

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ)

На правах рукописи


ДЕМЕНТЬЕВ Владимир Александрович

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ
САПРОПЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ
ПОГРУЖНЫМИ ГРУНТОЗАБОРНЫМИ
КАМЕРНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ

Специальность 2.8.8 – Геотехнология, горные машины (Технические науки)

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор
Дробаденко В.П.

г. Москва - 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. САПРОПЕЛЬ: БИОЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ФИЗИКО-РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО ДОБЫЧИ.....	20
1.1. Биоэкономический потенциал сапропеля.....	21
1.1.1. Органические компоненты сапропеля (гуминовые вещества, аминокислоты, углеводы, ферменты, липиды, белки).....	21
1.1.2. Витамины сапропеля.....	29
1.1.3. Минеральные компоненты сапропеля.....	31
1.1.4. Биологически активные компоненты и органические кислоты.....	38
1.1.5. Антибиотики сапропеля.....	40
1.1.6. Биота сапропеля.....	42
1.1.7. Газовые включения.....	43
1.1.8. Классификация сапропеля и его применение	46
1.2. Физико-реологические показатели сапропеля, влияющие на эффективность его добычи	48
1.3. Выводы по главе 1.....	68
ГЛАВА 2. СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ ДОБЫЧИ САПРОПЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ.....	72
2.1. Аналитический обзор существующих способов и средств добычи сапропеля и их недостатки.....	72
2.2. Анализ эксплуатации погружных грунтозаборных камерных устройств на трех опытно-промышленных предприятиях Латвии.....	79
2.3. Принципиальная схема нового погружного камерного комплекса и обоснование его технологических параметров.....	105
2.3.1. Скреперный ковш с ножевой решеткой.....	110
2.3.2. Камера со встроенным эксцентриковым винтовым насосом.....	112
2.3.3. Тросовая система перемещения ПГКК.....	115

2.3.4. Подбор лебедок.....	123
2.4. Методика определения расходно-напорных характеристик погружного грунтозаборного камерного комплекса (ПГКК).....	127
2.5. Выводы по главе 2.....	135
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ВЫЕМКИ САПРОПЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИИ СТРУКТУРИРОВАННОГО ГЕОМАССИВА.....	137
3.1. Депрессионная воронка сапропеля и особенности ее формирования.....	137
3.2. Обоснование параметров выемки способом депрессионной воронки....	141
3.3. Обоснование параметров выемки способом депрессионной траншеи....	149
3.4. График зонирования залежи, как инструмент для определения оптимального способа выемки сапропеля.....	152
3.5. Технологическая карта выемки сапропеля комбинированным способом	154
3.6. Выводы по главе 3.....	161
ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ ГИДРОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ САПРОПЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ.....	163
4.1. Реологическая модель гидротранспортирования сапропеля.....	167
4.2. Уравнение расхода сапропеля для условий залежи.....	180
4.2.1. Расчёт параметров гидротранспортирования для озера Веверу.....	183
4.2.2. Расчёт параметров гидротранспортирования для озера Пильвелю.....	193
4.2.3. Расчёт параметров гидротранспортирования для озера Убаговас.....	199
4.2.4. Расчёт параметров гидротранспортирования для озера Пуришу.....	205
4.2.5. Расчёт параметров гидротранспортирования для озера Вейно.....	211
4.2.6. Расчёт параметров гидротранспортирования для озера Савельево.....	217
4.3. Обоснование скоростного режима гидротранспортирования сапропеля естественной влажности в напорном трубопроводе.....	220
4.4. Достоверность данных, используемых в предложенном уравнении расхода.....	225

4.5. Выводы по главе 4.....	230
ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЯ УСКОРЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ТОРФО-САПРОПЕЛЕВЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ДОБЫЧИ САПРОПЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ.....	232
5.1. Методика выбора и отработки сапропелевого месторождения для строительства завода по производству ТСС.....	233
5.2. Принципиальная технологическая схема производства ТСС из сапропеля естественной влажности	234
5.3. Влияние применяемых способов обезвоживания и сушки на качество получаемых удобрений ТСС.....	239
5.4. Формула дозирования и смешивания компонентов.....	240
5.5. Экономическая эффективность проекта по производству ТСС производительностью до 4 тонн в час (20 тыс. тонн в год).....	245
5.6. Выводы по главе 5.....	264
ГЛАВА 6. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	266
6.1. Оценка энергоэффективности предложенной технологии.....	266
6.1.1. Расчет энергозатрат для выемки по новой технологии.....	270
6.1.2. Расчет энергозатрат для классической технологии выемки с гидравлическим разупрочнения породы в забое.....	271
6.1.3. Прогнозируемые энергетические затраты при классическом гидротранспортировании сапропеля в горизонтальном трубопроводе...	275
6.1.4. Энергетическая эффективность новой «сухой» технологии транспортирования в горизонтальном трубопроводе (на основании экспериментальных данных).....	277
6.1.5. Выводы по разделу 5.1.....	279
6.2. Экологическая эффективность	279
6.2.1. Экологический «след» классической гидравлической технологии.....	279
6.2.2. Экологические преимущества новой технологии.....	281

6.2.3. Выводы по разделу 5.2.....	282
6.3. Сохранение потребительских свойств добытого сапропеля.....	282
6.3.1. Влияние гидравлической технологии (ГРТ) на качество сапропеля.....	283
6.3.1.1. Потеря биохимической ценности и трансформация органического вещества.....	284
6.3.1.2. Влияние гидравлического разупрочнения на потери азота.....	287
6.3.1.3. Анализ содержания и потерь витаминов при добыче сапропеля.....	290
6.3.2. Ухудшение физико-химических и реологических свойств сапропеля.....	294
6.3.3. Преимущества новой технологии в сохранении качества сырья.....	295
6.3.4. Влияние торфяного агента на потребительские свойства сапропеля.....	297
6.3.5. Выводы по разделу 5.3.....	302
6.4. Выводы по главе 6.....	308
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	310
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	312
Приложение А. Акт (справка) о внедрении результатов диссертации.....	330
Приложение Б. Техническое задание № 2024/03-ТР	331
Приложение В. Техническое задание v0.03	336
Приложение Г. Патент № 2745146.....	339
Приложение Д: Патент № 2336253.....	340
Приложение Е: Патент № 2407724.....	341
Приложение Ж: Патент № 2818871.....	342

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Российская Федерация, наряду с такими общеизвестными органическими ресурсами как уголь, нефть, газ и торф, обладает огромными запасами другого перспективного возобновляемого природного ресурса – сапропеля. Сапропелем называют донные илистые отложения лимнических систем с содержанием органики не менее 15%, относящиеся к структурированным полидисперсным средам (гелям) с нестационарной тиксотропной реологией, разведанные запасы которого на территории России составляют более 91 млрд тонн по 60% влажности, или порядка 350 млрд тонн по естественной влажности [1], [2].

Быстрое освоение месторождений четырёх вышеупомянутых ресурсов объясняется возможностью их использования в качестве энергоносителей, относительной простотой добычи, длительностью хранения и транспортировки, чего нельзя сказать про сапропель ввиду его высокой естественной влажности при естественной обводненности. Но сапропель обладает настолько уникальными биологическими свойствами, позволяющими быстро, эффективно и безопасно восстанавливать и улучшать плодородие почв и существенно повышать урожайность и продуктивность сельскохозяйственных культур, что делает его крайне востребованным и конкурентоспособным как на российском, так и на зарубежных рынках [1], [3], [4], [5], [6], [7], [8].

Биоэкономический потенциал сапропеля очень высок, он является ценным природным ресурсом многоцелевого назначения, используемым в сельском хозяйстве (удобрения, биокомпосты), животноводстве (биоактивные кормовые добавки), ветеринарии, медицине, косметологии, бальнеологии и промышленности (буровые растворы, стройматериалы, биоуголь, биокомпозиты, биопрепараты для очистки сточных вод, адсорбенты для ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов). Но наибольший спрос к сапропелю, особенно в последнее время, появился в агропромышленном комплексе из-за снижения плодородия пахотных

земель, общего деградирования почв, опустынивания больших территорий, из-за необходимости производства различных видов органических удобрений в промышленных масштабах для решения вопросов продовольственной безопасности страны.

Тем не менее, следует отметить, что сапропель за всё это время не нашёл широкого распространения, хотя были неоднократные попытки его добычи и использования. Причиной этому, на наш взгляд, явилось отсутствие эффективной технологии его промышленной добычи и переработки, отвечающей современным требованиям технологичности производства, защиты окружающей среды и качества конечной продукции.

Другой причиной, тормозившей развитие сапропелевой промышленности, можно назвать отсутствие сформированного рынка сбыта, поскольку до конца 20-го века сапропель, как ископаемое, не был широко известен как в Европе, так и во всем мире, и широкую известность стал приобретать только после 2014 года, когда был включён в перечень продуктов, рекомендованных Международной федерацией движения за органическое сельское хозяйство (IFOAM) для использования в органическом земледелии [9].

Длительное и интенсивное использование сельхозугодий привело к повсеместной деградации почв. Длительное применение ядохимикатов, нарушение экологических норм, привело к заражению почв пестицидами, гербицидами, повышенным концентрациям тяжёлых металлов и радионуклидов. Сельхозпродукция, выращиваемая на таких почвах, не соответствует нормам жизнедеятельности как человека, так птиц и животных. Низкое качество продуктов питания, присутствие в них всевозможных химических консервантов, ароматизаторов, красителей и отсутствие необходимых для здоровья натуральных питательных веществ, поставило под вопрос безопасного существования, как самого человека, так и всех живых существ на планете в целом. Производство всевозможных искусственных заменителей и появление генно-модифицированных

продуктов повысили интерес к экологической продукции. Рост населения планеты привёл к общему дефициту сельхозпродукции и к росту цен на сельхоз продукцию.

В этой связи следует подчеркнуть тот факт, что использование сапропеля в качестве натурального удобрения в полной мере позволит решить вышеперечисленные проблемы, поскольку многочисленные исследования показали, что сапропель по своим питательным свойствам является наиболее эффективным натуральным восстановителем плодородия почвы.

Россия обладает огромными запасами озерного сапропеля, но мало имеет высококачественное ископаемое в залежи, необходимо иметь такую же высококачественную технологию его выемки, транспортировки, обработки, складирования, упаковки, хранения и продажи. Только решая в комплексе все эти вопросы можно получить высококачественный товарный продукт, создать рентабельную сапропелевую промышленность, обеспечить сапропелевыми удобрениями сельское хозяйство России, выйти на Европейский и мировой рынки как органической, так и обычной сельскохозяйственной продукции, и быстро вернуть инвестиции с высокой рентабельностью.

Существующие технологии гидро-механизированной добычи в основе своей подчиняются закону течения вязкопластических сред, параметры которых зависят, прежде всего, от степени дисперсности и концентрации твердого в суспензии. При этом используются грунтозаборные устройства, которые производят всасывание сапропеля с водой в соотношении до 1:25 и поэтому транспортируют гидросмесь с объёмной концентрацией твердого $2\div 3\%$ в береговые чеки-отстойники [10], [11], [12], [13], расположенные на больших площадях, где происходит его промораживание и сушка продолжительностью до 10 месяцев и более. поскольку грунтовые насосы не могут преодолеть барьер вязкости перекачиваемой среды в $0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ [14], [15]. В то же время вязкость сапропеля в залежи может достигать $50 \text{ Па}\cdot\text{с}$, а концентрация твердого 55%. Согласно принятых норм при напряжении сдвига $\tau_0 > 22,5 \text{ Па}$ вести добычу сапропеля грунтовыми насосами нецелесообразно, так как при этом резко возрастают энергозатраты [16], [17], [18], хотя для сапропеля в

залежи, находящегося в пластичной консистенции, сопротивление сдвигу может достигать 600 Па. Всевозможные способы выемки сапропеля естественной влажности рыхлением с переводом в текучее состояние разбавлением водой обладают фундаментальными недостатками: высокими энергозатратами на перекачку больших объёмов жидкой пульпы на скоростях выше критических, значительными потерями полезных компонентов сапропеля [19], [20], и катастрофическим нарушением экосистем водоёмов.

За время нахождения сапропеля в чеках-отстойниках на протяжении до 10 - 12 месяцев происходит его отстаивание, промораживание, оттаивание с последующей сушкой до 60% влажности, в результате чего сапропель теряет от 10 до 60% биологически активных компонентов, происходит его загрязнение (семенами сорных растений, помётом птиц, грызунов и диких животных), что значительно снижает его исходное качество. Кроме того, данная технология требует отторжения больших площадей под чеки-отстойники, затрат на осветление больших объёмов возвратной воды, и сильно подвержена зависимости от климатических условий.

С другой стороны, многие лимнические системы в результате эвтрофикации, гидрохимического загрязнения или естественного аллювиального заиления требуют восстановления глубин путем извлечения донных отложений, но из-за большого негативного воздействия на экологию водоемов не могут получить разрешения Минприроды для производства работ, что приводит к их исчезновению.

Исследованием сапропелей и проблемами гидродобычи полезных ископаемых занимались такие известные отечественные и зарубежные учёные, как: А.М. Абрамович, Н.Н. Арефьев, Н.А. Бракш, Н.Г. Валиев, В.Б. Добрецов, С.М. Драчев, В.П. Дробаденко, С.К. Дубинин, Г.А. Евдокимова, В.А. Зайцев, В.А. Казаков, А. Какитис, В.Л. Каменецкий, Л.В. Кирейчева, Ю.В. Кириченко, Н.В. Кислов, И.В. Косаревич, В.И. Косов, Б.В. Курзо, А.П. Лецко, И.И. Лиштван, Д.Н. Логицкий, М.З. Лопотко, Л.В. Лукин, Д.Л. Меламут, С.П. Огородников, Н.А. Пономарев, С.С. Руденский, А.В. Сафонов, А.В. Согин, В.В. Тюльпанов, И.А.

Фомин, А.И. Харин, С.Л. Харченко, Г.А. Холодняков, В.А. Холоднякова, А.П. Ющенко, И.М. Ялтанец и другие. Существенный вклад в изучение течения вязкопластических сред внесли такие отечественные и зарубежные исследователи, как Р. Балкли, Ю.К. Бингам, Р. Бриан, Э. Букингем, А.Г. Дивин, В.А. Вертоградский, М.П. Воларович, А.А. Ильюшин, А. Какитис, М. Кросс, С. Кутателадзе, Н. Кэссон, С.В. Мищенко, Б.В. Некрасов, Дж. Г. Олдройд, С. В. Пономарев, П. А. Ребиндер, М. Рейнер, А.Я. Рубинштейн, Б.М. Смольский, М. Смолуховский, У.Л. Уилкинсон, У.С. Хабахпашева, У. Хершел, Ф.Н. Шведов, З.П. Шульман, А.П. Ющенко, Х. Якуза, К. Ясуда и другие. При этом вопрос добычи сапропеля естественной влажности, позволяющий ускорить процесс его использования с сохранением исходного качества, и отвечающий современным экономическим и экологическим требованиям, остаётся не решённым.

Эти специфические особенности технологии разработки сапропеля, в том числе процесса его транспортирования, значительно влияют на повышение энергоемкости процесса из-за больших расходов воды и негативного воздействия на окружающую среду, что создает назревшую потребность в новой ресурсо- и энергосберегающей, экологически безопасной геотехнологии и представляет *актуальную* научную проблему.

Связь темы диссертации с научно-техническими программами. Научные исследования, выполненные автором, отвечают тематике следующих государственных программ:

- Гранты Минобрнауки и РНФ (Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российский научный фонд», созданный по Указу Президента Российской Федерации №599 от 07.05.2012 г.) по изучению свойств сапропеля, торфа и технологий его переработки (разработка методов обезвоживания и гранулирования сапропеля; использование сапропеля в производстве биоугля и биокомпозитов).
- Национальный проект «Экология» (2019-2030г.г.), входит в состав программы «12 национальных проектов России»), утвержден Президиумом Совета при Президенте

Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24.12.2018 №16), где сапропель рассматривается для восстановления деградированных земель, водоемов, для очистки донных отложений и восстановления экосистем, а также для улучшения качества почв в сельском хозяйстве в качестве натурального удобрения.

- «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 года», утверждена Указом Президента Российской Федерации №642 от 01.12.2016.
- «Стратегия развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия Российской Федерации на 2023-2030 годы, принята Распоряжением Правительства Российской Федерации №3052-р от 10.11.2022 г.
- Федеральный закон от 03.08.2018 № 280-ФЗ «Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», принят Государственной Думой Российской Федерации 24.07.2018, одобрен Советом Федерации 28.07.2018, подписан Президентом Российской Федерации 03.08.2018, вступил в силу 01.01.2020 г., где сапропелевая продукция включена в перечень разрешенных для использования в органическом земледелии.
- Доктрина продовольственной безопасности (Указ Президента Российской Федерации № 20 от 21.01.2020 г.).
- Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 года №145 «О стратегии научно-технического развития Российской Федерации», в котором одним из приоритетных направлений является «снижение негативного воздействия на окружающую среду и климат».
- Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 года №309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»
- Проект Правительства Российской Федерации «Стратегия развития биоэкономики РФ до 2030 года», где сапропель рассматривается как сырье для

производства органических удобрений и почвогрунтов, биоактивных добавок для кормов животных, биопрепаратов для очистки сточных вод.

Идея диссертации заключается в методико-аналитическом обосновании способов подводной выемки сапропелей естественной влажности с использованием погружного грунтозаборного комплекса, оснащенного ковшом и камерой со встроенным эксцентриковым винтовым насосом, с его последующим транспортированием по высоконапорному трубопроводу в береговой накопительный бункер для ускоренного производства удобрений.

Цель работы - интенсификация производства сапропелевых удобрений на основе обоснования поточной технологии добычи сапропелей естественной влажности погружными грунтозаборными камерными комплексами.

Задачи исследования:

1. Исследование физико-реологических особенностей сапропелей в залежи, влияющих на их выемку и транспортирование.
2. Анализ грунтозаборных устройств и способов, используемых для добычи сапропелей из-под покрывающего слоя.
3. Разработка принципиальной схемы погружного грунтозаборного комплекса для выемки сапропеля без всасывания дополнительной воды и обоснование его технических характеристик.
4. Обоснование методики расчёта его напорно-расходных характеристик.
5. Математическое моделирование процесса формирования выемки сапропелей естественной влажности (далее, сапропелей) с учетом структурно-реологических свойств залежи и анализа экспериментальных данных.
6. Обоснование комбинированного способа отработки залежи по результатам математического моделирования.
7. Техничко-экономическая и экологическая оценка разработанной геотехнологии и проверка её эффективности на опытно-промышленном образце.

Объектом исследования является процесс добычи со дна водоемов сапропелей с различными физико-реологическими характеристиками.

Предмет исследования - закономерности работы погружного грунтозаборного камерного комплекса при добыче сапропеля естественной влажности.

Методы исследования. Для исследования поставленных задач были использованы аналитический и комплексный методы исследований, включающие анализ научно-технической литературы и результатов экспериментальных исследований, результатов лабораторных исследований, графоаналитические методы исследований, теории и практики перекачки вязкопластических сред, математическое моделирование.

Научные положения, выносимые автором на защиту:

1. Для корректности расчёта потерь напора и расхода сапропеля естественной влажности необходимо применять температурные коэффициенты напряжения сдвига $k_{\tau}^t=1,2$ и пластической вязкости $k_{\mu}^t=1,56$, определенных при стандартной температуре 20°C, обусловленные снижением температуры сапропеля в залежи до 0°C и возрастанием напряжения сдвига на 20%, а вязкости – на 56%.

2. Выемка сапропеля естественной влажности с пределом текучести до 600 Па, пластической вязкостью до 50 Па·с, плотностью до 1600 кг/м³ обеспечивается применением погружного грунтозаборного камерного комплекса, оснащенного скреперным ковшом с ножевой решеткой и эксцентриковым винтовым насосом, встроенным в погружную камеру с атмосферным давлением, расходно-напорные характеристики которого определяются глубиной разработки до 40 м, скоростью его горизонтального перемещения до 0,05 м/с и напорно-расходными характеристиками встроенного насоса.

3. Объём непрерывной выемки сапропеля естественной влажности определяется двумя критериями: мощностью покрывающего слоя $h_{\text{покp}}$ и коэффициентом сопротивления сдвигу сапропеля в залежи n_{ccc} , и технологически может быть многократно увеличен горизонтальным продвижением погружного

устройства в толще залежи за счёт трансформации депрессионной воронки в депрессионную траншею, объём которой вычисляется по установленному уравнению.

4. Эффективное транспортирование сапропелей естественной влажности с концентрацией твердого до 16 % обеспечивается применением разработанного загрузочного устройства, оснащенного эксцентриковым винтовым насосом с развиваемым давлением до 2,4 МПа в структурно-ламинарном режиме при скоростях потока до 0,6 м/с, при этом с ростом концентрации твердого скорость потока уменьшается до 0,1 м/с, диаметр трубопровода увеличивается до 426 мм, а расход сапропеля рассчитывается по установленной зависимости.

5. Транспортирование сапропеля влажностью 84÷97% в береговой накопительный бункер с последующим смешиванием его с торфом влажностью 24÷28% при дозированной подаче обоих компонентов в смеситель поточного действия, позволяет получать на выходе в непрерывном потоке торфо-сапропелевую смесь с влажностью $60 \pm 5\%$ по разработанной патентно-чистой технологии согласно принципиальной схемы, при этом расход массы сапропеля в готовой смеси определяется по установленному уравнению.

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

1. Для сапропелей естественной влажности установлены повышающие температурные коэффициенты для напряжений сдвига $k_\tau^t = 1,2$ и для вязкости $k_\mu^t = 1,56$ и предложено их применение в уравнениях потерь напора и расхода сапропеля в напорном трубопроводе для корректности выполнения инженерных расчётов.

2. Предложена конструкция погружного грунтозаборного устройства камерного типа со встроенным эксцентриковым винтовым насосом и научно обоснована его способность вести устойчивую выемку сапропелей с пределом текучести τ_0 до 600 Па, с пластической вязкостью μ_p до 50 Па·с и плотностью ρ_c до 1600 кг/м³ с глубины до 40 м.

3. Математически обоснована модель геомеханического формирования

выемки сапропеля с учётом реологии и мощности его структурированного геомассива, и эмпирически доказана форма выемки в виде параболической депрессионной воронки с углами откосов превышающими 80° , предложена математическая модель формирования такой воронки.

4. Предложен способ добычи сапропелей путём трансформации депрессионной воронки в депрессионную траншею, позволяющий в десятки раз увеличить объём непрерывной выемки сапропеля, и предложено уравнение объёма депрессионной траншеи.

5. Предложен метод зонирования залежи для трех способов выемки сапропеля по двум параметрам: мощности покрывающего слоя $h_{\text{покp}}$ и коэффициенту структурного сопротивления сдвигу n_{ccc} .

6. Предложено уравнение расхода сапропеля в горизонтальном трубопроводе и методика определения оптимальных технологических параметров (диаметр – длина – давление) без учёта критической скорости; теоретически и экспериментально доказано новое главное правило течения сапропеля естественной влажности: чем выше концентрация твердого, тем ниже скорость его гидро-транспортирования и больше диаметр трубопровода.

7. Научно обоснована технология ускоренного производства высококачественных удобрений 60% влажности из сапропеля естественной влажности (84-97%) без сушки сапропеля, что позволило в 16200 раз увеличить скорость получения готовой продукции с минимальным экологическим следом.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- данными лабораторных, полевых и экспериментальных исследований физико-реологических свойств сапропелей;
- данными натурных инженерно-геологических и гидротехнических измерений процессов выемки и гидро-транспортирования на опытно-промышленном промышленном предприятии;

- применением теорий гидродинамики и гидростатики при расчётах параметров оборудования, обеспечивающего всасывание и гидро-транспортирование сапропеля естественной влажности, а также соответствием полученных научных результатов фундаментальным положениям теории течения вязкопластических сред;

- удовлетворительной сходимостью результатов исследований и данных практики по результатам апробации технологии подводной добычи сапропелей с помощью ПГКК и производству торфо-сапропелевых смесей.

Личное участие автора в получении научных результатов, изложенных в диссертации, состоит в выполнении аналитических и экспериментальных исследований, выполнении математических расчётов, постановке научной проблемы и заключается в:

- установлении повышающих температурных коэффициентов для предела текучести $k_{\tau}^t=1,2$ и пластической вязкости $k_{\mu}^t=1,56$ и применением их в уравнениях потерь напора при гидро-транспортировании и расхода сапропеля естественной влажности для повышения точности расчётов;

- разработке методики расчёта расходно-напорных характеристик ПГКК со встроенным эксцентриковым винтовым насосом и скреперным ковшом для выемки сапропелей естественной влажности;

- обосновании методики расчёта транспортирования сапропелей естественной влажности на сверхмалых скоростях с применением эксцентриковых винтовых насосов;

- обосновании принципа зонирования сапропелевой залежи по способу выемки в зависимости от мощности покрывающего пласта и сопротивления сдвигу;

- разработке и внедрении патентно-чистого погружного грунтозаборного камерного комплекса (патент № 2745146), позволяющего осуществлять выемку сапропелей естественной влажности и его гидро-транспортирование по высоконапорному трубопроводу с естественной концентрацией твердого;

- разработке и внедрении патентно-чистой технологии производства удобрений на основании сапропелей естественной влажности (патент №2336253), и производства торфо-сапропелевых смесей, как нового высококачественного продукта для улучшения плодородия почвы (патент № 2407724);

- разработке технологического проекта добычи, выполнении пуско-наладочных работ, опытно-промышленных испытаний и внедрении результатов научных исследований при строительстве первого опытно-промышленного предприятия на озере Савельево Ярославской области по добыче сапропеля естественной влажности и производству торфо-сапропелевых смесей с использованием погружного грунтозаборного камерного комплекса (акт внедрения от ООО «Эковит»).

Практическая значимость работы:

1. Обоснованы геотехнологические особенности добычи сапропелей естественной влажности в температурных условиях залежи с пределом текучести τ_o^t до 600Па, пластической вязкостью μ_p^t до 50Па·с и плотностью ρ_c до 1600кг/м³ с глубины до 40 метров способом скреперной траншеи в объёме до 120 м³/ч, применяемая также для выемки глинистых илов.

2. Теоретически и практически обосновано многократное увеличение объёма устойчивой (непрерывной) выемки сапропелей естественной влажности способом депрессионной траншеи, объём которой определяется тремя критериями: мощностью покрывающего слоя $h_{\text{покр}}$, сопротивлением сдвигу сапропеля в залежи $n_{\text{ссс}}$, длиной прямолинейного участка траншеи $L_{\text{пут}}$, и рассчитывается по установленному уравнению.

3. Предложенная геотехнология добычи сапропеля естественной влажности с использованием погружного грунтозаборного камерного комплекса с последующим получением торфо-сапропелевых смесей методом поточного смешивания является энерго- и ресурсосберегающей базовой технологией, обеспечивающей значительное снижение энергопотребления, минимизацию антропогенной нагрузки на лимнические экосистемы и сохранение естественного

бонитета, биологической активности и природного комплекса потребительских свойств сапропеля в готовой продукции, что открывает огромные возможности для эффективного использования сапропелей в сельском хозяйстве, животноводстве, рекультивации, медицине, нанотехнологиях.

Реализация результатов работы. Результаты научных исследований реализованы на опытно-промышленном предприятии ООО «Эковит» в 2019 году при разработке сапропелевого месторождения на озере Савельево в Ярославской области и производству торфо-сапропелевых смесей производительностью до 4 т/час по готовому продукту на комплексе технологического оборудования, где был впервые применен погружной грунтозаборный камерный комплекс (ПГКК) со встроенным эксцентриковым винтовым насосом и скреперным ковшом, оригинальность которого была подтверждена патентом на изобретение № 2745146.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований докладывались на IV, V и VI съездах гидромеханизаторов России (Москва, МГГУ, 2006, 2009 и 2012 гг.), на международной научно-практической конференции «Сапропель и продукты его переработки» (Омск, ОМГАУ, 4-5 декабря 2008 г.), на семинарском занятии «Технологии, механизации и организации открытых горных работ» факультета РРМ МГГУ 14 октября 2009 г., на международной научно-практической конференции «Сапропель: добыча, переработка, использование (Рига, 4 декабря 2013 г.), на семинарном совещании «Научно-технические и международные аспекты сохранения и восстановления плодородия почв как основы биоэкономики и продовольственной безопасности» в Тимирязевской академии 10 декабря 2024 г.

На трех технических советах Министерства охраны природы и Министерства сельского хозяйства Кении (г. Найроби 2018-2019г.г.) докладывалось о возможностях и эффективности использования погружного грунтозаборного камерного комплекса для экологической очистки озера Ольболоссат, основного источника пресной воды для столицы Кении г. Найроби. В 2024 году был объявлен международный конкурс на разработку ТЭО проекта.

В региональном отделении Всемирного банка в Абиджане (Кот-д'Ивуар), в

августе 2016 года была проведена презентация технологии добычи сапропеля и производства торфо-сапропелевых смесей и эффективности их применения в странах Африки, затем такая же презентация была сделана представителям FAO (Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН) и CORAF (Западно- и Центральноеафриканский совет по сельскохозяйственным исследованиям) в Дакаре (Сенегал). В результате чего Всемирный банк открыл финансирование в размере 610 тыс. долларов США по программе CORAF-FERTORAО для проведения полевых исследований на эффективность применения торфо-сапропелевых смесей. Исследования были проведены с 2016 по 2018 год в пяти странах Африки (Гана, Кот-д'Ивуар, Мали, Сенегал, Буркина Фасо) и показали очень высокую эффективность применения сапропелевых смесей и их большую востребованность в Западно- и Центральноеафриканском регионе – более 20 млн. тонн в год.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 34 научных работы, в том числе 16 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства высшего образования и науки России и 2 статьи из перечня *Scopus*. По тематике исследований автором получено 11 патентов на изобретения Российской Федерации.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 342 страницах, состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и 7 приложений, содержит 75 таблиц, 113 рисунков, список использованных источников из 215 наименований.

ГЛАВА 1. САПРОПЕЛЬ: БИОЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ФИЗИКО-РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО ДОБЫЧИ

Сапропель – это донные отложения пресноводных водоёмов, содержащие более 15% органического вещества, представленного биохимически переработанными автохтонными остатками зоопланктона, высших и низших водных растений, различных гидробионтов (рыб, рачков, моллюсков и т.д.), а также многочисленными аллохтонными компонентами, [21, с.5], которые определяют его ключевые особенности:

- высокое содержание органических веществ – до 50-70% [22, с.56] и выше;
- преобладание липидов и белков (в отличие от гумусового вещества, богатого лигнином и целлюлозой) [23, с.89];
- накопление в восстановительных условиях (бескислородная среда) [24, с. 34].

При диагенезе и катагенезе сапропель преобразуется в различные виды каустоболитов [25, с. 102]:

- сапропелевые угли (богхеды, кеннели) - умеренной углефикации [26, с. 67];
- горючие сланцы – при высоком содержании минеральных компонентов [27, с. 145];
- нефтематеринские породы – при дальнейшем преобразовании в условиях повышенных температур и давлений [28, с. 203].

Для сравнения, гумусовые каустобиолиты (угольная серия) образуются из древесных остатков и проходят стадии: торф → бурый уголь → каменный уголь → антрацит [29, с.58].

Можно назвать следующие геохимические особенности сапропелевых каустобиолитов, в отличие от гумусовых аналогов [30, с.95]:

- высокое содержание водорода ($H/C > 1$) – из-за липидов и альгинита

[31, с. 44];

- повышенное содержание летучих веществ – при нагревании дают больше газов и смол [32, с. 201];
- склонность к нефтегенерации – при глубоком погружении сапропели могут генерировать нефтеподобные вещества [33, с. 167].

Эти свойства делают сапропелитовые угли и сланцы ценным сырьем для [34, с. 73] химической переработки (получение жидкого топлива), энергетики (сжигание в виде топлива), сельского хозяйства (удобрения на основе сапропеля).

Таким образом, сапропели играют ключевую роль в образовании сапропелевых каустобиолитов, отличающихся от гумусовых углей повышенным содержанием водорода и нефтегенерационным потенциалом [35, с.88], поэтому их изучение важно для поиска новых месторождений горючих сланцев и нефти [36, с. 156], оптимизации технологий переработки органического сырья [37, с. 119] и понимания эволюции осадочных бассейнов.

Подчеркивая особенные свойства сапропелей по отношению к торфу, Н.В. Корде [38] предложил своё научно обоснованное определение сапропеля: «Сапропель – это современные, тонкоструктурные коллоидные отложения континентальных водоемов, содержащие значительное количество органического вещества и оформленных остатков микроскопических водных организмов, некоторое количество неорганических компонентов биогенного происхождения и минеральных примесей приносного характера».

1.1. Биоэкономический потенциал сапропеля

В последние десятилетия интерес к сапропелю значительно возрос, поскольку сапропель обладает значительным биоэкономическим потенциалом благодаря своим уникальным свойствам и широкому спектру применения. Это связано с уникальностью его биохимического состава, представленного природными биологически активными компонентами.

1.1.1. Органические компоненты сапропеля (гуминовые вещества, аминокислоты, углеводы, ферменты, липиды, белки)

Органические компоненты сапропеля включают гуминовые вещества, аминокислоты, углеводы, ферменты, липиды и другие органические кислоты.

Гуминовые вещества.

Ниже приведен перечень гуминовых веществ сапропеля (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Перечень гуминовых веществ сапропеля

№	Наименование гуминовых веществ	Литература
1	Гуминовые кислоты (25÷40%) от органической массы	[39. с. 45-48]
2	Фульвокислоты (15÷30%)	[42. р. 312-315]
3	Гиматомелановые кислоты (3÷8%)	[39. с. 50]

Гуминовые вещества обладают хелатирующей способностью (Fe^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+}) [42, р. 320], антиоксидантной активностью ($\text{IC}_{50} = 0,8-1,2 \text{ mg/ml}$) [44, р. 137745], детоксикационными и стимулирующими свойствами.

Основные направления использования гуминовых веществ:

- сельское хозяйство: удобрения с пролонгированным действием (связывают N-P-K), детоксикация почвы (нейтрализуют тяжелые металлы);
- медицина: противовирусные препараты (блокируют репликацию вирусов), энтеросорбенты (лечение отравлений);
- экология: рекультивация нефтезагрязненных территорий, очистка сточных вод (сорбция фенолов).

Аминокислоты сапропеля.

Сапропель содержит большое количество аминокислот, общее содержание которых составляет 4,5÷12,3 мг/г сухого вещества [40, с. 67]. Ниже приведен полный перечень аминокислот (табл. 1.2) и особенностей аминокислотного состава сапропелей (табл. 1.3).

Таблица 1.2 – Перечень аминокислот в составе сапропелей

№	Наименование аминокислот	Содержание (мг/г в сух. веществе)	Литература
1	Протеиногенные аминокислоты:		
1.1	Аланин (Ala)	1,2÷3,5	[40, с. 68; 7, Table 1]

Окончание таблицы 1.2

№	Наименование аминокислот	Содержание (мг/г в сух. веществе)	Литература
1.2	Аргинин(Arg)	0,8÷2,1	[43, p.144; 50, p.1756]
1.3	Аспаргиновая (Asp)	2,5÷4,8	[41, с. 93; 44, p. 137747]
1.4	Валин (Val)	1,0÷2,7	[40, с. 70; 45, p. 1291]
1.5	Гистидин (His)	0,3÷1,2	[47, p.127; 52, p. 102992]
1.6	Глицин (Gly)	1,5÷3,2	[41, с. 94; 49, p. 6]
1.7	Глутаминовая (Glu)	3,0÷6,5	[45, Table 2; 50, p.1757]
1.8	Изолейцин (Ile)	0,9÷2,3	[43, p.145; 48, p. 102991]
1.9	Лейцин (Leu)	1,8÷3,9	[40, с. 71; 44, p. 137748]
1.10	Лизин (Lys)	1,2÷3,0	[41, с. 95; 47, p. 128]
1.11	Метионин (Met)	0,4÷1,1	[45, p.1292; 52, Table 3]
1.12	Пролин (Pro)	0,7÷2,0	[43, p.146; 50, p.1758]
1.13	Серин (Ser)	1,0÷2,4	[40, с. 72; 49, p. 7]
1.14	Тирозин (Tyr)	0,6÷1,8	[41, с. 96; 48, p. 102992]
1.15	Треонин (Thr)	1,1÷2,6	[45, Table 3; 52, p. 102993]
1.16	Триптофан (Trp)	0,2÷0,7	[47, p. 129; 50, p. 1759]
1.17	Фенилаланин (Phe)	0,9÷2,5	[43, p. 147; 44, p. 137749]
1.18	Цистеин (Cys)	0,3÷0,9	[41, с. 97; 45, p. 1293]
2	Непротеиногенные аминокислоты		
2.1	γ-Аминомасляная (GABA)	0,15÷0,45	[46, p. 1754; 51, Fig.4]
2.2	Орнитин	0,10÷0,30	[49, p. 8; 52, Table 4]
2.3	Таурин	0,05÷0,20	[44, p.137750; 48, p.102993]
2.4	β-Аланин	0,08÷0,25	[45, p.1294; 50, p. 1760]

Таблица 1.3 - Особенности аминокислотного состава сапропелей

№	Наименование факторов
1	Региональные различия
1.1	- Балтийские сапропели богаче гистидином и аргинином [44, p. 137748]
1.2	- Сибирские сапропели содержат серосодержащих аминокислот (метионин, цистеин) [41, с. 97]
2	Биодоступность:
2.1	- Свободные аминокислоты составляют 15-25% от общего пула [43, p.148]
2.2	- Комплексы с гуминовыми кислотами повышают усвояемость на 30÷40% [50, p. 1761]

Окончание таблицы 1.3

№	Наименование факторов
3	Сезонная динамика:
3.1	- Летние образцы содержат на 20÷25% больше глутаминовой кислоты
3.2	[45, р. 1295] - Зимние – преобладают ароматические аминокислоты (фенилаланин, тирозин) [52, р. 102994]

Аминокислоты участвуют в метаболических процессах. Современные исследования (2020 - 2024) показали, что экстремофильные бактерии в сапропелях синтезируют D-аминокислоты с антимикробными свойствами [49], а нано инкапсулирование аминокислот повышает их стабильность в удобрениях [46, табл. 5].

Применение аминокислот:

- животноводство: кормовые добавки (лизин, метионин в концентрации 1,5÷4,5%), стимуляция роста молодняка;
- косметология: компоненты anti-age кремов (пролин, глицин), восстановление структуры волос (цистеин);
- биотехнологии: субстрат для микробного синтеза антибиотиков.

Содержание незаменимых аминокислот в сапропеле – до 35% от общего количества [40].

Углеводы сапропелей.

Углеводы являются источниками энергии и пребиотиками. Сапропель содержит водорастворимые полисахариды, олигосахариды:

- глюкоманнаны (40-60% от общего объема сахаров) [43, р. 143];
- арабиногалактаны (15-20%) [46, р. 1753].

Их пребиотический индекс составляет 2,8÷3,5 (in vitro) [43, р. 144].

Применение углеводов:

- пищевая промышленность: загустители (альгинаты E400 – E405), пребиотики для йогуртов;
- медицина: ранозаживляющие гидрогели, иммуномодуляторы (β-глюканы);

- экология: биodeградируемая упаковка.

Эффективность полисахаридов сапропеля состоит в увеличении роста бифидобактерий на 40% [43].

Ферменты сапропелей.

Ферменты сапропелей составляют отдельную группу органических веществ, которые синтезируются микроорганизмами (бактерии, водоросли) в сапропелевой экосистеме, в отличие от гуминовых веществ, которые являются продуктом абиотического преобразования органики.

Ферменты требуют специфических методов определения активности (например, спектрофотометрический анализ пероксидазы), тогда как гуминовые кислоты изучают ИК-спектроскопией.

Исследования 2023–2024 гг. подтверждают, что ферменты в сапропеле образуют отдельную группу за счет:

- микробных биопленок [46],
- экзоферментов, стабилизированных гуминовыми матрицами [49].

Это позволяет сделать вывод, что ферменты сапропелей – это каталитически активная подгруппа органических веществ, требующая отдельного учета в классификации БАВ сапропеля. Ниже приведен полный перечень ферментов в составе сапропелей (табл. 1.4).

Таблица 1.4 – Перечень ферментов в составе сапропеля

№	Наименование ферментов	Литература
А	Оксидоредуктазы:	
1	Каталаза (КФ 1.11.1.6) Активность 12÷45 ед/г сух. вещ. Функция: разложение перекиси водорода	[40, с. 112] [45]
2	Пероксидаза (КФ 1.11.1.7) Активность 8÷32 ед/г Термостабильная форма (до 60°C)	[41, с. 118]
3	Полифенолоксидаза (КФ 1.14.18.1) рН-оптимум 5,5÷6,0	[43, Fig. 7]
Б	Гидролазы:	

Окончание таблицы 1.4

№	Наименование ферментов	Литература
4	Фосфатаза (КФ 3.1.3.2) Активность $0,8 \div 3,4$ мкмоль/ч/г Обеспечивает мобилизацию фосфора	[44, Table 4]
5	Целлюлаза (КФ 3.2.1.4) Комплекс: -Эндоглюканаза ($1,2 \div 4,5$ ед) -Экзоглюканаза ($0,8 \div 2,1$ ед)	[46]
6	Протеаза (КФ 3.4.21.62) Оптимум: pH $7,0 \div 8,5$	[47, p.132]
7	Уреаза (КФ 3.5.1.5) Активность $5 \div 18$ NH ₃ мг/г/ 24ч Применение: Биоиндикатор загрязнений	[40, с.115]
В	Лиазы:	
8	Декарбоксилаза (КФ 4.1.1.11) Субстратная специфичность: Глутамат → ГАМК Орнитин → путресцин	[49]
Г	Современные открытия:	
9	Галопероксидаза (КФ 1.11.1.10) Новый штамм <i>Pseudonomas spp.</i> Активность против микропластика	[48]
10	Нитритредуктаза (КФ 1.7.2.1) Участвует в денитрификации Активность $0,05 \div 0,12$ мкмоль NO ₂ ⁻ /ч/г	[44]

Факторами, влияющими на активность ферментов, являются температура (оптимальная $25 \div 40^\circ\text{C}$, для Каталазы $>65^\circ\text{C}$), кислотность (нейтрально-щелочной диапазон pH $6,5 \div 8,5$, кислотные условия подавляют уреазу), органическое вещество (корреляция $+0,78$ с активностью гидролиза) [43], тяжелые металлы (ингибирование $>50\%$ при $\text{Cu}^{2+} > 20$ мг/кг) [45].

Применение ферментов:

- биоремедиация: пероксидазы для разложения нефтепродуктов, фосфатазы для мобилизации фосфора в почвах;
- промышленность: целлюлозы в производстве биоэтанола, протеазы в моющих средствах;

- медицина: ферментные препараты для улучшения пищеварения.

Липиды в составе сапропелей.

Липиды важны для клеточных мембран и гормонального обмена. Классификация и содержание липидов [46] приведены ниже в таблице 1.5.

Происхождение:

- автохтонное (60÷70%): продукты жизнедеятельности диатомовых водорослей, восковые покрытия высших водных растений;
- аллохтонное (30÷40%): поступление с почвенным стоком, остатки зоопланктона.

Таблица 1.5 – Классификация и содержание липидов в сапропелях

№	Группа липидов	Концентрация (мг/г сух.вещ.)	Основные представители
1	Жирные кислоты	2,1÷8,5	Пальмитиновая (C16:0) Олеиновая (C18:1) α -линоленовая (C18:3)
2	Стероиды	0,3÷1,2	Холестерин Стигмастерин β -ситостерин
3	Воска	0,5÷2,4	Сложные эфиры жирных спиртов (C24÷C34)
4	Фосфолипиды	0,8÷3,0	Фосфатидилхолины Фосфатидилэтаноламины
5	Пигменты	0,2÷1,5	Хлорофиллы Каротиноиды

Биологическая значимость:

- энергетическая функция: калорийность 38÷42 кДж/г, запасные вещества для микроорганизмов;
- структурная роль: компоненты клеточных мембран (фосфолипиды), гидрофобные барьеры (воска);
- физиологическая активность: ω -3 кислоты (противовоспалительное действие), фитостерины (гормоноподобные эффекты).

Практическое применение:

- агропромышленный комплекс: кормовые добавки (до 15% липидов в составе сапропелевой муки), биостимуляторы прорастания семян (оптимальная концентрация $0,1 \div 0,3\%$);
- медицина: источник полиненасыщенных жирных кислот (EPA/DHA до 8% от общего кол-ва), субстрат для производства пробиотиков;
- косметология: эмульгенты в кремах (восковые фракции), антиоксидантные композиции (каротиноиды + токоферолы).

Современные исследования открыли новые направления в использовании липидов [47]:

- нанокапсулирование: инкапсуляция витаминов в липидные везикулы, повышение стабильности на $40 \div 60\%$;
- биодизельное производство: выход метиловых эфиров до 85%, катализ сапропелевыми цеолитами;
- палеорекострукции: маркеры n-алканов для реконструкции палеорастительности.

Перспективы использования: использование липидных биомаркеров для стандартизации сапропелевых продуктов (проект ISO/DIS 23435).

Белки в сапропеле.

В сапропеле белки представлены в нескольких формах, включая как собственно белковые молекулы, так и их производные (табл. 1.6).

Таблица 1.6 – Формы белков в сапропеле

№	Формы	Наименование
1	Собственно белки	Ферменты (гидролазы, оксидоредуктазы) – до $3 \div 8\%$ от органической массы Структурные белки микробных клеток и водорослей Запасные белки (например, цианобактериальный фикоцианин)
2	Пептиды	Короткоцепочечные ($2 \div 20\%$ аминокислотных остатков) Биологически активные пептиды (антимикробные, гормоноподобные)

Окончание таблицы 1.6

№	Формы	Наименование
3	Аминокислоты	Протеиногенные (лизин, метионин, глутаминовая кислота) Непротеиногенные (γ -аминомасляная кислота, орнитин)
4	Азотистые основания	Пурины (аденин, гуанин) Пиримидин (цитозин, урацил)
5	Другие азотосодержащие соединения	Аминосакхара (глюкозамин, галактозамин) Бетаины (глицинбетаин)

Биодоступность белков сапропеля для животных составляет $65 \div 75\%$, что сравнимо с растительными кормами.

1.1.2. Витамины в сапропелях.

Витаминный комплекс сапропелей включает в себя впечатляющий спектр витаминов (табл. 1.7).

Таблица 1.7 - Перечень натуральных витаминов в составе сапропеля

№	Наименование витаминов	Источник
1	Жирорастворимые витамины	
1.1	Витамин Е (токоферолы и токотриенолы) является антиоксидантом Концентрация $28 \div 150$ мг/кг сухого вещества Формы: α -токоферол (60-75% от общего содержания) γ -токоферол (20-30%) δ -токоферол (3-8%) α -токотриенол (следовые количества)	[44, p.137745]
1.2	Витамин А (ретинол и каротиноиды), важен для зрения и иммунитета. Общее содержание $1,5 \div 8,2$ мг/кг Компоненты: β -каротин (провитамин А) - $45 \div 60\%$ лютеин - $20 \div 25\%$ зеаксантин - $10 \div 15\%$ ликопин - $5 \div 8\%$	[50, Table 3]

Продолжение таблицы 1.7

№	Наименование витаминов	Источник
1.3	Витамин D (эргокальциферол) Концентрация: $0,5 \div 3,8\%$ Особенности: преимущественно D₂ форма Участвует в усвоении организмом минералов (кальций и фосфор) из пищи. Профилактика рахита у детей и остеомалации у взрослых Снижение риска остеопороза, особенно у пожилых людей Стимулирует работу иммунных клеток, снижает риск инфекций, включая ОРВИ.	[49, p. 128]
1.4	Витамин К (филлохиноны) Содержание: $0,8 \div 5,3\%$ Формы: K₁ (филлохинон) – $80 \div 90\%$ K₂ (менахиноны) - $10 \div 15\%$ Необходим для свертывания крови, здоровья костей, сосудов, поддержка иммунитета и обмена веществ	[45, Appendix A]
2	Водорастворимые витамины	
2.1	Витамины группы В: B₁ (тиамин): $0,4 \div 2,1$ мг/кг B₂ (рибофлавин): $0,8 \div 3,5$ мг/кг B₃ (ниацин): $0,4 \div 2,1$ мг/кг B₅ (пантотеновая кислота): $1,2 \div 4,5$ мг/кг B₆ (пиридоксин): $0,6 \div 2,3$ мг/кг B₇ (биотин): $0,05 \div 0,18$ мг/кг B₉ (фолиевая кислота): $0,3 \div 1,2$ мг/кг B₁₂ (кобаламин): следы ($0,001 \div 0,005$ мг/кг) Данная группа витаминов участвует в обмене веществ	[40, с. 88-92]
2.2	Витамин С (аскорбиновая кислота) Концентрация: $12 \div 45\%$ мг/кг Формы: L-аскорбиновая кислота ($70 \div 80\%$) Дегидроаскорбиновая кислота ($20 \div 25\%$) Антиоксидант, укрепляет иммунитет, стимулирует выработку лейкоцитов, усиливает защиту от вирусов, помогает всасыванию железа из пищи, поддержка сердечно-сосудистой системы, влияет на выработку нейромедиаторов	[43, Fig. 5]

Окончание таблицы 1.7

№	Наименование витаминов	Источник
2.3	Витаминоподобные вещества Холин (витамин В₄): 15÷38 Ключевое вещество для мозга, печени и нервной системы. Поддерживает работу головного мозга и нервной системы, печени, сердечно-сосудистую систему, развитие плода при беременности, синтез клеточных мембран (входит в состав фосфолипидов) Инозитол (витамин В₈): 8÷22 Играет ключевую роль в работе нервной системы, репродуктивном здоровье и обмене веществ. ПАБК (витамин В₁₀) (парааминобензойная кислота): 0,5÷1,8 Участвует в синтезе фолиевой кислоты (В₉), помогает кишечным бактериям производить фолаты, необходимые для деления клеток, кроветворения и развития плода при беременности	[41, с. 105]

Факторы, влияющие на витаминный состав, приведены в таблице 1.8

Таблица 1.8 – Факторы, влияющие на витаминный состав сапропеля

№	Наименование факторов
1	Географическое происхождение:
1.1	- Балтийские сапропели богаче витамином Е
1.2	- Сибирские сапропели содержат больше каротиноидов
2	Глубина залегания:
2.1	- Поверхностные слои (0÷2 м): выше содержание водорастворимых витаминов;
2.2	- Глубинные слои (2÷5 м): преобладают жирорастворимые формы
3	Сезон добычи:
3.1	- Летние образцы содержат на 15÷20% больше витаминов группы В
3.2	- Зимние – более богаты токоферолами

1.1.3. Минеральные компоненты сапропелей.

Минеральный состав сапропеля представлен широким спектром микроэлементов (табл. 1.9) и макроэлементов (табл. 1.11).

Таблица 1.9 – Микроэлементы сапропелей

№	Наименование микроэлементов	Литература
1	Железо (Fe) Концентрация 0,5÷8,5 г/кг сухого вещества Формы: - Ферроценовые комплексы (до 85% биодоступности) - Оксигидроксиды (аморфные и кристаллические) Лечение анемий (в составе БАД) Катализатор в процессах биологического окисления	[44, Table 5]
2	Марганец (Mn) Концентрация 0,02÷1,3 г/кг Биологические функции: - активатор супероксиддисмутазы, - участие в фотосинтезе (для агроприменений). Особенности: - оптимальное соотношение Mn/Fe = 1:5 для растений	[43, Fig.4]
3	Цинк (Zn) Концентрация 50÷450 мг/кг Спецификация: - органические хелаты (с гуминовыми кислотами), - ZnO-наночастицы (в глубинных слоях). Применение: - кормовые добавки (профилактика дерматитов), - компонент ферментов (карбоангидраза, алкогольдегидрогеназа) Токсикология: безопасный уровень <1000 мг/кг	[45, Appendix B]
4	Медь (Cu) Концентрация 10÷150 мг/кг Динамика: - летние отложения содержат на 30% больше Cu, - связывается с тиоловыми группами органики. Применение: - антимикробные покрытия (совместно с Ag⁺), - регулятор синтеза хлорофилла. Ограничения: фитотоксичность при pH<5,5	[49, p.130-135]
5	Селен (Se) Концентрация 0,1÷4,5 мг/кг Биоактивные формы: - селенометионин (60÷75%), - селенат (SeO₄²⁻).	[51, Table 2]

Продолжение таблицы 1.9

№	Наименование микроэлементов	Литература
	Значение: - антиканцерогенный эффект (активация глутатионпероксидазы), - биофортификация сельхозпродукции.	
6	Молибден (Mo) Концентрация 0,5÷15 мг/кг Роль: - кофактор нитрогеназы (азотфиксация), - катализатор окислительных реакций. Применение: микродобавки для бобовых культур	[40, с.102]
7	Кобальт (Co) Концентрация 0,3÷8 мг/кг Биохимия: - центральный атом витамина B ₁₂ , - стимулятор роста азотфиксирующих бактерий. Особенности: аккумулируется в сине-зеленых водорослях	[42, р. 428]
8	Хром не (Cr) Концентрация 2÷50 мг/кг Проблематика: - Cr (VI) токсичен, в сапропеле преобладает Cr (III), - связывание с гуминовыми кислотами. Применение: коррекция метаболизма глюкозы (в форме пиколината)	[50, Fig.6]
9	Никель (Ni) Концентрация 5÷80 мг/кг Функции: - активатор уреазы, - участие в синтезе жасмоновой кислоты у растений. Ограничения: фитотоксичность при концентрациях >100 мг/кг	[48, Table 3]
10	Серебро (Ag) Концентрация 0,01÷1,2 мг/кг Формы: - нанокластеры Ag ⁰ (5÷12 нм), - органические комплексы с тиоловыми группами. Значение: - природный антисептик (активность против E. coli), - катализатор окислительных процессов.	[55]

Продолжение таблицы 1.9

№	Наименование микроэлементов	Литература
11	Бор (В) Концентрация 5÷80 мг/кг Динамика: - максимум в прибрежных сапропелях, - минимум в глубинных отложениях. Функции: - регуляция кальциевого обмена у растений, - участие в синтезе фитогормонов. Ограничения: фитотоксичность >100 мг/кг Перспективы: прецизионное земледелие	[56]
12	Йод (I) Концентрация 0,5÷12 мг/кг Биоформы: - йодорганические соединения (60÷75%), - йодиды (I⁻). Применение: - профилактика эндемического зоба, - компонент антисептиков.	[57]
13	Барий (Ba) Концентрация: 10÷150 мг/кг (в отдельных месторождениях до 300 мг/кг). Особенности: - преимущественно в сульфатной форме (BaSO₄), - индикатор геологического происхождения.	[58]
14	Бром (Br) Концентрация: 2÷45 мг/кг (максимум в прибрежных сапропелях). Источники: - разложение морских водорослей (до 80% от общего содержания), - геотермальные воды. Формы: - органический бром (бромфенолы) - 40÷50% - бромид-ион (Br⁻) - 30÷40% - броматы (BrO₃⁻) - <5% Токсикология: - ПДК в удобрениях <50 мг/кг	[59]

Окончание таблицы 1.9

№	Наименование микроэлементов	Литература
15	Бериллий (Be) Концентрация 0,001÷0,8 мг/кг Источники: - выветривание гранитов(60÷70%), - техногенное загрязнение (ТЭЦ, аэрокосмическая промышленность. Формы: - растворимая (Be^{2+}) - <5%, - связанная с гуминовыми кислотами - 30÷40%, - в составе глинистых минералов - 50÷60% Мониторинг: - индикатор техногенного загрязнения, - ПДК для сельхозземель <2 мг/кг	[60]
16	Титан (Ti) Концентрация 0,1÷3,5 г/кг Формы: - TiO_2 (рутил, анатаз), - органометаллические комплексы. Перспективы: - фотокаталитические покрытия, - биосовместимые импланты.	[61]
17	Ванадий (V) Концентрация 5÷120 мг/кг Биологическая роль: - аналог фосфата в ферментах, - стимулятор роста диатомей.	[61]

Предельно допустимая концентрация (ПДК) тяжелых металлов в сапропеле, зависит от сферы применения сапропеля (сельское хозяйство, рекультивация земель, производство удобрений и т.д).

При использовании сапропеля в качестве органического удобрения установлены ПДК тяжелых металлов (таблица 1.10) согласно ГОСТ Р 54000-2010. «Удобрения органические на основе сапропеля. Технические условия» и СанПин 1.2.3685-21. «Гигиенические нормативы содержания вредных вещества в объектах окружающей среды», а также приведены нормы Европейского Союза (Директива 86/278/ЕЕС и Регламент (EU) 2019/1009).

Таблица 1.10 – Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов

№	Название металла	ПДК по ГОСТ Р 54000-2010, (мг/кг)	ПДК по СанПин 1.2.3685-21, (мг/кг)	Нормы ЕС 86/278/ЕЕС и (EU)2019/1009
1	Свинец (Pb)	30-65	20-50	45-150
2	Кадмий (Cd)	1-2	0,5-2	0,7-3
3	Ртуть (Hg)	0,5-2	0,1-2	0,1-1,5
4	Мышьяк (As)	5-10	2-10	10-20
5	Никель (Ni)	40-100	20-80	30-75
6	Хром (Cr)	50-100	50-100 (Cr общий)	50-150(Cr ³⁺)
7	Медь (Cu)	60-150	50-150	50-140
8	Цинк (Zn)	200-500	100-300	150-450

Конкретные значения зависят от типа почв и региона применения сапропеля в качестве удобрений.

Макроэлементы сапропелей приведены ниже в таблице 1.11.

Таблица 1.11 – Макроэлементы сапропелей

№	Наименование	Литература
1	Кальций (Ca) Концентрация 1÷15% Структурная роль: основной компонент гидроксиапатита костей и зубов. Сигнальная функция: вторичный мессенджер в клеточной передаче сигналов	[62, с.215] [63]
2	Калий (K) Концентрация 0,1÷0,5% Основной внутриклеточный катион Поддержание мембранного потенциала Регуляция осмотического давления	[64] [65, p.78]
3	Фосфор (P) Концентрация 0,1÷0,8% Компонент АТФ, ДНК, фосфолипидов и других макроэргических соединений Структурный элемент нуклеиновых кислот	[62, с.302] [66, с.156]
4	Магний (Mg) Макроэлемент с микроэлементными функциями Концентрация 0,5÷3% Классификация: занимает промежуточное положение между макро- и микроэлементами	

Продолжение таблицы 1.11

№	Наименование	Литература
	Формы нахождения: - водорастворимая (ионы Mg^{2+} - 15÷25% от общесодержания), - обменная (комплексы с гуминовыми кислотами - 35÷45%, - структурная (в составе хлорофилла и глины - 30÷40%, - нерастворимая (магнезит $MgCO_3$, доломит - 5÷15%). Кофактор 300+ ферментов гликолиза Стабилизатор структуры рибосом, нуклеиновых кислот	[67] [63, с.104] [64, p.145]
5	Натрий (Na) Концентрация 0,1÷2% Создание градиента для активного транспорта Участие в генерации потенциала действия Главный внеклеточный катион	[65, p.82] [62, с.421]
6	Хлор (Cl) Концентрация 0,1÷2% Основной анион внеклеточной жидкости Компонент желудочного сока	[66, с.178] [63, с.112]
7	Сера (S) Концентрация 0,1÷1,5% (в сульфатной и органической формах) Компонент тиоловых групп Структурный элемент сульфолипидов Компонент аминокислот (метионин, цистеин), витаминов	[64, p.201] [65, p.95]
8	Азот (N) Концентрация 0,5÷4,5% (в органической и в аммонийной формах) Основной элемент аминокислот Компонент нуклеотидов, алкалоидов	[62, с.118] [66, с.134]
9	Железо (Fe) Концентрация 0,5÷10% Ключевой элемент гемоглобина и миоглобина Участие в электрон-транспортной цепи Кофактор ферментов каталазы и пероксидазы Суточная потребность: 8÷18мг для человека Железо формально относится к микроэлементам, но включено в список из-за его высокой значимости и относительно большого содержания в организме	[62, с.245] [64, p.178] [63, с.132] [65, p.112]

Окончание таблицы 1.11

№	Наименование	Литература
10	Кремний (Si) Концентрация 5÷30% (в зависимости от минеральной части) Биодоступные формы: - ортокремниевая кислота (H_4SiO_4), - фитоолиты. Важный элемент для растений (укрепление клеточных стенок растений). Участвует в образовании соединительной ткани у животных, Применение: биокерамические материалы.	[63, с.187] [64, р.223] [66]
11	Алюминий (Al) Концентрация 1÷10% (в глинистых сапропелях) Влияние на рост растений Накопление в некоторых видах чая Потенциальная токсичность при избытке Среднее содержание в организме человека 35÷50 мг. Алюминий не является эссенциальным элементом, но включен как важный макрокомпонент в некоторых биологических системах	[69, с.215] [70, с.187] [66, с.298] [63, с.205]

1.1.4. Биологически активные комплексы и органические кислоты.

В сапропеле, помимо уже упомянутых выше компонентов, присутствует целый спектр дополнительных биологически активных веществ и кислот (таблицы 1.12–1.15), играющих важную роль в его свойствах [71].

Таблица 1.12 – Органические кислоты сапропелей
(помимо гуминовых и фульвокислот)

№	Наименование	Концентрация мг/кг	Источник образования	Биологическая роль
1	Щавелевая	50÷300	Разложение растений	Хелатор металлов, регулятор pH
2	Лимонная	30÷150	Метаболизм микроорганизмов	Участие в цикле Кребса
3	Янтарная	20÷120	Анаэробное брожение	Стимулятор роста растений

Окончание таблицы 1.12

№	Наименование	Концентрация мг/кг	Источник образования	Биологическая роль
4	Молочная	15÷80	Бактерия рода <i>Lactobacillus</i>	Пребиотический эффект
5	Уксусная	10÷60	Ферментация целлюлозы	Ингибитор патогенной микрофлоры

Таблица 1.13 – Азотсодержащие соединения сапропелей [51]

№	Название
1	Пурины и пиримидины (аденин, гуанин – 0,5÷3,2 мг/кг) Продукт разложения ДНК/РНК микроорганизмов, важны для синтеза нуклеотидов
2	Бетаины (глицинбетаин – 1,5÷8,7 мг/кг) Осморегуляторы, накапливаются цианобактериями
3	Алкилпиридины (0,1÷0,5 мг/кг) Маркеры термального воздействия на органику

Таблица 1.14 – Серосодержащие соединения сапропелей

№	Название	Форма	Значение
1	Диметилсульфид	Летучий (0,01÷0,3 мг/кг)	Участвует в круговороте серы
2	Глутатион	Окисленная/восстановленная форма	Антиоксидант
3	Метионинсульфоксид	Продукт окисления метионина	Маркер окислительного стресса

В сероводородных зонах содержание тиолов может достигать 12 мг/кг [71].

Таблица 1.15 – Фенольные соединения в сапропелях

№	Наименование	Концентрация	Свойства
1	Лигнин	Производные (ванилин, сиреневый альгидрид – 2÷15 мг/кг).	Продукты деградации древесины, обладают антимикробными свойствами
2	Флавоноиды (кверцетин, кемпферол – 0,5÷3,0 мг/кг)	(кверцетин, кемпферол – 0,5÷3,0 мг/кг)	Являются антиоксидантами растительного происхождения
Метод выделения: экстракция этанолом с последующей ВЭЖХ (высокоэффективная жидкостная хроматография) [59]			

Гетероциклические соединения:

Порфирины, содержание $0,3 \div 1,8$ мг/кг, содержатся в остатках хлорофилла, образуют комплексы с Ni/V.

Индолы, содержание $0,2 \div 0,7$ мг/кг, содержатся в продуктах разложения триптофана, фитогормонах.

Стабильны в анаэробных условиях.

Необычные компоненты [68]:

Гопаноиды ($0,05 \div 0,4$ мг/кг): стеролоподобные соединения бактерий, маркеры древних экосистем.

Даймонд-подобные углеводороды (наноразмерные кластеры): образуются при катагенезе органики, обладают уникальными сорбционными свойствами.

Перспективность применения: использование в нанотехнологиях.

1.1.5. Антибиотики в сапропеле.

Сапропель содержит биологически активные вещества с антимикробными свойствами, которые могут подавлять рост патогенных микроорганизмов. Эти соединения имеют природное происхождение и в отличие от синтетических антибиотиков реже вызывают резистентность у бактерий. Ниже приведены основные группы природных антибиотиков (табл. 1.16) и их применение (табл. 1.17) [42, 72, 73, 74].

Таблица 1.16 – Основные группы антибиотиков в сапропеле

№	Наименование	Механизм действия
1	Гуминовые и фульвокислоты Эффективны против: <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella spp.</i> , <i>Candida albicans</i> (грибок)	Нарушают клеточные мембраны микроорганизмов Связывают ионы металлов, необходимые для метаболизма бактерий Подавляют ферменты системы патогенов
2	Фитонциды и терпеноиды – летучие соединения, выделяются из остатков водных растений	Подавляют рост бактерий и грибов Стимулируют иммунную систему растений и животных Обладают антисептическим эффектом

Окончание таблицы 1.16

№	Наименование	Механизм действия
		(монотерпены) Обладают противовоспалительным и антимикробным действием (сесквитерпены)
3	Азотосодержащие соединения (алкалоиды, аминокислоты)	Ингибируют рост микроорганизмов (алкалоиды) Усиливают иммунный ответ (аминокислоты лизин, аргинин)
4	Фенольные соединения и флавоноиды Эффективны против: <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Нарушают синтез ДНК и белков у бактерий Блокируют работу бактериальных ферментов
5	Натуральные антибиотики микробного происхождения: актиномицеты и цианобактерии	Они вырабатывают: - актиномицины, которые подавляют грамположительные бактерии; - бактериоцины, белки, которые уничтожают близкородственные бактерии

Таблица 1.17 - Перечень применения природных антибиотиков из сапропеля

№	Область применения
1	Медицина и бальнеология
1.1	<i>Лечебные грязи</i> для лечения в санаториях: - кожных инфекций (акне, экзема, псориаз); - гинекологических и урологических воспалений; - болезней суставов (артриты, артрозы)
1.2	<i>Антимикробные препараты на основе гуминовых кислот</i>
2	Сельское хозяйство
2.1	<i>Обработка семян и растений</i> Снижает грибковые и бактериальные инфекции
2.2	<i>Кормовые добавки для животных</i> Профилактика кишечных инфекций
3	Ветеринария Лечение ран, кожных заболеваний у животных Альтернатива синтетическим антибиотикам в животноводстве
4	Биотехнологии и фармацевтика Выделение и изучение новых природных агентов Создание пробиотиков и пребиотиков на основе сапропелевых экстрактов

Природные антибиотики из сапропеля обладают рядом преимуществ перед синтетическими:

- меньше побочных эффектов, поскольку не нарушают микрофлору кишечника;
- меньше риска резистентности, поскольку оказывают комплексное действие, а не по одной позиции;
- экологически безопасны, поскольку разлагаются без вреда для окружающей среды;
- многофункциональность действия, включая антимикробное, иммуномодулирующее и противовоспалительное [75], [76].

1.1.6. Биота сапропеля.

Биота сапропеля включает бактерии, водоросли, беспозвоночных, простейших и высшие растения (табл. 1.18).

Таблица 1.18 – Состав биоты сапропеля

№	Название
1	Микроорганизмы:
1.1	бактерии анаэробные (<i>Clostridium</i> , <i>Desulfovibrio</i>) и аэробные (<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i>), участвуют в разложении органики [77];
1.2	археи: метаногены (<i>Metanobacterium</i> , <i>Methanosarcina</i>), играют роль в образовании биогаза [78];
1.3	грибы и актиномицеты: разлагают целлюлозу и лигнин [79].
2	Водоросли:
2.1	диатомовые (<i>Melosira</i> , <i>Navicula</i>) – основной источник кремнезема [80];
2.2	зелёные (<i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i>) – накапливают белки и липиды [81];
2.3	цианобактерии (<i>Microcystis</i> , <i>Anabaena</i>) – могут быть токсичными, но участвуют в азотфиксации [82]
3	Беспозвоночные:
3.1	зоопланктон (дафнии, коловратки) – источники органического детрита [83];

Окончание таблицы 1.18

№	Название
3.2	зообентос (хирономиды, олигохеты) – ускоряют минерализацию органики [84].
4	Высшие растения: Остатки рогоза (<i>Typha</i>), камыша (<i>Phragmites</i>), элодеи (<i>Elodea</i>) – формируют грубый детрит [85].
5	Простейшие Амёбы, инфузории – участвуют в микробных пищевых цепях [86].

Роль биоты в образовании сапропеля:

- минерализация органики с образованием гуминовых кислот [87],
- накопление биогенов (N, P, S), что повышает удобрительную ценность [88],
- формирование коллоидной структуры, что придает сапропелю гелеобразную консистенцию [89].

1.1.7. Газовые включения.

Сапропель является одним из природных источников выброса болотных газов в атмосферу: двуокиси углерода, сероводорода, азота, аммиака и метана [90].

Двуокись углерода (CO₂) в сапропеле образуется в результате естественных биохимических процессов разложения органики. Источником CO₂ является аэробное разложение органики как в верхних слоях с участием бактерий-аэробов *Pseudomonas*, *Bacillus*, так и в глубинных слоях с участием бактерий ацетогенов (*Acetobacterium*, *Clostridium*), преобразующих органические соединения в ацетат (CH₃COOH), CO₂ и H₂.

Аэробное разложение органики в верхних слоях, например, глюкозы происходит с участием кислорода можно записать как Глюкоза + O₂ → CO₂ + H₂O + энергия. Такой процесс протекает со скоростью 5÷20 мг CO₂/кг сапропеля в сутки.

При анаэробном брожении (в глубинных слоях) с участием ацетогенов происходят реакции спиртового брожения с выделением CO₂:

C₆H₁₂O₆ → 2CH₃CH₂OH + 2CO₂ и ацетогенеза с выделением двуокиси углерода и метана: CH₃COOH → CH₄ + CO₂. Концентрации CO₂ различны (табл. 1.19).

Таблица 1.19 – Концентрация двуокиси углерода в сапропеле

№	Глубина залегания	Концентрация	Форма нахождения
1	Поверхностный слой (0÷0,5 м)	50÷200 мг/кг	Растворенный в воде, в виде пузырьков
2	Средние слои (0,5÷2 м)	200÷500 мг/кг	Комплексы с карбонатами (CaCO ₃)
3	Глубинные слои (>2 м)	До 1500 мг/кг	Газовые гидраты (CO ₂ ·6H ₂ O)

С глубиной анаэробная среда при окислительно-восстановительном потенциале (редокс-потенциал) $Eh < -200 \text{ mV}$ обеспечивает сильно восстановительные условия со следующими химическими изменениями:

- исчезновение кислорода, или полная аноксия ($O_2=0$),

- появление восстановительных форм:

$SO_4^{2-} \rightarrow H_2S$ с образованием сероводорода,

$Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$ с образованием растворимых ионов железа или сульфидов FeS

$CO_2 \rightarrow CH_4$ с образованием метана.

Сероводород (H_2S) формируется сульфатредуцирующими бактериями, например, *Desulfovibrio*. Содержание в сапропеле составляет 0,1÷3,0 мл/кг, однако в глубинных слоях залежи (в анаэробных зонах) концентрация достигает 3÷15 мг/кг.

Азот (N_2) и его соединения выделяется при денитрификации (восстановлении нитратов до N_2). В небольших количествах могут присутствовать аммиак (NH_3), меркаптаны и летучие органические соединения.

Метан (CH_4) является продуктом метаногенеза в глубинных слоях с участием метаногенов (*Methanobacterium*, *Methanosarcina*), производящих метан (CH_4) из простых соединений.

Концентрацией 5÷25 мл/кг. на этой стадии идет превращение ацетата (CH_3COOH) в (CH_4) с формированием газовых карманов. Например, в сапропелевых озёрах Карелии метаногены генерируют до 80% всего биогаза [91].

Факторами, влияющими на интенсивность выбросов газовых включений, являются глубина залегания, мощность отложений, мощность покрывающего слоя воды, температура сапропеля в залежи, температура воды.

Известен механизм внезапного высвобождения растворенных газов из глубинных слоев воды, так называемая лимнологическая катастрофа, в результате чего над поверхностью водоема возникает удушающее облако газа, поскольку он плотнее воздуха, приводящее к массовой гибели людей и животных, затоплению плавающих судов в зоне выброса, так как плотность воды резко уменьшается из-за насыщения её пузырьками газа, расширяющимися в верхних слоях воды из-за уменьшения гидростатического давления.

Причинами таких резких выбросов может быть землетрясение, оползни, резкое изменение температуры воды.

Сапропель, содержащий органические отложения, представляет собой газовый резервуар, в котором накапливаются двуокись углерода (CO_2) и метан (CH_4), как продукты анаэробного разложения органики, и сероводород (H_2S) от жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий.

Эти газы остаются растворенными в воде при давлении больше 20 бар (глубина более 200 м).

Историческими примерами таких катастроф являются выбросы газов на озерах Ниос и Манун в Камеруне, Центральная Африка. 15 августа 1984 года на озере Манун (глубина 99 м) произошел выброс CO_2 и H_2S , погибло 37 человек, и это был первый зарегистрированный случай лимнологической катастрофы. 21 августа 1986 года на озере Ниос (глубина 208 м) произошел выброс 1,2 млн тонн CO_2 , газовое облако распространилось на 25 км, в результате чего погибло более 1700 человек и тысячи животных.

В настоящее время 23 озера в мире признаны потенциально опасными (Nature, 2023), в том числе 5 озер в Российской Федерации: Кроноцкое (Камчатка), Курильское (Курилы), Голубые озера (Кабардино-Балкария), Шайтан (Кировская область), Дальнее (Приморье).

Критерии опасности (по данным Nature, 2023) являются:

- глубина более 50 м,
- вулканическая активность в районе озера,
- высокое содержание CO_2/CH_4 в придонных слоях,
- отсутствие сезонного перемешивания слоёв воды.

Обычно сапропелевые водоемы не превышают глубину в 50 м, при такой глубине газы выделяются постепенно, концентрация H_2S редко превышает 10 ppm. Исключение составляют кратерные озера с активным магматизмом.

Тем не менее даже при глубине разработки до 10 м происходит интенсивное выделение газов при погружении в сапропель грунтозаборных устройств, что необходимо учитывать при производстве добычных работ.

1.1.8. Классификация сапропеля и его применение

Сапропель (от греч. Sapos – гнилой, pelos – ил, грязь) – это многовековые донные отложения пресноводных водоемов, состоящие из органических и минеральных веществ, образовавшихся в результате естественного отмирания водной флоры и фауны и сложных биохимических процессов [104].

Классификация сапропеля это комплексная задача, так как она может обосновываться на разных критериях: происхождении, химическом составе, свойствах и назначении. Не существует единой универсальной классификации, но можно привести основные подходы.

1. Классификация по происхождению и составу

Это основная классификация, которая определяет потенциальное использование сапропеля. Она основана на содержании золы (минеральной части) и преобладающем компоненте органической части.

Классы сапропеля (по содержанию золы)

Данная классификация регламентирована ГОСТ Р 54000 -2010 [105] для сельскохозяйственного применения и детализирована в методических указаниях ВСЕГИНГЕО [106].

Органический (зольность менее 30%)

Органо-минеральный (зольность от 30% до 50%)

Минерально-органический (зольность от 50% до 70%)

Минерализованный (зольность от 70% до 85%)

Минеральный (зольность более 85%) – часто уже не считается классическим сапропелем, а простым илом.

Видовая классификация (по преобладающему биогенному компоненту):

Внутри каждого класса выделяют виды в зависимости от того, какие органические остатки преобладают. Данная типология широко представлена работах Тюльпанова В.В. [104] и Драчева С.М. [107]:

1. Органические сапропели:

Алгиновые (водорослевые) сапропели образованы в основном остатками сине-зеленых и зеленых водорослей, богаты органическим веществом, азотом, часто микроэлементами.

Диатомовые сапропели образованы панцирями диатомовых водорослей, богаты кремнеземом SiO_2 .

Бактериальные (гумусовые) образованы в результате жизнедеятельности бактерий, перерабатывающих органику, имеют высокое содержание гуминовых и фульвокислот.

Животные (зоогенные) образованы остатками рачков, простейших и других мелких организмов, богаты азотом и фосфором.

Смешанные сапропели - наиболее распространенный тип, сочетают в себе признаки нескольких видов, например, диатомово-водорослевый.

2. Органоминеральные и минеральные сапропели.

Известковистые (карбонатные) с высоким содержанием карбоната кальция (CaCO_3), имеют щелочную реакцию, используются для раскисления почвы.

Кремнезёмистые с высоким содержанием соединений кремния (SiO_2)/

Железистые с высоким содержанием соединений железа.

3. Торфянистые и торфо-сапропелевые смешанные отложения, где сапропель перемешан со слоями торфа.

2. Классификация по целевому использованию

Эта классификация важна для практического применения и регламентируется ГОСТами и техническими условиями.

Виды сапропеля по назначению:

Сельскохозяйственный [105, 107, 108]:

- удобрение (органическое удобрение), используется для прямого внесения в почву;

- кормовая добавка для животных и птиц, высококачественный, чистый сапропель.

Лечебный и рекреационный [104]:

- для грязелечения (пелоидотерапия), используется в санаториях;

- для приготовления косметических средств.

Промышленный [104]:

- сырьё для химической переработки, получение гуминовых кислот, восков;

- сорбент для сбора разливов нефти.

Прежде чем использовать сапропель, особенно в сельском хозяйстве [108] или медицине, необходимо провести химический, радиологический и бактериологический анализ, чтобы убедиться в его безопасности.

1.2. Физико-реологические показатели сапропеля, влияющие на эффективность его добычи

Плотность сапропеля. Плотность сапропеля в естественном залегании – величина непостоянная и сильно зависит от его состава, степени обводнённости и глубины залегания.

При этом самую высокую плотность в естественном сложении имеют старые, спрессованные, минерализованные сапропели, залегающие на большой глубине. Их плотность может достигать 1,4–1,6 г/см³ [109, 110].

Факторы, влияющие на плотность сапропеля:

Степень обводнённости (влажность) - это главный фактор. Свежий, только что вынутый сапропель представляет собой желеобразную массу с влажностью 90-97%. Его плотность близка к плотности воды и составляет $1,0 \div 1,03 \text{ г/см}^3$. По мере уплотнения под давлением вышележащих слоев вода отжимается, и плотность растёт [109, 111].

Минеральный состав. Сапропели с высоким содержанием минеральных веществ (песчаных частиц, глины, карбонатов кальция) имеют более высокую плотность, чем чисто органические [109].

Органический сапропель: плотность $1,0 \div 1,2 \text{ г/см}^3$.

Известковый (карбонатный) сапропель: плотность может достигать $1,3 \div 1,4 \text{ г/см}^3$ [109].

Кремнезёмистый (диатомовый) сапропель: также имеет повышенную плотность.

Глубина залегания и давление. Чем глубже залегает пласт сапропеля, тем большее давление испытывают нижние слои. За тысячи лет это давление вытесняет воду и сильно уплотняет осадок. Исследования показали [109, 110], что верхние слои всегда более рыхлые и влажные, нижние – более плотные и сухие.

Возраст отложений. Чем старше месторождение, тем больше времени было на процессы уплотнения и диагенеза (превращения осадка в горную породу).

Ниже приведены диапазоны плотности по данным источников:

- поверхностный, обводненный сапропель (пульпа): $1,01-1,07 \text{ г/см}^3$ [109, 112];
- средние слои (пастообразная консистенция): $1,1-1,3 \text{ г/см}^3$ [109, 110];
- нижние, уплотнённые слои (полутвердая консистенция): $1,3 \div 1,5 \text{ г/см}^3$ [109, 110];
- сильно минерализованные, древние, спрессованные отложения, например, известковые сапропели): до $1,6 \text{ г/см}^3$ и изредка выше [109].

Ниже, для сравнения, приведены плотности некоторых других горных пород:

- плотность сухого торфа: $0,15 \div 0,3 \text{ г/см}^3$,
- плотность глины: $1,8 \div 2,2 \text{ г/см}^3$,

- плотность песка: $1,6 \div 1,7 \text{ г/см}^3$.

Таким образом, как следует из данных геологоразведочной практики [110] и фундаментальных исследований [109], максимальная плотность сапропеля в естественном, ненарушенном залегании характерна для глубоких горизонтов старых месторождений с высоким содержанием минеральных веществ. Это значение приближается к плотности плотных глин и суглинков, но редко превышает $1,6 \text{ г/см}^3$, так как органическая составляющая, всегда присутствующая в сапропеле, имеет низкую плотность.

Плотность органической массы сапропеля ($1,4\text{--}1,6 \text{ г/см}^3$) значительно ниже плотности типичных минералов ($2,6\text{--}2,7 \text{ г/см}^3$). Это объясняется химическим составом и молекулярной структурой:

- органические соединения состоят из «лёгких» элементов: углерода (C), водорода (H), кислорода (O), азота (N);
- в их структуре много пор и пустот на молекулярном уровне;
- минералы же сложены из более «тяжелых» элементов: кремния (Si), алюминия (Al), кальция (Ca), железа (Fe), с более плотной кристаллической решеткой.

Для сапропеля с плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$ влажность W будет низкой, примерно $25 \div 45\%$. Следовательно, сухой остаток (C_c) будет высоким, примерно $55 \div 75\%$.

Рассмотрим два возможных сценария с $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$ и $C_c = 70\%$:

1. высокозольный сапропель, $C_c = 70\%$, зольность (A) = 65% (почти весь сухой остаток – это минералы), органическое вещество $ОВ = 5\%$ (ничтожно мало), плотность $1,6 \text{ г/см}^3$ достигается за счет тяжелых минералов.

2. средnezольный, но сильно уплотненный сапропель, $C_c = 70\%$, зольность (A) = 35% , органическое вещество $ОВ = 35\%$, плотность $1,6 \text{ г/см}^3$ достигается за счет рекордно низкой влажности и сильного уплотнения, вытеснившего воду. Это довольно редкий случай.

Подавляющее большинство сапропелей с такой высокой плотностью будут подходить под первый сценарий, поскольку высокая плотность почти всегда

коррелирует с высоким сухим остатком, который в свою очередь состоит в основном из минералов. Ниже приведены соотношения физических показателей сапропелей (табл. 1.20).

Таблица 1.20 – Плотность, влажность, сухой остаток

№	Параметр	Рыхлый, обводненный сапропель	Уплотненный сапропель	Плотный, минерализованный сапропель
1	Плотность, г/см ³	1,05÷1,10	1,2÷1,4	1,5÷1,6
2	Влажность, %	90÷95%	60÷80%	25÷45%
3	Сухой остаток, %	5÷10%	20÷40%	55÷75%
4	Преобладающая часть	Вода	Вода+Органика	Минералы (зола)

Оперировать понятием «сухой остаток» удобно при проектировании добычи и переработки, поскольку насосы, например, для добычи выбираются исходя из плотности пульпы, которая напрямую зависит от процента сухого остатка. Чем выше планируемый % сухого остатка в добываемой пульпе, тем более мощное требуется оборудование.

Однако, при такой высокой плотности 1,6 г/см³ и такой низкой влажности консистенция сапропеля уже не является текучей средой, а представляет собой пластичную или полутвердую массу.

Характеристика консистенции сапропеля при плотности 1,6 г/см³.

1. Внешний вид и структура. Это плотная, однородная масса, часто с массивной структурой; она может иметь тонкую слоистость, но не расслаивается на глазах; цвет – от темно-оливкового до черного или серого, в зависимости от преобладающих минералов.

2. Пластичность и связанность. Масса обладает высокой пластичностью, она легко деформируется под нагрузкой без разрыва сплошности (как плотная глина или пластилин), из нее можно скатать прочный шнур или шарик. Она липкая и оставляет жирный налет на руках (из-за содержания битумов).

3. Прочность. В естественном залегании такой пласт может обладать некоторой прочностью. Для его извлечения требуется уже не размыв, а резание или копание. Его не поднимешь обычным земснарядом, рассчитанным на текучую пульпу – потребуется техника с фрезерными или ковшовыми рабочими органами.

4. Водоотдача. Эта масса практически не отдает воду самопроизвольно. Чтобы обезводить ее до такого состояния в искусственных условиях, потребуются очень мощные прессы или термическая сушка.

Согласно геологической и технической литературы, сапропель с такой плотностью относится к следующим типам:

- полутвердый сапропель, влажность находится в диапазоне 25÷45%;
- пластично-вязкая консистенция (табл.1.21)

Таблица 1.21 – Зависимость между консистенцией и плотностью

№	Параметр	Текущий Сапропель	Пластичный сапропель	Полутвердый сапропель
1	Плотность, г/см ³	1,01÷1,10	1,2÷1.4	1,5÷1,6
2	Влажность, %	85%	50÷80%	25÷45%
3	Аналогия	Жидкая сметана	Густая сметана, паста	Пластилин, влажная глина
4	Способ добычи	Земснаряд Насосный	Фрезерный земснаряд	Экскаватор, скрепер
5	Поведение	Течёт, растекается	Держит форму, но медленно ползёт	Держит форму, режется кусками

Практическое значение такой консистенции:

1. Добыча. Залежи такого сапропеля часто отрабатываются карьерным способом (внутриводным или осушенным) с использованием экскаваторов, бульдозеров и скреперов. Иногда применяют специальные фрезерные рыхлители для предварительной обработки пласта.

2. Переработка. Его не нужно обезвоживать, можно сразу использовать в качестве:

- гранулированного удобрения (после предварительного измельчения и грануляции);
- сырья для производства топливных брикетов;
- готового мелиоранта (для внесения в почву в виде кусков или измельченном виде).

На основании вышесказанного можно сделать заключение, что сапропель с плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$ это плотная, пластичная или полутвердая масса, по консистенции сравнимая с влажной глиной или пластилином. Его физическое состояние коренным образом отличает его от жидкого ила и диктует совершенно иные технологии работы с ним.

Сопротивление сдвигу — это основной прочностной параметр для такого плотного сапропеля, напрямую влияющий на технологию его добычи.

Для сапропеля плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$ и влажностью $25\div 45\%$ сопротивление сдвигу уже достаточно существенно. Оно характеризуется двумя параметрами: углом внутреннего трения (ϕ) и удельным сцеплением (C).

Ниже приведены ориентировочные диапазоны прочностных характеристик для полутвердого, сильно уплотненного сапропеля (табл. 1.22).

Таблица 1.22 – Прочностные характеристики полутвердого сапропеля

№	Параметры	Обозначение	Диапазон значений	Что означает
1	Угол внутреннего трения	ϕ (фи)	$15\div 25^\circ$	Характеризует трение между частицами материала. Чем выше угол, тем больше сопротивление сдвигу за счет трения
2	Удельное сцепление	C	$10\div 25 \text{ кПа}$ ($0,1\div 0,25 \text{ кгс/см}^2$)	Характеризует силы связности между частицами (за счет глинистых и органических коллоидов)
3	Сопротивление сдвигу	τ (тау)	Расчёт по формуле Кулона	$\tau = C + \sigma \cdot \text{tg}(\phi)$, где σ - нормальное напряжение (давление)

Эти значения близки к характеристикам мягких глин, пластичных суглинков или влажного торфа высокой степени разложения. Это гораздо прочнее, чем у жидкого сапропеля (где $C=0\div 1$ кПа, $\varphi=0\div 5^\circ$), но слабее, чем у плотных сухих глин или песков.

Такой сапропель будет держать вертикальный откос небольшой высоты (до $0,5\div 1$ метра) в течение короткого времени. Для его разрушение (резания) потребуется приложить значительное усилие, он будет не «растекаться», а скалываться пластами или резаться стружкой, подобно плотному пластилину. Он обладает определенной несущей способностью, по нему может проехать колесная техника с низким давлением на грунт, хотя есть риск продавливания и залипания.

Факторы, влияющие на сопротивление сдвигу:

- минеральный состав: сапропели с высоким содержанием глинистых частиц будут иметь более высокое сцепление C , но могут быть более пластичными.
- органическое вещество: содержание битумов и гуминовых кислот действует как «природный клей», увеличивая сцепление.
- влажность: это самый важный фактор, поскольку даже незначительное повышение влажности на $5\div 10\%$ для такого плотного материала резко снижает и сцепление C , и угол трения φ , превращая его в пластичную массу.

Расчет сопротивления сдвигу критически важен для:

- проектирования добычи (расчет усилия резания для фрез и скреперов, выбор типа рабочего органа земснаряда или экскаватора);
- оценки устойчивости откосов карьера или отвалов добытого сапропеля;
- расчета параметров транспортирования (определение необходимого давления для перекачки массы по трубопроводу (если его планируется разжижать)).

Одним из важнейших реологическим параметром для текучести плотных дисперсных систем, к которым относится сапропель, является предельное напряжение сдвига (τ_0).

Для сапропеля с плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$ и влажностью $25 \div 45\%$ предельное напряжение сдвига сильно возрастает и может достигать 500 Па и даже выше [109, С. 56-57]. Высокие значения прочности на сдвиг характерны для специфических состояний и видов сапропеля, перечисленных ниже:

- крайне низкая влажность; при влажности менее $25 \div 30\%$ сапропель переходит из пластичного в полутвердое и даже твердое состояние; органические и минеральные частицы сближаются настолько, что силы молекулярного сцепления между ними резко возрастают; аналогия - влажная глина имеет $\tau_0 = 100 \div 300 \text{ Па}$, а у сухой глины τ_0 может превышать 1000 Па ;

- высокое содержание глинистых минералов; сапропели, образовавшиеся в водоемах с большим привнесом тонкодисперсных глинистых частиц, имеют особо прочную коагуляционную структуру; глины (каолинит, монтмориллонит) сами по себе являются структурообразователями с высоким значением сцепления C ;

- высокая зольность и карбонатность; сапропели, близкие по составу к известковым илам, при уплотнении и частичной цементации карбонатами кальция могут приобретать очень высокую структурную прочность.

- криогенное воздействие или сезонное промерзание; сапропели, подвергающиеся замораживанию и оттаиванию, могут уплотняться и структурироваться, что также ведет к увеличению τ_0 .

- длительное время уплотнения под нагрузкой. В нижних слоях древних месторождений процессы диагенеза могли значительно увеличить прочность.

Ниже в таблице 1.23 приведены сводные значения τ_0 для различных состояний сапропеля.

Таблица 1.23 – Диапазоны τ_0 для различных состояний сапропеля

№	Состояние сапропеля	Влажность, %	Предельное напряжение сдвига, τ_0	Аналогия по консистенции
1	Жидкое (пульпа)	$85 \div 98\%$	$0 \div 20 \text{ Па}$	Вода, молоко
2	Вязко-текучее	$70 \div 85\%$	$20 \div 50 \text{ Па}$	Густое масло, кефир

Окончание таблицы 1.23

№	Состояние сапропеля	Влажность, %	Предельное напряжение сдвига, τ_0	Аналогия по консистенции
3	Пастообразное	50÷70%	50÷150 Па	Густая сметана, йогурт
4	Пластичное	35÷50%	150÷300 Па	Плотный творог, пластелин
5	Полутвердое	25÷35%	300÷600 Па	Мягкое масло из холодильника, полутвердая глина
6	Твердое	< 25%	600 Па	Сухая глина, мягкий мел

Исследования сапропелей, проведённые в различных озёрах и в различных регионах разными учёными в разное время показали, что в естественном состоянии представляет из себя многокомпонентные полидисперсные системы, при этом верхний слой залежи толщиной до 1 м седиментационно-неустойчив, с высоким содержанием донной растительности и активно протекающими биологическими процессами. По мере седиментации со скоростью 1÷2 мм/год частицы образуют структурированный осадок сапропеля вязко-текучей консистенции, который на протяжении длительного времени минерализуется и уплотняется в нижних слоях, обуславливая тем самым образование в глубине залежи слоёв сапропелей пластичной и даже полутвердой консистенций [114].

Системы с периодической структурой склонны к дилатантному типу течения, при котором вязкость возрастает при увеличении скорости деформации сдвига. Сапропель же относится к системе с выраженной склонностью частиц к слипанию, образующей коагуляционную структуру (гель) – более или менее рыхлую сетку из взаимосцепляемых частиц. Им присущ тиксотропный тип поведения под нагрузкой, когда вязкость уменьшается с течением времени при постоянном напряжении сдвига, но с ростом напряжения сдвига она возрастает.

Белорусские учёные, занимающиеся вопросами разработки сапропелевых месторождений [115], выявили три характерные консистенции сапропеля: вязко-

текучая, вязко-пластичная и полутвердая, и выявили при этом диапазоны распределения влаги и численные значения пределов пластичности (рис. 1.1).

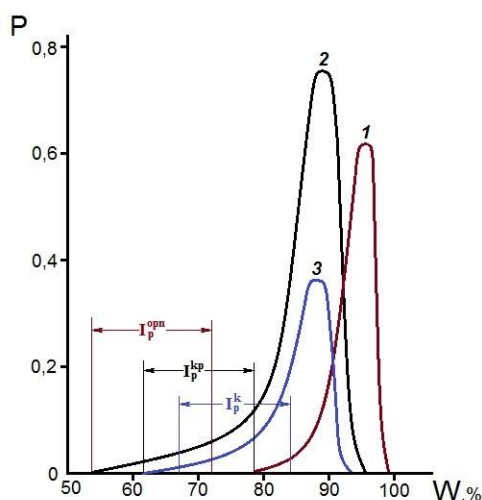


Рисунок 1.1 - Кривые распределения сапропелевых отложений по влаге и границы пределов пластичности: 1-органические сапропели; 2 - кремнеземистые; 3 - карбонатные; $I_p^{орг}$, $I_p^{кр}$, $I_p^к$ - границы пределов пластичности органических, кремнеземистых и карбонатных сапропелей.

При этом было установлено, что преобладающим видом консистенции озерных сапропелей является вязко-текучая консистенция (90%), а на сапропели с пластичной и полутвёрдой консистенцией приходится 9% и 1% соответственно.

Ниже в таблице 1.24 приведены данные разделения сапропелей по консистенции в пределах генетических типов [114], [115].

Таблица 1.24 - Категории консистенции сапропелей по генетическим типам

№ п/п	Генетический тип сапропеля	Вид консистенции		
		Вязко- текучая	Вязко- пластичная	Полутвердая
1	Органический	98	2	-
2	Кремнезёмистый	84	4	2
3	Карбонатный	94	6	-

Коллоидно-химический состав и физическое состояние сапропелей, их особенности обусловлены присутствием различных по энергии связи с веществом осадков категорий воды. Установлено, в результате анализа имеющихся данных,

что основную категорию удерживаемой сапропелями воды составляет слабосвязанная вода макропор (до 70...80% от полной влагоемкости). Она удерживается в осадке механически и не обладает сколько-нибудь заметной энергией связи.

До 12...15% это вода, иммобилизованная внутри рыхлых структур, агрегатов частиц гидрофильных коллоидов и биологически иммобилизованная вода. На долю физико-химически связанной воды приходится 8...15%. При этом 3...5% это прочно связанная вода.

Отмечается, что химический состав водной части сапропелей характеризуется более высокой общей минерализацией в сравнении с водой данного озера, повышенным содержанием азота, отдельных микроэлементов (медь, никель, бор, цинк), а также свободных и гидролизующихся редуцирующих веществ [116].

Литературные источники о сапропеле показывают большое расхождение в оценке как физических, так и реологических показателей не только между тремя генетическими типами сапропелей, но и в порядке подхода к определению технологических параметров. Ниже в таблице 1.25 приведен перечень исследуемых показателей и их значений для трех типов.

Приведенные показатели не всегда совпадают с фактическими значениями, например, предел текучести τ_0 может принимать значения выше 200Па и даже доходить до 500Па в высокозольных сапропелях при низких значениях влажности.

Таблица 1.25 – Значения показателей по генетическим типам сапропелей

№	Наименование показателей	Органический	Кремнеземистый	Карбонатный
1	W – влажность, % ГОСТ5180-2015	355÷4900	100÷2400	160÷3100
2	ω - водосодержание, %	78÷98	50÷96	62÷93
3	W _c - сухой остаток, %	2÷22	4÷50	3÷38
4	W _o – содержание органики, %	>50 (70÷80)	<50 (30÷50)	<50 (20÷40)

Окончание табл. 1.25

№	Наименование показателей	Органический	Кремнеземистый	Карбонатный
5	ρ - плотность, кг/м ³	1000÷1200	1200÷1400	1400÷1600
6	A _c - зольность, %	<50 20÷50	>50 50÷70	>50 60÷80
7	q _н - несущая способность, кПа (т/м ²)	50÷20 (0,5÷2)	10÷50 (1÷5)	20÷100 (2÷10)
8	S _p – сапропелевое число	<1 жидкотекучий	1÷5 пластичный	>5 пастообразный
9	τ_0 - предел текучести, Па (ГОСТ 1929-2021)	5÷20	10÷50	20÷200
10	μ_0 (μ_p) - вязкость, Па·с (ГОСТ 1929-2021)	0,1÷1,0	0,5÷5,0	1,0÷10,0

Сами значения влажности, как таковые, не участвуют в уравнениях течения или потерь давления на трение, а также в уравнениях расхода при гидротранспортировании жидкостей в трубопроводе, а вот предел текучести, или предельное напряжение сдвига, или другими словами, структурное сопротивление сдвигу τ_0 является одним из основных показателей течения вязко-пластичных сред, какой является сапропель.

На протяжении 11 лет (с 2007 по 2018 год) автором были взяты пробы сапропелей из 10 озер Латвии, Белоруссии и России и выполнены лабораторные анализы реологических показателей, результаты которых приведены ниже в таблице 1.26.

Из таблицы видно, что значения коэффициентов пластической вязкости сапропелей μ_p различных озер могут отличаться в 19 раз (0,98 ÷ 18,5 Па·с), а предельного напряжения сдвига τ_0 в 25 раз (6,1 ÷ 150,1 Па).

Из таблицы видно, что значения коэффициентов пластической вязкости сапропелей μ_p различных озер могут отличаться в 19 раз (0,98 ÷ 18,5 Па·с), а предельного напряжения сдвига τ_0 в 25 раз (6,1 ÷ 150,1 Па).

Таблица 1.26 - Значения реологических показателей сапропеля (при 20°C)

№	Название озера	Вязкость, Па·с		Предельное напряжение сдвига, Па	
		Пластическая μ_p	Динамическ. μ_∞	Статическое τ_0	Динамическ. τ_∞
1	Веверу	1,12 2,46	0,06 -	6,1 14,43	17,5 54,6
2	Малта	1,0	0,07	11,3	28,0
3	Нотра	1,6	0,1	14,5	38,0
4	Пильвелю	3,42	0,07	17,4	63,2
5	Убаговас	6,7	0,18	26,5	73,0
6	Пуришу	0,98 3,0	0,08 0,19	6,7 39,9	23,5 82,0
7	Сынове	2,24	0,18	68,2	124,0
8	Вейно	18,5	0,18	90,0	204,0
9	Любче	3,64	0,28	118,0	221,5
10	Савельево	5,3	0,68	150,1	393,0

Кроме того, в ряде озер, например, в Веверу и в Пуришу, значения μ_p и τ_0 сильно возрастают с глубиной залегания. Пластическая вязкость μ_p в озере Веверу возрастает с 1,12Па·с до 2,46Па·с, а в озере Пуришу с 0,98Па·с до 3,0Па·с.

Предел текучести, или напряжение сдвига τ_0 в озере Пуришу возрастает с 6,7Па до 39,9Па, то есть в 6 раз!

В качестве примера (см. рис. 1.2) приведен литологический разрез залежи сапропеля на озере Веверу, из которого видно, что по мощности пласта могут



Рисунок 1.2 - Литологический разрез обводненной залежи сапропеля оз. Веверу.

меняться не только физические показатели сапропеля, но и сама залежь может включать слои и линзы их различных видов и классов сапропелей.

Этот факт говорит о том, что отбор проб в залежи необходимо брать как минимум с 3х уровней: в кровле, середине и в подошве залежи, а для расчётов принимать наибольшие значения вязкости μ_p и напряжения сдвига τ_0 .

При смешивании сапропеля естественной влажности с водой эти показатели уменьшаются, что, с одной стороны, облегчает гидротранспортирование сапропеля по напорному трубопроводу, но с другой стороны, оказывает большое негативное воздействие на экологию озера и прилегающей береговой зоны, создает проблему по обезвоживанию сапропеля и его продолжительной сушки, что негативно отражается на сохранении его качественных показателей из-за потери значительной части биологически активных компонентов сапропеля.

Процедура разупрочнения сапропеля естественной влажности водой имеет большое значение при добыче сапропеля земснарядами, грунтовые насосы которых имеют ограничения по вязкости и пределу текучести, поскольку необходимо определить степень разбавления с целью снижения реологических показателей до предельных. Изменения реологических характеристик сапропеля с добавлением воды приведены ниже в таблице 1.27.

Для выявления областей жидко-образного, твердообразного и упруго-хрупкого состояния в логарифмических координатах построена зависимость предельного напряжения сдвига от концентрации сухого вещества (СВ). Во всем диапазоне влажностей от естественной до состояния предельно обводненной пульпы таких областей не выявлено (см. рис. 1.3 и 1.4).

Влажность w (%) – выраженное в процентах отношение массы воды, содержащейся в сапропеле m_b , к массе всего сапропеля m :

$$w = (m_b / m) \times 100 \quad (1.1)$$

Влагосодержание W – отношение массы воды, содержащейся в сапропеле m_b , к массе сухого сапропеля m_c (кг/кг):

$$W = m_b / m_c \quad (1.2)$$

Таблица 1.27 – Изменение реологических показателей при разбавлении сапропеля водой

Реологические характеристики образцов сапропеля

№ образца	Объем воды к исходно- му, %	Влажность, %	Влагосо- держание, кг/кг	Концен- трация сух. вещ., %	Золь- ность, %	Пределное напряжение сдвигу, Па			Вязкость, Па с	
						стати- ческое	динами- ческое	пласти- ческая	динами- ческая	
1 Пилверю	100	96,41	26,86	3,59	17,60	17,4	63,2	3,42	0,07	
	120	97,00	32,33	3,00		7,9	28,1	1,34	0,06	
	145	97,50	39,00	2,50		4,1	14,0	0,76	0,04	
	182	98,00	49,00	2,00		1,7	3,8	0,21	0,02	
	245	98,50	65,67	1,50		1,3	2,2	0,17	0,01	
2 Веверу	369	99,00	99,00	1,00		1,0	1,7	0,15	0,01	
	100	96,78	30,06	3,22	16,50	6,1	17,5	1,12	0,06	
	108	97,00	32,33	3,00		3,6	13,5	0,81	0,05	
	130	97,50	39,00	2,50		2,5	7,7	0,46	0,03	
	163	98,00	49,00	2,00		1,7	2,2	0,20	0,02	
3 Пуришу	218	98,50	65,67	1,50		1,1	1,8	0,15	0,01	
	329	99,00	99,00	1,00		0,6	1,6	0,12	0,01	
	100	95,35	20,51	4,65	14,50	6,7	23,5	0,98	0,08	
	117	96,00	24,00	4,00		3,3	11,5	0,53	0,03	
	134	96,50	27,57	3,50		2,5	7,9	0,40	0,02	
	158	97,00	32,33	3,00		1,9	5,0	0,33	0,01	
	190	97,50	39,00	2,50		1,4	3,6	0,26	0,01	
	239	98,00	49,00	2,00		1,0	2,6	0,23	0,01	
	320	98,50	65,67	1,50		0,8	2,0	0,18	0,01	
	483	99,00	99,00	1,00		0,6	1,7	0,15	0,004	

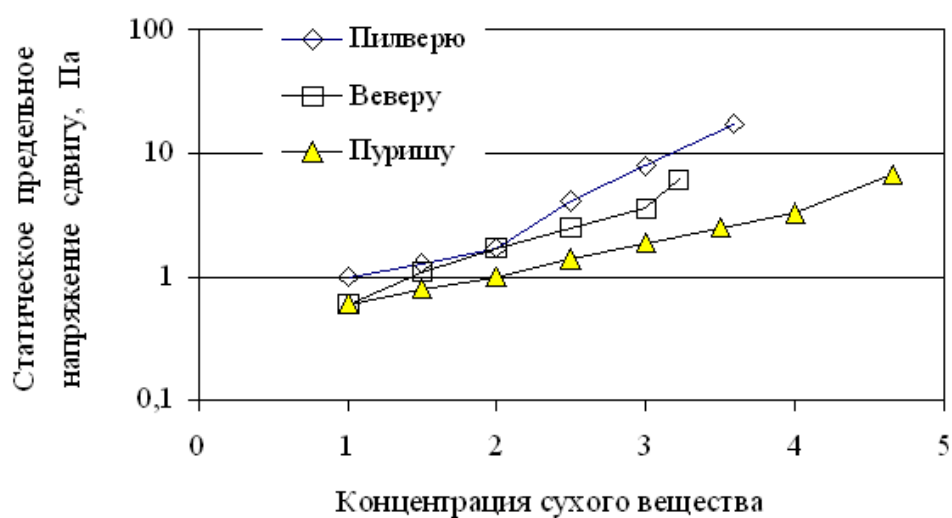


Рисунок 1.3 - График зависимость статического предельного напряжения сдвига от концентрации сухого вещества.

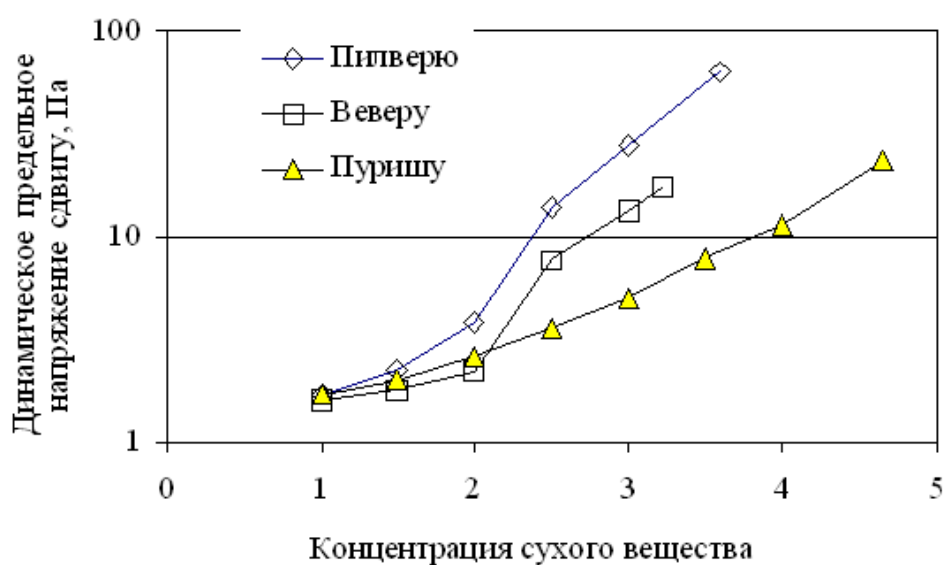


Рисунок 1.4 - Зависимость динамического предельного напряжения сдвига от концентрации сухого вещества

Единицы измерения показывают, сколько килограммов воды приходится на 1 кг сухого вещества сапропеля. Влажность и влагосодержание связаны между собой следующими соотношениями:

$$W = w / (100 - w), \quad (1.3)$$

$$w = 100 \times W / (1+W) \quad (1.4)$$

Концентрация сухого вещества СВ:

$$\text{СВ} = 100 - w \quad (1.5)$$

Влажность проб сапропеля определена согласно ГОСТ 11305-83. Сушку сапропеля производили в сушильном шкафу при температуре 105 °С.

Зольность A^c (%) – выраженное в процентах отношение массы золы, содержащейся в сапропеле m_z , к массе сухого вещества сапропеля m_c :

$$A^c = (m_z / m_c) \times 100 \quad (1.6)$$

Зольность проб сапропеля определена согласно ГОСТ 11306-83. Озоление сапропеля производили в муфельной печи при температуре 900° С. Работы были выполнены в лаборатории Академии наук Белоруссии под руководством д.т.н. Курзо Б.В. Представленная на рисунке 1.5 типичная реограмма показывает зависимость между напряжениями сдвига τ и развивающимися деформациями ε жидко-образной системы, какой является сапропель.

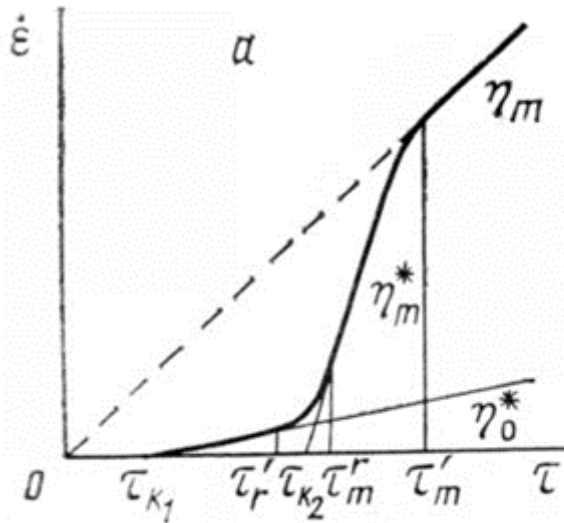


Рисунок 1.5 - Типичная реограмма сапропеля

Здесь $\tau_{к1}$ – статическое предельное напряжение сдвига, $\tau_{к2}$ – динамическое предельное напряжение сдвига. Пластическая и динамическая вязкости соответственно:

$$\eta_o^* = (\tau - \tau_{к1}) / \varepsilon \quad (1.7)$$

$$\eta_m^* = (\tau - \tau_{к2}) / \varepsilon \quad (1.8)$$

Определение реологических характеристик предоставленных образцов произведено на цилиндрическом ротационном вискозиметре Rheotest 2.1 коаксиальными цилиндрическими измерительными устройствами при температуре +20°C.

В зависимости от влажности исследуемого сапропеля использованы цилиндрические устройства (N с диаметром цилиндра 10,6мм, S1 с диаметром 10мм и S2 с диаметром конусного цилиндра 30мм с конусом 1 градус) различающиеся по геометрическим размерам. С трехкратной повторяемостью снимали зависимость между напряжением сдвига и скоростью сдвига во всем диапазоне от 0,1 до 437,4 с⁻¹. Скорость сдвига указана в прилагаемой к инструкции по эксплуатации таблице ступеней скоростей вращения. Согласно инструкции по эксплуатации прибора напряжение сдвига τ :

$$\tau = z \times \alpha, \quad (1.9)$$

где z – постоянная цилиндра ($\times 10^{-1}$ Па);

α – отсчитываемое значение шкалы на индикаторном приборе (делений шкалы).

Постоянная цилиндра, зависящая от геометрических размеров цилиндрической системы и от постоянной упругости пружины динамометра заимствована из инструкции по эксплуатации. Исходная влажность, влагосодержание, концентрация сухого вещества и зольность представлены в первой строке для каждого озера (см. табл. 1.27). Затем добавлялась вода с таким расчетом, чтобы относительная влажность увеличивалась на 0,5 % (соответственно концентрация сухого вещества в образце снижалась на 0,5 %). Все показания снимались с образцов сапропеля, температура которых соответствовала температуре помещения, в котором они находились, а именно, +20°C. Однако, температура естественных условий залегания образцов в залежи сильно отличается от температуры взятых образцов в лаборатории. А кроме температуры с глубиной залегания изменяются и другие физические показатели сапропеля, причем, одни из них уменьшаются, как, например, температура, а другие, наоборот, увеличиваются, как показано ниже (табл. 1.28).

Таблица 1.28 - Физические показатели сапропеля, изменяющие своё значение с глубиной залегания, и их зависимость между собой

№	Показатели в сторону возрастания (+)	Показатели в сторону уменьшения (-)
1	Минерализация	Содержание органики
2	Плотность	Влажность
3	Структурная вязкость	Температура
4	Напряжение сдвига	

При отборе проб было установлено, что сапропель в залежи имеет очень низкую температуру даже в самое жаркое время года, при температуре окружающего воздуха $28\div 32^{\circ}\text{C}$ температура сапропеля в залежи оставалась на уровне $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$, и это в Прибалтике, где не самые суровые зимы.

С учётом того, что лабораторные показатели снимаются при 20°C , а сапропель в залежи имеет температуру ниже $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$, необходимо вносить соответствующие корректирующие поправки в уравнения с реологическими параметрами.

Анализ литературных источников показал, что исследованиями влияния температуры на реологические показатели сапропелей занимались Лопотко М.З. [115], Косаревиц И.В. [116], Ляшевич В.В. [117], Лиштван И.И., Волков Г.Г. [118]. Эти исследования показали, что с увеличением температуры вязкость и напряжение сдвига сапропелей уменьшаются, а с уменьшением температуры увеличиваются.

Используя результаты [116] (см. табл. 1.29) анализов влияния температуры на реологические свойства дисперсий торфа и сапропелей (Косаревиц, 1990), автором было установлено, что пластическая вязкость μ_p органических сапропелей увеличивается на 56% (с $12,8\text{мПа}\cdot\text{с}$ при 20°C до $19,97\text{мПа}\cdot\text{с}$ при 0°C), а предел текучести τ_0 возрастает на 20% (с $5,04\text{Па}$ при 20°C до $6,05\text{Па}$ при 0°C). Это позволило установить значение температурного коэффициента увеличения пластической вязкости μ_p в размере $k_{\mu}^t=1,56$ и значение температурного коэффициента повышения предела текучести τ_0 в размере $k_{\tau}^t=1,2$.

Таблица 1.29 – Влияние температуры на реологические свойства дисперсий сапропелей [116]

$t, ^\circ\text{C}$	Реологические параметры							
	$\tau_1, \text{Па}$	$\mu_0, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\varphi_1, \text{с}^{-1}$	$\tau_r, \text{Па}$	$\tau_0, \text{Па}$	$\mu_{\text{пл}}, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$\varphi_э, \text{с}^{-1}$	$\mu_{\text{эф}}, \text{мПа}\cdot\text{с}$
Органический сапропель, $C_{\text{т.ф.}}=2,0\%$								
0	3,39	0,42	8,2	5,40	6,05	19,97	302,9	23,10
10	3,02	0,37	8,1	4,37	5,38	15,37	350,1	18,08
20	2,69	0,35	7,6	3,90	5,04	12,80	393,3	15,80

Значения реологических показателей, приведенные ранее в таблице 1.26, откорректированы с учетом температурных коэффициентов и приведены в таблице 1.30.

Таблица 1.30 - Реологические показатели сапропелей в условиях залежи

№	Название Озера	Вязкость, Па с				Напряжение сдвига, Па			
		Пластическая		Динамическая		Статическое		Динамическая	
		20°C $\mu_{\text{пл}}$	$k_\mu^t=1,56$ $\mu_{\text{пл}}^t$	20°C $\mu_{\text{дин}}$	$k_\mu^t=1,56$ $\mu_{\text{дин}}^t$	20°C τ_0	$k_\tau^t=1,2$ τ_0^t	20°C $\tau_{\text{дин}}$	$k_\tau^t=1,2$ $\tau_{\text{дин}}^t$
1	Веверу*	2,46	3,843	0,06	0,094	14,43	17,32	54,6	65,52
2	Малта	1,0	1,562	0,07	0,109	11,3	13,56	28,0	33,6
3	Нотра	1,6	2,499	0,1	0,156	14,5	17,4	38,0	45,6
4	Пильвелю	3,42	5,342	0,07	0,109	17,4	20,88	63,2	75,84
5	Убаговас	6,7	10,456	0,18	0,281	26,5	31,8	73,0	87,6
6	Пуришу*	3,0	4,686	0,19	0,297	39,9	47,88	82,0	98,4
7	Сынове	2,24	3,499	0,18	0,281	68,2	81,84	124,0	148,8
8	Вейно	18,5	28,86	0,18	0,28	90,0	108,0	204,0	244,8
9	Любче	3,64	5,69	0,28	0,437	118,0	141,6	221,5	265,8
10	Савельево	5,3	8,28	0,68	1,062	150,1	180,1	393,0	471,6

*Для озер №1(Веверу) и №6 (Пуришу) расчет выполнен с наиболее высокими показателями для нижних слоев залежи (см. табл. 1.26).

На основании табличных данных построен график (см. рис. 1.6) изменения вязкости сапропеля для пяти озер №2(Малта), №4(Пильвелю), №5 (Убаговас), №6 (Пуришу), №8 (Вейно).

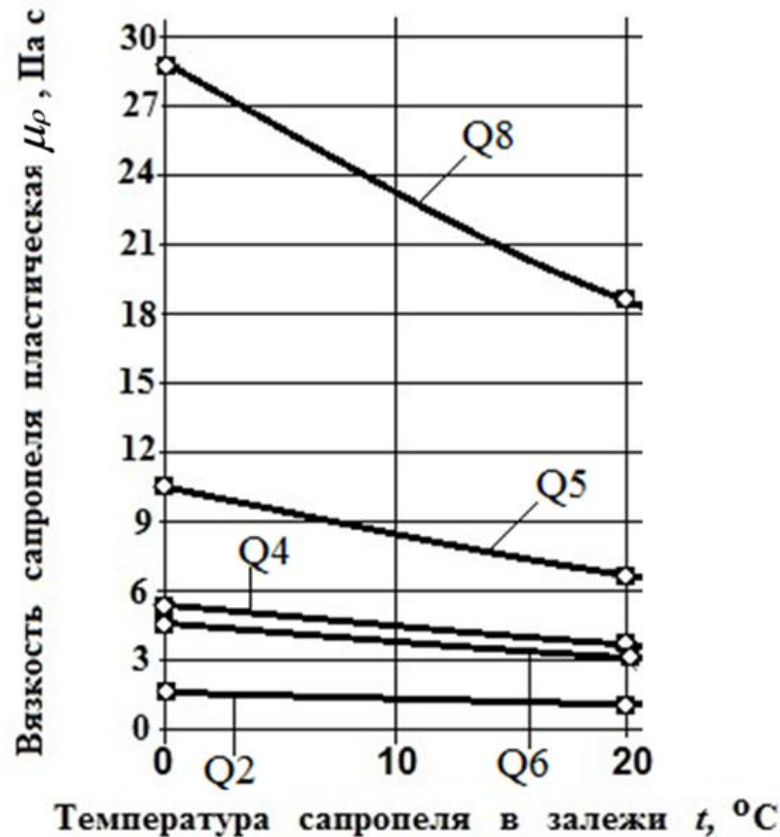


Рисунок 1.6 - График изменения вязкости сапропеля в зависимости от изменения его температуры

1.3. Выводы по главе 1

1. Сапропель обладает высоким биоэкономическим потенциалом, еще полностью не раскрытым, и является перспективным источником сырья для нанотехнологий и новых технологий в медицине, промышленности, животноводстве и сельском хозяйстве с огромной сырьевой базой, но в силу своей природной обводненности и высокой влажности является крайне уязвимым к любым видам техногенного воздействия.

2. Добыча сапропеля, который в естественном сложении является уникальной «живой» системой, требует принципиально нового технологического подхода. Этот подход должен обеспечивать решение триединой задачи: сохранение природных потребительских свойств, оставление минимального экологического следа и наличие экономической эффективности.

3. По результатам исследования реологических свойств сапропеля получена следующая научная новизна: впервые установлены повышающие температурные коэффициенты для напряжений сдвига $k_{\tau}^t = 1,2$ и пластической вязкости $k_{\mu}^t = 1,56$ и предложено их применение в уравнениях потерь напора на трение и расхода сапропеля в напорном трубопроводе для корректности выполнения расчётов.

Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать *первое научное положение*: при математическом моделировании потерь напора и расхода сапропеля естественной влажности необходимо вводить температурные коэффициенты напряжения сдвига τ_0 и пластической вязкости μ_p , определенных при стандартной температуре 20°C, поскольку установлено, что при снижении температуры сапропеля до 0°C его напряжение сдвига возрастает на 20%, а вязкость – на 56%, следовательно, для корректного расчёта следует применять коэффициенты $k_{\tau}^t = 1,2$ и $k_{\mu}^t = 1,56$, умножая на них лабораторные значения τ_0 и μ_p .

4. Приведенные выше данные подтверждают тот факт, что сапропель – это чрезвычайно разнородный материал, чьи свойства могут варьироваться в очень широких пределах в зависимости от состава, влажности и истории формирования. Это позволяет сформулировать ключевую технологическую проблему и единственно возможный путь её решения.

Сапропель с предельным напряжением сдвига до $\tau_0 = 600$ Па (в залежи) – это структурированная полутвердая масса, которая не течёт самостоятельно и не может быть перекачана традиционными методами, поэтому автор предлагает идею механического метода добычи сапропеля и предполагает, что метод должен работать, если будет включать в себя следующие этапы:

1. Механическое разупрочнение: резание, деформирование, рыхление.

Это основной и обязательно первый этап подготовки полутвердого и пластичного сапропеля к транспортированию.

Цель данного этапа — это физически разрушить сплошную структуру материала, преодолеть то самое высокое удельное сцепление и превратить

монолитный пласт в отдельные куски, стружки породы, и подготовить к следующему этапу.

Оборудование, которое может быть использовано для достижения цели, не должно иметь быстро трущихся, быстровращающихся, быстродвигающихся элементов, не должно создавать быстрых потоков, чтобы обеспечить отсутствие взмучивания и взвеси в зоне забоя.

В результате такого механического разупрочнения материал все еще не течет, но его сопротивление сдвигу локально снижается в зоне разрушения, и он становится пригодным для захвата транспортирующим органом.

2. Воздействие вибрации (вибрационная релаксация).

Это высокоэффективный способ временного снижения вязкости и сопротивления сдвигу. Целью данного воздействия является передача материалу колебания высокой частоты, что нарушает структурные связи между частицами (проявляется эффект тиксотропии – разжижение при механическом воздействии и загустевание в покое). Источником такого воздействия могут быть вибрационные питатели, часто используются в комбинации с резанием (виброфрезы) или на входе в насос. В результате масса в зоне вибрации становится более текучей, что значительно снижает усилие, необходимое для ее всасывания или проталкивания.

3. Транспортирование в трубе под высоким давлением.

Этот этап, который становится возможным только после первых двух, потому что для придания течения такой материи необходимо создать в трубопроводе давление, которое создаст напряжение сдвига в материале, значительно превышающее τ_0 .

Используемым оборудованием в таком случае должны быть не центробежные насосы (они не создают нужного давления и не могут всосать такую массу), а объемные насосы, к которым относятся:

- шнековые, подходят для абразивных полутвердых и твердых сред, они не всасывают, а захватывают материал и механически проталкивают его вдоль оси шнека, создавая очень высокое давление на выходе;

- винтовые прогрессивно-полостные (винтовые эксцентриковые или ЭВН) идеально подходят для вязких, абразивных и структурированных сред, они всасывают материал и механически проталкивают его вдоль оси гироторной пары, создавая очень высокое давление на выходе;
- поршневые и плунжерные насосы, создают самое высокое давление, но могут быть чувствительны к абразивности;
- мембранные насосы, хороший вариант для менее абразивных, но очень плотных паст.

Течение таких сред будет не столько ламинарным, сколько структурно-ламинарным или пробкообразным; масса будет двигаться по трубе как единый деформированный цилиндр (пробка) с очень тонким слоем смазки у стенок трубы; потери на трение при таком режиме будут высокими, отсюда и требование к высокому давлению перекачивающего насоса.

Таким образом выстраивается следующая технологическая цепочка для сапропеля с полученным максимальным значением $\tau_0^t = 600$ Па в залежи (с учётом предложенного температурного коэффициента $k_T^t = 1,2$):

1. добыча механическим резанием и рыхлением (экскаватор, драглайн, скрепер) с предварительной подготовкой измельчением, резанием, но без добавления воды, для небольшого снижения τ_0 и увеличения подвижности;
2. подача в насос через вибрационный питатель, или шнековый конвейер, или за счет перепада давления (переход из зоны высокого давления в зону низкого давления);
3. транспортирование объёмным насосом (шнековым, винтовым, поршневым) по трубопроводу под высоким давлением.

Такой сапропель ведет себя уже не как жидкость, а как мягкое твердое тело. Работа с ним требует не гидромеханических, а скорее механо-гидравлических подходов, более характерных для горной добычи или переработки полезных ископаемых, чем для перекачки жидкостей.

ГЛАВА 2. СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ДОБЫЧИ САПРОПЕЛЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ

2.1. Аналитический обзор существующих способов и средств добычи сапропеля из-под покрывающего слоя и их недостатков

Проблемой, связанной с выемкой, гидротранспортированием, сушкой и использованием сапропеля занимаются различные научно-исследовательские и проектные организации, в том числе Институт торфа АН Белоруссии, ВНИИПИ ГидроТрубопровод, ВНИИГидромеханики и мелиорации им. Костякова А.Н., Тверской государственный технический университет и другие учреждения. Исследованиями технологии освоения месторождений сапропеля, его переработки и использования занимались в 60-х годах прошлого века Д.Л. Меламут, И.А. Фомин, в 80-х М.З. Лопотко, А.П. Лецко, С.К. Дубинин, Г.А. Евдокимова, Н.В. Кислов, в 90-х В.Б. Добрецов, Д.Н. Логицкий, В.А. Зайцев, В.А. Холднякова, В.К. Егоров, В.Л. Каменецкий, С.Л. Харченко, А.В. Согин, Н.Н. Арефьев, И.В. Косаревич, Б.В. Курзо, А. Какитис, А.П. Ющенко, И.М. Ялтанец и др., включая автора данной диссертации. На протяжении длительного времени было разработано множество технических средств гидро-механизированной добычи сапропеля, главной задачей которых являлось повышение концентрации твердого в транспортируемой гидросмеси и снижение экологической нагрузки на аквасистему озера. В результате анализа были систематизированы технические средства для технологии выемки сапропеля из-под покрывающего слоя (рис. 2.1), как наиболее безопасной для экологии.

1.1.1. Известно устройство для очистки водоемов и добычи сапропеля, описанное в патенте RU №2256035 (Е 02 F 5/28,) [119]. Данное устройство включает плавсредство (земснаряд) с рабочим органом, содержащим грунтозаборное устройство (ГЗУ), выполненное в виде колоколообразного корпуса с пилообразной окантовкой в нижней части, с вмонтированным в него, по крайней мере, двумя трубопроводами для подвода сжатого воздуха и отводящей

всасывающей трубой с турбовентилятором в верхней части.

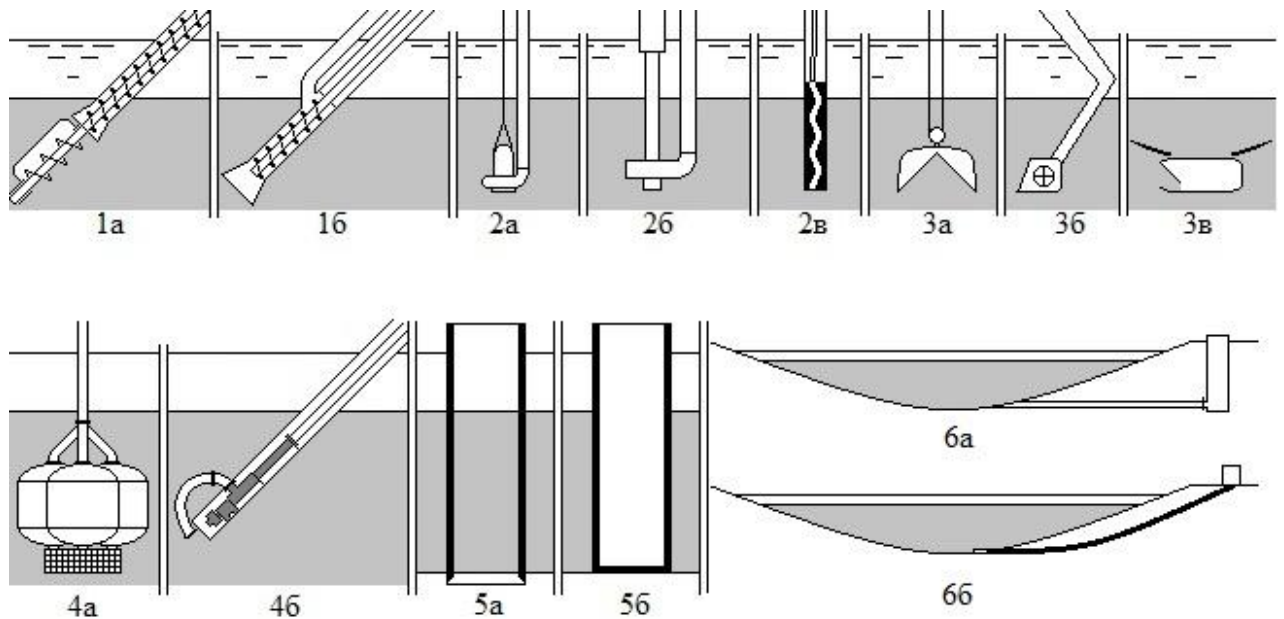


Рисунок 2.1 - Систематизация средств и способов выемки сапропеля из-под покрывающего слоя: 1а-фрезерно-шнековый (К.П. Гвелесиани, А.А. Гачечиладзе), 1б-шнековый насос с конусным скрепером и трюмным ЭВН (Н.Н. Арефьев), 2а-погружной центробежный насос, 2б-погружной НППН, 2в-полупогружной ЭВН, 3а- ковшевой двухчелюстной, 3б-ковшевой со встроенным шнеком и подающим НППН, 3в-ковш канатного скрепера (В.П. Курзо), 4а-пневматический камерный насос (В.А. Дементьев), 4б-полупогружная камера со встроенным ЭВН (В.А. Дементьев), 5а-погружной колодец (С.М. Штин), 5б-погружной колодец с герметичным днищем, 6а-шурф-шtolья (В.Б. Добрецов), 6б-скважина с погружным ЭВН (СПГГИ).

В связи с тем, что грунтозаборное устройство выполнено в виде колоколообразного корпуса, который может перемещаться и погружаться в сапропель только вертикально, выработка сапропелевой залежи будет вестись так называемым вертикально-стволовым способом со всеми присущими ему недостатками. При вертикальном внедрении корпуса в толщу сапропеля он движется вниз и образует над собой полый вертикальный цилиндрический ствол, заполняемый водой, т. к. сапропель, в отличие от других илистых осадков, обладает очень высокой структурной вязкостью и поэтому не течет в естественном сложении. Со временем стенки между пустыми стволами насыщаются свободной

водой, теряют свою устойчивость и оползают, что приводит к повышению естественной влажности сапропеля при следующей заходке земснаряда. Работа данного устройства будет происходить в циклическом режиме, что значительно снижает производительность добычи. Поднятие колоколообразного корпуса из ствола будет приводить к образованию облака взвеси, что нарушит экологический баланс водоема. Опускание колокола будет происходить под собственным весом, а подъем и перестановка его на новое место потребует плавкран большой грузоподъемности. Как показала практика применения вертикальных полупогружных ГЗУ, после нескольких минут поступления СЕВ внутрь ГЗУ, происходит прорыв сапропелевой гидросмеси внутрь ГЗУ, поскольку из-за большой текучести вода успевает быстрее проникнуть в ГЗУ чем СЕВ, сопротивление сдвигу которого в тысячи раз выше, чем у воды.

2.1.2. Известно устройство для добычи и переработки сапропеля, описанное в патенте RU №2233821 С2 (7 С 05 F 7/00) [120], где грунтовой насос размещен в герметичной капсуле, закрепленной на нижнем конце полой вертикально ориентированной штанги, а зона забора сапропеля ограничена коробом П-образной формы, накрывающим насос с целью ограничения захвата свободной воды из водоема. В связи с тем, что сапропель обладает высокой структурной вязкостью, работа данного заборного устройства возможна только при его вертикальном перемещении в сапропелевой залежи с образованием вертикальных стволов прямоугольного сечения. Поэтому данному устройству присущи все недостатки, указанные для устройства по патенту RU №2256035.

2.1.3. Способы, разработанные в СПГГИ (ТУ) и изложенные в работе [2], как экологически чистые, включая добычу сапропеля с использованием мобильных модулей-блоков с погружными грунтозаборными агрегатами и скважинный способ отработки иловой залежи, не нашли внедрения, т. к. имеют ряд существенных недостатков.

Первый названный способ имеет следующие существенные недостатки:

- очень металлоемок, очень большое количество металлических

поверхностей находится в контакте как с озерной, так и с атмосферной влагой, будет корродировать от длительной, тем более, круглогодичной эксплуатации, оказывая негативное воздействие на акваторию озера;

- езда автотранспортных средств будет негативно влиять на окружающую среду как газовыми выхлопами двигателей, так и частицами дорожного грунта, попадающими в акваторию с колес автотранспорта;

- модульные блоки под добычной агрегат, сгуститель, обезвоживатель, фасовочно-упаковочный блок будут иметь довольно внушительные размеры, т.к. размещаемое в них оборудование имеет большой вес (до 10 тонн веса) и большие размеры, а также потребуют подвода значительного объёма электроэнергии по кабелю длиной в несколько сот метров и более, или подвозки дизтоплива в случае использования бортовых дизель-генераторов;

- при работе зимой потребуется производить обогрев всех этих помещений довольно большой площади, что потребует ещё больших энергозатрат;

- наличие такого большого числа механического оборудования будет оказывать большое негативное звуковое воздействие на экосистему озера круглый год, так как вода является отличным проводником звука;

- при большой площади озера длина и стоимость понтонной трассы сильно возрастёт, а эксплуатация её в дождливое и зимнее время будет не безопасной;

- выемка сапропеля естественной влажности с одной стоянки будет сильно ограничена структурной вязкостью и мощностью пласта, и будет вестись со всасыванием свободной воды, что потребует её возврата и сильно осложнит процесс добычи;

- в конечном счете использование данного способа может оказать еще большее негативное воздействие на экологию озера, чем применение обычного земснаряда.

2.1.4. Второй указанный способ скважинной отработки сапропелевой залежи [2] практически нереализуем из-за фактической длины штольни, которая может составлять несколько сотен метров, поскольку должна соединять береговой шурф

с самой глубокой точкой озера. Кроме этого, предельное (пластическое) напряжения сдвига τ_0 , принятое в приведенных расчётах на [2, стр. 108], составляет всего 2,4 Па, что в несколько десятков раз ниже фактических значений, приведенных ниже в таблице 1.5, которые в условиях залежи достигают значений в пределах 150 Па.

2.1.5. При экскаваторном способе добычи, или грейферном, основным технологическим недостатком выемочно-погрузочных операций является их цикличность, сопровождаемая большими потерями сапропеля и образованием облака взвеси. При этом с возрастанием глубины разработки этот недостаток проявляется все сильнее, поскольку увеличивается непроизводительное время спускоподъемных операций. Циклическими также являются транспортирование сапропеля от экскаватора до берега водоема и его последующая перегрузка для дальнейшего перемещения до пункта переработки. Достаточно длительной по времени является и последующая переработка сапропеля, в результате чего получение конечного продукта осуществляется за период от 9 месяцев до 2 лет.

2.1.6. Использование погружных низконапорных грунтовых насосов ПНГН конструкции Ленинградского Государственного Университета позволяет вести выемку сапропеля на сапропелях текучей консистенции с их непосредственной загрузкой в бункер земснаряда или баржу. С учетом того, что в большинстве случаев текучестью обладает лишь поверхностный слой залежи, имеющий высокую влажность, применение таких насосов не решает вопроса промышленного освоения сапропелевых месторождений в полном объёме.

2.1.7. Все попытки осуществить добычу сапропеля земснарядами, оснащенными грунтовыми центробежными насосами, так популярными в гидромеханизации при подводной добыче песчано-гравийных смесей, приводят к разбавлению сапропеля водой 1:4 - 1:25, поскольку центробежные насосы не могут преодолеть барьер вязкости в $200 \text{ сП} = 200 \text{ мПа} \cdot \text{с} = 0,2 \text{ Па} \cdot \text{с}$ [16], [17], [18], [19], [20], при этом вязкость СЕВ может превосходить этот показатель до 150 раз (см. табл. 1.30).

2.1.8. Следует остановиться на вакуум-эжекционной (иногда её называют вакуумно-эжекторной, вакуумно-всасывающей или просто эрлифтной). Это уникальная технология, кардинально отличающаяся от схем с гидромонитором и насосом (Ющенко и др., 1980).

Физический принцип и суть метода - технология основана на использовании энергии сжатого воздуха (или воды) для создания разрежения (вакуума) и подъема пульпы по всасывающей трубе за счёт разности гидростатических давлений. Конструктивная схема установки включает в себя заборное устройство, всасывающую трубу (пульпопровод), эжектор (вакуум-насос), сепаратор (приемный бак), напорный пульпопровод, место для укладки (отстойник), а также могут быть дожимные насосные станции

Заборное устройство (всасывающий наконечник, «головка») располагается на илистом дне, имеет форму раструба с решёткой для предотвращения засасывания крупных предметов, часто снабжено механическим или гидравлическим рыхлителем для предварительного разрушения структуры сапропеля прямо перед всасыванием.

Всасывающая труба (ствол эрлифта) — это вертикальная или наклонная труба, по которой пульпа поднимается от дна к эжектору. В классическом эрлифте сжатый воздух подаётся в нижнюю часть этой трубы. В вакуум-эжекционной схеме воздух (или вода) работает в эжекторе, установленном наверху.

Вакуум-эжектор (сердце системы) это струйный аппарат, не имеющий движущихся частей. Принцип работы: поток рабочей жидкости (сжатый воздух от компрессора или вода от насоса высокого давления) проходит через сопло эжектора с высокой скоростью. Это создаёт зону резкого разрежения в камере смешения, куда подсоединён всасывающий патрубок от пульпопровода. Пульпа засасывается, смешивается с рабочим потоком, и смесь сбрасывается в сепаратор.

Сепаратор — это приёмная ёмкость (отстойник-гаситель), где происходит отделение воздуха (или рабочей воды) от сапропелевой пульпы. Пузырьки воздуха лопаются, а пульпа, потерявшая кинетическую энергию, осаждается на дно

сепаратора, откуда уже может самотеком или с помощью дожимного насоса (обычно шнекового) отправляться дальше по напорному пульпопроводу.

Компрессорная станция (или насос высокого давления) обеспечивает эжектор рабочим агентом.

Преимущества метода и почему его рассматривали для сапропеля):

1. нет контакта абразивной пульпы с рабочими органами насоса, а это решает главную проблему износа центробежных и даже шнековых насосов на песчаных сапропелях;
2. простота и ремонтпригодность, так как эжектор почти не ломается, а заменить сопло дешевле и проще, чем ремонтировать сложный насос;
3. возможность добычи с больших глубин, поскольку глубина всасывания теоретически ограничена только атмосферным давлением (практически 7–9 метров водяного столба для чистой воды), а для более плотной пульпы глубина меньше, но всё равно значительна;
4. возможность регулирования концентрации, когда меняя степень разрежения и работу рыхлителя, можно контролировать плотность засасываемой пульпы;
5. хорошая работа с жидкими и маловязкими сапропелями, так как для сапропелей естественной влажности с высокой текучестью (влажность >92-93%) метод был весьма эффективен.

Ограничения и проблемы данного метода (Ющенко и др., 1980):

1. низкий КПД (10–25%), поскольку основные энергозатраты идут на сжатие воздуха, а не на подъём пульпы, и возникают большие потери энергии в струе эжектора; метод энергетически невыгоден для транспортирования на большие расстояния по горизонтали;
2. чувствительность к реологическим свойствам, поэтому для структурированных вязко пластичных сапропелей ($\tau_0 > 50\text{--}100$ Па) метод был плохо применим: чтобы засасывать такую массу, нужно создавать огромное разрежение, и в вертикальном стволе может образоваться пробка, которая не разрушится вакуумом и оборвёт

столб пульпы; даже подняв такую пульпу, её потом крайне сложно транспортировать по горизонтальному участку без мощного дожимного насоса;

3. зависимость от глубины водоёма, поскольку оптимальная глубина для работы классического эрлифта/вакуумного забора составляет 5-20 метров, а на мелководьях (<3м) эффективность падает;

4. необходимость в дополнительном оборудовании, так как после сепаратора почти всегда требуется дожимная насосная станция для подачи пульпы в место укладки.

Поэтому метод рекомендовался не для основной работы, а на стадии добычи (подъёма) на карьере в составе комбинированных схем.

Схема вакуум-эжекционный подъём + дальнейшая перекачка шнековым насосом, когда эжектор поднимает пульпу с глубины водоёма на береговую площадку в приёмный бункер-сепаратор. Из бункера шнековый (винтовой) насос забирает пульпу и подаёт её по напорному трубопроводу к месту складирования. Для маловязких, разжиженных сапропелей, например, после предварительного гидравлического разупрочнения, метод мог использоваться как основной на коротких дистанциях (до 100-200 м).

Была попытка вести разработку сапропеля с помощью эрлифтного устройства на озере Палиастоме в Грузии (Нацвлишвили Г. М.). Несмотря на то, что эрлифтовые устройства могут работать на больших глубинах (10-70м), широкого внедрения для добычи сапропелей они не получили, поскольку не позволяют вести сплошную выемку сапропеля, приводят к большой потере полезного ископаемого, имеют очень узкий спектр по вязкости (могут работать только на сильно текучих сапропелях), не решают вопроса гидротранспорта сапропеля.

Таким образом можно сделать вывод, что вакуум-эжекционная добыча это узкоспециализированная, аппаратно простая, но энергозатратная технология. Её главная ниша в добыче сапропеля - подъём маловязкой пульпы с глубины, особенно в условиях, где применение погружных насосов затруднено из-за

абразивности или риска засорения.

В современном контексте её можно сравнить с эрлифтом (airlift), широко используемым в горной добыче и морской глубоководной гидротехнике. Однако для подавляющего большинства сапропелей естественной влажности, обладающих высокой структурной прочностью, советские исследователи во главе с Ющенко А. П. доказали преимущество схем с гидромеханическим рыхлением и прямым объемным (шнековым) насосным транспортированием.

2.1.9. Для добычи высоковязкого сапропеля Тбилисский комплексный отдел ВНИИПИгидротрубопровода на базе существующего земснаряда ЗРС-Г разработал экспериментальную установку, где вместо стрелы земснаряда было установлено ГЗУ в виде шнека (рис. 2.2)

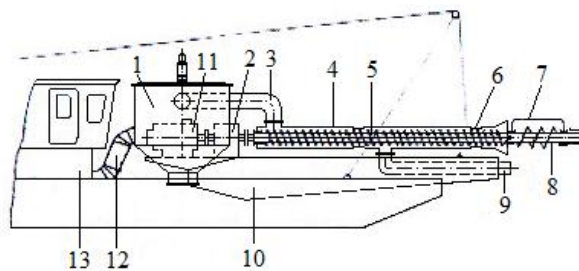


Рисунок 2.2 - Схема экспериментальной установки на базе ЗРС-Г: 1 - бункер-смеситель, 2 - редуктор, 3- трубопровод, 4 - корпус ГЗУ, 5 - вал транспортирующего шнека, 6 - подшипники скольжения, 7 - кожух фрезы, 8 - грунтозаборная головка, 9 - патрубок для подсоса воды, 10 - рама, 11 - электродвигатель, 12 - трубопровод, 13 - грунтовой насос.

ГЗУ состоит из грунтозаборной головки 8 и корпуса 4. Грунтозаборная головка представляет собой режущую винтообразную фрезу, закрепленную с одного конца в подшипниках скольжения на раме 10 корпуса, а с другого - на валу транспортирующего шнека 5. Аналогичное грунтозаборное устройство описано ниже.

2.1.10. Заслуживает внимания решение, предложенное док. тех. наук Арефьевым Н. Н. [121],[122],[123],[124], который предложил использовать шнековое грунтозаборное устройство для выемки сапропеля и трюмный эксцентриковый винтовой насос для его перекачки на берег по напорному

плавающему трубопроводу, реализовав эту идею на земснаряде 258.60-2СШ (рис.2.3).

Применение трюмного ЭВН (эксцентрикового винтового насоса) позволяет решить проблему гидро-транспортирования сапропеля, но вопрос выемки сапропеля без всасывания воды так же как в 1.1.9 остался не решенным, поскольку для выемки СЕВ на данном земснаряде было предложено так же использовать ГЗУ в виде шнекового насос 4 с коническим скрепером, установленным на погружной раме земснаряда.

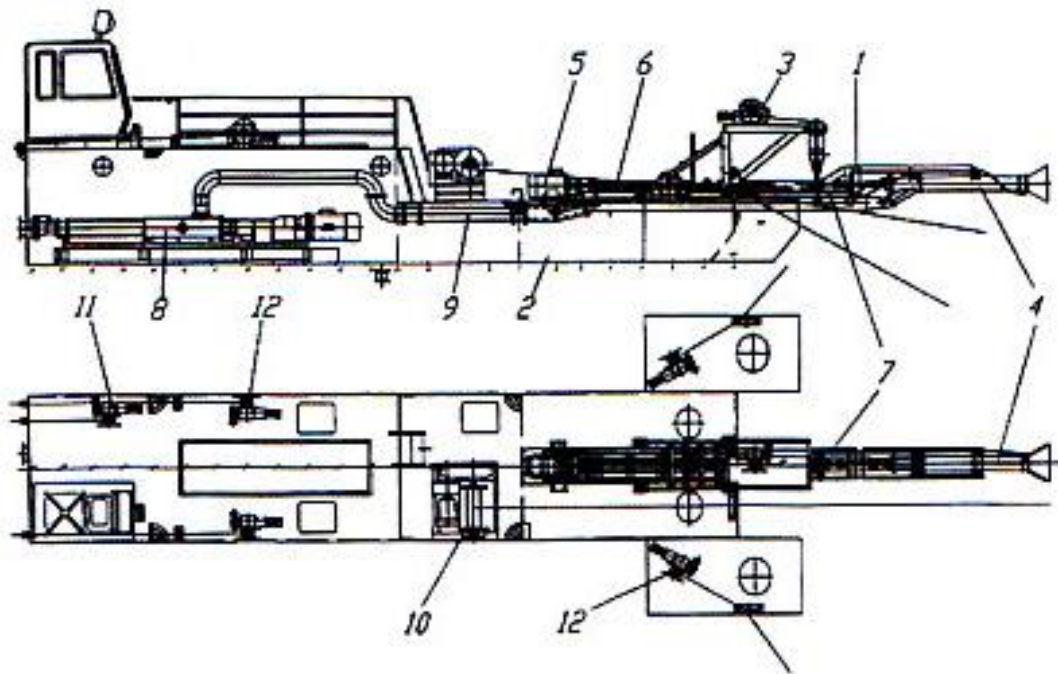


Рисунок 2.3 - Схема земснаряда проекта 258.60СШ: 1 – ГЗУ, 2 – корпус земснаряда, 3 – рамоподъемное устройство, 4 – шнековый насос, 5 – электродвигатель, 6 – валопровод, 7 – рама, 8 – эксцентриковый винтовой насос, 9 – трубопровод, 10 – носовая лебедка, 11 – кормовая лебедка, 12 – четыре папильонажные лебедки.

Заявленная производительность земснаряда в $100 \text{ м}^3/\text{час}$ с транспортировкой на 800 м при диаметре напорного трубопровода в 200 мм с рабочим давлением трюмного насоса в 1,1МПа является не совсем корректной для транспортировки СЕВ, и такую производительность может обеспечить только гидросмесь с разбавлением сапропеля водой или сапропель высокой естественной влажности

(97%) с низким напряжением сдвига и низкой вязкостью.

Ниже на рисунке 2.4 показан общий вид такого земснаряда в Тюмени, оснащенного шнековым нагнетателем, а на рисунке 2.5 показан вид шнекового нагнетателя со стороны конического скрепера. Также показан (см. рис. 2.6) общий вид шнекового нагнетателя, установленного на земснаряде проекта 258.60СШ, с максимальной глубиной разработки 5 метров с трюмным вариантом эксцентрикового винтового насоса (рис. 27) и выходом сапропелевой пульпы из напорного трубопровода (рис.2.8).



Рисунок 2.4 - Общий вид земснаряда 258.60-2СШ, оборудованного шнековым грунтозаборно-нагнетательным устройством и трюмным ЭВН (село Упорово, Тюмень).



Рисунок 2.5 - Вид шнекового нагнетателя со стороны конического скрепера.



Рисунок 2.6 - Вид шнекового нагнетателя установленного на раме земснаряда 258.60-2СШ.



Рисунок 2.7 - Вид стандартного эксцентрикового винтового насоса, установленного в трюме земснаряда в Тюмени.



Рисунок 2.8 - Закачка сапропелевой гидросмеси в земляной чек-отстойник в Тюмени.

Турбулентность гидросмеси с расширением струи после выхода из трубопровода, а также её бурление при вхождении в отстойник говорят о высокой текучести гидросмеси и о сильном разбавлении сапропеля водой. Если бы земснаряд транспортировал сапропель натуральной влажности, тогда выход его из трубы должен происходить ламинарным потоком с ненарушенным внутренним ядром в виде гладкого конусного стержня без турбулентных завихрений, а в отстойнике он сформировал бы конусную поверхность с расходящимися от центра конуса кольцевыми уступами. Но такой картины (см. рис. 2.8), к сожалению, не наблюдается.

Тем не менее, следует отметить, что Арефьев Н. Н. сделал принципиально правильный выбор самого насоса для перекачки сапропелей, поскольку эксцентриковый винтовой насос имеет целый ряд преимуществ и может обеспечить как транспортировку, так и выемку СЕВ при наличии соответствующего грунтозаборного устройства, например, погружной камеры и ковша, что было подтверждено экспериментально в наших проектах.

2.1.11. Заслуживает внимания канатно-скреперная технология разработки сапропеля, используемая в Беларуси. Установка позволяет вести выемку сапропеля без воды даже в вязко-пластичном и туго-пластичном состоянии, и напоминает работу драглайна, но поскольку процесс является цикличным из-за постоянного погружения-продвижения-вынимания ковша, она не отвечает современным требованиям экологии, требует повышенных энергозатрат на преодоление сопротивления ковша перемещению в залежи, и разрешается для разработки только погребенных месторождений сапропеля.

2.1.12. Проблему гидравлического разупрочнения сапропеля в залежи пытались решать применением геотубов для быстрого водоотделения с осаждением взвеси, для чего предлагалось использовать различные виды флокулянтов, связывающие легкие частицы в более крупные и тяжелые агрегаты для увеличения скорости гидравлической скорости осаждения. Но этот метод не нашел применения для добычи сапропеля, так изначально геотубы предназначались для укрепления

береговых откосов от волнового размыва. Они заполнялись песком, имеющим высокую фильтрацию, и выполняли защитную роль (защита береговой линии от разрушения волнами), а для фильтрации сапропелевой пульпы оказались не пригодными, и вот почему.

В начале заполнения геотуба пульпой фильтрация воды через его стенки идет хорошо, но со временем затухает и в скором времени прекращается вообще. При фильтрации воды из внутренней стороны наружу на внутренней стенке геотуба начинает расти и уплотняться слой осажденной взвеси, которая создает на внутренней стенке геотуба плотную рубашку из отфильтрованного сапропеля. И когда эта рубашка достигает толщины в 10-15 см фильтрация воды через неё полностью прекращается.

При оставлении геотуба, наполненного сапропелевой пульпой, на зимний период для проморозки, опять не получается ожидаемого результата. Казалось бы, что сапропель должен замерзнуть зимой внутри геотуба, разорвать морозом структурные связи, а летом после оттаивания отдать всю лишнюю влагу наружу, высохнуть до 60% влажности и быть отправлен в виде товарной продукции покупателям или на дальнейшую переработку. Но этого, к сожалению, не происходит, так как образовавшаяся внутри сапропелевая рубашка обладает очень низкой теплопроводностью, и сапропель зимой внутри не промерзает и влагу летом не отдает, и может находиться таком состоянии несколько лет.

Кроме этого недостатка, эта технология обезвоживания сапропелевой пульпы имеет очень большой экологический недостаток, так как в начальный момент его наполнения пульпой, когда фильтрация обратной воды идет довольно интенсивно, площадка вокруг геотуба становится совсем не экологичной.

В 2013 году в Англии голландская инженерная компания организовала показательный семинар по экологической очистке водоемов от донных илистых отложений. Но на самом деле получился обратный эффект: все увидели технологию как не надо работать, так как экологический след от нее запомнился всем участникам надолго (см. рис. 2.9 и 2.10).



Рисунок 2.9 – Показательный семинар в 2013 году в Англии по экологической очистке водоема с использованием технологии геотубов.



Рисунок 2.10 – Показательный семинар в 2013 году в Англии по экологической очистке водоема с использованием технологии геотубов.

2.2. Анализ опыта эксплуатации погружных грунтозаборных камерных устройств на трех опытно-промышленных предприятиях Латвии

2.2.1. В 2007 году в Латвии на озере Пильвелю был реализован первый проект и запущено первое опытно-промышленное производство по производству торфо-сапропелевых удобрений, описанное в работах автора [125], [126], [127]. Добыча сапропеля велась земснарядом (рис. 2.11), оснащенный пневматическим камерным насосом (ПКН) итальянской фирмы PNEUMA (рис. 2.12) с подачей сапропеля в береговой накопительный бункер (рис. 2.13).

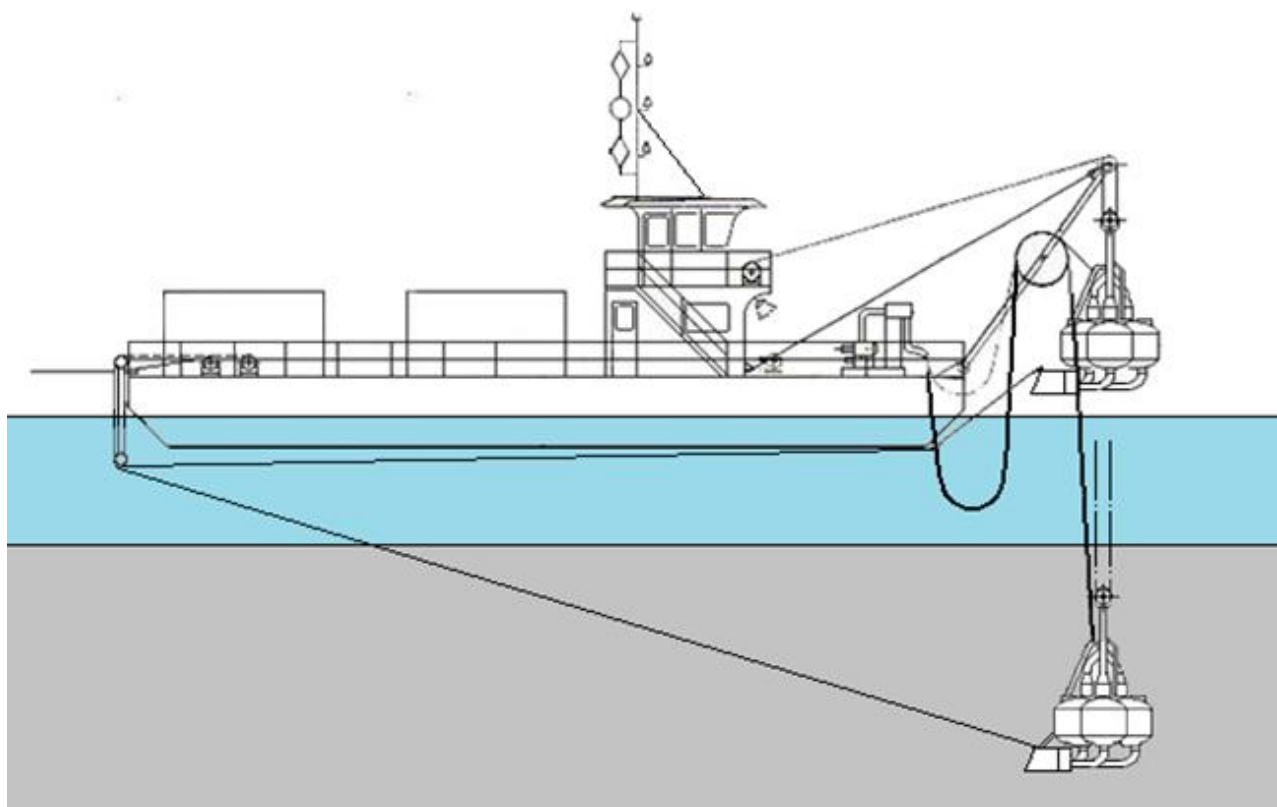


Рисунок 2.11 – Земснаряд, оснащенный пневматическим камерным насосом (ПКН) итальянской фирмы PNEUMA.

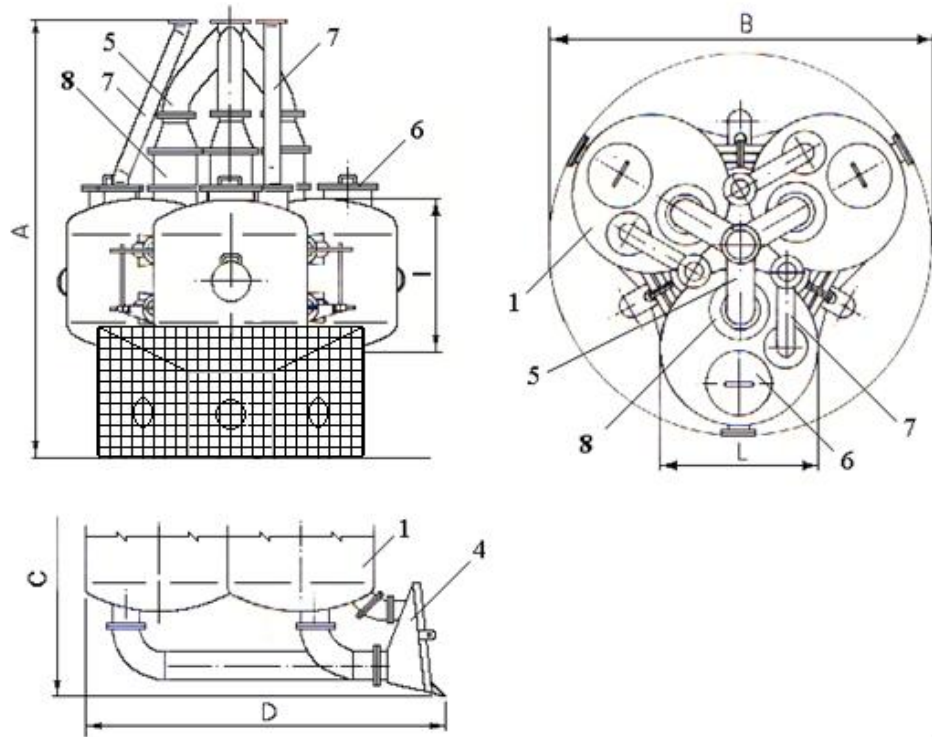


Рисунок 2.12 - Насос ПКН марки 60/10 итальянской фирмы PNEUMA со скреперным ковшем высотой 600мм.



Рисунок 2.13 – Вид накопительного бункера сапропеля с подающим стальным трубопроводом на озере Пильвелю.

Грунтозаборное устройство выполнено в виде скреперного ковша, прикрепленного посредством трех всасывающих патрубков к трем погружным камерам ПКН, подвешенного на тросе подъёмной лебедки и перемещающемся горизонтально за счёт тягового троса и папильонажных лебедок. На входе ковш снабжен неподвижной сеткой-ножом, исключающим забивание насоса крупными включениями.

При текучей консистенции сапропеля выемка осуществляется простым всасыванием сапропеля, а при пластической консистенции сапропеля ковш осуществляет грунтозабор путем горизонтального перемещения в залежи и отделения определенного объёма илистой породы (стружки) от массива (целика) с целью последующего всасывания пульпы через всасывающие патрубки, расположенные в задней стенке ковша.

При повышении предела текучести и структурной вязкости сапропеля, для обеспечения устойчивого (непрерывного) всасывания производится разжижение разрабатываемой породы путем смешивания её с водой. Вода при этом может всасываться извне, как через фронтальный сетчатый проем ковша, так и через клапана в корпусе ковша, а также путем принудительного впрыскивания её внутрь ковша через форсунки, установленные на стенках ковша. При этом происходит уменьшение плотности всасываемой гидросмеси, увеличивается её текучесть, уменьшается вязкость, и пульпа (гидросмесь) всасывается устойчивым потоком.

Данное устройство характеризуется работой с небольшим дозированным разбавлением сапропеля водой, что в дальнейшем требует времени и затрат на осветление и возврат отстоявшейся воды, увеличивает время выхода сапропеля с товарной влажностью (60%) и его себестоимость, ухудшает качество конечного продукта. Устойчивое всасывание сапропеля с естественной влажностью ниже 95 % осложняется его высокой структурной вязкостью и напряжением сдвига в залежи.

Анализ работы данного устройства выявил ряд недостатков в работе такого земснаряда. Одним из недостатков является тот факт, что ПКН имеет три камеры,

работающих в последовательном цикле, что обеспечивает непрерывность и плавность подачи гидросмеси. Каждая камера составляет в диаметре 700мм и имеет высоту $h=900\text{мм}$, и с учётом их радиального расположения в плане ширина насоса получилась равной $B=1900\text{мм}$. Площадь поперечного сечения трех камер в направлении рабочего хода составила $S_{\text{кам}}=1,71\text{м}^2$.

Над камерами расположены три патрубка для подачи и сброса воздуха, три обратных клапана с патрубками для подачи гидросмеси, три смотровых люка, что в общей сложности даёт дополнительно $S_{\text{доп}} \approx 2,17\text{м}^2$ площади сопротивления движению.

Увеличивает сопротивление движению и вертикальные трубопроводы, соединяющие ПКН с земснарядом (рис. 2.14). Их длина при 9м глубине погружения составляет 6,6м, а при диаметре одно подающего $\varnothing 125\text{мм}$ и трех воздушных диаметром $\varnothing 80\text{мм}$ общая их площадь сопротивления движению составляет 2,4м.



Рисунок 2.14 – Вид земснаряда с насосом ПКН на озере Пуришу.

Кроме перечисленных выше элементов ПКН на сопротивление хода оказывает влияние площадь скреперного ковша, расположенного под камерами.

Начальный размер поперечного сечения ковша составлял $S_{\text{ковш}} = 1200 \text{ мм} \cdot 600 \text{ мм} = 0,72 \text{ м}^2$.

Таким образом общая площадь сопротивления движению погружного ПКН составила $F_{\text{ПКН}} = 7,0 \text{ м}^2$, что довольно много.

Папильонажные лебедки, осуществляя рабочее перемещение земснаряда и передавая через натяжной троса тяговой лебедки инерцию движения ПКН, погружённому в вязкую среду, привели земснаряд в аварийное состояние, поскольку, находясь в высоковязкой среде и обладая большой поперечной площадью, ПКН становится якорем, создавая большое сопротивление движению. В результате динамической нагрузки, возникшей в натяжном тросе за счет перемещения земснаряда по водной гладе и тормозящего эффекта погруженного в сапропель ПКН, тяговая лебедка получила ударную нагрузку, сорвалась с болтового крепления к палубному фундаменту и вылетела за борт земснаряда.

После случившегося инцидента высота ковша была уменьшена в 2 раза (рис. 2.15), а на ходовые лебедки были поставлены частотные регуляторы, позволяющие регулировать плавность хода земснаряда от 0 до 0,05 м/с.

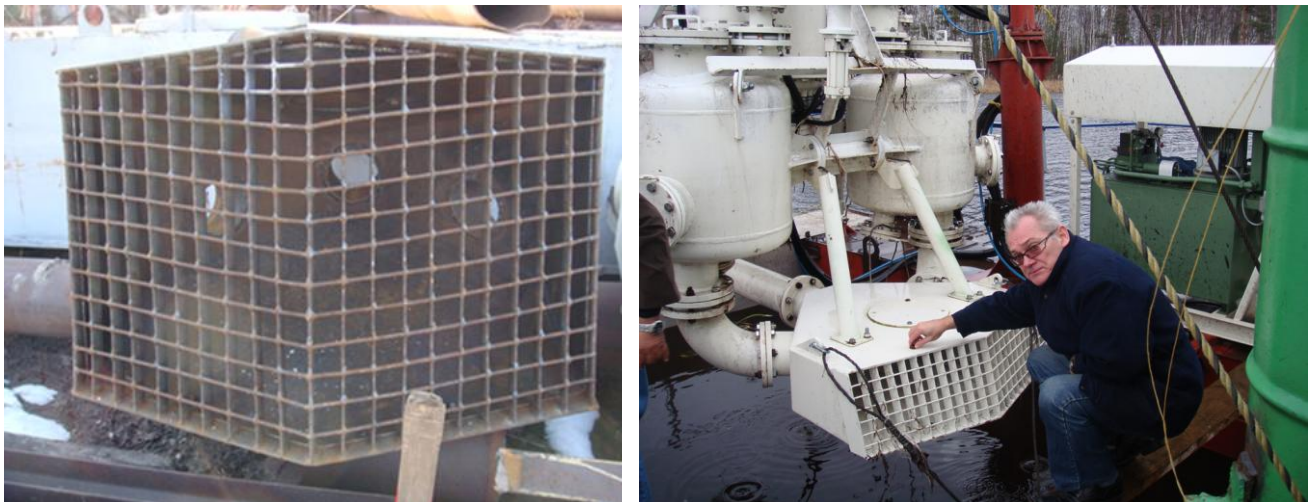


Рисунок 2.15 – Вид первичного скреперного ковша высотой 0,6м (снимок слева), и вид скреперного ковша с уменьшенной высотой 0,3м (снимок справа).

Это событие подчеркнуло важность работы с сапропелем на малых скоростях, включая скорости намотки тросов не только лебедок рабочего хода, но также тяговой и погружной, поскольку сила сопротивления движению в вязкой среде возрастает пропорционально скорости перемещения и площади поперечного сечения движущегося тела.

Другой проблемой применения ПКН стала его пониженная производительность и всасывание свободной воды до 30% в общем объёме перекачиваемой гидросмеси, что было установлено сливом отстоявшейся воды из берегового бункера сапропеля. Поскольку на 3х входных патрубках насоса происходит потеря напора из-за высокой вязкости сапропеля, для снижения этих потерь напора необходимо (по возможности) увеличить сечение всасывающих патрубков, что было сделано при реализации второго проекта через два года.

2.2.2. В 2009 году в той же Латвии на озере Веверу было запущено второе предприятие по производству торфо-сапропелевых смесей [128]. Добыча сапропеля велась земснарядом, оснащённым таким же ПКН со скреперным ковшом высотой 300мм и с увеличенным диаметром входных патрубков с 80мм до 120мм (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 - Земснаряд на озере Веверу, оснащенный насосом ПКН марки 60/10 итальянской фирмы PNEUMA

Кроме этого, давление выдаваемого ПКН ограничено давлением воздуха до 0,9МПа, что лимитирует дальность транспортировки сапропеля, особенно при высоких реологических показателях.

К существенному недостатку данного устройства следует отнести повышенный расход энергии, поскольку на глубинах до 4÷5 метров приходится подключать вакуумную систему, чтобы обеспечить достаточное разряжение на входе в ГЗУ ввиду низкого гидростатического давления на малых глубинах. При этом при работе на высоковязких органических сапропелях происходит забивание вакуумной системы и выброс сапропеля вместе со сбрасываемым воздухом в атмосферу (рис. 2.17).



Рисунок 2.17 - Выброс сапропеля из вакуумной системы на палубу земснаряда: сапропель, выброшенный на палубу из выходного патрубка вакуумной системы, поступивший в неё вместе с воздухом из камер насоса.

По этой причине с переходом на глубину более 6 м вакуумную систему отключают, что позволяет снизить энергопотребление земснаряда на 40 кВт.

С целью уменьшения потерь давления в трубопроводе точка выгрузки гидросмеси в бункер на берегу должна быть минимальной. С этой целью бункера сапропеля были выполнены из морских контейнеров (рис. 2.18), установленных не вертикально один на другой, а параллельно на одном горизонтальном уровне с уклоном, образовав тем самым конус для выгрузки сапропеля, при этом сами контейнера были соединены между собой патрубками диаметром 600 мм, как сообщающиеся сосуды, что позволило снизить точку загрузки гидросмеси в бункер до 6 м над уровнем воды в озере.



Рисунок 2.18 - Вид берегового бункера сапропеля из трёх морских контейнеров на берегу озера Веверу в Латвии.

Загрузка сапропеля в бункер при этом осуществлялась в первый контейнер, а подача сапропеля в цех осуществлялась из третьего контейнера, тем самым обеспечивалась проточность сапропеля с целью исключения его застоя в бункере.

В целом выемка сапропеля и его транспортировка на берег была отработана с использованием насоса ПКН с получением приемлемых результатов. Время выемки сапропеля при одном погружении ПКН на одной заходке было доведено до 45 минут за счёт непрерывного горизонтального продвижения земснаряда вперед. Производительность насоса по сапропелю естественной влажности составила в среднем 26 м³/час (при паспортной производительности 60 м³/час). На рисунке 2.19 показана подача сапропеля насосом ПКН в береговой накопительный бункер, при этом объём дополнительной воды в добытом сапропеле составил 10%, что измерялось уровнем отстоявшейся воды в бункере над отстоявшимся сапропелем через сутки.



Рисунок 2.19 - Подача сапропеля насосом ПКН в береговой накопительный бункер по напорному трубопроводу диаметром 220мм на озере Веверу.

Контроль за концентрацией сапропеля, поступающего в напорный трубопровод из насоса ПКН, осуществлялся визуально с помощью контрольного

патрубка диаметром 80 мм, врезанного в самом начале напорного трубопровода, как показано на рисунке 2.20.

Таким образом, к недостаткам погружного пневматического камерного насоса относятся: повышенный расход энергии на малых глубинах; отсутствие регулируемой скорости всасывания, а значит отсутствие и регулируемой производительности насоса; небольшое выходное давление насоса и большое сопротивление горизонтальному перемещению в залежи из-за больших размеров насоса.



Рисунок 2.20 - Выход сапропеля из контрольного патрубка земснаряда оснащенного пневматическим камерным насосом (ПКН)

2.2.3. В 2011 году на озере Убаговас на территории национального парка Разна в Латгалии (Латвия) было запущено третье опытно-промышленное производство, где вместо насоса ПКН на земснаряде впервые было применено полупогружное грунтозаборное устройство камерного типа со встроенным эксцентриковым винтовым насосом [129]. Камера была выполнена в виде стальной трубы [130] длиной 9,6 м и диаметром 860 мм для выемки сапропеля с глубины до 8 метров и подачи его в состоянии естественной влажности по напорному трубопроводу диаметром 280 мм на 750 метров в береговой накопительный бункер на высоту 8 м (рис. 2.21). Задний торец трубы открыт, закреплен на уровне палубы между двух понтонов на горизонтальной оси вращения, и всегда находится выше уровня воды. Передний торец трубы имеет торцевую заглушку, опускается в толщу залежи на заданную глубину с помощью полиспаста с возможностью менять угол наклона ГЗУ к горизонту от 0 до 76 градусов.

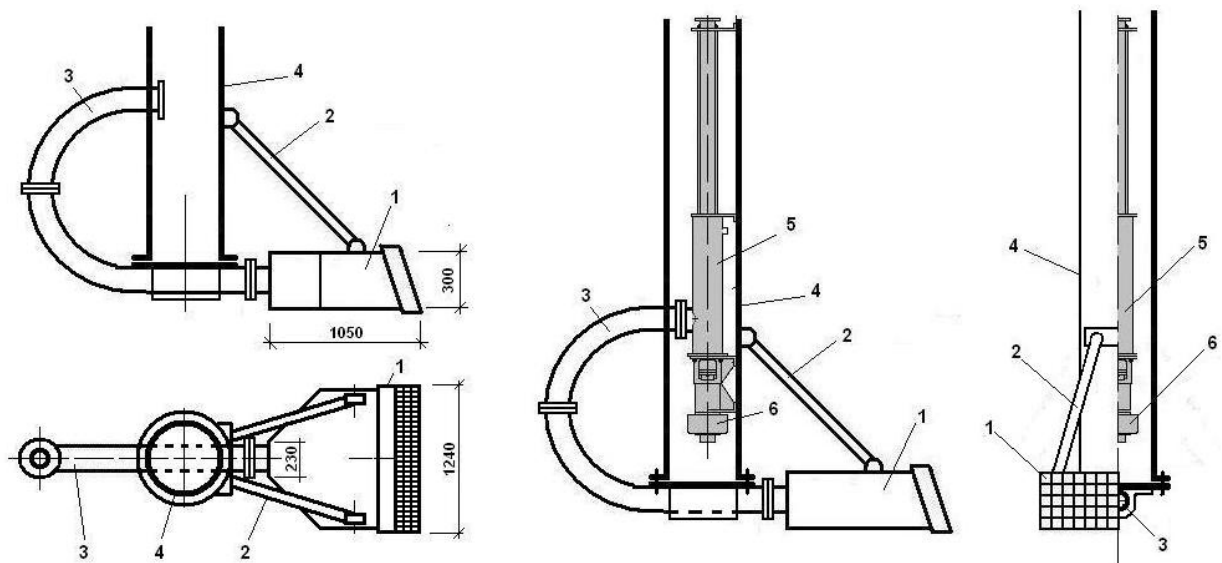


Рисунок 2.21 - Грунтозаборное устройство полупогружной камеры жесткого типа со встроенным эксцентриковым винтовым насосом: 1 – ковш, 2 – упор, 3 – входной патрубок, 4 – камера в виде полу-погружной трубы, 5 – эксцентриковый винтовой насос, 6 – гидравлический привод насоса.

Внутри камеры-трубы 4 установлен эксцентриковый винтовой насос 5 производительностью 25 м³/ч (по воде), развивающий давление до 2,0 МПа. Подача сапропеля с одной стоянки могла длиться не более 15 минут, после чего земснаряду необходимо было продвигаться вперед с помощью лебедок рабочего хода. Общий вид земснаряда катамаранного типа, оснащенного полупогружным грунтозаборным устройством камерного типа со встроенным эксцентриковым винтовым насосом и его компоновочная схема приведены ниже на рисунках 2.22 и 2.23.



Рисунок 2.22 - Общий вид земснаряда серии ЕНТ25-Winter на озере Убагавас в Латвии.

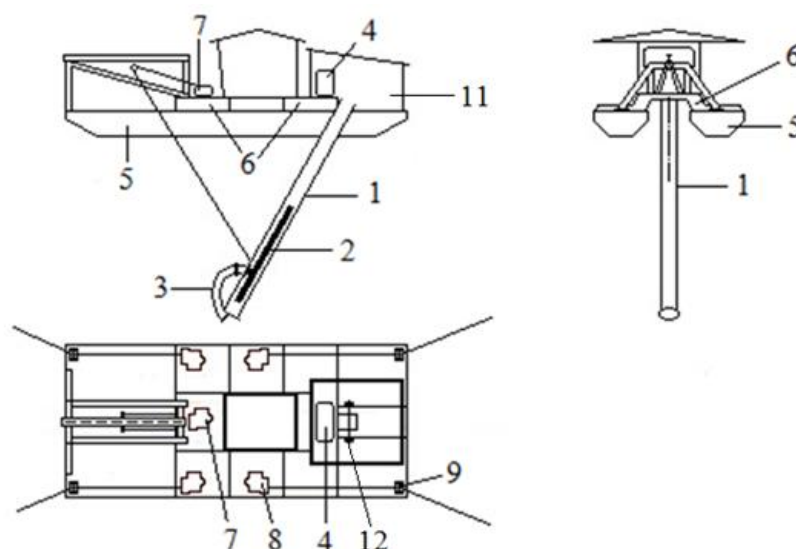


Рисунок 2.23 - Компоновочная схема земснаряда: 1- камера ГЗУ, 2 – насос, 3 – всасывающий патрубок, 4 – гидростанция, 5 – два понтона, 6 – две рамы соединительные, 7 – подъемная лебедка, 8 – две лебедки рабочего и две возвратного хода, 9 – четыре роулса, 10 – рубка, 11 – техпомещение, 12 – опорный узел камеры

В данной конструкции земснаряда грунтозаборная камера полупогружного типа впервые в мировой практике была оснащена встроенным эксцентриковым винтовым насосом объёмного действия с разряжением до 0,08 МПа и с рабочим давлением на выходе до 2,0 МПа, оснащённым гидравлическим приводом, с производительностью по сапропелю до 20 м³/час (Патент автора на изобретение №2348762 от 10.03.2009). Никогда до этого случая винтовые эксцентриковые насосы не работали под водой.

Опыт эксплуатации данного устройства на протяжении 14 лет показал, что применение ГЗУ камерного типа в варианте полупогружной жёсткой трубной конструкции, оснащённой встроенным ЭВН с гидравлическим приводом, позволяет вести устойчивую выемку сапропеля естественной влажности вязко-текучей консистенции и транспортировать его на берег по напорному трубопроводу диаметром 280 мм под давлением до 2,1 МПа без гидравлического разупрочнения, что отвечает требованиям экологии и полностью исключает возврат обратной воды (см. рис. 2.24).



Рисунок 2.24 – Сапропель в береговом бункере емкостью 500м³, добытый с помощью полупогружного ГЗУ камерного типа со встроенным ЭВН с гидравлическим приводом на озере Убаговас.

Однако, при глубине разработки до 9 метров и мощности сапропелевого пласта до 7 метров ГЗУ, выполненное в виде полупогружной жёсткой трубы диаметром 820 мм и длиной в 9,6 метра имеет большую площадь боковой поверхности, контактирующую с сапропелем, который из-за высокой вязкости оказывает большое сопротивление горизонтальному перемещению ГЗУ, что вызывает большие изгибающие моменты на его опорном узле (рис. 2.25).



Рисунок 2.25 - Опорный узел полупогружного грунтозаборного камерного устройства со встроенным эксцентриковым винтовым насосом

Для уменьшения сопротивления ковш пришлось демонтировать (рис. 2.26), но проблема горизонтального перемещения не была решена, так как камера в виде трубы длиной 9,6 метра, погруженная нижним концом в сапропель на 5-7 метров имеет большое сопротивление движению и работает как якорь, который ограничивает перемещение земснаряда, приводит к отстреливанию (сбросу) тормозов от чрезмерного натяжения тросов лебёдок рабочего хода, что в свою очередь привело к аварийной ситуации: смятию высоконапорной композитной

трубы с внутренним диаметром 280мм магистрального трубопровода при резком неконтролируемом развороте земснаряда вокруг вертикальной оси над погружённым в сапропель ГЗУ после отстрела тормозов лебёдок рабочего хода.



Рисунок 2.26 - Грунтозаборное устройство полупогружной камеры жесткого типа с гибкими всасывающими патрубками и встроенным эксцентриковым винтовым насосом на озере Убаговас в Латвии.

Опыт эксплуатации этих трех предприятий показал следующее:

1 - даже при возможности всасывания сапропеля естественной влажности любым из вышеперечисленных устройств, через непродолжительное время (5–15 минут) в грунтозаборное устройство любого типа начинает поступать сапропель, сильно разбавленный водой;

- 2 - очевидно, что проблема устойчивой выемки сапропеля естественной влажности зависит не только от конструкции ГЗУ, но и от технологии его применения, и от понимания происходящих в забое геологических процессов;
- 3 - в условиях залежи сапропель обладает повышенной вязкостью и повышенным сопротивлением сдвига, возрастающими с глубиной из-за температурного изменения структуры сапропеля, что необходимо учитывать при расчетах его выемки и транспортировки по напорному трубопроводу;
- 4 - различным реологическим характеристикам сапропеля естественной влажности в залежи должны быть найдены соответствующие технологические решения его выемки, исключаящие разбавление (смешивание) его с водой;
- 5 - самые положительные результаты при выемке сапропеля были получены при использовании камерных устройств, описанных выше в пунктах 2.2.1 и 2.2.2. При этом у устройства ПКН установлен повышенный расход электроэнергии (9,8 кВт/МЗ) и развиваемое давление до 0,8МПа;
- 6 – с учетом того, что полупогружное камерное устройство в 2.2.3 дало значительную экономию энергии за счет применения встроенного винтового насоса, но из-за больших размеров полу-погружной камеры возникает большое сопротивление при ее перемещении в сапропеле, необходимо найти новое конструктивное решение для погружной камеры со встроенным винтовым насосом, которое бы позволило снизить сопротивление камеры при ее продвижении в толще сапропеля, увеличить глубину разработки на всю мощность залежи сапропелей как вязко-текучей, так и вязко-пластичной консистенций.

С учётом приведенного выше анализа грунтозаборных устройств и личного опыта их эксплуатации, автором было разработано новое устройство в виде погружного грунтозаборного комплекса камерного типа со встроенным эксцентриковым винтовым насосом, которое было внедрено на четвертом опытно-промышленном предприятии на озере Савельево в Ярославской области (см. приложение А).

2.3. Принципиальная схема погружного грунтозаборного камерного комплекса (ПГКК)

С учётом опыта эксплуатации погружных пневматических камерных насосов и полупогружного камерного устройства со встроенным эксцентриковым насосом при добыче сапропеля, автором разработано и внедрено патентно-чистое устройство в виде погружного грунтозаборного камерного комплекса (ПГКК) со встроенным эксцентриковым винтовым насосом (ЭВН), принципиальная схема которого приведена ниже на рисунке 2.27 (патент на изобретение №2745146 РФ) [131].

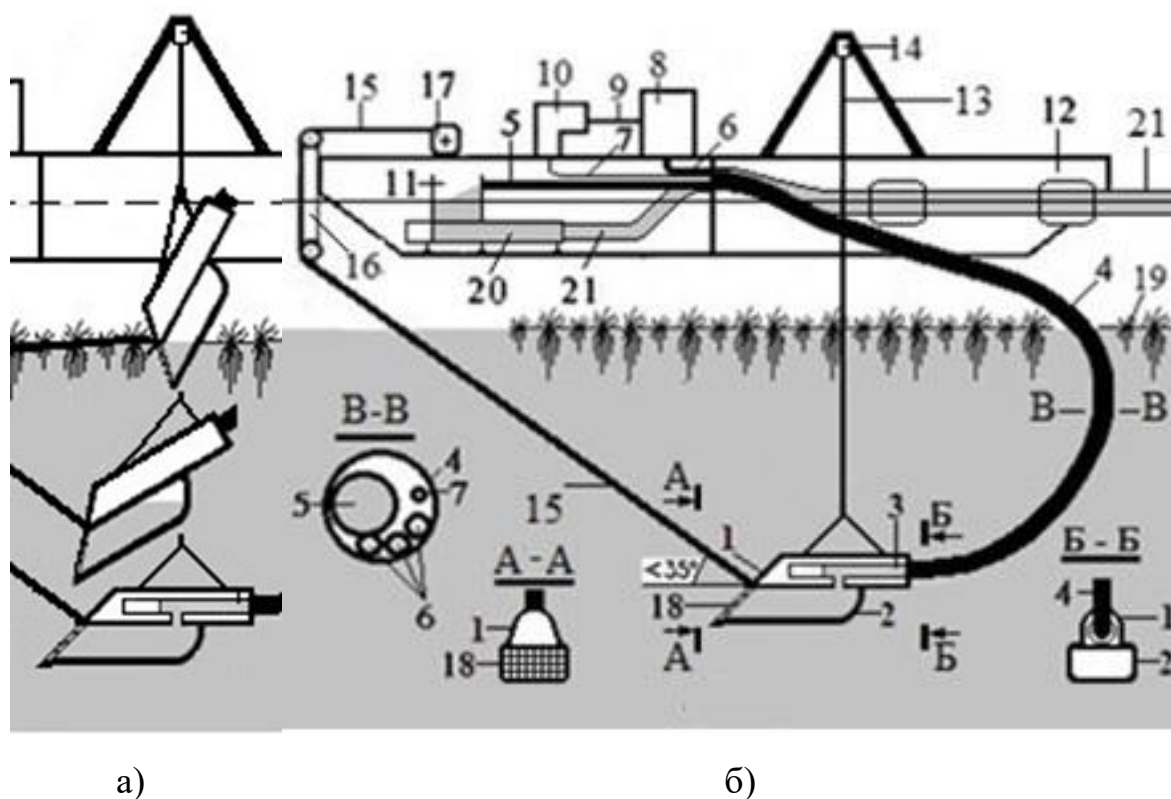


Рисунок 2.27 - Принципиальная схема грунтозаборного комплекса: а) –схема внедрения погружной камеры комплекса в толщу залежи через покрывающий растительный слой, б) – общий вид комплекса.

Погружная часть комплекса состоит из герметичной камеры 1 и ковша 2, который служит для неё опорным основанием, при этом камера 1 соединена с атмосферой и земснарядом 12 транспортным рукавом 4, в котором размещен

напорный трубопровод 5 и шланги 6 гидравлической станции 8. Комплекс оснащен системой из трёх тросов: тягового 15, для продвижения вперёд; подвесного 4, для поднимания и опускания камеры на заданную глубину; страховочного (не показан), для предотвращения отрыва рукава 4 от камеры 1.

Камера 1 погружается на тросе 13 с помощью лебедки 14 на заданную глубину вертикально под собственным весом, при этом угол наклона камеры к горизонту регулируется с помощью траверсы троса 13 и натяжением троса 15 с углом наклона к горизонту до 35°. Наличие острой режущей кромки ковша 2 позволяет ему вместе с камерой относительно легко проникать сквозь слой подводной растительности 19, нередко покрывающей кровлю залежи, и внедряться в толщу на заданную глубину.

Преимущества настоящего грунтозаборного комплекса перед остальными аналогами:

1 – наличие погружной камеры, что позволяет использовать внешнее гидростатическое давление и облегчает работу насоса 3 на входе;

2 – наличие в погружной камере встроенного насоса, что позволяет максимально приблизить его к забою и минимизировать потери давления во всасывающей линии;

3 – наличие гидравлического привода у насоса, что позволяет осуществлять точную регулировку производительности, останавливать его в случае поступления в него разбавленного водой сапропеля и осуществлять плавный пуск после остановки;

4 – наличие гибкого транспортного рукава 4, исключаяющего большие изгибающие моменты и обеспечивающего заданную глубину разработки;

5 – наличие скреперного коша 2 и ножевой решеткой 18 на входе, обеспечивающих принудительную подачу сапропеля пластичной консистенции к всасу и защиту насоса от крупных включений;

6 – наличие тросовой системы вертикального 13 и горизонтального 15 перемещения комплекса в толще сапропелевой залежи с экологически безопасной

скоростью, что исключает образование взвеси и обеспечивает непрерывность процесса всасывания сапропеля.

С учетом того, что грунтозаборный комплекс является навесным оборудованием, конструкция земснаряда даже при больших глубинах разработки остается компактной.

Ниже (рис. 2.28) показан общий вид земснаряда, оснащенного погружным грунтозаборным камерным комплексом для добычи сапропеля натуральной влажности. В зависимости от глубины разработки, дальности транспортировки, высоты точки выгрузки и физико-реологических характеристик сапропеля в залежи, земснаряд может быть выполнен в форме катамарана или катамарана с добавочным носовым понтоном.

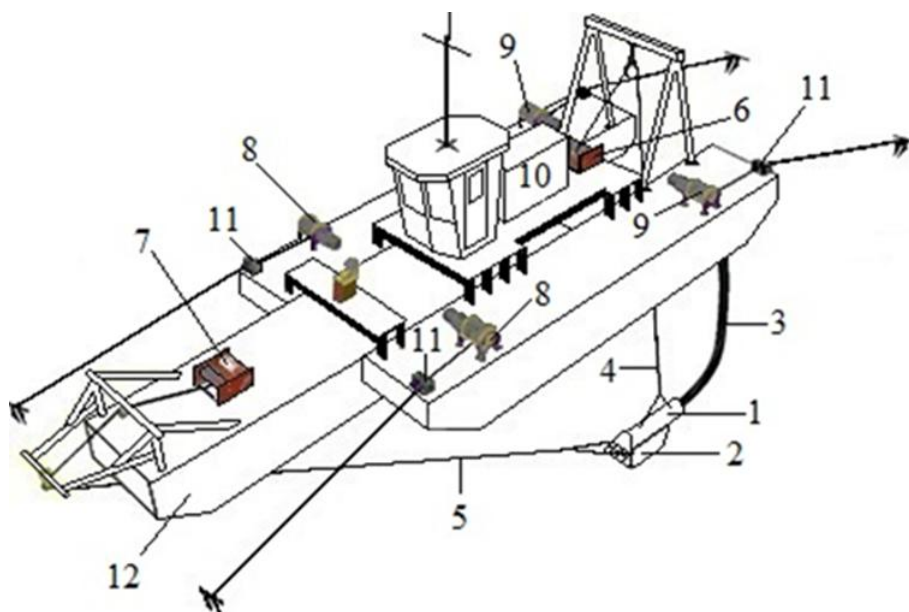


Рисунок 2.28 - Вид земснаряда для добычи сапропеля: 1- погружная камера со встроенным ЭВН, 2 – скреперный ковш, 3 - транспортный рукав, 4- погружной трос, 5-тяговый трос, 6-погружная лебедка, 7-тяговая лебедка, 8 - папильонажные лебедки рабочего хода, 9 – папильонажные лебедки возвратного хода, 10 – дизель-генератор, 11 – роулсы, 12- носовой понтон с трюмным ЭВН с приемным бункером сапропеля.

При больших глубинах, когда угол натяжения тягового троса 5 начинает превышать 35 градусов, этот угол можно уменьшить за счет соединения тягового троса с береговой лебедкой, или за счет установки опорного понтона, расстояние

до которого будет регулироваться длиной соединительной рамы, соединяющей его с земснарядом, как показано ниже (рис. 2.29).

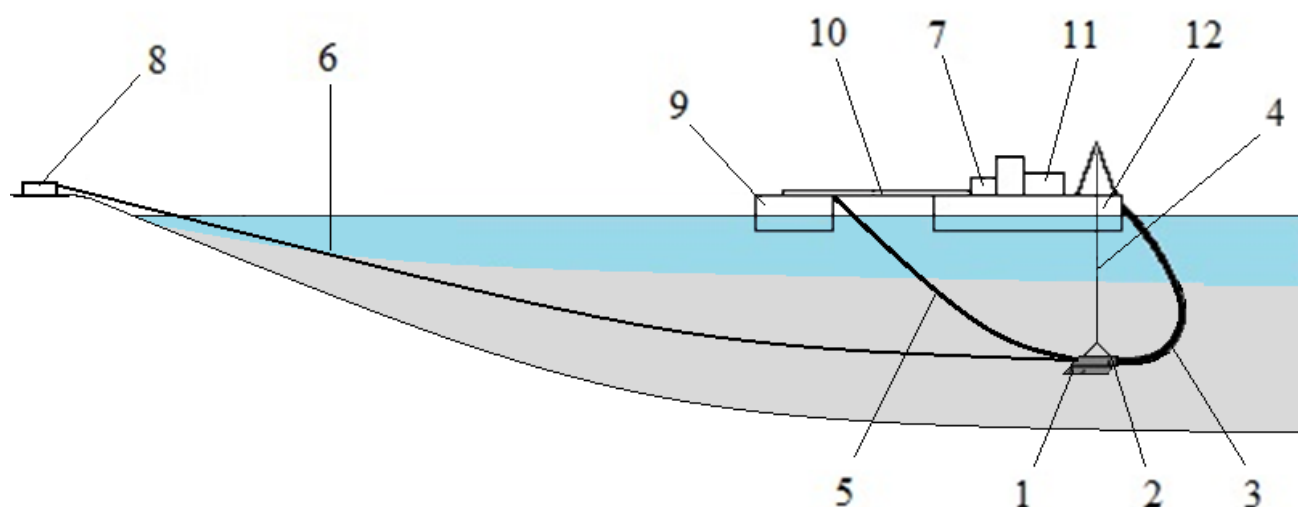


Рисунок 2.29 - Схемы уменьшения угла наклона тягового троса: 1 – погружная камера, 2 – ковш, 3 – транспортный рукав, 4 – погружной трос, 5 – тяговый трос земснаряда, 6 – тяговый трос береговой лебедки, 7 – тяговая лебедка земснаряда, 8 – береговая лебедка, 9 – опорный понтон, 10 – соединительная рама, 11 – дизель-генератор, 12 – земснаряд.

Исследования литературных источников показали, что экологически безопасная скорость перемещения грунтозаборных устройств в подводном забое для илистых грунтов, обеспечивающая минимальную концентрацию взвеси в придонной зоне, лежит в пределах 108–180 м/час, или 0,03–0,05 м/с. [128].

С учётом этого приведена зависимость производительности встроенного эксцентрикового винтового насоса и площади поперечного сечения ковша от допустимой скорости горизонтального перемещения (табл. 2.1) и отражена графически (рис. 2.30).

Из чего следует, что производительность ЭВН ограничена до 120 м³/ч по сапропелю естественной влажности. При этом производительность насоса должна точно регулироваться для исключения всасывания воды, что достигается за счет оснащения ЭВН гидравлическим приводом, а наличие погружной камеры с атмосферным давлением внутри обеспечивает встроенный насос на входе дополнительным подпором от внешнего гидростатического давления.

Таблица 2.1 - Зависимость производительности ЭВН от размеров ковша и экологической скорости его перемещения в залежи

№	Скорость продвижения $v_{гзу}$, м/ч (м/с)	Высота ковша h_k , м	Ширина ковша b_k , м	Площадь ковша, $м^2$	Производительность насоса, $м^3/ч$
1	108÷180 (0,03÷0,05)	0,3 м	0,8 м	0,24	25,9÷43,2
2	108÷180 (0,03÷0,05)	0,4 м	1,0 м	0,4	43,2÷72
3	108÷144 (0,03÷0,04)	0,5 м	1,2 м	0,6	64,8÷86,4
4	108÷144 (0,03÷0,04)	0,6 м	1,4 м	0,84	90,72÷120,96

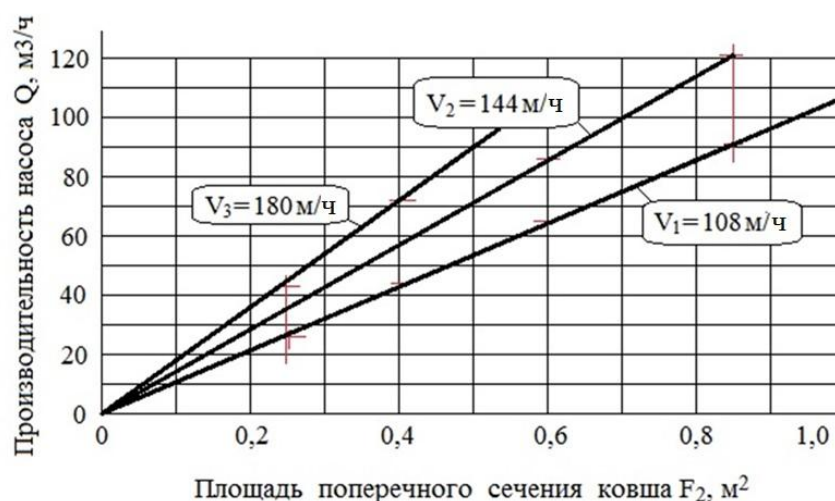


Рисунок 2.30 - График зависимости производительности насоса от площади ковша и скорости его горизонтального перемещения в залежи

Увеличение глубины разработки увеличивает внешний гидростатический подпор, что облегчает работу насоса при всасывании и облегчает запуск насоса после остановки.

Увеличение фронтальной площади ковша увеличивает нагрузку на тяговый трос 15 с увеличением мощности лебедок рабочего хода 8, и потребует увеличить всасывающую производительность насоса, которая ограничена расходом сапропеля в напорном трубопроводе (см. четвертое научное положение). Ниже на

рисунке 2.31 изображен вариант элементов погружного устройства ПГКК, работающего на озере Савельево.

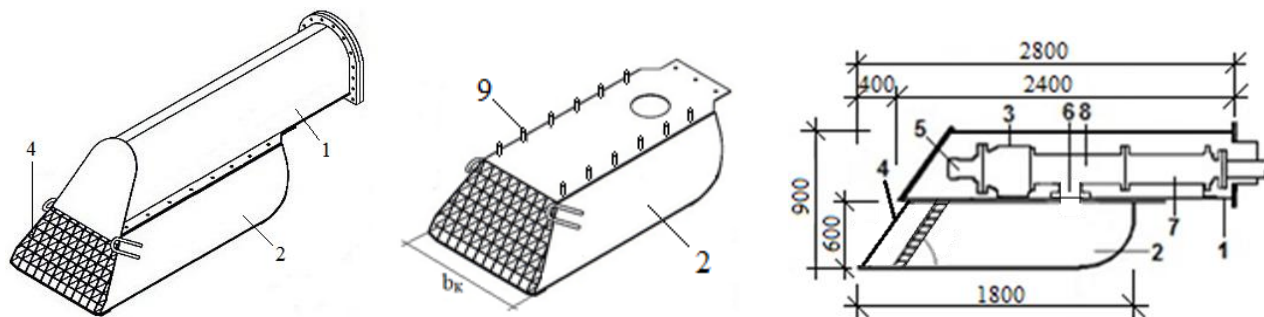


Рисунок 2.31 - Элементы погружного комплекса со встроенным ЭВН на озере Савельево в Ярославской области: 1-камера, 2-ковш, 3-насос ЭВН, 4-ножевая решетка, 5-гидропривод, 6-входной патрубок, 7-гироторная пара, 8-приемная камера насоса, 9-шпильки для крепления камеры.

2.3.1. Скреперный ковш с ножевой решеткой

Скреперный ковш является очень важным элементом первичного механического (не гидравлического) разупрочнения структурированного геомассива в подводном забое, которое состоит из трех фаз: отделения породы от целика, подготовки породы к всасыванию и непосредственное всасывание, то есть вход породы во всасывающий патрубок и приемную камеру встроенного ЭВН.

Отделение породы от целика начинается созданием напора ковша на забой через натяжение тягового троса в начале рабочего перемещения ПГКК с внедрением режущего периметра ковша в породу с выдавливанием стружки в виде бруса породы с перекрытием зева ковша. Отделение стружки от целика происходит за счет непрерывной механической вырезки бруса породы с непрерывным механическим приближением к нему всасывающего патрубка устройства.

Подготовка породы к всасыванию начинается с рассечения ножевой решеткой поступающего в ковш цельного бруса породы на более мелкие тонкие бруски квадратного сечения с площадью поперечного сечения, равной площади проходного отверстия решетки, образованной вертикальными и горизонтальными

ножами решетки, после чего между тонкими брусками породы образуются ножевые полости, способствующие увеличению подвижности породы в ковше.

Таким образом в ковше возникает пластичный поток поршневой структуры, в котором элемент входной стружки породы, занимающий все сечение потока, изменяет свою структурную сетку за счет рассечения ножевой решеткой на более тонкие и более гибкие элементы. Далее, за счёт вибрационного воздействия эксцентрикового насоса и смятия встречного потока задней радиальной стенкой ковша, вязко-пластичный и более подвижный поток оказывается в зоне всасывания входного патрубка с пониженным давлением, где начинается его всасывание (втягивание) в насос с последующей подачей на поверхность.

Кроме режущей функции ножевая решетка выполняет и защитную функцию, предотвращая проникновение крупных включений в приемную камеру насоса. При этом шаг ножей решетки должен соответствовать пропускной способности насоса, которая колеблется от 20 до 60 мм.

Согласно расчётных данных (табл. 2.1) принимаем ширину ковша $B_k = 1,4$ м, высоту ковша $H_k = 0,6$ м, длину днища ковша $L_k = 1,8$ м, длина крышки ковша 1,38 м, поскольку зев ковша установлен под углом 55° для облегчения проникновения в породу, и днище ковша при этом выступает вперёд на 0,42 м по отношению к передней кромке крышки. Зев ковша перекрыт съёмной ножевой решеткой, установленной с таким же углом наклона к горизонту 55° .

Решётка выполнена из пересекающихся ножей в виде полос толщиной 3-4мм и шириной 40 мм. Горизонтальные ножи установлены ступенчато параллельно днищу с просветом между ними в 40 мм, вертикальные ножи установлены под углом 55° к днищу ковша и параллельно между собой с просветом 40мм, образуя тем самым квадратные ячейки сетки 40х40мм со скосом внутрь ковша. Продвижение ковша вперед происходит за счет передачи натяжного усилия от тяговой лебедки 7 через тяговый трос 5 под углом 35 градусов к горизонту, прикрепленный к двух ветвевому стропу скреперного ковша (рис. 2.28).

2.3.2. Камера со встроенным эксцентриковым винтовым насосом

Погружная камера выполняет несколько функций в данном устройстве.

Первая функция камеры – это роль барьера для создания перепада давления на входе в насос, поскольку камера соединена транспортным рукавом с атмосферой, и встроенный насос находится под постоянным внешним гидростатическим давлением столба воды и сапропеля (если камера погружена в сапропель), выполняя при этом роль входного клапана камеры.

Вторая функция камеры – это роль механической защиты насоса от воздействия внешней среды для поддержания его в идеальном рабочем состоянии и чистоте с возможностью быстрого обслуживания путем снятия задней крышки камеры для выемки насоса.

Третья функция камеры – это защита экологии водоема от возможных утечек гидравлического масла, подаваемого в гидравлический мотор насоса по гидравлическим шлангам.

И самым главным элементом данного устройства является встроенный в камеру насос – эксцентриковый винтовой насос объемного действия.

Исследование рынка насосов и их технических характеристик показало, что наиболее подходящим типом насосов для работы с сапропелем является эксцентриковый винтовой насос (ЭВН) [132],[133], который может быть использован как для выемки, так и для транспортировки сапропеля по напорному трубопроводу на берег. ЭВН имеет следующие преимущества:

- производительность до 500 м³/ч, давление до 96 бар, подача равномерна и пропорциональна числу оборотов ротора, само-всасываемость от 8 до 12м;
- возможность перекачки неоднородного материала, содержащего газ (до 40%) и абразивные вещества (песка до 40%), волокнистые и твердые включения диаметром до 150 мм;
- перекачка жидкостей с вязкостью до 3 000 000 мПа·с;
- точное дозирование перекачиваемой жидкости;

- отсутствие клапанов; перекачка без центрифугирования с минимальным стрессом напряжения перекачиваемого материала;
- высокий КПД (65÷80%);
- низкая энергоемкость, низкая стоимость эксплуатации.

ЭВН представляет собой объёмный самовсасывающий ротационный механизм (рис. 2.32). «Перекачивающая» часть агрегата состоит из двух элементов - ротора и статора. Ротор 1 представляет собой однозаходный винт с круглой резьбой, с особо крупным шагом, значительной высотой и большим эксцентриситетом относительно внутреннего диаметра. Статор 2, обычно изготавливаемый из эластичного материала, имеет двойную резьбу, которая совместима с ротором аналогичного эксцентриситета.

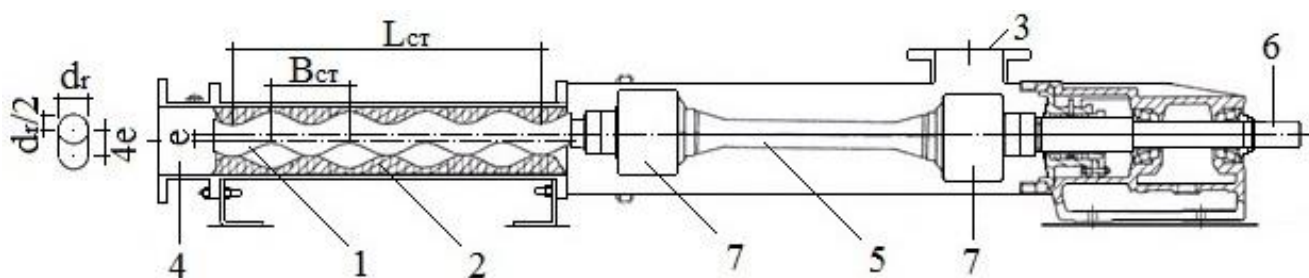


Рисунок 2.32 - Конструкция ЭВН: 1- ротор, 2 – статор, 3 – загрузочный патрубок, 4 – выгрузной патрубок, 5 – карданный вал, 6 – вал, 7 – муфты.

Ротор 1, вращающийся в статоре 2, осуществляет гипоциклоидное вращательно-поступательное движение. Такое соединение двух элементов создает контактную линию вдоль профиля, гарантирующего уплотнение между ними. Вращение ротора создает герметичную полость, смещающуюся винтовым движением от всасывающей стороны (патрубок 3) до подающей (патрубок 4). Теоретический расход жидкости ($Q_{\text{ЭВН}}$) прямо пропорционален числу оборотов ротора. С учётом того, что диаметр ротора d_p превышает диаметр статора d_c расход насоса можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{ЭВН}} = \frac{[4ed_p - 8ew - \pi(d_p w - w^2)] \cdot B_{\text{ст}} \cdot n_p \cdot 60}{1000^3} \quad (2.1)$$

где: $Q_{\text{ЭВН}}$ – производительность насоса, м³/час;

w – разница между радиусами ротора и статора, $w = \frac{d_p - d_c}{2}$, мм;

e – эксцентриситет ротора, мм;

d_p – диаметр ротора, мм; d_c – диаметр статора, мм; $B_{ст}$ – шаг статора, мм;

n_p – скорость вращения ротора, об/мин.

Потребляемая мощность насоса вычисляется следующим образом:

$$N = \frac{\rho_c \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta \cdot 3600 \cdot 10^3} \quad (2.2)$$

где: N – потребляемая мощность (кВт), ρ_c – объёмный вес сапропеля в залежи (кг/м³), Q – расход перекачиваемой среды (м³/ч), H – потери напора (м), η – общий КПД (результат объёмного КПД и механического КПД).

На рисунке 2.33 приведены напорно-расходные характеристики ЭВН, рекомендуемых для использования в ПГКК.

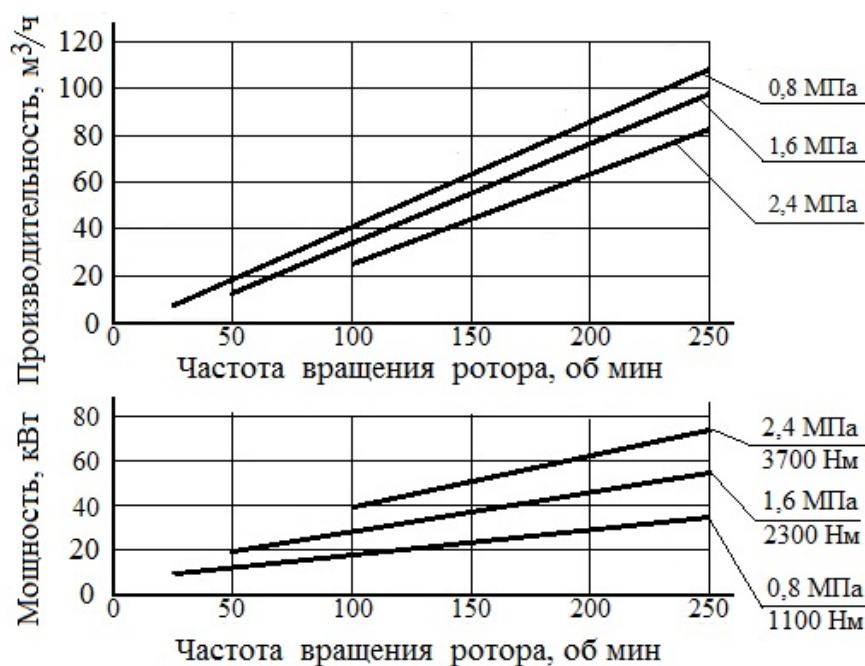


Рисунок 2.33 - Напорно-расходные характеристики эксцентриковых винтовых насосов [133]

Следует подчеркнуть, что давление, развиваемое ЭВН, зависит не столько от частоты вращения ротора, сколько определяется длиной $L_{ст}$ пары ротор-статор, в то время как обычные грунтовые насосы развивают максимальный напор лишь при

максимальной скорости вращения ротора, а при уменьшении частоты вращения давление резко падает.

2.3.3. Тросовая система перемещения ПГКК

Тросовая система перемещения ПГКК состоит из трех тросов, которые испытывают значительные нагрузки из-за перемещения погружного устройства в вязкой среде, и правильный выбор диаметра троса и соответствующих лебедок необходим для надежной работы всего устройства.

Для расчета принимаем следующие исходные данные:

масса ГЗУ: $m_{\text{ГЗУ}} = 1200 \text{ кг}$

габариты камеры: 0,4м х 0,6м х 5м

объем камеры (для силы Архимеда): $V_{\text{кам}} = 0,4 \cdot 0,6 \cdot 5 = 1,2 \text{ м}^3$ (2.3)

габариты ковша: 0,6м х 1,4м х 1,8м (2.4)

1. Грунтозаборное устройство (ГЗУ):

Масса $m_{\text{ГЗУ}} = 1200 \text{ кг}$ (включая вес ковша+вес камеры+вес насоса+вес гидромотора+вес гидравлических шлангов с маслом)

Объем камеры $V_{\text{кам}} = 0,4 \cdot 0,4 \cdot 5 = 0,8 \text{ м}^3$ (2.5)

(из расчета, что камера выполнена в виде трубы квадратного сечения 400х400мм и длиной 5м).

Площадь боковой поверхности камеры $S_{\text{бок.кам}} = 8 \text{ м}^2$ (как длина периметра камеры 0,4м·4 умноженная на длину 5м) и площадь боковой поверхности ковша:

$$S_{\text{бок.ковш}} = (2 \cdot 0,6 \cdot 1,8 \text{ м} + 2 \cdot 1,4 \cdot 1,8 \text{ м} - 1 \cdot (1,8 \text{ м} - 0,42 \text{ м})) = 5,82 \text{ м}^2 \quad (2.6)$$

Общая боковая поверхность ГЗУ составляет

$$S_{\text{бок}} = S_{\text{бок.кам}} + S_{\text{бок.ковш}} = 8 + 5,82 = 13,82 \text{ м}^2. \quad (2.7)$$

Площадь фронтальной поверхности ГЗУ составит $S_{\text{фронт.ГЗУ}}$:

$$S_{\text{фронт.ГЗУ}} = 0,4 \text{ м} \cdot 0,4 \text{ м} + 0,6 \text{ м} \cdot 1,4 \text{ м} = 0,16 + 0,84 = 1 \text{ м}^2 \quad (2.8)$$

2. Сапрпель:

$\rho_{\text{сапр}} = 1600 \text{ кг/м}^3$ (берем максимальное значение);

$\tau_o = 600$ Па (берем максимальное значение);

$\mu_{пл} = 50$ Па · с (берем максимальное значение).

3. Транспортный рукав (ТР):

Длина = 64 м $L_{тр.рук} = 64$ м (как половина длины окружности с диаметром 41,0 м).

Диаметр наружный транспортного рукава принимаем $D_{тр} = 0,4$ м с целью размещения в нем высоконапорного рукава и гидравлических шлангов.

Площадь поперечного сечения ТР :

$$A_{тр.рук} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} = 0,1256 \text{ м}^2. \quad (2.9)$$

Масса 1 пог. м армированного : $m_{1тр} = 15$ кг/м.

Общая масса пустого ТР: $m_{тр} = 15 \cdot 64 = 960$ кг. (2.10)

4. Высоконапорный рукав (ВНР) внутри ТР:

Длина $L_{внр} = 74$ м (на 10 м длиннее транспортного рукава для разводки по земснаряду).

Внутренний диаметр $d_{внр} = 0,28$ м.

$$\text{Площадь сечения: } A_{внр} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,28^2}{4} = 0,0616 \text{ м}^2. \quad (2.11)$$

Масса 1 пог. м армированного: $m_{1внр} = 8$ кг.

Общая масса пустого ВНР: $m_{внр} = 8 \cdot 74 = 592$ кг (2.12)

$$\begin{aligned} \text{Объем сапропеля в ВНР: } V_{сапр.внр} &= \pi \cdot d^2 \cdot \frac{L_{внр}}{4} = \\ &= 3,14 \cdot 0,28^2 \cdot \frac{74}{4} = 4,56 \text{ м}^3 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Масса сапропеля в ВНР:

$$m_{сапр.внр} = V_{сапр.внр} \cdot \rho_{сапр} = 4,56 \text{ м}^3 \cdot 1600 \text{ кг/м}^3 = 7296 \text{ кг} \quad (2.14)$$

5. Три (3) гидравлических шланга ГШ (внутри ТР - транспортного рукава):

Диаметр $d_{гидр} = 0,04$ м

Длина $L_{гидр} = 80$ м (из расчета 64м+10м+6м). (2.15)

Площадь сечения одного шланга:

$$A_{1\text{гидр}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,04^2}{4} = 0,00126 \text{ м}^2 \quad (2.16)$$

Масса 1 пог. м примем: $m_{1\text{гидр}} = 1,5 \text{ кг/м}$

$$\text{Общая масса шлангов: } m_{\text{гидр}} = 3 \text{ шт} \cdot 1,5 \cdot 80 \text{ м} = 360 \text{ кг} \quad (2.17)$$

Плотность гидравлической жидкости: $\rho_{\text{гидр}} \approx 900 \text{ кг/м}^3$

Объем жидкости в гидравлических шлангах:

$$V_{\text{гидр}} = 3 \cdot A_{1\text{гидр}} \cdot L_{\text{гидр}} = 3 \cdot 0,00126 \cdot 80 = 0,3 \text{ м}^3 \quad (2.18)$$

Масса жидкости в шлангах:

$$m_{\text{жидк}} = V_{\text{гидр}} \cdot \rho_{\text{гидр}} = 0,3 \cdot 900 = 270 \text{ кг} \quad (2.19)$$

6. Суммарная масса наполненной системы "ТР+ВНР+ШГ":

$$\begin{aligned} m_{\text{систем.ТР}} &= m_{\text{тр}} + m_{\text{внр}} + m_{\text{сапр.внр}} + m_{\text{гидр}} + m_{\text{жидк}} = \\ &= 960 + 592 + 7296 + 360 + 270 = 9478 \text{ кг} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Задача №1: расчет вертикального погружного троса

Силы, действующие на трос при подъеме ГЗУ из сапропеля:

$$1. \quad \text{Вес ГЗУ в воздухе: } P_{\text{гзу}} = m_{\text{гзу}} \cdot g = 1200 \cdot 9,81 = 11772 \text{ Н} \quad (2.21)$$

2. Сила Архимеда на ГЗУ:

$$F_{\text{арх.гзу}} = \rho_{\text{сапр}} \cdot g \cdot V_{\text{кам}} = 1600 \cdot 9,81 \cdot 0,8 = 12557 \text{ Н} \quad (2.22)$$

3. Сила сопротивления сапропеля движению ГЗУ вверх.

Сапропель ведет себя как вязкопластическая жидкость, поэтому для расчета силы сопротивления при движении тела в такой среде используем модель Шведова-Бингама:

Сила сопротивления для параллелепипеда:

$$\begin{aligned} F_{\text{сопр,гзу}} &= F_{\text{сдвига}} + F_{\text{вязкость}} = \tau_0 \cdot S_{\text{бок}} + \frac{\mu_{\text{пл}} \cdot S_{\text{бок}} \cdot v}{h} = 600 \cdot 13,82 + \frac{50 \cdot 13,82 \cdot 0,1}{0,2} = \\ &= 8292 + 342 = 8632 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.23)$$

где:

$S_{\text{бок}}$ – площадь боковой поверхности ГЗУ,

h – характерный размер для тонкого слоя, принимается половина ширины, камеры $h=0,5 \cdot 0,4 \text{ м}$,

v – скорость вертикального подъёма ГЗУ принимаем равной $0,1 \text{ м/с}$.

4. Вес поднимаемой части транспортной системы: учитываем, что при подъеме ГЗУ из глубины 40 м , примерно 50% длины ТР (32 м) также будет выходить из воды/сапропеля. Масса этой части системы пропорциональна длине.

$$P_{\text{систем.тр}} = \frac{32 \cdot m_{\text{систем.тр}} \cdot g}{64} = 0,5 \cdot 9478 \cdot 9,81 = 46490 \text{ Н} \quad (2.24)$$

5. Сила сопротивления сапропеля движению ТР: ТР движется вертикально. Площадь сдвига - боковая поверхность погруженной части ТР (32 м).

$$\begin{aligned} S_{\text{бок.тр}} &= \pi \cdot D_{\text{тр}} \cdot L_{\text{тр.под}} = 3,14 \cdot 0,4 \cdot 32 = 40,2 \text{ м}^2 \\ F_{\text{сопр.тр}} &= \tau_o \cdot S_{\text{бок.тр}} + \frac{\mu_{\text{пл}} \cdot S_{\text{бок.тр}} \cdot v}{0,5 \cdot D_{\text{тр}}} = \\ &= 600 \cdot 40,2 + \frac{50 \cdot 40,2 \cdot 0,1}{0,5 \cdot 0,4} = 25125 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Общая нагрузка на погружной трос при подъеме в сапропеле:

$$\begin{aligned} F_{\text{верт}} &= P_{\text{гзу}} - F_{\text{архим.гзу}} + F_{\text{сопр.гзу}} + P_{\text{систем.тр}} + F_{\text{сопр.тр}} = \\ &= 11772 - 12557 + 8632 + 46490 + 25125 = 79462 \text{ Н (8100 кгс)} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Нагрузка в воздухе при подъеме ГЗУ на борт: суммарный вес ГЗУ и 50% системы:

$$F_{\text{верт.возд}} = P_{\text{гзу}} + P_{\text{систем.под}} = 11772 + 46490 = 58262 \text{ Н (5939 кгс)} \quad (2.27)$$

Расчет выбора троса ведем по максимальной нагрузке при подъеме в сапропеле $F_{\text{верт.мах}} = 79462 \text{ Н}$.

Коэффициент запаса прочности $k_{\text{зап}} = 6$.

$$F_{\text{разыв}} = F_{\text{верт.мах}} \cdot k_{\text{зап}} = 79462 \text{ Н} \cdot 6 = 476772 \text{ Н} = 48,6 \text{ тс} \quad (2.28)$$

По таблицам ГОСТ 7669-80 [134] определяем трос:
трос типа ЛК-РО с конструкции $6 \times 36(1+7+7/7+14)+7 \times 7(1+6)$,
диаметр троса: $26,5 \text{ мм}$ (разрывное усилие $480500 \text{ Н} \sim 49,0 \text{ тс}$).

Задача №2: Расчёт наклонного тягового троса

Нагрузка создается силой сопротивления движению ГЗУ в сапропеле + силой сопротивления движению транспортного рукава в сапропеле.

1. Расчет усилия резания (сдвига) породы

Это усилие необходимо для отделения стружки грунта от массива.

Ширина резания (B_k), это ширина ковша: $B_k = 1,4\text{м}$.

Высота стружки (h), это высота ковша $H_k = 0,6\text{м}$ (ковш работает на полное заглубление).

Угол заточки ножа (φ), это угол установки фронтальной плоскости зева к горизонту, или угол резания: $\varphi = 55^\circ$.

Предельное напряжение сдвига (τ_o): $\tau_o = 600\text{ Па}$.

Коэффициент (K), учитывающий форму стружки и давление на переднюю грань, для пластичных пород и большого угла резания принимаем $K = 2$.

Формула для усилия резания ($F_{\text{рез}}$):

$$F_{\text{рез}} = K \cdot \tau_o \cdot B_k \cdot h = 2 \cdot 600\text{Па} \cdot 1,4\text{м} \cdot 0,6\text{м} = 1008\text{ Н} \quad (2.29)$$

Эта сила направлена перпендикулярно к режущей плоскости (под углом 35° к горизонту). Нас интересует её горизонтальная проекция.

Горизонтальная составляющая усилия резания ($F_{\text{рез.гор}}$):

$$F_{\text{рез.гор}} = F_{\text{рез}} \cdot \cos(35^\circ) = 1008 \cdot 0,819 = 826\text{ Н} \quad (2.30)$$

2. Расчёт усилия трения породы по поверхностям ковша

Сапропель движется по ножевой решетке, установленной под углом 55° , и сила трения складывается из трения о решетку и трения о боковые стенки.

Угол трения сапропеля по стали (δ) принимаем как для влажной глины ($\delta = 20 - 25^\circ$), $\delta = 25^\circ$.

Коэффициент трения (η): $\eta = \text{tg}(\delta) = \text{tg}(25^\circ) = 0,47$.

Нормальное давление на решетку: будем считать, что весь объем грунта в ковше давит на решетку, и давление на дне будет максимальным.

Объём призмы сапропеля перед решеткой:

Упрощенно можно представить как треугольную призму длиной B_k .

$$V = \frac{L_k \cdot H_k}{2} \cdot B_k = \frac{1,8\text{м} \cdot 0,6\text{м}}{2} \cdot 1,4\text{м} = 0,756 \text{ м}^3 \quad (2.31)$$

Вес сапропеля в этой призме (G):

$$G = V \cdot \rho \cdot g = 0,756 \cdot 1600 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 = 11870 \text{ Н} \quad (2.32)$$

Сила нормального давления породы на решетку (N) равна проекции веса и силы инерции на нормаль к плоскости. Упрощенно можно принять, что основное давление создается весом породы.

Нормальная сила на решетке ($N_{\text{реш}}$):

$$N_{\text{реш}} = G \cdot \cos(55^\circ) = 11870 \text{ Н} \cdot 0,574 = 6810 \text{ Н} \quad (2.33)$$

Сила трения о решетку ($F_{\text{тр.реш}}$):

$$F_{\text{тр.реш}} = \eta \cdot N_{\text{реш}} = 0,47 \cdot 6810 \text{ Н} = 3200 \text{ Н} \quad (2.34)$$

Эта сила направлена вдоль решетки (55° к горизонту). Её горизонтальная проекция $F_{\text{тр.реш.гор}}$:

$$F_{\text{тр.реш.гор}} = F_{\text{тр.реш}} \cdot \cos(55^\circ) = 3200 \text{ Н} \cdot 0,574 = 1835 \text{ Н} \quad (2.35)$$

Трение о внутренние стенки ковша включая крышку и днище:

$$F_{\text{тр.внутр.пов.ковш}} = \tau_o \cdot S_{\text{внутр.пов.ковш}} + \frac{\mu_{\text{пл}} \cdot S_{\text{внутр.пов.ковш}} \cdot v}{0,5 \cdot D_{\text{тр}}} \quad (2.36)$$

$$S_{\text{внутр.пов.ковш}} = 2 \cdot 0,6\text{м} \cdot 1,8\text{м} + 2 \cdot 1,4\text{м} \cdot 1,8\text{м} = 2,16 + 5,04 = 7,2 \text{ м}^2 \quad (2.37)$$

$$F_{\text{тр.внутр.пов.ковш}} = 600 \text{ Па} \cdot 7,2 \text{ м}^2 + \frac{50 \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot 7,2 \text{ м}^2 \cdot 0,05 \text{ м/с}}{0,5 \cdot 1,27 \text{ м}} = 4320 + 28 = 4348 \text{ Н} \quad (2.38)$$

Сопротивление камеры (горизонтальное) $F_{\text{сопр.кам.гор}}$:

$$F_{\text{сопр.кам.гор}} = 600 \cdot 0,16 + \frac{50 \cdot 0,16 \cdot 0,05}{0,5 \cdot 0,4} = 96 + 2 = 98 \text{ Н} \quad (2.39)$$

3. Сопротивление ТР (горизонтальное): ТР волочитсЯ по сапропелю.

Площадь сдвига - проекция погруженной части ТР на вертикальную плоскость.

Упрощенно: длина погруженного ТР ~64 м, диаметр 0.4м.

$$S_{\text{гор.тр}} = D_{\text{тр}} \cdot L_{\text{тр}} = 0,4\text{м} \cdot 64\text{м} = 25,6 \text{ м}^2 \quad (2.4)$$

$$F_{\text{сопр.тр.гор}} = \tau_o \cdot S_{\text{гор.тр}} + \frac{\mu_{\text{пл}} \cdot S_{\text{гор.тр}} \cdot v}{0,5 \cdot D_{\text{тр}}} =$$

$$= 600 \cdot 25,6 + \frac{50 \cdot 25,6 \cdot 0,05}{0,5 \cdot 0,4} = 15360 + 320 = 15680 \text{ Н} \quad (2.41)$$

4. Суммарное сопротивление горизонтальному движению:

Учет угла натяжения (35°):

$$F_{\text{тяг.трос}} = \frac{F_{\text{сопр.гор.сум}}}{\cos(35^\circ)} = \frac{22509 \text{ Н}}{0,819} = 27484 \text{ Н} \quad (2.42)$$

Выбор тягового троса ведем по $F_{\text{тяг.трос}} = 27484 \text{ Н}$

Коэффициент запаса прочности $k_{\text{зап}} = 4,5$.

$$F_{\text{разрывная}} = F_{\text{тяг.трос}} \cdot k_{\text{зап}} = 27484 \cdot 4,5 = 123678 \text{ Н} = 12,61 \text{ тс} \quad (2.43)$$

По таблицам ГОСТа выбираем трос:

трос типа ЛК-Р.

диаметр троса: 14,5 мм (разрывное усилие 141500 Н = 14,4 тс).

Задача №3: Страховочный трос

Этот трос должен держать:

1. нагрузку от горизонтального движения (как в Задаче 2): 22509 Н,
2. нагрузку при аварийном подъеме всей системы (ГЗУ + 100% ТР) с динамическим коэффициентом.

Расчет для аварийного подъема:

Определим вес ГЗУ в сапропеле $P_{\text{гзу.сапр}}$:

$$\begin{aligned} P_{\text{гзу.сапр}} &= P_{\text{гзу}} - F_{\text{архим.гзу}} + F_{\text{сопр.гзу}} = \\ &= 11772 - 12557 + 8632 = 7847 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Вес всей системы ТР в сапропеле складывается из веса системы ТР за минусом архимедовой силы ТР. С учетом того, что внутри ТР высоконапорный рукав ВНР заполнен сапропелем и 3 гидравлических шланга наполнены гидравлической жидкостью, его эффективный вес в сапропеле - это его масса $m_{\text{сист.тр}}$, умноженная на g , за вычетом архимедовой силы, которой можно пренебречь по сравнению с массой. Поэтому $P_{\text{сист.тр}} = 92979 \text{ Н}$:

$$P_{\text{сист.тр}} = m_{\text{сист.тр}} \cdot g = 9478 \cdot 9,81 = 92979 \text{ Н} \quad (2.45)$$

Сопротивление сапропеля движению всего ТР при подъеме (длина 64 м):

$$S_{\text{бок.тр.полн}} = \pi \cdot D_{\text{тр}} \cdot L_{\text{тр}} = 3.14 \cdot 0.4 \cdot 64 \approx 80.4 \text{ м}^2 \quad (2.46)$$

$$F_{\text{сопр.тр.пол}} = \tau_0 \cdot S_{\text{бок.тр.полн}} + \frac{\mu \cdot S_{\text{бок.тр.полн}} \cdot v}{0.5 \cdot D_{\text{тр}}} =$$

$$= 600 \cdot 80.4 + \frac{50 \cdot 80.4 \cdot 0.05}{0.5 \cdot 0.4} = 48240 + 1005 = 49245 \text{ Н} \quad (2.47)$$

Суммарная статическая нагрузка при аварийном подъеме:

$$F_{\text{стр.статич}} = P_{\text{гзу.сапр}} + P_{\text{сист.тр}} + F_{\text{сопр.тр.пол}} =$$

$$= 7847 + 92979 + 49245 = 150072 \text{ Н} \quad (2.48)$$

Учет динамичности ($k_{\text{дин}} = 1.5$):

$$F_{\text{стр.дин}} = F_{\text{стр.статич}} \cdot k_{\text{дин}} = 150072 \text{ Н} \cdot 1.5 = 225113 \text{ Н} \quad (2.49)$$

Выбор троса: Расчет ведем по динамической нагрузке $F_{\text{стр.дин}} = 225113 \text{ Н}$.

Коэффициент запаса прочности $k_{\text{зп}} = 6$.

$$F_{\text{разрывн}} = F_{\text{стр.дин}} \cdot k_{\text{зп}} = 225113 \cdot 6 = 1350678 \text{ Н (137,7 тс)} \quad (2.50)$$

По таблицам ГОСТ7669-80 [134] выбираем трос:

трос типа ЛК-Р, диаметр троса: 48.5 мм (разрывное усилие ~140 тс), это очень крупный трос.

Результаты расчетов сводим в таблицу.

Таблица 2.2-Результаты расчётов тросов

№	Назначение троса	Максимальная расчетная нагрузка, Н (тс)	Требуемое разрывное усилие, Н (тс)	Рекомендуемый диаметр троса по ГОСТ7669-80, мм
1	Вертикальный погружной	79462 Н (6,0)	466772 Н (48,6)	26,5
2	Тяговый (горизонтальный)	27484 Н (2,8)	123678 Н (12,61)	14,5
3	Страховочный	225113 Н (22,95)	1350678 Н (137,7)	48,5

Вывод: Учет массы и сопротивления транспортного рукава кардинально увеличивает расчетные нагрузки, особенно на вертикальный и страховочный тросы.

2.3.4. Подбор лебедок

Произведем подбор лебедок с установленными мощностями электромоторов для каждого троса на основе выше приведенных расчетов.

Исходные данные для подбора:

1. Вертикальный погружной трос:

максимальное тяговое усилие: $F_{\text{верт}} = 79462 \text{ Н}$,

скорость подъема: $v_{\text{верт}} = 0,1 \text{ м/с}$,

диаметр троса: 26,5 мм.

2. Тяговый трос (горизонтальный):

максимальное тяговое усилие: $F_{\text{гор}} = 27484 \text{ Н}$,

скорость движения: $v_{\text{стр}} = 0.05 \text{ м/с}$,

диаметр троса: 14,5 мм.

3. Страховочный трос:

максимальное тяговое усилие (аварийный режим): $F_{\text{стр}} = 225113 \text{ Н}$,

скорость подъема (аварийный): $v_{\text{стр}} = 0.05 \text{ м/с}$ (принимая меньшую скорость для снижения мощности),

диаметр троса: 48.5 мм.

Расчет мощностей и подбор лебедок.

Формула для расчета мощности на барабане лебедки:

$$P_{\text{леб}} = (F \cdot v) / \eta, \text{ где:} \quad (2.51)$$

$P_{\text{леб}}$ - мощность на барабане, Вт;

F - тяговое усилие, Н;

v - скорость намотки троса, м/с

η - общий КПД лебедки (редуктор, подшипники), примем $\eta = 0.85$

1. Лебедка для вертикального погружного троса:

$$P_{\text{леб.верт}} = \frac{79462 \text{ Н} \cdot 0,1 \text{ м/с}}{0,85} = \frac{7946,2}{0,85} = 9349 \text{ Вт} = 9,4 \text{ кВт} \quad (2.52)$$

С учетом запаса на пусковые токи и возможные перегрузки

рекомендуемая установленная мощность электромотора погружной лебедки составит 15 кВт.

1. Лебедка для тягового троса (горизонтальное перемещение):

$$P_{\text{леб.гор}} = \frac{27484 \text{ Н} \cdot 0,05 \text{ м/с}}{0,85} = \frac{1374,2}{0,85} = 1617 \text{ Вт} = 1,62 \text{ кВт} \quad (2.53)$$

Рекомендуемая установленная мощность электромотора: 2.2 кВт или 3.0 кВт. (Мощность невелика, но выбор двигателя большего типоразмера обусловлен надежностью, моментом и стандартным рядом).

2. Лебедка для страховочного троса (аварийная):

$$P_{\text{леб.стр}} = \frac{225113 \text{ Н} \cdot 0,05 \text{ м/с}}{0,85} = \frac{11255,65}{0,85} = 13242 \text{ Вт} = 13,3 \text{ кВт} \quad (2.54)$$

Рекомендуемая установленная мощность электромотора: 16 кВт или 18.5 кВт (запас прочности на случай необходимости подъема на скорости выше 0.05 м/с).

Рекомендации по конструктиву лебедок (табл. 2.3)

1. Вертикальная подъемная лебедка (15 кВт):

Тип: Лебедка с барабанным шпилем, должна иметь тормоз замкнутого типа (удерживающий) и аварийный тормоз. Обязательно наличие счетчика витков или энкодера для контроля глубины. Управление - частотное, для плавного пуска и остановки.

Таблица 2.3 - Сводная таблица подбора лебедок

№	Назначение лебедки	Тяговое усилие, тс	Скорость, м/с	Диаметр троса, мм	Мощность на барабане, кВт	Рекоменд. мощность двигателя, кВт
1	Вертикальная подъемная	6,0	0,1	26,5	9,4	15
2	Горизонтальная тяговая	2,8	0,05	14,5	1,62	3,0
3	Страховочная аварийная	22,95	0,05	48,5	12,9	18,5

Запас троса на барабане: не менее 45 м + 5-6 запасных витков.

Расчет диаметра барабана:

$$D_{\text{бар}} \geq (25...30) \cdot d_{\text{трос}} = 25 \cdot 26,5 = 700 \text{ мм.} \quad (2.55)$$

Пример: Лебедка типа ЛБ-4 (с индексацией под тягу 5-7 тс).

2. Горизонтальная тяговая лебедка (3.0 кВт):

Тип: буксирная или тяговая лебедка.

Конструктив: может быть более простой конструкции, но также с надежным тормозом. Возможно использование мотор-редуктора.

Запас троса на барабане: не менее 80 м.

Расчет диаметра барабана:

$$D_{\text{бар}} \geq (20...25) \cdot d_{\text{трос}} = 20 \cdot 14,5 = 300 \text{ мм.} \quad (2.56)$$

3. Страховочная лебедка (18.5 кВт):

Тип: лебедка аварийной ситуации или мощная барабанная лебедка.

Конструктив: Должна быть максимально надежной. Часто имеет самостоятельный привод (дизельный или от отдельного генератора) на случай отключения электроэнергии. Обязательна система аварийного пуска. Тормозная система должна удерживать груз в любом положении.

Запас троса на барабане: не менее 74 м.

Расчет диаметра барабана:

$$D_{\text{бар}} \geq (25...30) \cdot d_{\text{трос}} = 25 \cdot 45 = 1200 \text{ мм.} \quad (2.57)$$

Лебедки должны соответствовать требованиям Правил безопасности [135] и ГОСТу на лебедки [136].

Фактический подбор конкретной модели лебедки осуществляется по каталогам производителей (например, "Ураллебедка", "Сокол", "Велмаш" и др.) на основе расчетных усилий, скоростей и массогабаритных показателей.

Указанные мощности являются установленной электрической мощностью. Пусковой момент двигателей должен быть достаточным для начала движения системы из состояния покоя.

Для уменьшения тягового усилия и диаметра троса аварийной лебедки можно использовать полиспаст - систему из нескольких подвижных и неподвижных блоков (шкивов), через которые пропущен трос.

Выигрыш в силе достигается за счет проигрыша в расстоянии.
Теоретическое усилие на лебедке:

$$F_{\text{леб}} = F_{\text{гр}} / n, \quad (2.58)$$

где n — кратность полиспаста (количество ветвей троса, на которых висит груз).

Фактическое усилие всегда выше из-за потерь на трение в блоках:

$$F_{\text{леб}} = F_{\text{гр}} / (\eta_{\text{пол}} \cdot n), \quad (2.59)$$

где $\eta_{\text{пол}}$ - КПД полиспаста.

Скорость навивки троса на лебедку:

$$v_{\text{леб.тр}} = v_{\text{гр}} \cdot n \quad (2.60)$$

Расчет для аварийной страховочной лебедки

Усилие на крюке (подъем всей системы): $F_{\text{стр}} = 225113 \text{ Н}$

Скорость подъема (аварийная): $v_{\text{гр}} = 0.05 \text{ м/с}$

Вариант с полиспастом кратностью $n = 6$:

Общий КПД для $n=6$: $\eta_{\text{пол.общ}} = 0,96^6 = 0.78$

Усилие на лебедке $F_{\text{леб.стр}}$:

$$F_{\text{леб.стр}} = \frac{225113 \text{ Н}}{0,78 \cdot 6} = \frac{225113}{4,68} = 48101 \text{ Н. (4,9 тс)} \quad (2.61)$$

Скорость навивки троса на лебедку:

$$v_{\text{леб.стр}} = 0.05 \cdot 6 = 0.3 \text{ м/с} \quad (2.62)$$

Мощность на барабане лебедки $P_{\text{леб.стр}}$:

$$P_{\text{леб.стр}} = \frac{48101 \text{ Н} \cdot 0,3 \text{ м/с}}{0,85} = 16977 \text{ Вт} = 17,0 \text{ кВт} \quad (2.63)$$

Итог по аварийной лебедке: без полиспаста нам нужна лебедка с тяговым усилием 22,95 тс и мотором 18.5 кВт, а с полиспастом $n=6$ нужна лебедка с тяговым усилием 4,9 тс с тем же мотором.

Таким образом, применение полиспаста на аварийной лебедке позволяет снизить тяговое усилие с 23 тс до 4,9 тс и уменьшить диаметр троса на лебедке до

18-20 мм, что в свою очередь позволяет использовать неспециализированную лебедку, снизить стоимость и упростить конструкцию.

Полиспаста должен соответствовать требованиям ГОСТ [137].

2.4. Методика определения расходно-напорных характеристик погружного грунтозаборного камерного комплекса (ПГКК)

Практические наблюдения показали, что время выемки сапропеля любым погружным грунтозаборным устройством с одной стоянки длится несколько минут, после чего в него начинает поступать сапропель, значительно разбавленный водой. При добыче сапропеля земснарядами грунтозабор обычно осуществляется разупрочнением горной массы эрозионным размывом, либо фильтрационным, когда торец всасывающего патрубка погружен в рыхлый разрабатываемый слой, который называется также суффозионным. Изучение скоростного поля всасывающей жидкости в работах Кнороза В.С., Гончарова В.Н., Рощупкина Д.В., Харина А.И., Романенко Б.Е., Царевского А.М. и других показали, что определяющим для обеспечения всасывания породы гидравлическим разупрочнением является положение торца всасывающего патрубка относительно подводного забоя. Так, при удалении грунтозаборника от забоя на расстояние, равного диаметру, скорость всасывания уменьшается в 2 раза, а при удалении до 2-х диаметров – до 10 раз. Таким образом, с увеличением расстояния между грунтозаборником и забоем резко уменьшается всасывающая способность грунтового агрегата, и для её увеличения используются погружные устройства, способные повысить концентрацию гидросмеси.

Погружение грунтозаборного устройства в толщу разрабатываемой залежи приводит к резкому увеличению гидравлического сопротивления на входе в насос и кавитации. Уравнения (2.64) потерь напора во всасывающей линии Нурока [138] и Дарси-Вейсбаха содержат квадратный член скорости всасывания $v_{вс}^2$ – критическая величина всего процесса гидравлической добычи, поскольку связана

с критической скоростью гидро-транспортирования, и для сапропелевых пульп она лежит в пределах $1,5 \div 3 \text{ м/с}$.

$$h_b = h_{\pi} \left(\frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_0} - 1 \right) + h_{\Gamma} \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_0} + i_l l + h_{\pi} + \frac{v_{\text{вс}}^2}{2g} \cdot \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_0} + h_{\text{вх}} \quad (2.64)$$

$$\Delta h_b = \lambda \cdot (L/D) \cdot (v^2/2g) \quad (2.65)$$

Согласно данной классической методики расчётная скорость потока во всасывающем патрубке должна быть не меньше критической скорости гидро-транспортирования сапропелевой пульпы, чтобы исключить закупорку трубопровода. При этом необходимо соблюдать главное правило технологии гидравлического разупрочнения: чем гуще и плотнее сапропель, тем выше критическая скорость его гидро-транспортирования.

Предлагаемая автором методика основывается на противоположном принципе: сапропель естественной влажности является седиментационно-устойчивой структурированной дисперсией и не имеет критических скоростей седиментации, что позволяет отказаться от парадигмы гидравлического разупрочнения и повернуть главное классическое правило на 180° : чем гуще и плотнее сапропель, тем ниже скорость его транспортирования и ниже энергозатраты.

Ниже на рисунке 2.34 приведена расчётная схема потерь напора ПГКК, которая включает следующие местные потери давления: в защитной решетке, скреперном ковше, на входе в камеру, входном патрубке, в эксцентриковом винтовом насосе, а также на трение при всасывании сапропеля.

Камера ПГКК будет испытывать внешнее гидростатическое давление согласно основного уравнения гидростатики, от столба воды h_b и столба сапропеля h_c . При этом полную формулу давления на камеру 2 с учетом атмосферного давления можно записать следующим образом:

$$P_{\pi} = P_a + \rho_b \cdot g \cdot h_b + \rho_c \cdot g \cdot h_c, \quad (2.66)$$

где: ρ_b и ρ_c – плотность, h_b и h_c – мощность покрывающего слоя воды и сапропеля

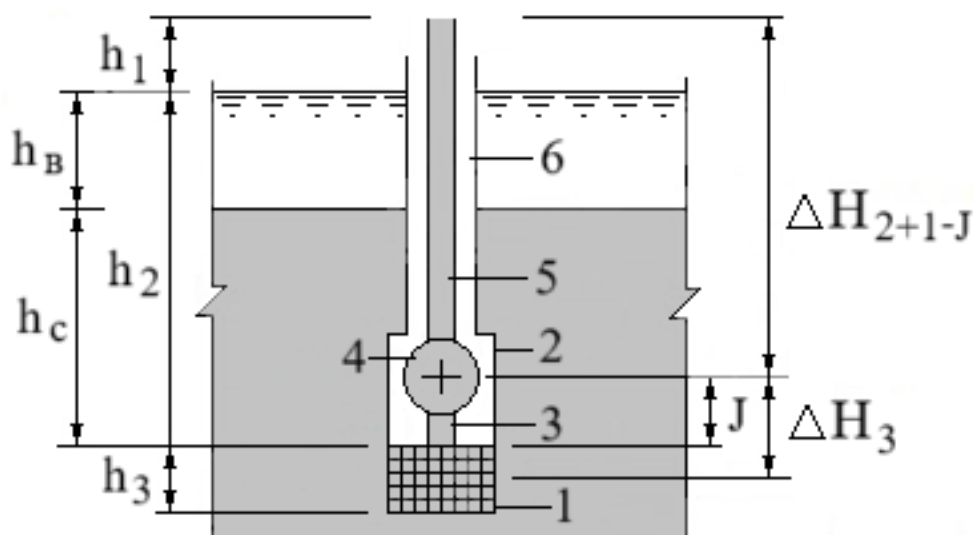


Рисунок 2.34 – Расчетная схема для потерь напора ПГКК: 1 – ковш с ножевой решеткой, 2 – погружная камера, 3 – входной патрубок насоса, 4 – насос ЭВН, 5 – напорный трубопровод, 6 – транспортный рукав.

соответственно. Камера 2 соединена с атмосферой рукавом 6, поэтому давление внутри камеры 2 равно атмосферному P_a . Поскольку сапропель является структурированной средой с пределом текучести τ_0 , напряжения в такой среде должны преодолеть сопротивление среды сдвигу (τ_0), чтобы сапропель начал течь и вести себя как жидкость. Пока среда неподвижна, она может удерживать часть гидростатического давления за счет своей структуры. Чтобы оценить, может ли столб сапропеля высотой h_c «протечь» вниз и создать давление на входе в камеру 2, нужно оценить касательные напряжения в нем. Для вертикального столба сапропеля с пределом текучести τ_0 максимальная высота $h_{\text{макс}}$, которую он может удержать без течения (без передачи полного гидростатического давления), определяется по формуле:

$$h_{\text{макс}} = \tau_0 / (\rho_c \cdot g). \quad (2.67)$$

Подставив значения τ_0^t и ρ_c для образцов исследуемых сапропелей и максимально возможных значений τ_0^t и ρ_c для гипотетического образца (Мах), рассчитываем значения максимальных высот столба сапропеля $h_{\text{макс}}$ (табл. 2.4).

Таблица 2.4 – Максимальная высота столба сапропеля удерживаемого без течения

Обозначение и название параметров		Q1 Веверу	Q4 Пильвелю	Q5 Убаговас	Q6 Пуришу	Q8 Вейно	Q10 Савельево	Max
ρ_c	Плотность, кг/м ³	1050	1058	1123	1098	1305	1356	1600
τ_0^t	Предел текучести с учетом k_t^t , Па	17,32	20,88	31,8	47,88	108	180,1	600
$h_{\text{макс}}$	Высота столба максимальная, м	0,002	0,002	0,003	0,005	0,008	0,014	0,038

Анализ полученных значений показывает, что столб сапропеля с максимальным пределом текучести $\tau_0^t = 600$ Па высотой всего 3,8 см создает напряжение, достаточное для преодоления его прочности и начала течения. Рабочие же глубины выемки сапропелей многократно превышают эту критическую высоту, что подтверждает тот факт, что сапропель не может удержать свой собственный вес и будет вести себя как густая тяжелая жидкость, создавая почти полное гидростатическое давление на погружную камеру. Предел текучести в 600 Па слишком мал, чтобы повлиять на ситуацию при большой мощности покрывающего слоя.

С учётом того, что сапропель представляет собой не идеальную пластическую среду (которой нужен только порог τ_0 чтобы сдвинуться), и не совсем вязкопластическую жидкость, описываемую моделью Бингама, касательные напряжения в которой описываются как

$$\tau = \tau_0 + \mu_p(du/dr), \quad (2.68)$$

где μ_p – пластическая вязкость (Па·с), du/dr – скорость сдвига (с⁻¹), или градиент скорости течения. Чтобы сапропель потек нужно не только преодолеть предел текучести для течения в трубе (условие начала течения)

$$\Delta P > \Delta P_{\min}, \text{ где } \Delta P_{\min} = (2\tau_0 \cdot L)/R \quad (2.69)$$

но надо также обеспечить перепад для преодоления пластического сопротивления: дополнительное давление $\Delta P_{\text{вязк}}$ будет тратиться на преодоление участка сдвигового разжижения вязкости (псевдо пластического течения).

Пластическая вязкость не влияет на то, потечет сапропель или нет, но она сильнейшим образом влияет на то, как быстро он будет течь.

Давление снаружи камеры главным образом зависит от глубины погружения камеры. При малой глубине перепад давлений ΔP будет лишь немного превышать минимальный порог ΔP_{min} , необходимый для сдвига, почти вся энергия внешнего давления будет уходить на преодоление предела текучести, и на долю преодоления вязкости остается очень маленькая «движущая сила». В результате чего сапропель сдвинется с места, но будет течь очень медленно – ползти. Всасывание будет затруднительным и неэффективным.

При большой глубине перепад давления ΔP значительно превышает порог ΔP_{min} , и после преодоления τ_0 остается большой запас давления

$$\Delta P_{эфф} = \Delta P - \Delta P_{min} \quad (2.70)$$

для преодоления вязкости. Согласно уравнению Бингама, чем больше $\Delta P_{эфф}$, тем выше скорость сдвига (du/dr) и, следовательно, тем выше скорость течения. При этом сапропель не только начнет течь, но будет всасываться значительно быстрее, всасывание будет более эффективным. При этом необходимо также учесть потери давления на всасывающем участке ПГКК. Сумму потерь давления (м) на всасывающем участке можно записать следующим уравнением:

$$\Delta H_3 = J \frac{\rho_c}{\rho_0} + \Delta H_\xi + \Delta H_L \quad (2.71)$$

где: h_3 - высота ковша, м; J – высота от крышки ковша до центра приемной камеры насоса, м; $J \frac{\rho_c}{\rho_0}$ - потери напора на подъёме гидросмеси (м), где: ρ_c плотности сапропеля, кг/м³; ρ_0 – плотность воды, кг/м³; ΔH_ξ – местные потери (м), складывающиеся из потерь напора на входной решетке 1 и на входном патрубке 3; ΔH_L – потери напора на трение по длине L всасывающей линии, включая ковш, патрубков и камеру насоса;

Местные потери напора в метрах на входной решетке определим по известной формуле Дарси-Вейсбаха (2.65), приняв скорость всасывания в ковше как максимальную скорость рабочего продвижения ковша в залежи $v=0,05\text{ м/с}$, а

коэффициент местного сопротивления решетки $\xi_{\text{реш}}$, выполненной из стальных полос толщиной 4мм с острыми краями, рассчитывают по формуле Идельчика И.Е. [139]:

$$\Delta H_{\xi} = \Sigma \frac{\xi_{\text{реш}} \cdot v^2}{2g} = \frac{0,29 \text{м} \cdot 0,05^2 \text{м/с}}{2 \cdot 9,81 \text{м/с}^2} = 0,00074 \text{м} \quad (2.72)$$

$$\xi_{\text{реш}} = \left(1 + \frac{0,707}{\sqrt{1 - \frac{F_1}{F_2}}} \right)^2 \left(\frac{F_2}{F_1} - 1 \right)^2 = 0,29 \quad (2.73)$$

где: $F_1 = 0,7168 \text{м}^2$ - площадь ячеек сетки; $F_2 = 0,84 \text{м}^2$ - площадь поперечного сечения ковша (Таблица 2.1, п.4)

Коэффициент сопротивления входного патрубка насоса, установленному заподлицо с верхней крышкой ковша, определяем по формуле Харина А.И. [140]:

$$\xi_{\text{вх}} = \frac{15}{(v_{\text{вс}} - 0,2)0,8} = \frac{15}{(0,68 - 0,2) \cdot 0,8} = 39,06 \quad (2.74)$$

Скорость потока гидросмеси на входном патрубке в м/с определяется по формуле (2.75), и при максимальной производительности насоса $Q_n = 120 \text{м}^3/\text{ч}$ и диаметре входного патрубка $D = 250 \text{мм}$ составит:

$$v_{\text{вс}} = \frac{4Q_n}{\pi D^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 120 \text{м}^3/\text{ч}}{3,14 \cdot (0,25 \text{м})^2 \cdot 3600} = 0,68 \text{ м/с} \quad (2.75)$$

Тогда местные потери на входном патрубке при $D = 250 \text{ мм}$ будут равны:

$$\Delta h_{\text{вх}} = \frac{\xi_{\text{вх}} \cdot v_{\text{вс}}^2}{2g} = \frac{39,06 \cdot 0,68^2}{2 \cdot 9,81 \text{м/с}^2} = 0,92 \text{ м} \quad (2.76)$$

Потери напора на трение при общей длине всасывающей линии, состоящей из длины ковша, плюс длина всаса, плюс длина приемной камеры насоса, примем как потери на участке трубы диаметром 250 мм длиной 2,5 м и рассчитаем по известной формуле Бэкингема [141],[142] (модифицированное уравнение Дарси-Вейсбаха для бингамовских пластических жидкостей) с учётом максимальных известных показателей для сапропелей: пластической вязкости $32 \text{Па} \cdot \text{с}$, напряжения сдвига 500Па с применением установленных выше температурных коэффициентов для вязкости и напряжения сдвига, а также максимальной плотности сапропеля

$\rho_c = 1600 \text{ кг/м}^3$:

$$\Delta h_{\text{тр}} = \left(\frac{4\tau_o \cdot k_t^t}{\rho g} + \frac{32\mu_o \cdot k_\mu^t \cdot v}{D \rho g} \right) \frac{L}{D} = \left(\frac{4 \cdot 500 \text{ Па} \cdot 1,2}{1600 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2} + \right. \\ \left. + \frac{32 \cdot 32 \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot 1,56 \cdot 0,68 \text{ м/с}}{0,25 \text{ м} \cdot 1600 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2} \right) \frac{2,5 \text{ м}}{0,25 \text{ м}} = (0,152 \text{ м} + 0,277 \text{ м}) \cdot 10 = 4,29 \text{ м} \quad (2.77)$$

Тогда общие потери на входе согласно уравнения (2.71) при высоте ковша $h_3 = 0,6 \text{ м}$ и $J = 0,4 \text{ м}$ составят:

$$\Delta H_3 = J \frac{\rho_c}{\rho_o} + \Delta H_\xi + \Delta H_L = 0,4 \text{ м} \frac{1600 \text{ кг/м}^3}{1000 \text{ кг/м}^3} + 0 + 0,92 \text{ м} + 4,29 \text{ м} = 5,85 \text{ м} \quad (2.78)$$

Поскольку насос максимально приближен к всасу (длина L мала) и скорость всасывания v тоже мала (меньше 1 м/с), низкие гидравлические потери $5,85 \text{ м}$ на входе в ГЗУ гарантируют устойчивое всасывание сапропеля естественной влажности в залежи при плотности $\rho_c = 1600 \text{ кг/м}^3$, пластической вязкости $\mu_p = 50,0 \text{ Па} \cdot \text{с}$, напряжении сдвига $\tau_o = 600 \text{ Па}$ и даже на самой малой глубине разработки до 1 м , так как ЭВН создает собственное разряжение до 7 м . Внешнее гидростатическое давление растёт пропорционально глубине разработки, за счёт чего всасывающая способность ЭВН с глубиной тоже возрастает. Плюс механический напор ковша за счет тягового троса, что облегчает пуск и работу ЭВН при выемке высокопластических и пастообразных сапропелей и всегда гарантирует устойчивое всасывание при работе ПГКК.

Потери давления на трение на гидродоёме сапропеля встроенным ЭВН на поверхность складываются из потерь напора на подъём гидросмеси, из местных потерь входа и выхода трубопровода, потерь на трение в подающем трубопроводе с учётом установленных выше температурных коэффициентов, и описываются следующим уравнением:

$$\Delta H_{1+2-J} = (h_2 + h_1 - J) \frac{\rho_c}{\rho_b} + 2\Delta \xi_\phi \frac{\rho_c}{\rho_b} + \left(\frac{4\tau_o \cdot k_t^t}{\rho_c g} + \frac{32\mu_o \cdot k_\mu^t \cdot v}{D \rho_c g} \right) \frac{L_{\text{тр}}}{D} \quad (2.79)$$

где: $\tau_o = 500 \text{ Па}$; $\mu_o = 32 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $h_1 = 1,5 \text{ м}$ высота подъёма гидросмеси над уровнем воды, м; $h_2 = 39,4 \text{ м}$ - глубина погружения днища камеры (уровень всаса), м; J

$= 0,25$ м высота подъема оси насоса над днищем камеры, м; $\rho_c = 1600$ кг/м³; $\Delta\xi_\phi = 5$ м - местные потери на выходе из насоса и выходе из трубопровода; $D = 0,28$ м - диаметр напорного трубопровода, м; v - скорость транспортировки, м/с; $L_{тр}$ – длина напорного трубопровода с учетом кривизны определяется по следующей формуле:

$$L_{тр} = \frac{\pi(h_1 + h_2 - J)}{2} + l_{зс} = \frac{3,14 \cdot (1,5 + 39,4 - 0,25)}{2} + 10 \text{ м} = 73,82 \text{ м} \quad (2.80)$$

где: $l_{зс} = 10$ м - длина напорного трубопровода от точки подъема на земснаряде до входа в трюмный бункер.

Средняя скорость подъема гидросмеси при расходе $Q = 120$ м³/ч определяется по формуле (2.75) и составляет 0,54 м/с:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 120 \text{ м}^3/\text{ч}}{3,14 \cdot 0,28^2 \cdot 3600} = 0,54 \text{ м/с}. \quad (2.81)$$

Подставляем указанные выше значения в уравнение (2.79), находим потери напора на подъёме:

$$\begin{aligned} \Delta H_{1+2-J} &= 40,65 \cdot \frac{1600}{1000} + 2 \cdot 5 \cdot \frac{1600}{1000} + \left(\frac{4 \cdot 500 \cdot 1,2}{1600 \cdot 9,81} + \frac{32 \cdot 32 \cdot 1,56 \cdot 0,54}{0,28 \cdot 1600 \cdot 9,81} \right) \frac{73,82}{0,28} = \\ &= 65,04 + 16 + (0,152 + 0,196) \cdot 263,64 = 81,04 + 91,75 = 173 \text{ м} (1,7 \text{ МПа}). \end{aligned} \quad (2.82)$$

Таким образом, погружной грунтозаборный камерный комплекс может обеспечить расход до 120 м³/ч сапропеля плотностью до 1600 кг/м³ с глубины до 40 м при диаметре напорного трубопровода 280 мм и рабочем давлении насоса 1,7 МПа при скорости подачи гидросмеси 0,54 м/с и подать его в приемный бункер трюмного или палубного перекачивающего насоса, или в транспортное плавсредство.

Максимальная глубина разработки в 40 м обусловлена не предельной высотой подъема сапропеля (в запасе остается еще 0,7 МПа давления), а максимальным внешним гидростатическим давлением в 0,4 МПа, которое выдерживают уплотнительные элементы приемной камеры ЭВН.

2.4. Выводы по главе 2

1. Основываясь на классических принципах расчёта гидравлических потерь напора, подтверждается возможность применения погружного грунтозаборного камерного комплекса для обеспечения устойчивой выемки сапропеля естественной влажности на глубине разработки до 40 метров и при изменении его физико-механических и физико-реологических показателей в залежи в полном спектре максимально возможных значений.

2. По результатам исследования получена следующая научная новизна: впервые в мировой практике предложена конструкция погружного грунтозаборного устройства камерного типа со встроенным эксцентриковым винтовым насосом, работающая в забое со скоростью до 0,05 м/с, и впервые научно обоснована его способность вести подачу сапропеля естественной влажности с пределом текучести τ_0 до 600 Па, с пластической вязкостью μ_p до 50 Па·с и плотностью ρ_c до 1600 кг/м³ с глубины до 40 м; до этого выемку таких пород предлагалось вести погружными грунтозаборными устройствами путем смешивания сапропеля с водой, что вело к образованию облака взвеси с перекачкой больших объемов сапропелевой гидросмеси (СПГ).

3. Результаты выполненных автором расчётов, основанных на фундаментальных законах гидростатики и гидродинамики с учетом предложенных поправочных коэффициентов и ограничений по экологически безопасной скорости рабочего перемещения ПГКК, позволяют сформулировать *второе научное положение*:

выемка сапропеля естественной влажности с пределом текучести до 600 Па, пластической вязкостью до 50 Па·с, плотностью сапропеля в естественном сложении до 1600 кг/м³ обеспечивается применением погружного грунтозаборного камерного комплекса, оснащенного скреперным ковшом с ножевой решеткой и эксцентриковым винтовым насосом, встроенным в погружную камеру с атмосферным давлением, расходно-напорные характеристики которого определяются глубиной разработки до 40 м, скоростью его горизонтального

перемещения до 0,05 м/с и напорно-расходными характеристиками встроенного насоса .

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ВЫЕМКИ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИИ СТРУКТУРИРОВАННОГО ГЕОМАССИВА САПРОПЕЛЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ

3.1. Депрессионная воронка сапропеля и особенности её формирования.

Практические эксперименты, проведенные на опытно промышленных предприятиях в Латвии [125], [126], [127] по добыче сапропеля показали, что при воронковом способе время выемки СЕВ с одной стоянки может колебаться от нескольких минут до полутора десятков минут, после чего начинается всасывание смешанного с водой сапропеля (СГС – сапропелевой гидросмеси) с образованием воронки, заполненной разбавленным водой сапропелем, при этом время выемки сапропеля увеличивается с ростом мощности покрывающего слоя.

Результаты экспериментальных замеров на озере Убаговас приведены ниже в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты замеров депрессионных воронок

№№ п/п	h_k (м)	r_k (м)	$Q_{сев}$ (м ³)
1	5,0	0,5	1,31
2	5,0	1,0	5,23
3	5,0	1,5	11,75
4	5,0	2,0	20,93
5	5,0	2,5	32,71

При погружении ГЗУ на глубину в 5м в толщу залежи разбавленный водой сапропель начинал поступать в ГЗУ через 15 минут, или ¼ часа. С учётом того, что производительность грунтового насоса в эксперименте составляла 25 м³/час, объём втянутого СЕВ составил чуть более 6,25 м³. Получается, что радиус конусной

воронки должен быть около 1,1 м, поскольку объём конусной воронки (см. рис. 3.1) определяется известной формулой:

$$V_{\text{сев}} = \frac{1}{3} h_k \pi r^2 \quad (3.1)$$

где : h_k – глубина погружения ГЗУ в толщу сапропеля, (м);

π – безразмерное число Пи, равное 3,14;

r_k – радиус основания конуса вынутаго СЕВ, (м)

Подставляя фактическое значение для h_k , равное 5 метрам и меняя значения радиуса r_k от 0,5 до 2,5 метров, получаем значения объёма воронки.

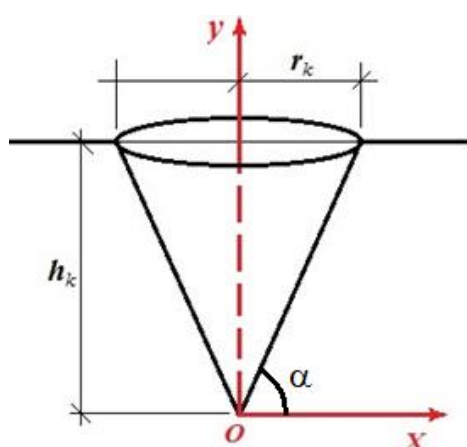


Рисунок 3.1 - Условно прямая конусная воронка всасывания.

Таким образом можно сделать предварительный вывод, что при толщине покрывающего слоя СЕВ, равной 5 метрам, объём СЕВ, извлекаемый без воды, соответствует порядка 6,25 м³ за 15 минут работы насоса и соответствует объёму, условно ограниченному объёмом конуса с радиусом основания $r_k = 1,1$ м.

При этом литературные источники [2],[143] дают нам углы внутреннего трения φ сапропеля в пределах 15÷30 градусов, которые приравниваются к углам естественного откоса γ установившегося профиля выемки. Столь большую разницу полученных значений можно объяснить реологическими свойствами сапропелей, структура которых при изменении внешних сил также изменяется, при этом полная стабилизация структуры может длиться от 50 до 200 часов [2]. Из этого следует, что угол естественного откоса воронки может меняться от большего значения α (с момента возникновения нагрузки) в сторону меньшего значения φ или γ (момент полной стабилизации нагрузки), а сам процесс стабилизации откосов является временем выполаживания откосов.

При этом процесс выполаживания (стабилизации) откосов происходит не равномерно по времени. Поскольку проникновение воды в ГЗУ происходит очень быстро, объем первичной воронки выемки даже при большой мощности покрывающего слоя получается небольшим, а это означает, что начальные углы откоса воронки могут быть очень большими, а образующая конуса не обязательно должна быть прямой, поскольку угол наклона может меняться в соответствии с изменением структурных показателей сапропеля (влажности, плотности, вязкости, напряжения сдвига, содержания твердого и содержания органики в нем, гидростатического давления).

Сопоставление натурных результатов позволило рассчитать формулу объёма идеальной депрессионной воронки и предложить 3D модель процесса формирования воронки всасывания сапропеля (см. рис. 3.2).

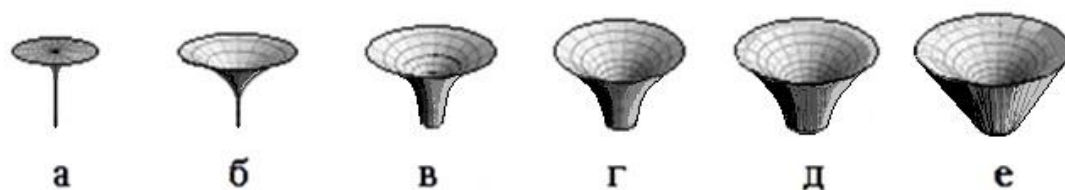


Рисунок 3.2 - 3D модель процесса формирования воронки всасывания сапропеля:
а, б - всасывание сапропеля с образованием депрессионной воронки без всасывания воды; в, г, д, е – всасывание разбавленного водой сапропеля с образованием воронки эрозионного размыва.

По мере проседания сапропеля и роста площади раструба воронки происходит заполнение просевшего объёма воронки водой.

Когда весь объём сапропеля из депрессионной воронки извлечен, воронка принимает форму параболического конуса (рис. 3.2, б). Это форма (б) идеальной депрессионной воронки без учета оползания и выполаживания откосов, на которое требуется время.

Термин «депрессионная воронка» в данном случае введен для того, чтобы разделить процесс всасывания сапропеля на два различных физических процесса:

1^{ый} – всасывание сапропеля естественной влажности без всасывания (без

размыва) с его проседанием под действием силы тяжести над входом ГЗУ (над зоной депрессии) с образованием депрессионной воронки в толще покрывающего слоя; 2^{ой} – всасывание сапропеля с водой с образованием эрозионной воронки размыва.

Текучесть воды может до $50 \cdot 10^3$ [144] раз превышать текучесть сапропеля, поэтому депрессионная воронка (рис. 3.2, б) по мере проседания в ней сапропеля полностью заполняется водой. В случае продолжения всасывания на входной патрубок начинает поступать сапропелевая гидросмесь со все возрастающим количеством воды, которая быстро размывает стенки первичного конуса депрессионной воронки и формирует растущую по объёму воронку эрозионного размыва (стадии в-г-д-е).

Для расчёта технологических параметров выемки сапропеля, автором предложена математическая модель формирования идеальной депрессионной воронки (ИДВ). Расчеты показали, что образующие кривые конусов такой воронки (рис. 3.3) могут быть описаны следующей параболической функцией:

$$x = y^3 / n_{ccc} \quad \text{или} \quad R_{дв} = h_{покр}^3 / n_{ccc} \quad (3.2)$$

где: x – радиус депрессионной воронки $R_{дв}$, y – мощность покрывающего слоя, n_{ccc} – коэффициент структурного сопротивления сдвига.

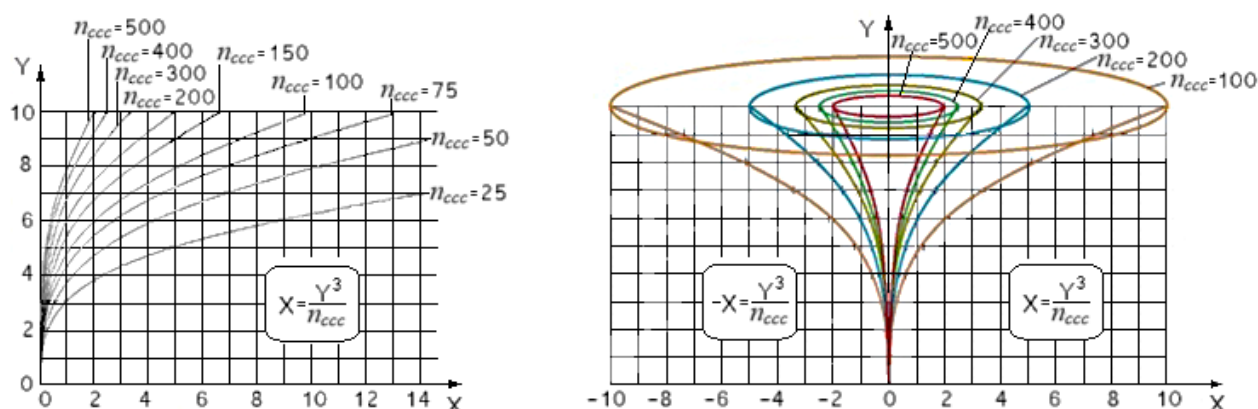


Рисунок 3.3 – Образующие кривые и конусы идеальных депрессионных воронок $V^{ИДВ}$ для различных значений y и n_{ccc} .

В физическом смысле коэффициент n_{ccc} является предельным напряжением (сопротивлением) сдвигу, измеренным в Па (паскалях), определенным для сапропеля естественной влажности в температурных условиях залежи.

3.2. Обоснование параметров выемки способом депрессионной воронки.

Согласно результату проведенных исследований коэффициент n_{ccc} для различных сапропелей в залежи может принимать значения в интервале от 18 до 600 (см. табл. 1.23). Чем больше коэффициент n_{ccc} , тем круче кривая стенки конуса, тем меньше радиус раскрытия раструба и объём депрессионной воронки, и наоборот. Мощность покрывающего слоя может варьировать в большом интервале, но для выявления закономерностей формирования воронки мы ограничились рассмотрением мощности покрывающего слоя до 10 метров. Значения радиусов X для различных значений мощности покрывающего слоя y и коэффициента n_{ccc} , а также объёмы воронки, рассчитаны на основании графика, изображенного на рисунке 3.3. Расчётная схема определения оптимально безопасного объёма депрессионной воронки, гарантирующая выемку сапропеля без разбавления его водой, показана на рисунке 3.4.

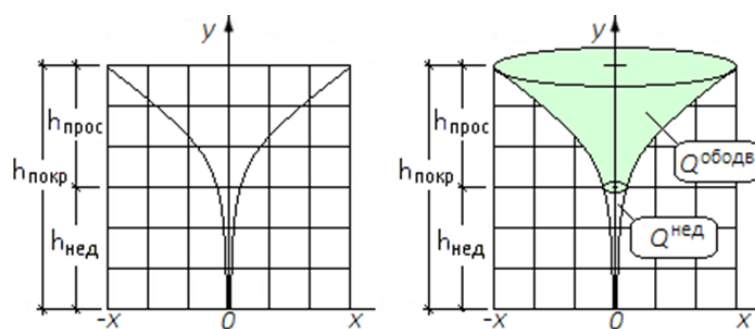


Рисунок 3.4 – Расчетная схема оптимально безопасного объёма депрессионной воронки $V^{\text{ободв}}$ с глубиной проседания $h_{\text{прос}}$.

Объём идеальной депрессионной воронки можно рассчитать по следующей формуле:

$$V_{\text{идв}} = \int_a^b \pi x^2 dy \quad (3.3)$$

Если радиус горизонтального сечения депрессионной воронки r соответствует значению x , которое изменяется по кривой $x = y^3/n_{\text{ССС}}$ в зависимости от y , где y - мощность покрывающего слоя $h_{\text{покp}}$ над входом в камеру, а образующая кривая вращается вокруг оси y , тогда формулу (3.3) можно записать следующим образом:

$$V_{\text{ИДВ}} = \int_0^h \pi x^2 dy = \int_0^h \pi \left(\frac{y^3}{n_{\text{ССС}}} \right)^2 dy = \left[\frac{\pi y^7}{7n_{\text{ССС}}^2} \right]_0^{h_{\text{покp}}} = \frac{\pi \cdot h_{\text{покp}}^7}{7n_{\text{ССС}}^2} \quad (3.4)$$

Подставляя значения $h_{\text{покp}}$ и значения $n_{\text{ССС}}$ в уравнение (2.4) в указанных выше пределах находим значения объёмов идеальной депрессионной воронки для различной мощности покрывающего слоя и структурного сопротивления сдвига и сводим эти данные в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Расчёт объёмов ИДВ и определения зон и глубин недобора $h_{\text{нед}}$

Коэфф. ($n_{\text{ССС}}$)	Толщина покрывающего слоя СЕВ ($h_{\text{покp}}$) по оси Y									
	1м	2м	3м	4м	5м	6м	7м	8м	9м	10м
	Значения $R_{\text{дв}}$ радиусов депрессионной воронки по оси X, (м)									
	Значения объёмов идеальной депрессионной воронки, м ³									
18	0,056 0,001	0,444 0,177	1,5 3,028	3,556 22,68	6,944 108,2	12 387,6	19,06 1140	28,44 2903	40,5 6622	55,56 13845
25	0,04 0,001	0,32 0,092	1,08 1,57	2,56 11,76	5 56,07	8,64 200,91	13,72 591	20,48 1505	29,16 3433	40 7177
50	0,02 0	0,16 0,023	0,54 0,392	1,28 2,94	2,5 14,02	4,32 50,23	6,86 147,8	10,24 376,3	14,58 858,2	20 1794
72	0,014 0	0,111 0,011	0,375 0,189	0,889 1,418	1,736 6,76	3 24,22	4,764 71,26	7,111 181,5	10,13 413,9	13,89 865,3
100	0,01 0	0,08 0,006	0,27 0,098	0,64 0,735	1,25 3,51	2,16 12,56	3,43 36,94	5,12 94,07	7,29 214,6	10 448,6
125	0,008 0	0,064 0,004	0,216 0,063	0,512 0,47	1 2,24	1,728 8,04	2,744 23,64	4,096 60,21	5,83 137,31	8 287,1
150	0,007 0	0,053 0,003	0,18 0,044	0,427 0,327	0,833 1,56	1,44 5,58	2,287 16,42	3,413 41,81	4,86 95,36	6,667 199,4
175	0,006 0	0,046 0,002	0,154 0,032	0,366 0,24	0,714 1,144	1,234 4,1	1,96 12,06	2,926 30,72	4,166 70,06	5,714 146,5
200	0,005 0	0,04 0,002	0,135 0,025	0,32 0,184	0,625 0,876	1,08 3,14	1,715 9,24	2,56 23,52	3,645 53,64	5 112,2
225	0,004 0	0,036 0,001	0,12 0,019	0,284 0,145	0,556 0,692	0,96 2,48	1,524 7,3	2,276 18,58	3,24 42,38	4,444 88,61

Окончание таблицы 3.2

Коэфф. (n_{ccc})	Толщина покрывающего слоя СЕВ ($h_{покр}$) по оси Y									
	1м	2м	3м	4м	5м	6м	7м	8м	9м	10м
	Значения $R_{дв}$ радиусов депрессионной воронки по оси X, (м) Значения объемов идеальной депрессионной воронки, m^3									
250	0,004 0	0,032 0,001	0,108 0,016	0,256 0,118	0,5 0,561	0,864 2,01	1,372 5,91	2,048 15,05	2,916 34,33	4 71,77
275	0,004 0	0,029 0,001	0,098 0,013	0,233 0,097	0,455 0,463	0,785 1,66	1,247 4,88	1,862 12,44	2,651 28,37	3,636 59,32
300	0,003 0	0,027 0,001	0,09 0,011	0,213 0,082	0,417 0,389	0,72 1,4	1,143 4,1	1,707 10,45	2,43 23,84	3,333 49,84
325	0,003 0	0,025 0,001	0,083 0,009	0,197 0,07	0,385 0,332	0,665 1,19	1,055 3,5	1,575 8,91	2,243 20,31	3,077 42,47
350	0,003 0	0,023 0,001	0,077 0,008	0,183 0,06	0,357 0,286	0,617 1,03	0,98 3,02	1,463 7,68	2,083 17,51	2,857 36,62
375	0,003 0	0,021 0,001	0,072 0,007	0,171 0,052	0,333 0,249	0,576 0,89	0,915 2,63	1,365 6,69	1,944 15,26	2,667 31,9
400	0,003 0	0,02 0	0,068 0,006	0,16 0,046	0,313 0,219	0,54 0,79	0,858 2,31	1,28 5,88	1,823 13,41	2,5 28,04
425	0,002 0	0,019 0	0,064 0,006	0,151 0,041	0,294 0,194	0,508 0,695	0,807 2,05	1,205 5,21	1,715 11,88	2,353 24,82
450	0,002 0	0,018 0	0,06 0,005	0,142 0,036	0,278 0,173	0,48 0,62	0,762 1,83	1,138 4,65	1,62 10,6	2,222 22,15
475	0,002 0	0,017 0	0,057 0,004	0,135 0,033	0,263 0,155	0,455 0,56	0,722 1,64	1,078 4,17	1,535 9,51	2,105 19,88
500	0,002 0	0,016 0	0,054 0,004	0,128 0,029	0,25 0,14	0,432 0,5	0,686 1,48	1,024 3,76	1,458 8,58	2 17,94

Если, например, глубина покрывающего слоя сапропеля (глубина погружения камеры в толщу сапропеля) будет составлять $h_{покр} = 6$ м при $n=72$, объём нижней части воронки с невыбранным сапропелем высотой 3 м согласно формулы (3.4) и таблицы 3.2 будет равен $0,189 м^3$:

$$V_{нед} = \frac{\pi \cdot y_{нед}^7}{7n^2} = \frac{3,14 \cdot 3^7}{7 \cdot 72^2} = 0,189 м^3 \quad (3.5)$$

При этом общий объём идеальной воронки при этих же параметрах $h_{покр}$ и n согласно формулы (3.4) будет равен $24,22 м^3$ (смотри Таблицу 3.2):

$$V_{идв} = \frac{\pi \cdot h_{покр}^7}{7n^2} = \frac{3,14 \cdot 6^7}{7 \cdot 72^2} = 24,22 м^3 \quad (3.6)$$

Таким образом, недобор, в этом случае, составляет всего 0,78%, а объём вынутого сапропеля составит $24,03 м^3$, или 99,22% (см. рис. 3.4).

Сравнение результата эксперимента на озере Убаговас ($6,25\text{м}^3$) с расчетными данными по формуле (3.4), имеет расхождение в 4,87%:

$$(6,76 - 6,25) : 6,76 \cdot 100\% = 4,87\% \quad (3.7)$$

Во избежание всасывания разжиженного водой сапропеля определяем оптимальную глубину проседания кровли $h_{\text{прос}}$ в воронке (рис. 3.4), которая позволяет определить оптимально безопасный объем депрессионной воронки $V^{\text{ободв}}$, который может быть извлечен с места одной стоянки ГЗУ со сведением риска всасывания дополнительной воды к минимуму.

Интегрируя формулу (3.4) по dh от $h_{\text{нед}}$ до $h_{\text{покр}}$ получаем уравнение (3.8) объёма оптимально безопасного объема депрессионной воронки $V^{\text{ободв}}$:

$$V^{\text{ободв}} = \int_{h_{\text{нед}}}^{h_{\text{покр}}} \pi r^2 dh = \frac{1}{7} \frac{\pi}{n_{\text{сcc}}^2} (h_{\text{покр}}^7 - h_{\text{нед}}^7) \quad (3.8)$$

где: $h_{\text{покр}}$ – мощность покрывающего слоя сапропеля над погружной камерой, м; $h_{\text{нед}}$ – мощность недобранного (защитного) слоя сапропеля над погружной камерой, м; π – число пи, $n_{\text{сcc}}$ – коэффициент структурного сопротивления сдвига, соответствующий величине предельного напряжения сдвига сапропеля в залежи, измеренного в Паскалях.

Процесс формирования в природе подобных депрессионных воронок можно наблюдать при формировании торнадо, скважинном водозаборе, депрессии в нефтеносном пласте вокруг добывающей скважины. Все они описываются параболическими функциями (кубическая парабола), а сам термин “острого гиперболического твердого тела”, впервые ввел Торричелли в 1641 году, исследующий вместе с Робервалем поверхность конуса струи воды, вытекающей из трубки крана.

Наряду с ростом гидростатического давления с глубиной увеличивается плотность сапропеля, зольность, вязкость, структурное напряжение сдвига, что и оказывает решающую роль в формировании площади раструба и объема воронки. Высокие значения сопротивления сдвига и структурной вязкости сапропеля

предотвращают развитие вихря (закручивания) при всасывании сапропеля. В дальнейшем при всасывании сапропеля с водой генерируется эрозионный размыв воронки (рис. 3.2, в-г-д-е) с образованием водяного вихря.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что основной объём сапропеля поступает из верхней части раструба депрессионной воронки, расположенной ближе к кровле залежи, где воронка имеет наибольший радиус раскрытия. Ввиду сужения конуса книзу, скорость проседания кровли происходит по нарастающей при постоянной производительности всасывающего насоса, и фактически определить прекращение поступления СЕВ можно лишь тогда, когда в насос уже поступила жидкая гидросмесь, поскольку при этом падает нагрузка на приводе насоса. Исключить всасывание разжиженного водой сапропеля надо путем остановки насоса, или начав горизонтальное продвижение ГЗУ в залежи.

Ниже в таблице 3.3 приведены соотношения оптимальных глубин проседания кровли воронки $h_{\text{прос}}$ к мощности покрывающего слоя $h_{\text{покр}}$, и соответствующие им оптимально безопасные объёмы воронок $V^{\text{ободв}}$, вычисленные как разницы объёмов между $V^{\text{идв}}$ и недобором $V^{\text{нед}}$.

Проверяем расчёт объёма оптимально безопасного объёма депрессионной воронки, беря интеграл в интервале от 3 до 6 по dy :

$$\begin{aligned} V^{\text{ободв}} &= \int_a^b \pi x^2 dy = \int_3^6 \pi \left(\frac{y^3}{n_{\text{ccc}}} \right)^2 dy = \left[\frac{\pi y^7}{7n_{\text{ccc}}^2} \right]_3^6 = \frac{\pi 6^7}{7 \cdot 72^2} - \frac{\pi 3^7}{7 \cdot 72^2} = \\ &= 24,22 - 0,189 = 24,03 \text{ м}^3 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Таким образом получается, что во избежание смешивания сапропеля с водой не надо производить выемку 100% объёма идеальной депрессионной воронки $V^{\text{идв}}$, а нужно ограничиться выемкой оптимально безопасного объёма $V^{\text{ободв}}$, оставив маленький недобор.

Расчёты оптимально безопасных объёмов депрессионных воронок $V^{\text{ободв}}$, произведенные по формуле (3.8), приведены ниже (Таблица 3.3).

Приведённые расчёты показывают соотношения оптимальных глубин проседания кровли воронки $h_{\text{прос}}$ к мощности покрывающего слоя $h_{\text{покр}}$, и

соответствующие им значения $V^{\text{ободв}}$, вычисленные как разницы объёмов между $V^{\text{идв}}$ и недобором $V^{\text{нед}}$.

Анализ полученных значений $V^{\text{ободв}}$ (табл. 3.3) позволяет выделить 3 зоны ведения работ. При значении $n_{\text{сс}} = 150\text{--}200$ и мощности покрывающего слоя $h_{\text{пок}}$ менее 10м величина $V^{\text{ободв}}$ начинает резко уменьшаться.

Таблица 3.3 - Расчёт оптимально безопасных объёмов депрессионных воронок, соотношений $h_{\text{прос}} / h_{\text{пок}}$ и определения границ выемки (проседания)

Толщина покрывающего слоя СЕВ ($h_{\text{пок}}$) по оси Y										
Коэфф $n_{\text{сс}}$	1м	2м	3м	4м	5м	6м	7м	8м	9м	10м
	$h_{\text{прос}} / h_{\text{пок}}$ $Q_{\text{ободв}} = Q_{\text{идв}} - Q_{\text{нед}}$									
18		0,177	1/3 2,851	1/2 22,5	3/5 108	2/3 387,4	5/7 1140	3/4 2903	7/9 6622	4/5 13845
25		0,092	1/3 1,48	1/2 11,67	3/5 55,98	2/3 200,82	5/7 591	3/4 1505	7/9 3433	4/5 7177
50			0,392	1/4 2,55	2,5 13,63	1/2 49,84	4/7 147,4	5/8 375,9	2/3 857,8	7/10 1794
72			0,189	1/4 1,229	2/5 6,57	1/2 24,03	4/7 71,07	5/8 181,31	2/3 413,7	7/10 865,1
100			0,098	1/4 0,637	2/5 3,41	1/2 12,46	4/7 36,84	5/8 93,97	2/3 214,5	7/10 448,5
125				1/5 0,47	1/5 1,77	1/3 7,57	3/7 23,17	1/2 59,74	5/9 136,84	3/5 286,6
150				1/5 0,327	1/5 1,23	1/3 5,25	3/7 16,09	1/2 41,48	5/9 95,03	3/5 199,1
175				1/5 0,24	1/5 0,91	1/3 3,86	3/7 11,82	1/2 30,48	5/9 69,82	3/5 146,3
200				1/5 0,184	1/5 0,692	1/3 2,96	3/7 9,06	1/2 23,34	5/9 53,46	3/5 112
225				1/5 0,145	1/5 0,547	1/3 2,34	3/7 7,16	1/2 18,44	5/9 42,24	3/5 88,47
250				1/5 0,118	1/5 0,443	1/3 1,89	3/7 5,79	1/2 14,93	5/9 34,21	3/5 71,65
275					1/6 0,463	1/6 1,22	2/7 4,42	3/8 11,98	4/9 27,91	1/2 58,86
300					1/6 0,389	1/6 1,01	2/7 3,7	3/8 10,06	4/9 23,45	1/2 49,45

Окончание таблицы 3.3

Коэфф n_{ccc}	Толщина покрывающего слоя СЕВ ($h_{покр}$) по оси Y									
	1м	2м	3м	4м	5м	6м	7м	8м	9м	10м
	$h_{прос} / h_{покр}$ $Q_{ободв} = Q_{идв} - Q_{нед}$									
325					0,332	1/6 0,86	2/7 3,2	3/8 8,58	4/9 19,98	1/2 42,14
350					0,286	1/6 0,74	2/7 2,74	3/8 7,4	4/9 17,2	1/2 36,3
375					0,249	1/6 0,64	2/7 2,38	3/8 6,44	4/9 15,01	1/2 31,7
400					0,219	1/6 0,57	2/7 2,09	3/8 5,66	4/9 13,19	1/2 27,82
425					0,194	1/6 0,501	2/7 1,86	3/8 5,02	4/9 11,69	1/2 24,63
450					0,173	1/6 0,45	2/7 1,66	3/8 4,48	4/9 10,43	1/2 21,98
475					0,155	1/6 0,41	2/7 1,49	3/8 4,02	4/9 9,36	1/2 19,73
500						0,432 0,5	1/7 0,98	1/2 3,26	1/3 8,08	2/5 17,44

Выделенная коричневым цветом зона в левой части таблицы (Зона №1) показывает область повышенного риска всасывания воды, поскольку объем недобора в этой зоне составляет менее $0,5\text{м}^3$ и выемка сапропеля без всасывания воды в этой зоне способом депрессионной воронки становится не эффективной, и даже невозможной.

Выделенная зелёным цветом зона в правой части таблицы (Зона №3) показывает область, в которой можно вести устойчивую выемку сапропеля с образованием депрессионной воронки с одной стоянки, поскольку эта зона включает в себя значения объёмов $V^{ободв}$ более 100м^3 .

При этом уравнение (3.8) не совсем удобно, так как требует каждый раз определять значение высоты недобора. Для упрощения уравнения (3.8) принимаем объём недобора $V^{нед}$ в размере $\leq 0,5\text{м}^3$ и из формулы (3.8) выражаем $h_{нед}$:

$$V^{нед} = \frac{\pi \cdot h_{нед}^2}{7n_{ccc}^2} \leq 0,5\text{м}^3 \quad (3.10)$$

Тогда

$$h_{\text{нед}} \leq \sqrt[7]{\frac{7n_{\text{ccc}}^2 \cdot V_{\text{нед}}}{\pi}} = \sqrt[7]{\frac{7n_{\text{ccc}}^2 \cdot 0,5}{3,14}} = \sqrt[7]{1,11465n_{\text{ccc}}^2}. \quad (3.11)$$

Что такое $0,5 \text{ м}^3$? Объём недобора в размере $0,5 \text{ м}^3$ позволяет иметь 15 секунд времени багермейстеру для принятия решения по остановке насоса, чтобы исключить проникновение воды к зеву ГЗУ. При производительности насоса $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ в секунду он будет всасывать $0,0333 \text{ м}^3/\text{с}$, а значит время, через которое в насос начнёт поступать вода, составляет $0,5 \text{ м}^3 : 0,0333 \text{ м}^3/\text{с} = 15$ секунд.

Подставляя значение $h_{\text{нед}}$ из (3.11) в уравнение (3.8), мы избавляемся от показателя $h_{\text{нед}}$, и получаем расчётное уравнение выемки оптимально безопасного объёма депрессионной воронки (3.12) по двум основным критериям: $h_{\text{покр}}$ – геологический, n_{ccc} – структурно-реологический:

$$V_{\text{ободв}} = \frac{\pi(h_{\text{покр}}^7 - h_{\text{нед}}^7)}{7n_{\text{ccc}}^2} = \frac{\pi\left(h_{\text{покр}}^7 - \sqrt[7]{1,11465n_{\text{ccc}}^2}^7\right)}{7n_{\text{ccc}}^2} = \frac{\pi(h_{\text{покр}}^7 - 1,11465n_{\text{ccc}}^2)}{7n_{\text{ccc}}^2}. \quad (3.12)$$

На основании уравнения (3.12) строим графики зависимости объёма выемки депрессионной воронки (с учетом $V_{\text{нед}} = 0,5 \text{ м}^3$) от двух критериев, $h_{\text{покр}}$ и n_{ccc} (рис. 3.5).

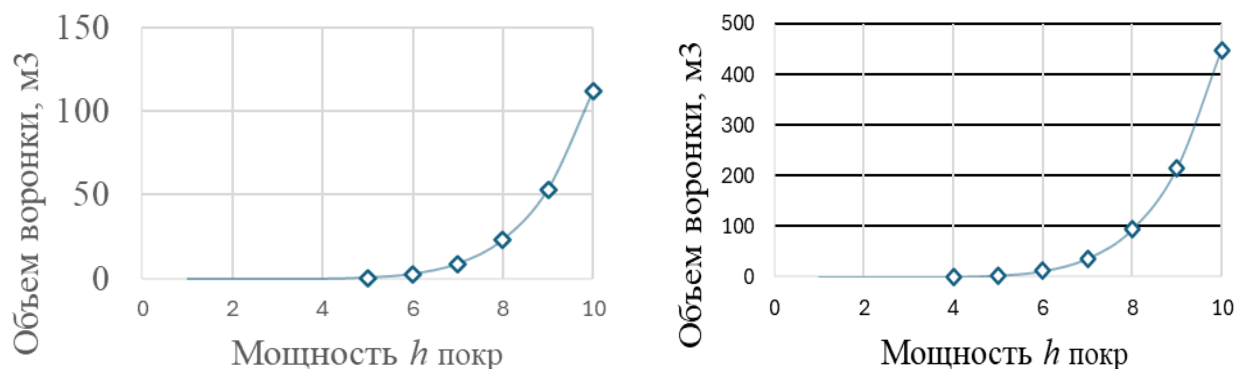


Рисунок 3.5 - Графики зависимости объёмов выемки депрессионной воронки от $h_{\text{покр}}$ для $n_{\text{ccc}}=200$ (слева) и $n_{\text{ccc}}=100$ (справа)

Из графиков следует, что уменьшение n_{ccc} , например с 200 до 100 ведет к резкому увеличению объёма выемки воронки и к уменьшению высоты недобора с

5 до 4м. Однако мощность залежи большинства небольших озер как раз лежит в диапазоне до 10м, что требует обоснования нового технологического решения для выемки сапропеля естественной влажности для различных геологических условий.

3.3. Обоснование параметров выемки сапропеля способом депрессионной траншеи.

Практика показала, что таким решением является способ депрессионной траншеи, совмещающий в себе одновременно вертикальный и горизонтальный способы добычи, когда выемка начинается вестись вертикально с образованием депрессионной воронки в точке O_1 , а затем не выключая насоса ПГКК начинает осуществлять горизонтальное рабочее продвижение в толще залежи со скоростью до 0,05 м/с в точку O_2 (рис. 3.6), в результате чего депрессионная воронка трансформируется в депрессионную траншею, длина которой $L^{\text{пут}}$ является длиной заходки земснаряда, и определяется длиной троса лебедки рабочего хода (или папильонажных лебедок). При этом оптимально безопасный объём выемки депрессионной траншеи $V^{\text{ободт}}$ складывается из объёма выемки воронки $V^{\text{ободв}}$ и объёма выемки прямолинейного участка траншеи $V_{\text{пут}}^{\text{обо}}$ длиной $L^{\text{пут}}$ (рис. 3.6, б) с площадью поперечного сечения $S^{\text{пут}}$.

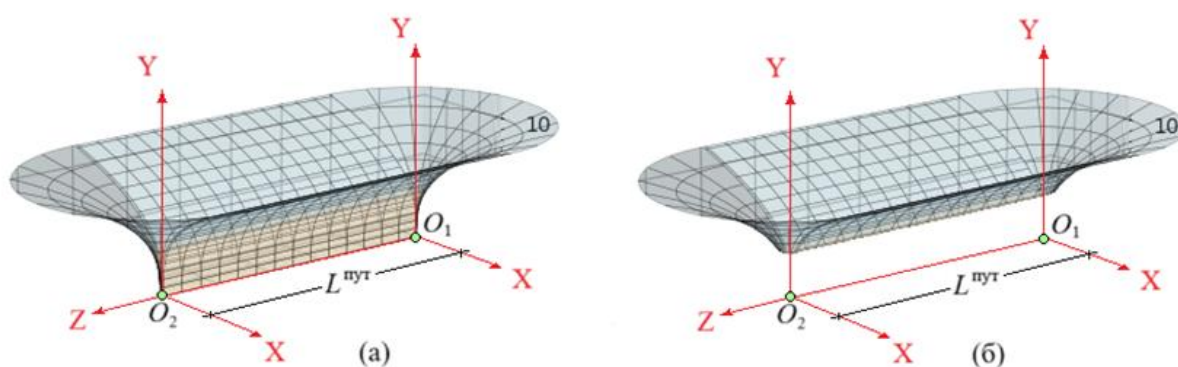


Рисунок 3.6 - 3D модели: а) – объёма идеальной депрессионной траншеи (ИДТ), б) - оптимально безопасного объёма депрессионной траншеи (ОБОДТ).

Тогда уравнение оптимально безопасного объёма депрессионной траншеи можно записать следующим образом:

$$V^{\text{ободт}} = V^{\text{ободв}} + V^{\text{обопут}} = V^{\text{ободв}} + S^{\text{пут}} \cdot L^{\text{пут}}, \quad (3.13)$$

где есть только одно неизвестное - площадь поперечного сечения траншеи $S^{\text{пут}}$, поскольку объём $V^{\text{ободв}}$ был определен ранее по формуле (3.8), а значение $L^{\text{пут}}$ задается длиной заходки земснаряда, которая определяется длиной тросов рабочей и возвратной лебедок, и может быть принята в пределах 100 ÷ 200м (рис. 3.6)

Площадь поперечного сечения $S^{\text{пут}}$ можно найти путем интегрирования расстояния между кривыми от $h_{\text{нед}}$ до $h_{\text{покр}}$ по оси Y, когда x изменяется от $-\frac{y^3}{n_{\text{ссс}}}$ до $\frac{y^3}{n_{\text{ссс}}}$ (рис. 3.7):

$$\begin{aligned} S^{\text{пут}} &= \int_{h_{\text{нед}}}^{h_{\text{покр}}} \left(\frac{y^3}{n_{\text{ссс}}} - \left(-\frac{y^3}{n_{\text{ссс}}} \right) \right) dy = \int_{h_{\text{нед}}}^{h_{\text{покр}}} \frac{2y^3}{n_{\text{ссс}}} dy = \frac{2}{n_{\text{ссс}}} \int_{h_{\text{нед}}}^{h_{\text{покр}}} y^3 dy = \\ &= \frac{2}{n_{\text{ссс}}} \left[\frac{y^4}{4} \right]_{h_{\text{нед}}}^{h_{\text{покр}}} = \frac{2}{n_{\text{ссс}}} \left(\frac{h_{\text{покр}}^4 - h_{\text{нед}}^4}{4} \right) = \frac{h_{\text{покр}}^4 - h_{\text{нед}}^4}{2n_{\text{ссс}}}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

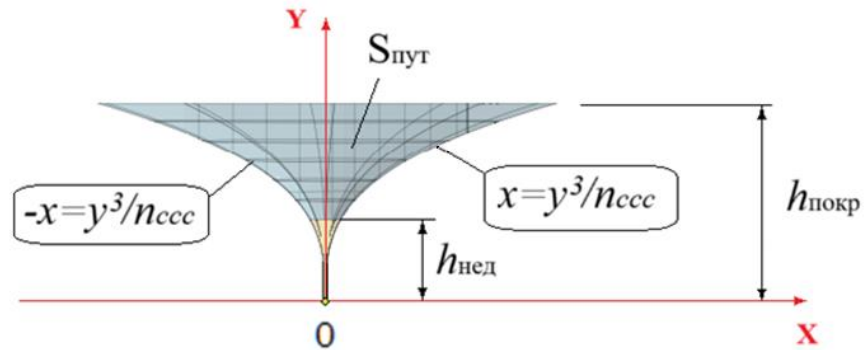


Рисунок 3.7 - Расчетная схема для определения площади поперечного сечения прямолинейного участка депрессионной траншеи

Тогда уравнение оптимально безопасного объёма депрессионной траншеи $V^{\text{ободт}}$ можно записать следующим образом:

$$V^{\text{ободт}} = V^{\text{ободв}} + V^{\text{обопут}} = \frac{\pi(h_{\text{покр}}^7 - h_{\text{нед}}^7)}{7n_{\text{ссс}}^2} + \frac{(h_{\text{покр}}^4 - h_{\text{нед}}^4) L^{\text{пут}}}{2n_{\text{ссс}}}. \quad (3.15)$$

Принимая значение $L^{\text{пут}}$ равным 100м, рассчитываем значения прямолинейного участка депрессионной траншеи $V^{\text{обопут}}$ для различных значений покрывающего слоя и недобора, как показано в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Расчёт объёмов прямолинейного участка депрессионной траншеи $Q^{\text{пут}}$ и определения границы между способами выемки СТ / ДТ

Коэфф. $n_{\text{ссс}}$	Толщина покрывающего слоя СЕВ (h покр) по оси Y, м									
	1м	2м	3м	4м	5м	6м	7м	8м	9м	10м
	Значения объёмов Q обопудт при L пут =100 м, м ³									
18		42	180	667				З о н а	ДВ	
25		30	130	480	1218					
50		15	65	240	609	1280				
72		10	56	122	378	844	1611			
100			40	88	272	608	1160	2008		
125			32	70	218	486	928	1606		
150			27	58	181	405	773	1338	2160	
175				50	105	297	613	1097	1801	
200				44	92	260	536	960	1576	2436
225		З о н а	СТ	39	82	231	477	853	1401	2165
250				35	74	208	429	768	1261	1949
275				32	67	189	390	698	1146	1772
300				29	62	173	358	640	1050	1624
325				27	57	160	330	591	970	1499
350				25	52	149	306	549	901	1392
375					49	90	237	463	791	1250
400					46	84	222	434	742	1172
425					43	79	209	408	699	1103
450					41	75	197	386	660	1042
475					39	71	187	365	625	987
500					37	67	178	347	594	938

Подставляем значение $h_{\text{нед}}$ (3.11) в (3.14), и площадь $S^{\text{пут}}$ записываем следующим образом:

$$S^{\text{пут}} = \frac{h_{\text{покр}}^4 - (1,11465 \cdot n_{\text{ссс}}^2)^{4/7}}{2n_{\text{ссс}}}. \quad (3.16)$$

Тогда умножая полученное выражение площади траншеи (3.16) на длину прямолинейного участка траншеи $L^{\text{пут}}$, получаем значение оптимально безопасного объёма прямолинейного участка траншеи $V^{\text{обопут}}$ в виде следующего

выражения:

$$V^{\text{обопут}} = \frac{(h_{\text{покр}}^4 - (1,11465 \cdot n_{\text{ссс}}^2)^{4/7}) \cdot L^{\text{пут}}}{2n_{\text{ссс}}} \quad (3.17)$$

Складывая оптимально безопасный объём депрессионной воронки $V^{\text{ободв}}$ (3.12) с оптимально безопасным объёмом прямолинейного участка траншеи

$V^{\text{обопут}}$, получаем уравнение оптимально безопасного объёма депрессионной траншеи $V^{\text{ободт}}$:

$$V^{\text{ободт}} = \frac{\pi(h_{\text{покp}}^7 - 1,11465n_{\text{ccc}}^2)}{7n_{\text{ccc}}^2} + \frac{(h_{\text{покp}}^4 - (1,11465n_{\text{ccc}}^2)^{4/7}) L^{\text{пут}}}{2n_{\text{ccc}}} \quad (3.18)$$

При способе депрессионной траншеи объём непрерывной выемки сапропеля естественной влажности резко возрастает за счет прямолинейного участка траншеи, как показано на рис. 3.8.

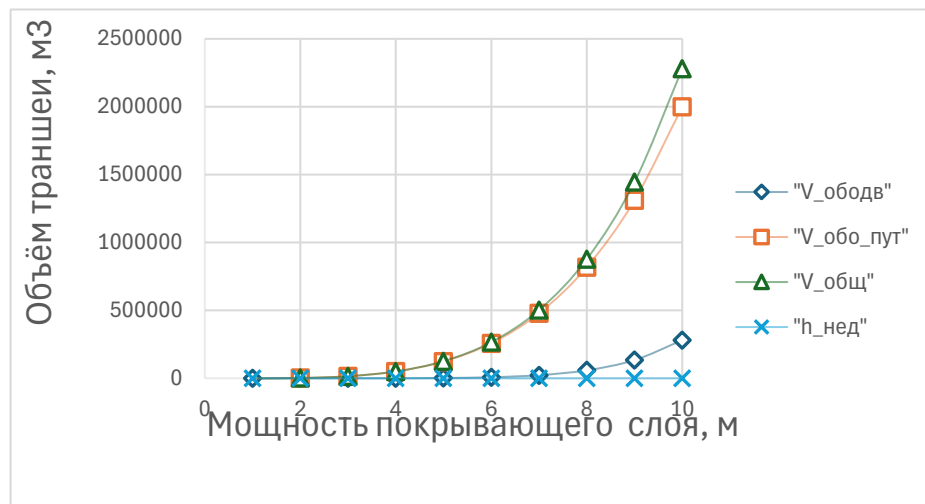


Рисунок 3.8 - График выемки оптимально безопасного объёма депрессионной траншеи $V^{\text{ободт}}$ от $h_{\text{покp}}$ для $n_{\text{ccc}} = 5$

3.4. График зонирования залежи как инструмент для определения оптимального способа выемки сапропеля.

На основании уравнения (3.18) строим общий график зависимости объёма выемки депрессионной траншеи по двум критериям: $h_{\text{покp}}$ и n_{ccc} (рис. 3.9), принимая значение $L^{\text{пут}} = 100\text{м}$.

Анализ рассчитанных значений объёмов траншей $V^{\text{ободт}}$ в табличном формате позволил выявить три зоны выемки сапропеля с характерными признаками отличия и отобразить их графически, как показано на рисунке 3.9.

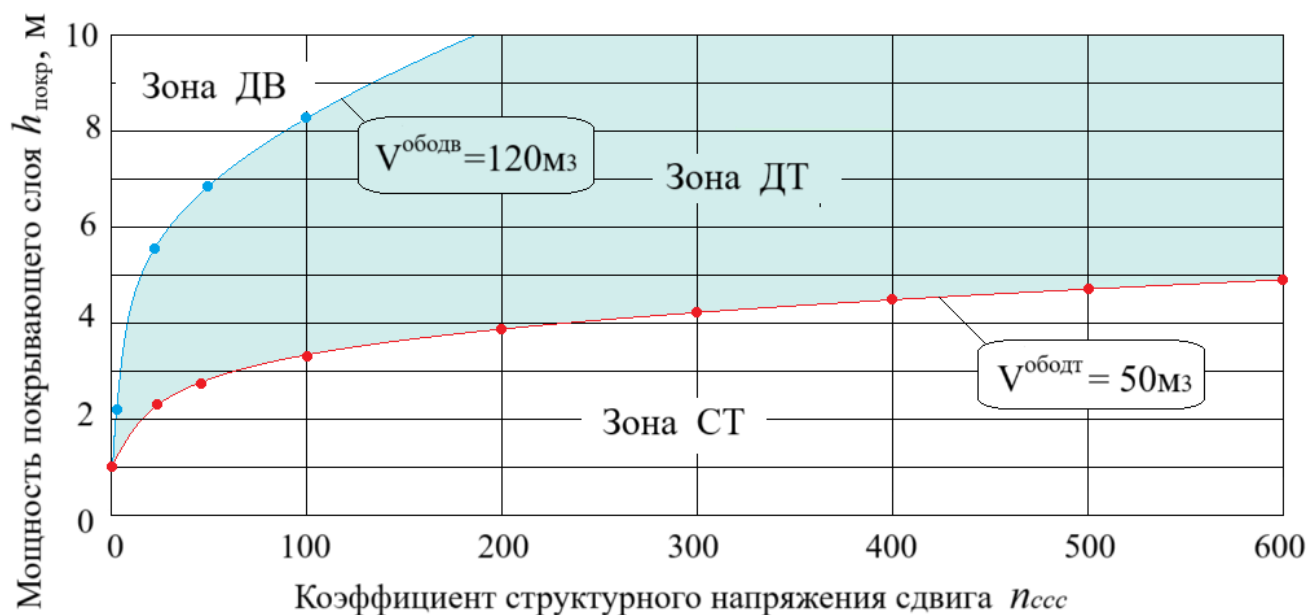


Рисунок 3.9 - График зонирования залежи по способам разработки: зона ДВ – способом депрессионной воронки, зона ДТ- способом депрессионной траншеи, зона СТ – способом скреперной траншеи.

График на рисунке 3.9 позволяет определить оптимальную технологию разработки сапропелевой залежи, используя один из трех указанных способов или их комбинацию в зависимости от структурных показателей $h_{покр}$ и $n_{ссс}$.

Зону ДВ разрабатывают способом депрессионной воронки, когда расчётный объём выемки депрессионной воронки $V^{ободв} > 120 \text{ м}^3$; зону ДТ – способом депрессионной траншеи, когда объём выемки воронки $V^{ободв} < 120 \text{ м}^3$ и объём выемки траншеи $V^{ободт} > 50 \text{ м}^3$; зону СТ – способом скреперной траншеи, когда объём выемки депрессионной траншеи $V^{ободт} < 50 \text{ м}^3$.

Для выбора оптимального способа выемки сапропеля естественной влажности по графику зонирования (см. рис. 3.9) необходимо соответствие двум критериям: мощности покрывающего слоя $h_{покр}$ (геологический показатель) и сопротивлению сдвига $n_{ссс}$ (реологический показатель).

Ниже приведена технологическая карта разработки обводненного сапропеля при мощности покрывающего слоя $h_{покр} = 10 \text{ м}$ (см. рис. 3.10).

3.5. Технологическая карты выемки сапропеля с минимальным негативным воздействием на окружающую среду.

На рис. 3.10 изображена технологическая карта с использованием трех способов разработки. При начальной мощности пласта $h_{\text{покр}}=10\text{м}$ и значении $n_{\text{сcc}} \leq 175$ разработка залежи начинается способом депрессионных воронок (ДВ) с проседанием кровли на $h_{\text{прос}}$.

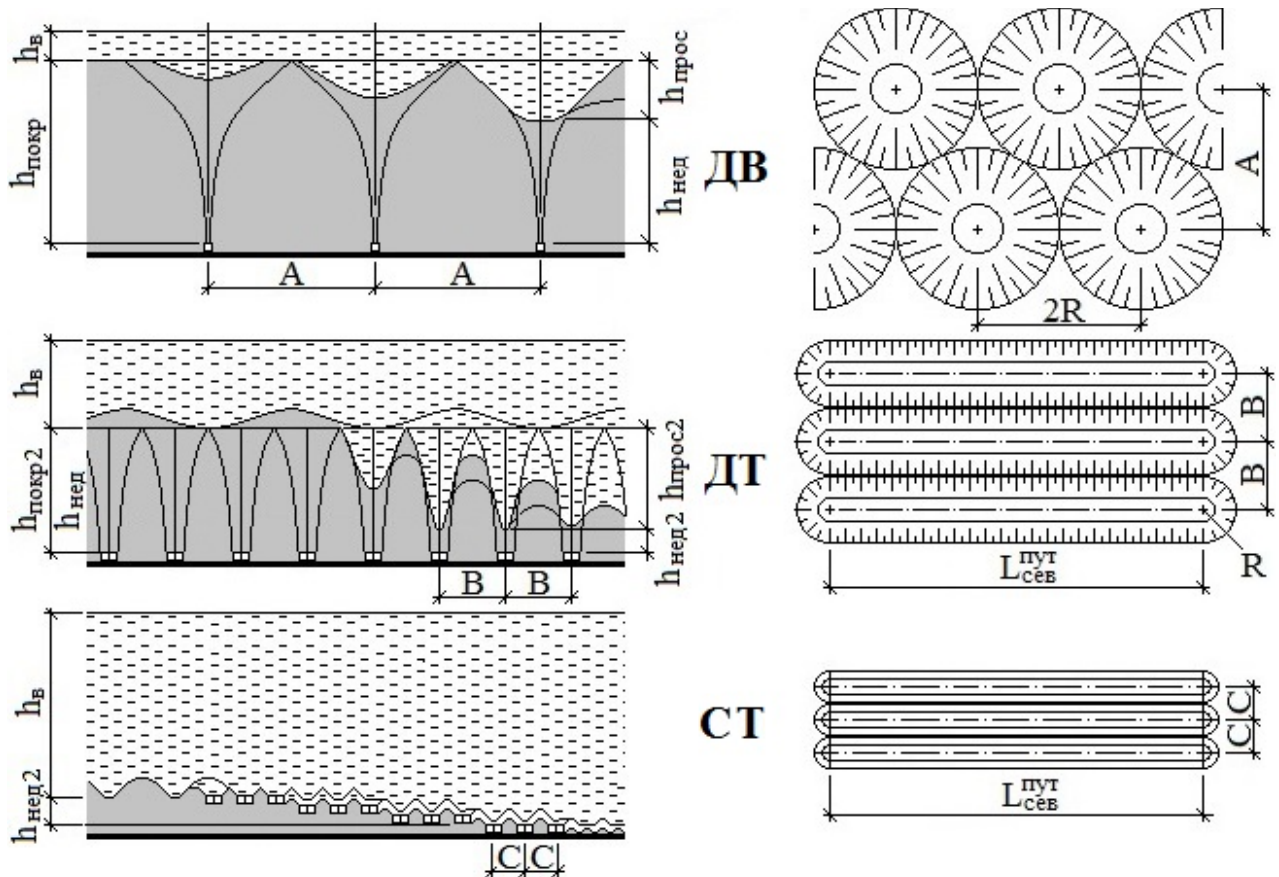


Рисунок 3.10 - Технологическая карта выемки сапропеля тремя способами: ДП-депрессионной воронки с шагом А, ДТ-депрессионной траншеи с шагом В, СТ-скреперной траншеи с шагом С.

При этом шаг А между центрами смежных рядов воронок будет определяться следующей формулой:

$$A = \sqrt{(2R)^2 - R^2} = \sqrt{3R^2} = \sqrt{3x^2} = \sqrt{3\left(\frac{y^3}{n}\right)^2} = \sqrt{\frac{3y^6}{n^2}} = \sqrt{\frac{3h_{\text{покр}}^6}{n^2}} \quad (3.13)$$

После вскрытия залежи способом депрессионных воронок и проседания кровли залежи на глубину $h_{\text{прос}}$, приступают ко второму этапу разработки залежи

способом депрессионных траншей (ДТ) с последующим проседанием кровли на величину $h_{\text{прос2}}$. При этом расстояние B между осями смежных траншей определяются по следующей формуле:

$$B = 2R = 2x = 2 \frac{y^3}{n} = \frac{2(h_{\text{покр2}})^3}{n} = \frac{2(h_{\text{нед}})^3}{n} \quad (3.14)$$

С целью увеличения ширины раскрытия депрессионных траншей ковш погружной камеры заменяют на более широкий. Оставшийся после второго этапа недобраный слой сапропеля обрабатывают способом скреперной траншеи, для чего расстояние между осями скреперных траншей C уменьшается до 2-х размеров ширины ковша. Ширина ковша ограничивается сопротивлением ковша сдвигу и производительностью (расходом) насоса, и составляет 0,6 – 1,2 м.

Эффективность предложенной автором технологии выемки сапропеля естественной влажности подтверждена экспериментально [145], [146] на озере Савельево в Ярославской области (см. Приложение А). На рис. 3.11 отображена подача сапропеля в накопительный бункер земснаряда показывающая, что сапропель, поступающий в бункер земснаряда, имеет вязко-пластичную консистенцию, поскольку образует устойчивый конус с очень высоким углом внутреннего трения, порядка 42–55 градусов. Гидроподача сапропеля такой консистенции не возможна ни одним другим известным устройством [9], [147].

На основании выше приведенных математических расчётов автором было разработано техническое задание (см. Приложение Б), согласно которого была разработана программа 3D моделирования и визуализации процессов образования депрессионных воронок и траншей, позволяющая путем ввода четырех технологических параметров получать изображения воронок или траншей с расчётом оптимально безопасных объёмов выемки и объёмов недобора как для воронок, так и для траншей.

Примеры таких 3D-изображений приведены ниже на рисунках 3.12 - 3.15).

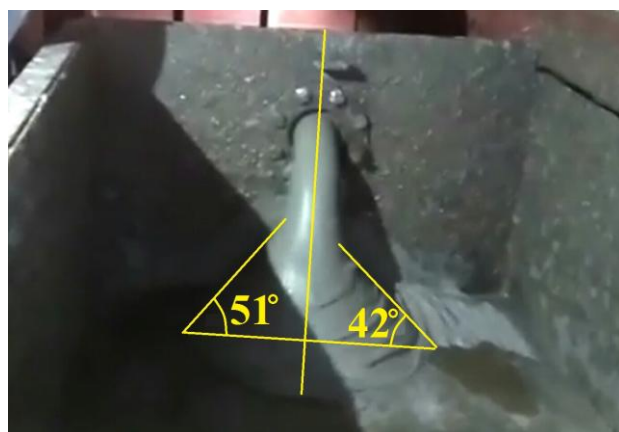
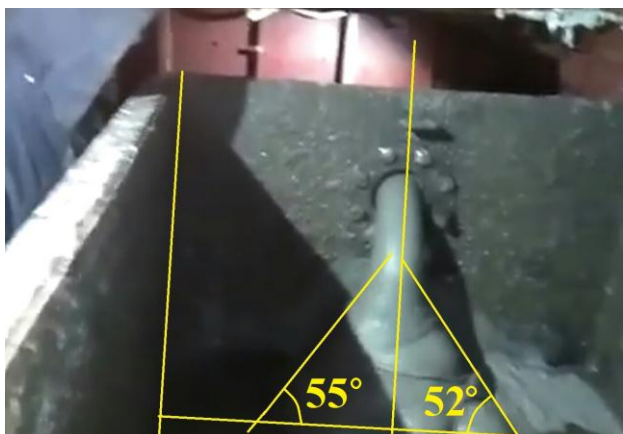
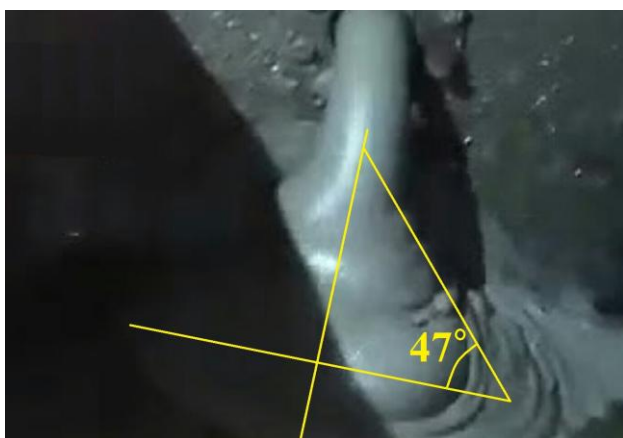
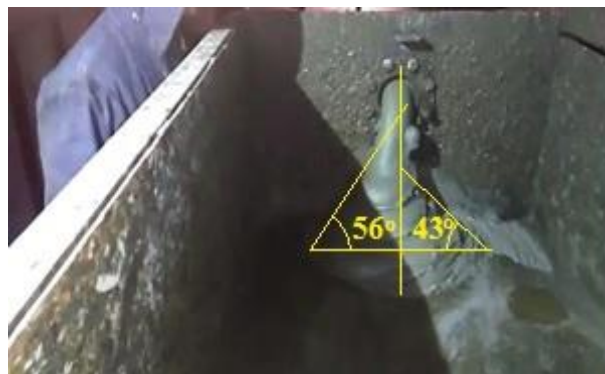


Рисунок 3.11 - Подача сапропеля натуральной влажности в трюмный бункер земснаряда с использованием ПГКК на озере Савельево в Ярославской области.

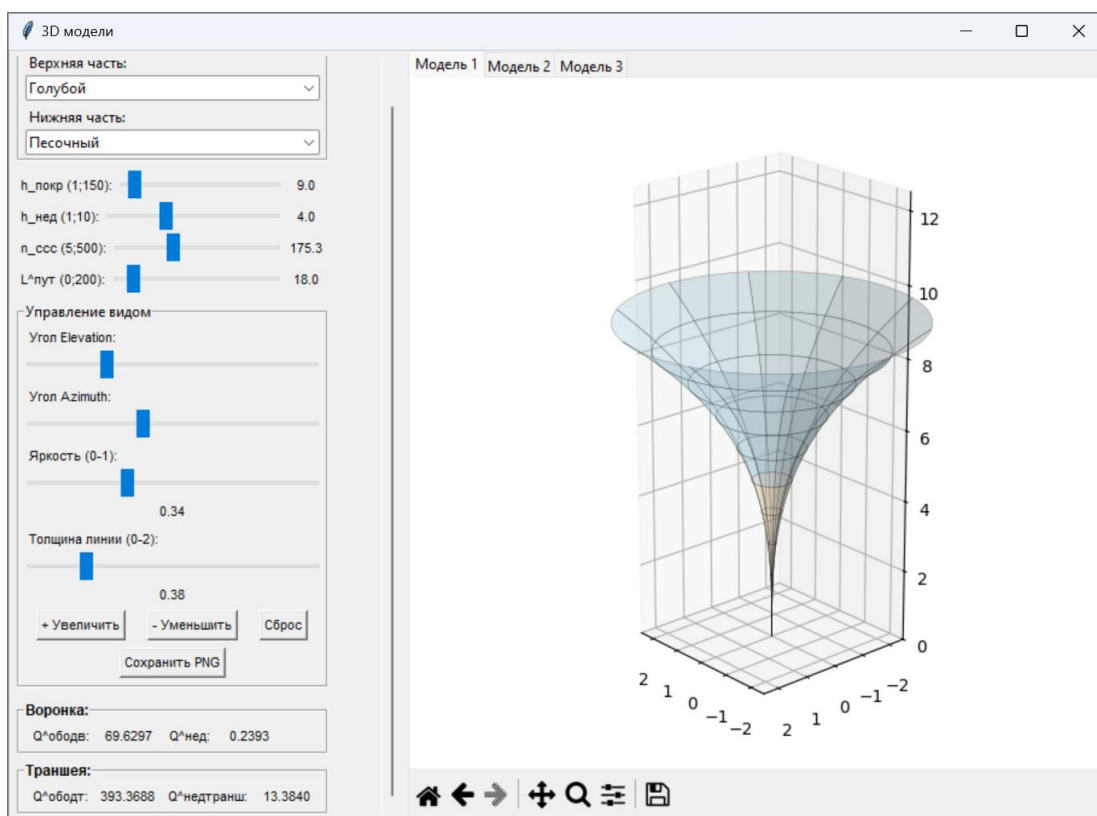
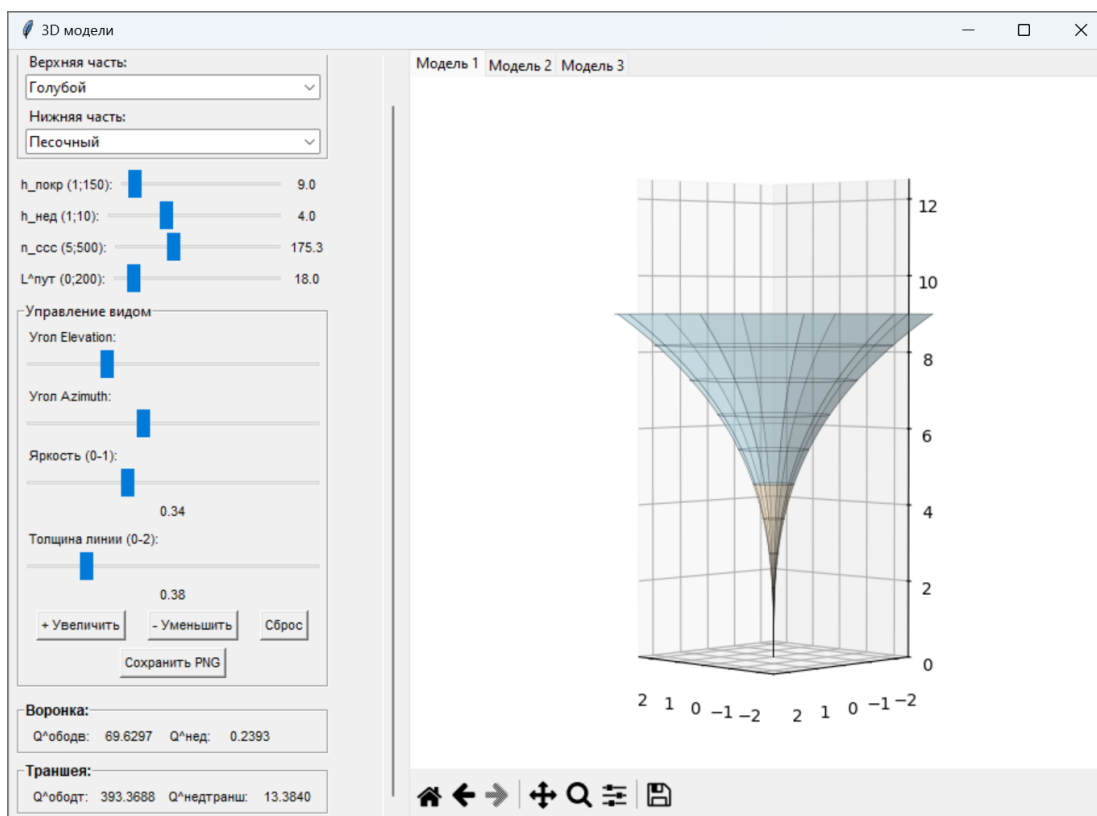


Рисунок 3.12 - 3D-модель депрессионной воронки для $n_{\text{ссс}} = 175,3$

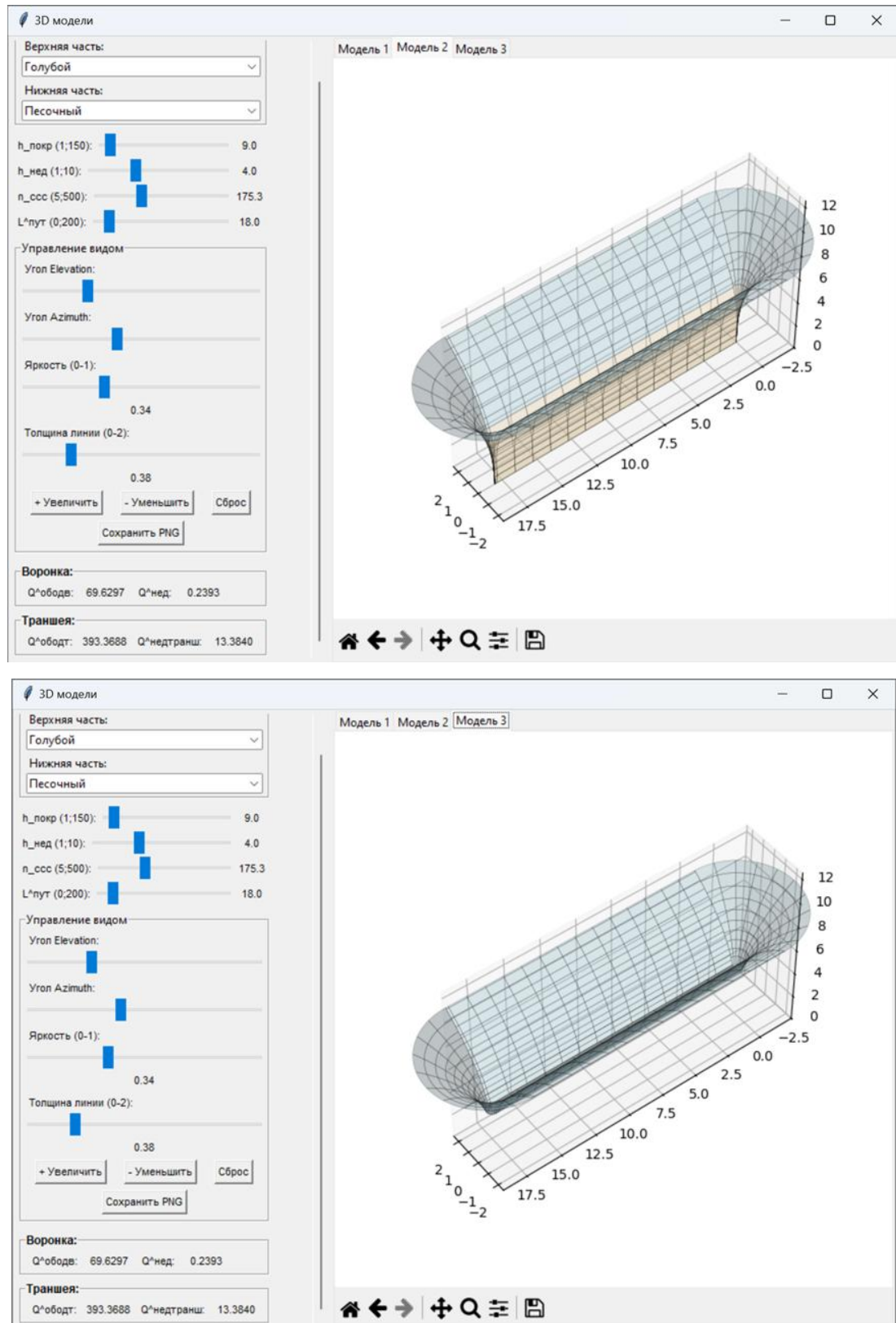


Рисунок 3.13 - 3D-модели идеальной депрессионной траншеи (сверху) и оптимально безопасного объёма депрессионной траншеи (снизу) для $n_{ccc} = 175,3$

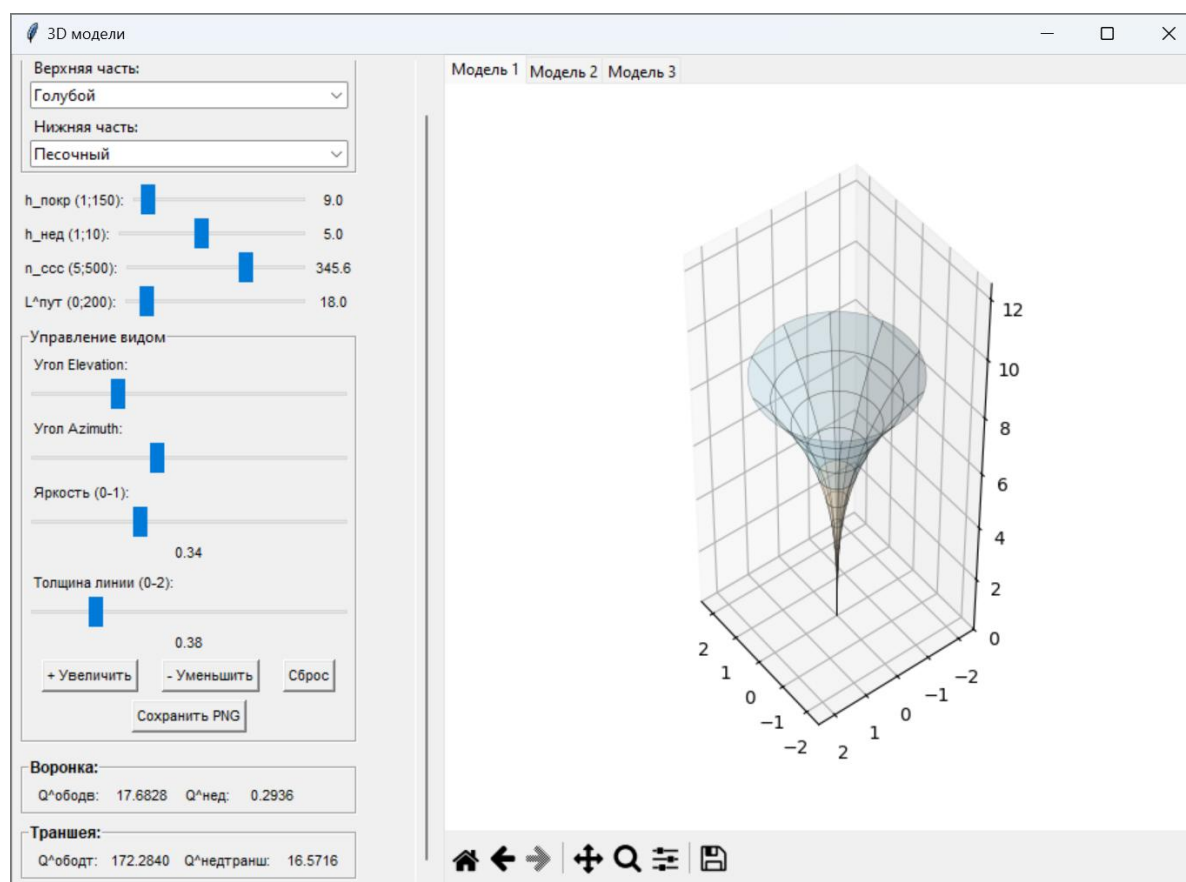
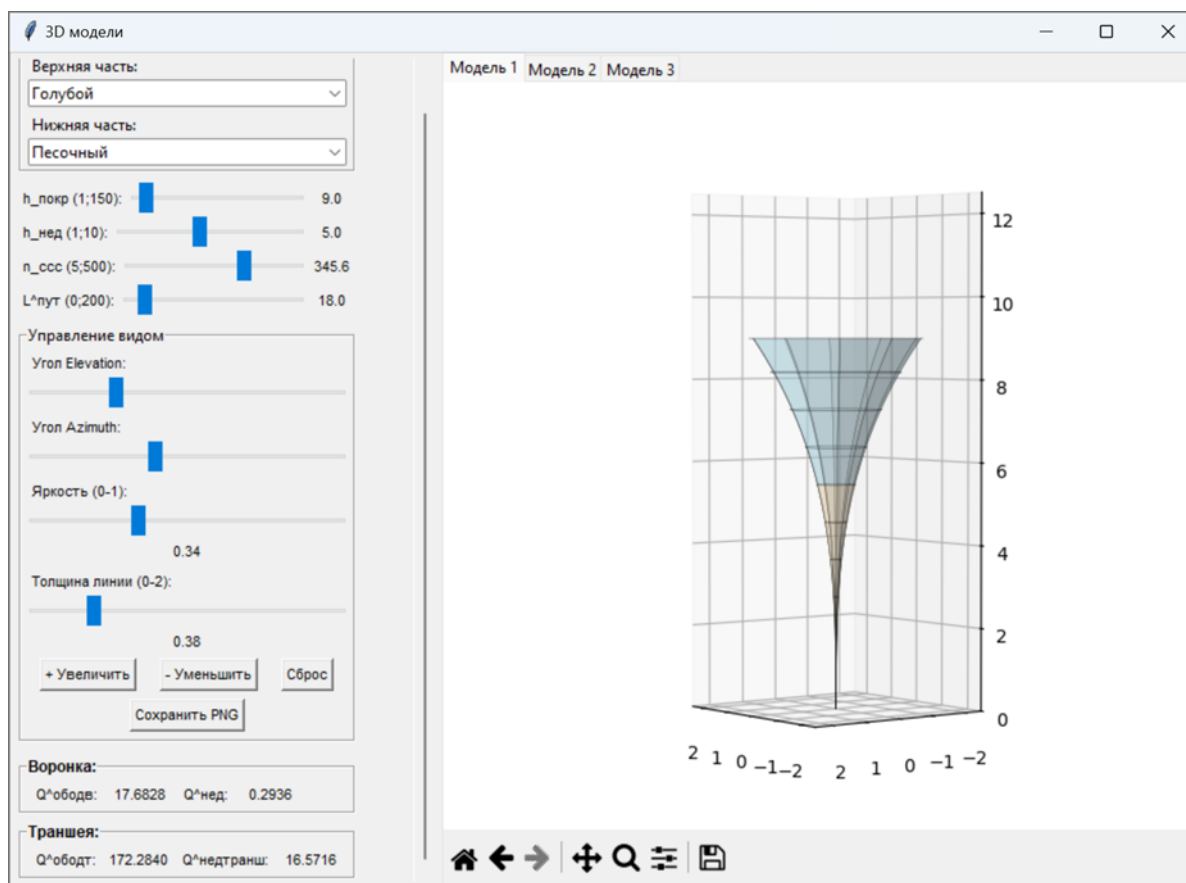


Рисунок 3.14 - 3D-модель депрессионной воронки для $n_{\text{ccc}} = 345,6$

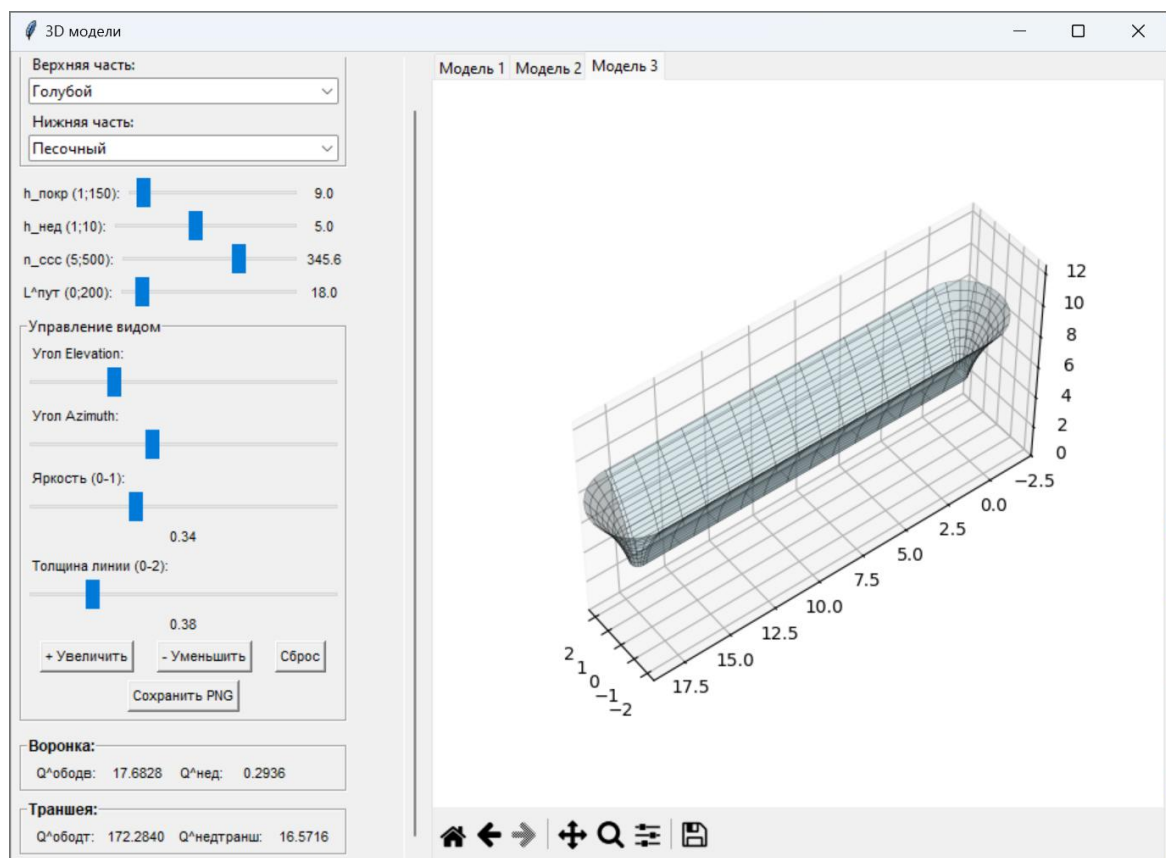
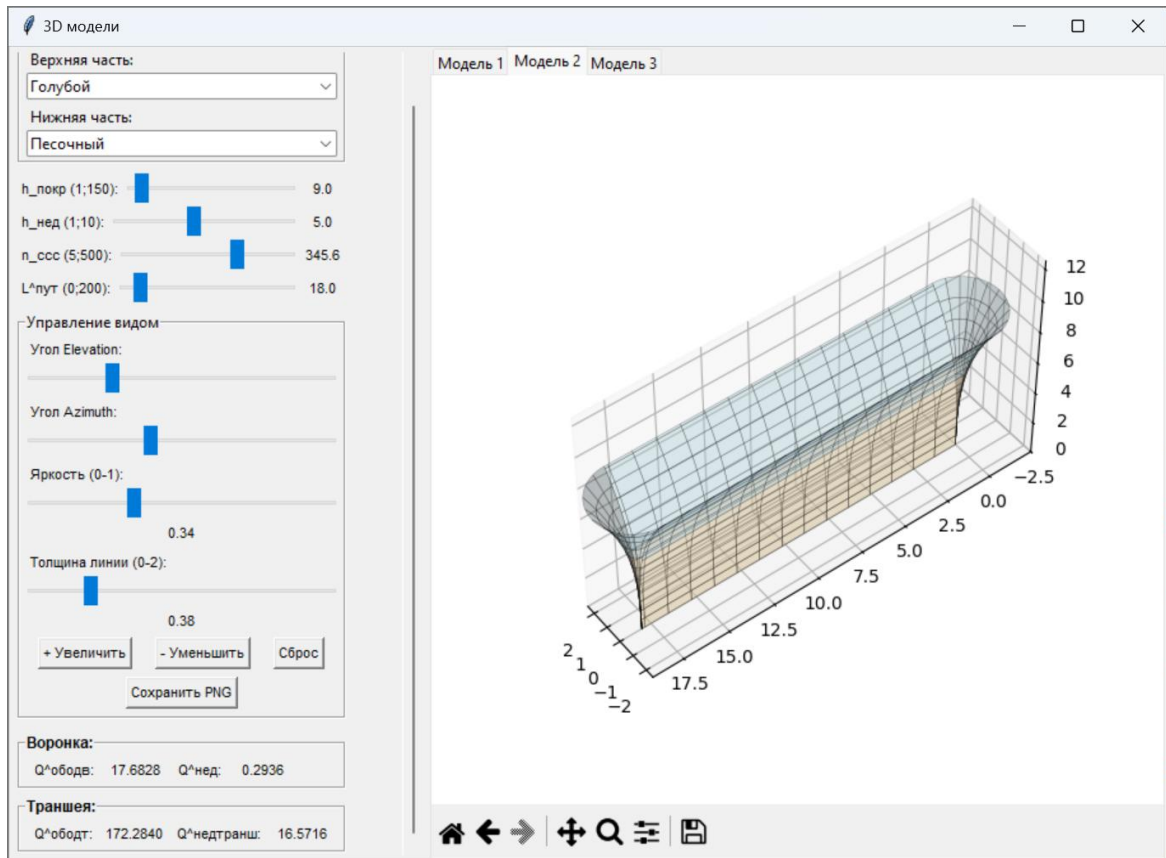


Рисунок 3.15 - 3D-модели идеальной депрессионной траншеи (сверху) и оптимально безопасного объёма депрессионной траншеи (снизу) для $n_{\text{сcc}} = 345,6$

3.6. Выводы по главе 3

По результатам исследования получена следующая научная новизна:

1. Впервые математически обоснована модель геомеханического формирования выемки сапропеля естественной влажности с учётом реологии и мощности его структурированного геомассива, и эмпирически доказана форма выемки в виде параболической депрессионной воронки с углами откосов превышающими 80° , а не в виде воронки прямого конуса с углами откосов до 25° , как было принято считать ранее.

2. Впервые предложено уравнение объёма выемки такой воронки по двум критериям: мощности покрывающего слоя $h_{\text{покp}}$ и коэффициенту структурного сопротивления сдвига n_{ccc} .

3. Впервые предложен способ добычи сапропеля естественной влажности путем трансформации депрессионной воронки в депрессионную траншею, позволяющий в десятки раз увеличить объём непрерывной выемки сапропеля естественной влажности, и предложена математическая модель объёма депрессионной траншеи по трем параметрам: мощности покрывающего слоя $h_{\text{покp}}$, длине прямолинейного участка траншеи $L^{\text{пут}}$ и сопротивлению сдвига сапропеля в залежи n_{ccc} .

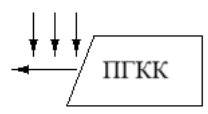
4. Впервые предложен метод зонирования залежи для трех способов выемки сапропеля естественной влажности по двум параметрам: мощности покрывающего слоя сапропеля $h_{\text{покp}}$, и коэффициенту структурного сопротивления сдвигу n_{ccc} .

Приведенные выводы позволяют сформулировать *третье научное положение*: объём непрерывной выемки сапропеля естественной влажности способом депрессионной воронки определяется двумя критериями: мощностью покрывающего слоя $h_{\text{покp}}$ и коэффициентом сопротивления сдвигу сапропеля в залежи n_{ccc} , и может быть многократно увеличен горизонтальным продвижением погружного устройства в толще залежи за счет трансформации депрессионной

воронки в депрессионную траншею, объём которой вычисляется по установленному уравнению 3.18.

6. Классификация способов выемки сапропелей естественной влажности с использованием погружного грунтозаборного комплекса ПГКК приведена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Классификация способов выемки сапропелей естественной влажности с применением ПГКК

№	Способ выемки по направлению извлечения породы	Способ выемки по используемому технологическому приёму	Схема способа	$h_{\text{покр}}$ м	$n_{\text{ссс}}$ Па
1	Вертикальный	Депрессионной воронки (ДВ)		>4	< 200
2	Смешанный	Депрессионной траншеи (ДТ)		>1	200 - 400
3	Горизонтальный	Скреперной траншеи (СТ)		0,5 - 5	400 - 600

ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ ГИДРОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ САПРОПЕЛЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ НА СВЕРХМАЛЫХ СКОРОСТЯХ

Исследования в области гидро-транспортирования структурированных сред (глинистых суспензий, сапропелей, шламов) имеют свою нишу, и ключевые ученые здесь — это специалисты по реологии, гидромеханике неньютоновских жидкостей и конкретно по гидротранспорту сложных материалов. Основоположники и ключевые ученые в области гидротранспорта неньютоновских и вязкопластических сред - это фундамент, без которого изучение сапропеля было бы невозможно, это Юджин Бингам (Eugene C. Buckingham, а не Bingham), Мелвин Муни (Melvin Mooney), В. Г. Лойцянский и Л. Г. Лойцянский, Г. И. Баренблатт, Я. Б. Зельдович, А. Г. Иосифьян, Д. М. Тарг, Г. В. Виноградов, П. Ф. Ребиндер, Уоррен Маккамб (Warren McCabe), Джулиан Смит (Julian Smith), Питер Хэрриот (Peter Harriott), Р. Дарби (Ron Darby), Р. В. Х. Л. Б. Хэмпсон (R.W.H. (Bill) Hanks).

Во вторая половина XX века получили известность работы западных ученых, много писавшие о гидродинамике неньютоновских жидкостей в трубах, о критериях перехода ламинарный-турбулентный режим для сред с пределом текучести τ_0 (обобщенное число Рейнольдса-Хедстрёма, число Хэмпсона). Но по исследованиям гидротранспорта сапропеля фокус сместился в СССР (Россия, Беларусь, Украина) и страны Восточной Европы, где сапропель рассматривался как ресурс. Это А. П. Ющенко, Л. К. Высоцкий, В. А. Комаров, В. Г. Гуревич, Л. Л. Гитман, И. М. Каган.

Известны ученые из Польши и прибалтийских стран, занимавшиеся изучением и добычей сапропеля (в Польше, Литве, Латвии и Эстонии), такие как Т. Крол (T. Król), Й. Шимански (J. Szymański), К. Шюпшинскас (K. Šiupšinskas), А. Какитис (A. Kakitis), Я. Чесна (J. Čėsna) и другие.

Темами современных исследований часто выступают такие, как уточнение реологических моделей для сапропеля (модель Хершеля-Балкли часто подходит

лучше, чем Бингама), оптимизация параметров добычи и транспортировки, использование гидромониторов и эрлифтов.

Теоретическую базу для этого заложили Бингам, Лойцянский, Виноградов, а непосредственное инженерное приложение к сапропелю наиболее полно было выполнено белорусской школой гидротранспортников (Ющенко, Высоцкий, Комаров), чья монография 1980 года остается классикой в этой узкой, но важной области. Ниже приведены основные положения этой монографии [148]. Авторы подробно исследовали сапропель не как геологическое тело, а как инженерный материал для транспортирования, и сделали классификацию сапропеля по условиям транспорта, выделив три типа по содержанию органики (минеральный, органоминеральный, органический) и, главное, по структурно-реологическим свойствам.

Ими было установлено, что сапропель естественной влажности (85–94%) является вязко пластичным телом (телом Бингама); были определены границы влажности, при которых материал переходит из пластичного в текучее состояние и наоборот; представлены экспериментальные кривые течения (зависимость напряжения сдвига τ от скорости деформации $\dot{\gamma}$) для сапропелей разного состава и влажности; выведены эмпирические формулы для определения реологических параметров.

1. Предел сдвига (τ_0 , Па): $\tau_0 = A \cdot \exp(B \cdot W)$, где W влажность, A и B — коэффициенты, зависящие от типа сапропеля. Важный вывод: с ростом влажности τ_0 падает по экспоненте.

2. Коэффициент пластической вязкости ($\mu_{пл}$, Па·с): $\mu_{пл} = A \cdot \exp(C \cdot W)$ падает по аналогичной экспоненциальной зависимости.

3. Даны таблицы и номограммы для определения этих констант (A , B , C , D) в зависимости от зольности, содержания песка (> 0.25 мм) и коллоидных частиц.

4. Исследовано влияние предварительного механического разрушения (гидроразрыва) структуры на реологию. Показано, что после разрушения структура

восстанавливается (тиксотропия), но не полностью, что важно для технологии.

Они рассмотрели процесс образования и истечения сапропелевой пульпы из карьера, при этом начальная стадия рассмотрена как вовлечение сапропеля в поток. Проанализирована работа струи гидромонитора гидромонитора (водяной или пульповой) по разрушению залежи (гидравлическое разупрочнение). Определены оптимальные давления, расстояния, углы атаки. Описано образование первичной смеси (пульпы) в призабойной зоне, её влажность и реология. Смоделирован процесс истечения этой пульпы по лоткам или начальному участку трубопровода. Показано, что движение начинается только при превышении критического уклона (или градиента давления), обеспечивающего $\tau_w > \tau_0$.

Ими дано теоретическое (гидромеханическое) обоснование движения сапропелевой пульпы в круглом трубопроводе, оно рассматривается как стационарное ламинарное течение вязкопластической жидкости с выводом профиля скоростей: наличие неподвижного ядра ("пробки") в центре потока, где $\tau < \tau_0$.

$$\Delta P_0 = (2 \cdot \tau_0 \cdot L) / R$$

Рассматривая уравнение для расхода Бэкингема-Райнера они ввели понятие «начального (критического) градиента давления» ($i_0 = \Delta P_0 / L$), необходимого для начала движения всего сечения: $\Delta P_0 = (2 \cdot \tau_0 \cdot L) / R$. Это основной параметр, заменяющий "критическую скорость"! Если $\Delta P < \Delta P_0$, течение отсутствует.

Рассмотрели возможность турбулентного режима, но с оговоркой, что для типичных сапропелевых пульп он наступает при высоких скоростях (выше 1.5–2 м/с) и экономически невыгоден из-за огромных потерь напора. Основной рабочий режим — структурированный ламинарный (пробковый).

Далее авторы представили результаты натурных и лабораторных экспериментов по определению потерь напора на различных опытных трассах, вывели эмпирические формулы и графики для определения гидравлического уклона $i_{\text{г}}$ (потери напора на 1 м трубопровода) в зависимости от:

1. средней скорости потока (V , м/с).
2. диаметра трубы (D , м).

3. влажности (W , %) и типа сапропеля (через τ_0 и $\mu_{пл}$).

Формулы имеют вид: $i_{п} = i_{в} + k \frac{\tau_0}{\rho g D}$, где $i_{в}$ - потери для чистой воды при той же скорости, k - экспериментальный коэффициент, учитывающий режим.

Они создали универсальные расчетные номограммы, позволяющие инженеру по известным D , V и свойствам пульпы быстро найти $i_{п}$ и требуемый напор насоса.

Прикладной раздел монографии содержит технологические схемы и параметры гидротранспорта сапропеля.

Анализируются три основные технологические схемы:

1. Прямая гидродобыча с транспортированием: гидромонитор > пульповод > место складирования/переработки.
2. Гидро-механизированная добыча с перекачкой: экскавация > сгущение в отстойнике-накопителе > перекачка насосной станцией.
3. Вакуум-эжекционная добыча для маловязких сапропелей.

Для каждой схемы приводятся рекомендуемые диапазоны параметров:

- концентрация пульпы по твердому C_0 10-25% (влажность 75–90%). Выше — резкий рост τ_0 и затрат, ниже — неэффективный расход воды.
- *рабочая скорость в трубопроводе $v = 0.6–1.2$ м/с.* Подчеркивается, что это не критическая, а экономически оптимальная скорость, достаточная для предотвращения застоя и обеспечения надежного течения с разумными энергозатратами.
- диаметр трубопровода (D) 150–300 мм в зависимости от производительности.

В качестве рекомендуемого оборудования для гидро-транспортирования сапропеля детально обосновывается выбор насосов объемного действия.

Шнековые (винтовые) насосы - оптимальны для высоковязких, абразивных сапропелей с крупными включениями.

Поршневые и плунжерные насосы - для больших напоров и дальности.

Ими сделан вывод, что центробежные насосы непригодны для сапропеля

естественной влажности из-за резкого падения КПД и напора на вязкопластической среде.

Рекомендованы трубопроводы по материалам (сталь, полиэтилен), способам соединения, необходимость устройства ревизионных и промывочных отверстий (обязательно! на случай аварийной остановки и затвердевания пульпы).

Ниже приведены выводы из их монографии [148]:

1. Сапропель — тело Бингама: $\tau = \tau_0 + \mu_{\text{пл}} \cdot \gamma$.
2. Параметры τ_0 и $\mu_{\text{пл}}$ зависят от влажности экспоненциально: с ростом W они резко падают: $\Delta P > \Delta P_0 = (2 \cdot \tau_0 \cdot L)/R$
3. Критерий начала движения - не скорость, а давление: $\Delta P > \Delta P_0 = (2 \cdot \tau_0 \cdot L)/R$
4. Рабочая скорость выбирается из экономического компромисса (0.6–1.2 м/с), а не из условия не размывающего осадка.
5. Основной режим течения — пробковый (структурированный ламинарный) с неподвижным ядром.
6. Насосы — только объемные (шнековые/поршневые).
7. Главная инженерная задача — точное определение реологических свойств конкретного сапропеля и расчет начального градиента давления.

К сожалению, они остановились на скорости 0,6 –1,2 м/с и не решились на еще большее уменьшение скорости очевидно из-за отсутствия у них информации по эксцентриковым винтовым насосам, остановившись на шнековых, хотя в то время такие насосы уже выпускались промышленностью ряда стран, включая Индию, Францию, Германию в основном для нефтеперерабатывающей промышленности, работающей с вязкой нефтью.

4.1. Реологическая модель гидро-транспортирования сапропеля.

Для отображения потока жидкостей разработано большое множество эмпирических уравнений, приведенных ниже в таблице 4.1 [148].

Таблица 4.1 – Модели потока жидкостей

Основные модели псевдопластических (нелинейновязких) сред		Основные модели вязкопластических сред	
Наименование модели	Уравнение	Наименование модели	Уравнение
Степенной закон Освальда	$\tau = k (\dot{\gamma})^n = k \dot{\gamma} ^{n-1} \dot{\gamma}, \quad n \geq 0$ [4.1]	Модель Шведова-Бингама	$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$ [4.12]
Модель Эллиса	$\tau = (A+B \tau ^{\alpha-1})^{-1} \dot{\gamma}, \quad \alpha \geq 1$ [4.2]	Модель Гершеля-Балкли	$\tau = \tau_0 + A(\dot{\gamma})^n$ [4.13]
Модель Сиско	$\tau = (A+B \dot{\gamma} ^{n-1}) \dot{\gamma}, \quad n \geq 0$ [4.3]	Модель Бриана	$\tau = \mu_\infty \dot{\gamma} \left(1 + \frac{\tau_\infty}{\mu_\infty m \dot{\gamma}}\right)^m$ [4.14]
Модель де Хавена	$\tau = \frac{\mu_0}{1+C \tau ^n} \dot{\gamma}, \quad n > 0$ [4.4]	Модель Кроули-Китца	$\tau = \mu_\alpha \left[\frac{1,2+V(\theta_0 \tau^{\frac{1}{2}}+1)^3}{1,2-2V(\theta_0 \tau^{\frac{1}{2}}+1)^3} \right] \dot{\gamma}$ [4.15]
Модель Прандтля	$\tau = A \dot{\gamma} \arcsin(\dot{\gamma} C)$ [4.5]		
Модель Уильямса	$\tau = \left[\frac{A}{B+\dot{\gamma}} + \mu_\infty \right] \dot{\gamma}$ [4.6]	Модель Кэссона	$\tau = [k_0 + k_1(\dot{\gamma})^2]^2$ [4.16]
Модель Эйринга	$\tau = \frac{\dot{\gamma}}{B} + C \sin\left(\frac{ \tau }{A}\right)$ [4.7]	Модель Шульмана	$\tau = [\tau_0^{\frac{1}{2}} + (\mu_p \dot{\gamma})^{\frac{1}{m}}]^2$ [4.17]
Модель Прандтса-Эйринга	$\tau = A \operatorname{arsh}\left(\frac{\dot{\gamma}}{B}\right)$ [4.8]	Модель Кутателадзе - Хабахпашевой	$d\varphi_* = -\varphi_* d\tau_*^m$ [4.18]
Модель Пауэлла-Эйринга	$\tau = \left[C + \frac{1}{B \dot{\gamma} } \operatorname{arsh}\left(\frac{\dot{\gamma}}{A}\right) \right] \dot{\gamma}$ [4.9]		$\varphi_* = \frac{\varphi - \varphi_\infty}{\varphi_0 - \varphi_\infty}$ [4.19]
Модель Рейнера-Филиппова	$\tau = \left[\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + \left(\frac{\tau}{A}\right)^2} \right] \dot{\gamma}$ [4.10]	Модель Кросса	$\tau_* = \theta \frac{ \tau - \tau_1 }{\varphi_\infty - \varphi_0}$ [4.20]
Модель Рабиновича	$\tau = \frac{\mu_0}{1 + C \cdot \tau^2} \dot{\gamma}$ [4.11]		$\mu = \mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{[1 + k(\dot{\gamma})^n]}$ [4.21]
		Модель Какитиса	$\tau = \tau_0 \left[1 + k \left(\frac{\mu_p}{\tau_0} \frac{du}{dy} \right)^n \right]$ [4.22]

Кривые течения всех этих моделей наглядно отображены графически на рисунке 4.1.

Исследования реологических особенностей сапропеля показали, что его пластическая вязкость $\mu_p(\mu_{пл})$ и предельное напряжение сдвига τ_0 зависят от времени деформации и градиента скорости du/dy . В начале деформации, когда структура сапропеля еще не нарушена, он характеризуется значительным упругим сопротивлением. При развитии деформации его структура разрушается в поток. Происходит обратный изотермический переход, который распространяется, как тиксотропия. Она усиливается при увеличении содержания твердого. После снятия деформации структура сапропеля восстанавливается с образованием петли гистерезиса. При этом с ростом напряжения сдвига уменьшается вязкость. В результате этого кривая течения сапропеля не линейная, а кривая (см. рис. 4.1, г).

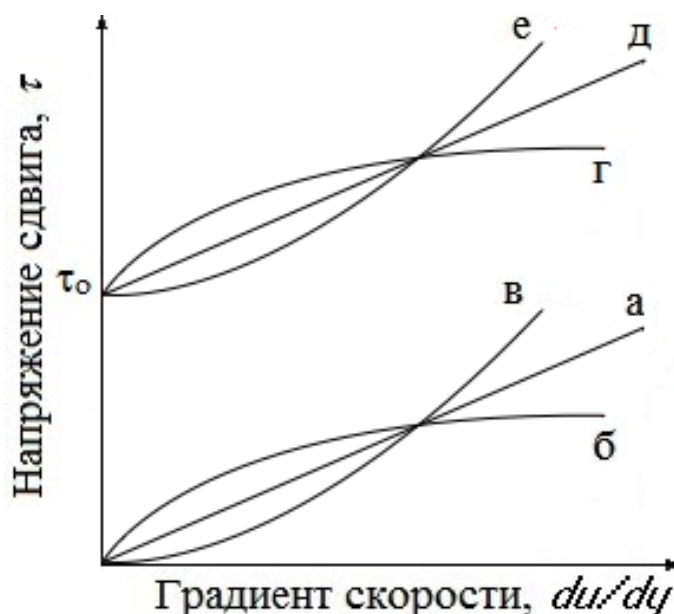


Рисунок 4.1 – Реологические кривые течения жидкостей:
а – ньютоновской, б – Освальда де Вейла по степенному закону,
в – дилатантных (загустевающих) по степенному закону, д – бингамовских,
г – тиксотропных, е – реопектических

Явление тиксотропии сапропеля было впервые детально исследовано и научно описано в 1928 году советским почвоведом и грунтоведом Борисом Викторовичем Некрасовым [149], [150].

Хотя сам термин “тиксотропия” был введен еще в 1923 году немецким ученым Петером Шалмайером (Peter Schalhmayr) для описания поведения некоторых красок и гелей, именно Некрасов Б.В. первым применил это понятие к грунтам, провел эксперименты и доказал его универсальность для целого класса дисперсных пород, включая сапропель.

Некрасов установил, что сапропель, будучи насыщенным водой, ведет себя как тиксотропная система: в спокойном состоянии он образует прочный гель, способный выдерживать некоторую нагрузку (τ_0); при механическом воздействии (перемешивание, вибрация) его структура разрушается, и он разжижается, превращаясь в вязкую жидкость; после прекращения воздействия со временем он снова загустевает, возвращаясь в гелеобразное состояние с образованием петли

гистерезиса. Это свойство имеет огромное практическое значение в геотехнике, строительстве и при добыче сапропеля.

Некрасов Б.В. в своих работах (1928, 1940) описал и проанализировал само явление – незамкнутость, гистерезисный характер кривых нагружения и разгружения. Он перенес концепцию гистерезиса из физики магнетизма (термин ввел шотландский инженер и физик Джеймс Альфред Юинг [151], а затем австрийский химик-аналитик Франц Эйльхард Эмих [152] в 1889 году предложил использовать этот термин в более широком физическом контексте) в физику грунтов, и доказал экспериментально, что между кривой разрушения структуры и кривой её восстановления (в состоянии покоя) существует гистерезис, или “кривая разупрочнения и упрочнения не совпадают”, или “неполная обратимость процесса”.

В 1950-х термин “тиксотропная петля” (thixotropic loop) стал стандартным в реологии для описания кривой “напряжение-деформация” или “вязкость-время” при циклическом нагружении тиксотропного материала благодаря развитию понятия гистерезиса Ильюшиным Алексеем Антоновичем – выдающимся советским ученым, внесшим фундаментальный вклад в теорию пластичности, ползучести и упругости, разработав теорию механического гистерезиса, написав классические работы про “отставание” деформаций от напряжений [153],[154].

В нашем случае при транспортировании сапропеля естественной влажности в круглой трубе как раз и происходит циклическое нагружение (разупрочнение) тиксотропной среды и его циклическое восстановление (после остановки перекачивающего насоса), и в этом явлении присутствует некая опасность, или соблазн использования в инженерных расчетах минимального значения динамической вязкости.

Поскольку тиксотропия подразумевает снижение пластической вязкости при изменении напряжения со временем, а реометр выдает значение динамической вязкости μ_{∞} как наименьшее по сравнению с начальной пластической μ_p (μ_o или $\mu_{пл}$), возникает соблазн в расчетах расхода и потерь напора использовать

значение динамической вязкости, а это является большой ошибкой, поскольку приводит к занижению расчетных потерь давления и завышению расхода.

Исследования реологических особенностей сапропеля, проведенные в 1999 году А. Какетисом, показали, что пластическая вязкость μ_p и предельное напряжение сдвига τ_0 зависят от времени деформации и градиента скорости du/dy [155]. Сапропель естественной влажности по своему строению соответствует гелю. В начале деформации, когда структура материала еще не нарушена, он проявляет свойства упругой деформации. При дальнейшей деформации структура геля разрушается и превращается в поток. Происходит обратный изотермический переход, который распространяется как тиксотропия. Она усиливается при увеличении зольности сапропеля [156]. После снятия деформации структура сапропеля восстанавливается. В результате этого кривая течения сапропеля не линейная, а кривая (см. рис. 4.1. г).

Цель исследования – найти уравнения, соответствующие кривой течения и расхода сапропеля естественной влажности для условий залежи (добычи).

Движение псевдо-пластических жидкостей (полимерные жидкости) отображает эмпирическое уравнение (4.1) Освальда де Вейла (степенной закон течения), где K – показатель консистенции; $\dot{\gamma}$ – градиент скорости; n – коэффициент нелинейности.

Пластические (пастообразные) жидкости и суспензии, к которым принадлежит и сапропель, начинают течь только если превышена величина предельного напряжения сдвига τ_0 . Течение идеальной пластической жидкости описывает уравнение Шведова-Бингама (4.12), но оно описывает такую деформацию неньютоновских жидкостей, которым несвойственна тиксотропия, т.е. их пластическая вязкость и предельное напряжение сдвига не меняется в зависимости от времени и скорости деформации.

На практике большей частью встречаются пластические жидкости, кривые течения которых являются нелинейными (см. рис. 4.1, кривые е, f), и для описания движения таких жидкостей разработано множество эмпирических моделей, из

которых наиболее широко известны модели Гершеля - Баркли (4.13), Кессона (4.16), Шульмана (4.17), Кросса (4.21), где:

$\dot{\gamma}$ – градиент скорости,

μ_k – пластическая вязкость по Кессону,

τ_k – предельное напряжение сдвигу по Кессону,

μ_0, μ_∞ – наибольшей и наименьшей пластическая вязкости,

m, n – коэффициенты нелинейности.

В равенствах (4.1), (4.13) и (4.17) нелинейные проявления потоков отображены, принимая за основу равенства Ньютона или Шведова-Бингама и не линеаризуя их с помощью различных показателей степени, при этом принято, что n – это константа, чья величина установлена для каждого материала. Так как значения τ и $\dot{\gamma}$ тоже установлены, тогда получается, что значению k необходимо меняться, переходя с одного материала на другой.

Все члены уравнения (4.17) содержат одинаковый показатель степени и он корректен в отношении измеряемых показателей. Однако эксперименты с сапропелем натуральной влажности показали, что равенство (4.17) весьма приблизительно описывает его текучесть. Изменив значение показателей степени всех членов, возможно достичь лучшего совпадения с данными эксперимента, но дальнейшее использование полученного равенства для моделирования текучести ограничено, так как его интегрирование приводит к сложным выражениям и не позволяет рассчитать скорость потока и расход.

Схожая ситуация и с равенством (4.21). Данное равенство содержит μ_∞ и μ_0 , где μ_0 – это значение наибольшей пластической вязкости жидкости с не разрушенной структурой (в начале деформации). Проводя исследования реологических особенностей сапропеля, было установлено [155], что точное определение данного параметра осложнено, так как в начале деформации оно изменяется очень быстро.

Анализируя полученный в ходе эксперимента характер кривых течения сапропеля различной влажности и, сравнивая его с разными моделями течения

пластических жидкостей, А. Какетисом было получено уравнение (4.22) (см. табл. 4.1), которое описывает течение сапропеля естественной влажности в лабораторных условиях и является достаточно простым [46].

Уравнение (4.22) получено из уравнения Шведова-Бингама (4.12):

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} = \tau_0 + \frac{\mu_p du}{dy} \quad (4.23)$$

Чтобы избавиться от несоответствия единиц измерения, переделаем равенство (4.23) в безразмерную форму, разделив обе его части на τ_0 :

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 1 + \frac{\mu_p}{\tau_0} \frac{du}{dy}. \quad (4.24)$$

Для оценки изменения пластической вязкости в зависимости от изменения градиента скорости и предельного напряжения сдвига, возводим в n степень изменяемое слагаемое правой части равенства и умножаем на коэффициент k :

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 1 + k \left(\frac{\mu_p}{\tau_0} \frac{du}{dy} \right)^n. \quad (4.25)$$

Выражая напряжение τ , получаем реологическую модель потока естественной (природной) влажности сапропеля:

$$\tau = \tau_0 \cdot \left(1 + k \left(\frac{\mu_p}{\tau_0} \frac{du}{dy} \right)^n \right). \quad (4.26)$$

Полученное равенство содержит безразмерные коэффициенты k и n , значение которых меняется в зависимости от содержания в сапропеле сухого вещества и органических веществ. Чтобы найти значение коэффициентов k и n и установить соответствие равенства (4.26) реальному потоку сапропеля, была произведена серия замеров особенностей сапропелей различной естественной влажности. Реологические особенности образцов сапропеля были установлены, используя реометр в виде конусной пластины. Определялась пластическая вязкость массы и предельное напряжение сдвига, а также снята кривая изменений напряжения деформации в зависимости от градиента скорости потока. Для образцов

использовался сапропель естественной влажности с содержанием органического вещества (в сухом веществе) 62%, с относительной влажностью 90÷96%, температурой образцов при замерах 18°C. Методы и материалы эксперимента анализированы в [155]. Используя полученные в ходе эксперимента кривые текучести сапропеля, были установлены коэффициенты k и n . Результаты исследований показали, что, используя равенство (4.26) возможно достичь хорошего совпадения с результатами эксперимента. В соответствие с равенством (4.26) кривая текучести с относительной влажностью $W_{\text{отн}}=91,2\%$ и содержанием органического вещества в сухом веществе 62% показана на рис 4.2.

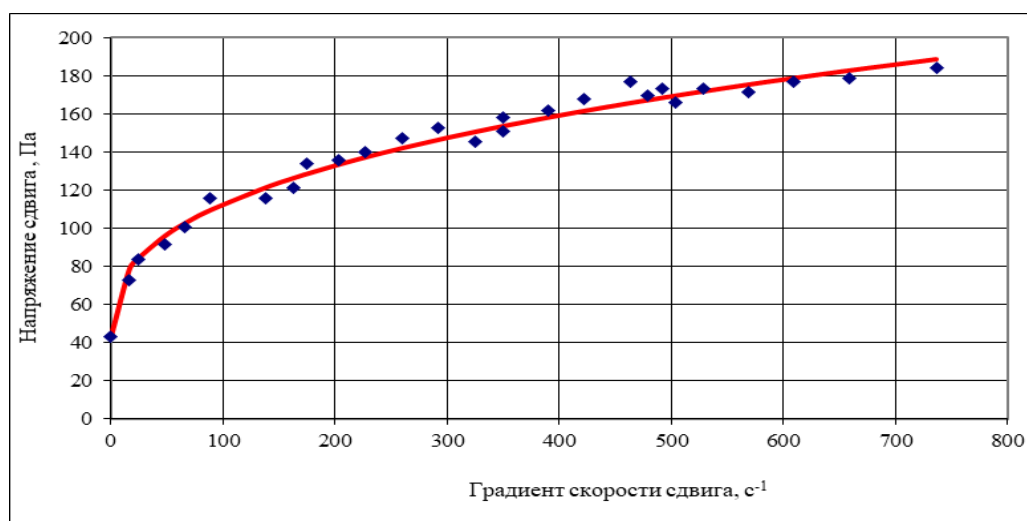


Рисунок 4.2 - Изменение динамического напряжения сдвига в зависимости от градиента скорости

Используя компьютерную программу SPSS, были установлены значения коэффициентов $k=2.66$ и $n=0.43$ равенства. Значение пластической вязкости $\mu_{p\infty} = 0.11$ Па·с и начального предельного сопротивления сдвигу $\tau_{\infty} = 42.8$ Па соответствует жидкости с неполностью разрушенной структурой, и это наименьшие значения. Полученное ниже равенство (4.27) выражает изменения напряжения сдвига в зависимости от градиента скорости:

$$\tau = \tau_{\infty} \cdot \left(1 + 2.66 \cdot \left(\frac{\mu_{p\infty}}{\tau_{\infty}} \frac{du}{dy} \right)^{0.43} \right). \quad (4.27)$$

Чтобы равенство (4.26) можно было использовать для расчета потока в трубопроводах, из него был выражен градиент скорости и выполнено интегрирование дифференциального уравнения:

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau_{\infty}}{\sqrt[n]{k} \cdot \mu_{p\infty}} \sqrt[n]{\frac{\tau}{\tau_{\infty}} - 1}. \quad (4.28)$$

В круглом трубопроводе напряжения сдвига в массе определяют по формуле известной формуле гидродинамики исходя из предположения, что не происходит скольжения массы по стенкам трубы [148]:

$$\tau = \frac{r \cdot \Delta p}{2l}, \quad (4.29)$$

где r – расстояние от центра трубопровода до деформируемого слоя массы,

Δp – падение (потери) давления на отрезке трубопровода, l – длина отрезка.

Поместив равенство (4.29) в равенство (4.28) и отметив расстояние между элементарными слоями жидкости, как изменение радиуса трубопровода $dy=dr$, получаем:

$$du = \frac{\tau_0}{\sqrt[n]{k} \cdot \mu_{p\infty}} \sqrt[n]{\frac{r \cdot \Delta p}{2l \cdot \tau_{\infty}} - 1} \cdot dr. \quad (4.30)$$

Чтобы интегрировать равенство (4.30), для его упрощения обозначаем константные величины $\frac{\tau_{\infty}}{\sqrt[n]{k} \cdot \mu_{p\infty}} = k_1$, $\frac{\Delta p}{2l \cdot \tau_{\infty}} = k_2$, и $\frac{1}{n} = m$, поместив полученные величины в равенстве (4.30) получаем:

$$du = k_1 (k_2 \cdot r - 1)^m \cdot dr \quad (4.31)$$

Интегрируя равенство (4.31) и выполнив алгебраические преобразования, получаем изменение скорости по поперечному сечению трубы:

$$u = \frac{2l \cdot \tau_{\infty}^2}{\Delta p \cdot \mu_{p\infty} (m+1) \cdot k^m} \left[\left(\frac{\Delta p \cdot r}{2l \cdot \tau_{\infty}} - 1 \right)^{m+1} - \left(\frac{\Delta p \cdot R}{2l \cdot \tau_{\infty}} - 1 \right)^{m+1} \right]. \quad (4.32)$$

Полученное равенство описывает изменение скорости потока по поперечному сечению трубопровода сапропеля естественной влажности. Чтобы

установить соответствие данного равенства потоку сапропеля в трубопроводе, необходимо произвести ряд замеров скорости потока сапропеля разного состава. Чтобы использовать полученную модель потока для практических расчетов трубопровода, необходимо найти уравнение расхода потока в трубопроводе, соответствующее модели потока. Расход Q можем рассчитать по равенству (4.33):

$$\frac{Q}{\pi \cdot R^3} = \frac{1}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau, \quad (4.33)$$

где: τ_w – напряжение сдвига на внутренних стенках трубопровода, исходя из предположения, что скольжения массы не происходит, Па; $f(\tau)$ – функция изменения напряжения сдвига, $f(\tau) = du/dy$, то есть соответствует выражению градиента скорости в полученной реологической модели потока (4.28).

Напряжение сдвига на внутренних стенках трубопровода рассчитывается по формуле (4.34) по аналогии с формулой (4.29):

$$\tau_w = \frac{R \cdot \Delta p}{2l}. \quad (4.34)$$

Поместив выражения (4.28) и (4.34) в равенство (4.33) и преобразовав, получаем уравнение расхода протока в трубопроводе:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty^{\left(\frac{n-1}{n}\right)}}{\tau_w^3 \mu_{p\infty}} \int_{\tau_\infty}^{\tau_w} \tau^2 (\tau - \tau_\infty)^{1/n} d\tau. \quad (4.35)$$

С целью упрощения (4.35) обозначим константный множитель до интеграла буквой b и показатель степени $1/n=m$:

$$b = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty^{\left(\frac{n-1}{n}\right)}}{\tau_w^3 \mu_{p\infty}}. \quad (4.36)$$

получаем:

$$Q = b \int_{\tau_\infty}^{\tau_w} \tau^2 (\tau - \tau_\infty)^m d\tau. \quad (4.37)$$

Интегрируя равенство (4.37) в пределах от τ_{∞} до τ_w и выполнив алгебраические преобразования, получаем равенство расчета потока сапропеля естественной влажности в круглом трубопроводе:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 n \cdot \tau_{\infty}}{\mu_{p\infty} (3n+1) \sqrt[n]{k}} \left(\frac{R \cdot \Delta p}{2l \cdot \tau_{\infty}} - 1 \right)^{1/n} \left[1 - \frac{1}{2n+1} \left(\frac{2l \cdot \tau_{\infty}}{R \cdot \Delta p} \right) - \frac{2n}{(2n+1)(n+1)} \left(\frac{2l \cdot \tau_{\infty}}{R \cdot \Delta p} \right)^2 - \frac{2n^2}{(2n+1)(n+1)} \left(\frac{2l \cdot \tau_{\infty}}{R \cdot \Delta p} \right)^3 \right]. \quad (4.38)$$

Чтобы упростить уравнение (4.38), введём следующее обозначение:

$$\frac{2l \cdot \tau_{\infty}}{R \cdot \Delta p} = A \quad (4.39)$$

Величина A выражает начальные условия движения массы в трубопроводе: если $A \geq 1$, $Q=0$, движение в трубопроводе не происходит, если $A < 1$, $Q > 0$, начинается движение в трубопроводе.

Поместив равенство (4.39) в уравнение (4.38), получаем:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 n \cdot \tau_{\infty}}{\mu_{p\infty} (3n+1) \sqrt[n]{k}} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^{1/n} \left[1 - \frac{A}{2n+1} - \frac{2n \cdot A^2 (1+n \cdot A)}{(2n+1)(n+1)} \right]. \quad (4.40)$$

Уравнение (4.40) немного упрощается, если использовать эмпирический нелинейный коэффициент $m=l/n$:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{p\infty} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]. \quad (4.41)$$

где: Q – расход сапропеля, $\text{м}^3/\text{с}$;

π – число Пи;

τ_{∞} – напряжение сдвига, установленное на реометре при температуре 18°C , Па;

$\mu_{p\infty}$ – вязкость пластическая, определена на реометре при температуре 18°C , Па с;

l – длина трубопровода, м;

R – радиус трубопровода, м;

ΔP – потери давления на длине трубопровода l , Па;

k – безразмерный коэффициент содержания твёрдого;

n – безразмерный коэффициент нелинейности содержания органики.

Равенство (4.41) описывает проточное течение пластических (пастообразных) жидкостей по круглому трубопроводу в зависимости от потери

напора или перепаде давления Δp на длине трубопровода. Равенство подходит структурному (ламинарному) режиму потока.

Чтобы выполнить проверку равенства (4.41), принимаем $m=1$ и $k=1$, и после алгебраических преобразований, получаем известное равенство Бэкингема, которое описывает проточное течение пластических жидкостей Шведова-Бингама в круглом трубопроводе:

$$Q = \frac{\pi R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_p} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right] \quad (4.42)$$

В случае абсолютной (ньютоновской) жидкости $\tau_0 = 0$ и $\mu_p = \mu$ получаем известное равенство Пуазеля:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \mu}. \quad (4.43)$$

Полученное равенство (4.41), как и равенство Бэкингема (4.42), не решается в отношении к Δp , что доставляет некоторые неудобства в практических расчетах.

Чтобы установить соответствие равенства (4.41) реальному потоку, была произведена серия экспериментов, в которых установили проточное течение сапропеля естественной влажности в зависимости от потерь давления на длине отрезка трубопровода. В экспериментах был использован сапропель с относительной влажностью $W_{\text{отн}} = 92\%$ и содержанием органического вещества в сухом веществе 68% . Замеры выполнены на отрезках трубопровода разной длины и диаметра. Полученные результаты показали хорошее совпадение значений теоретически полученного проточного течения с экспериментальными, как показано на рисунке 4.3.

Для возможности проведения расчётов и моделирования потока, необходимо знать, как изменяются значения коэффициентов k и m при изменении массы сухого вещества и органических веществ в нем. С данным намерением была произведена серия экспериментов, в результате которых была установлена закономерная связь между изменениями коэффициентов k и m в зависимости от состава сухого вещества сапропеля (см. рис. 4.4).

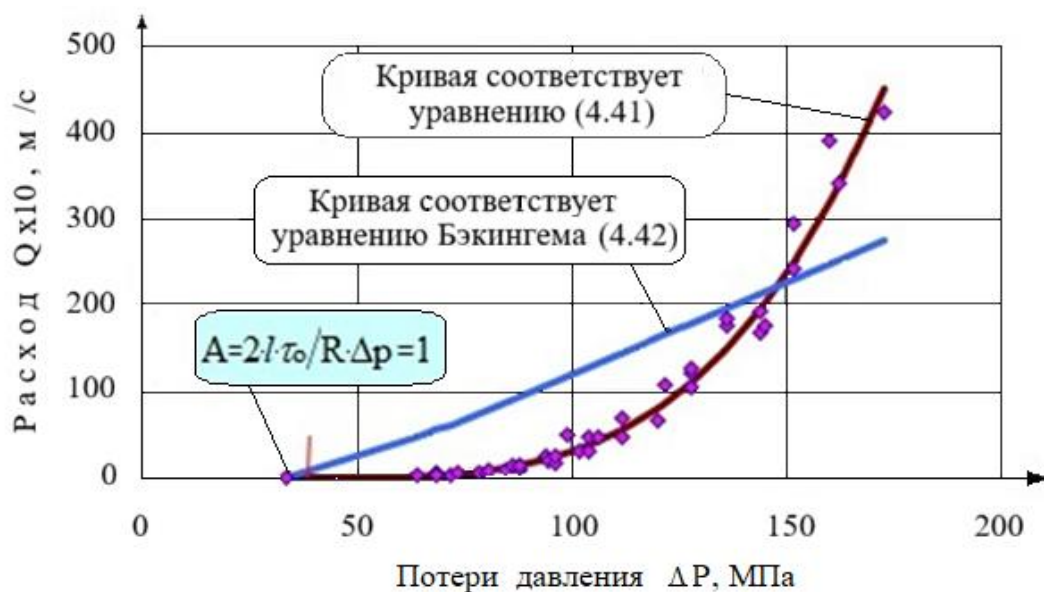


Рисунок 4.3 - Зависимость расхода сапропеля от потери давления на длине трубопровода. Внутренний диаметр трубы $d=16$ мм, длина $l=1$ м, пластическая вязкость сапропеля $\mu_p=0,75$ Па·с, предельное напряжение сдвигу $\tau_0=135$ Па, $m=3,45$ и $k=2,9$.

Коэффициент k уменьшается с увеличением массы сухого вещества C_o :

$$k = 5.52 - 0.39 \cdot C_o, \quad (4.44)$$

Коэффициента m возрастает при увеличении массы сухого вещества:

$$m = 0.18 + 0.29 \cdot C_o, \quad (4.45)$$

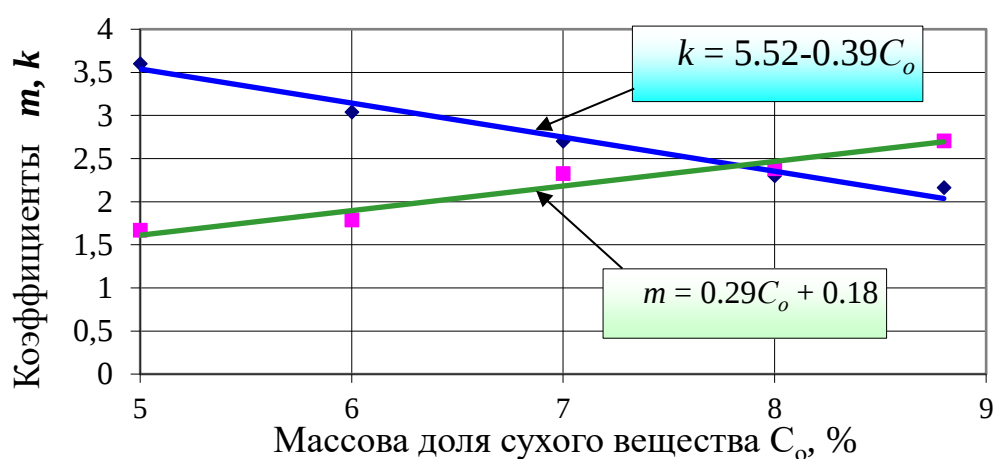


Рисунок 4.4 - Изменение коэффициентов k , m в зависимости от состава сухого вещества C_o в сапропеле. Содержание органики в сапропеле $ОВ=61\%$

Схожие результаты были получены в результате экспериментов с сапропелем с содержанием органического вещества $ОВ = 21,7\%$.

$$k = 2,72 - 0,075 C_o, \quad (4.46)$$

$$m = 0,5 + 0,16 C_o, \quad (4.47)$$

Изменение коэффициентов k и m в зависимости от состава сухого вещества C_o в этом сапропеле представлена на рисунке 4.5.

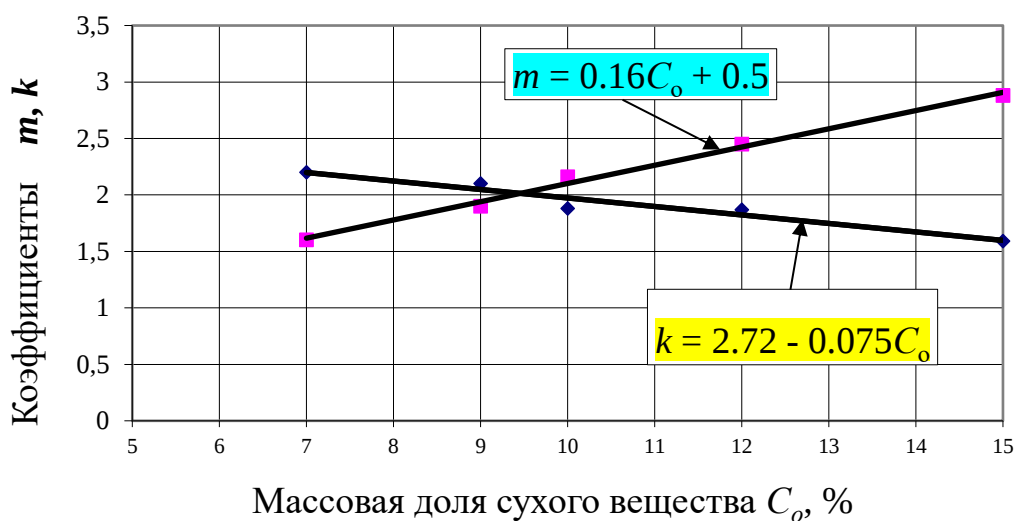


Рисунок 4.5 - Изменение эмпирических коэффициентов k и m в зависимости от состава сухого вещества C_o . Содержание органики в сапропеле $ОВ=21,7\%$

4.2. Уравнение расхода сапропеля для условий залежи.

На практике при работе в условиях пониженных температур сапропеля в залежи при использовании формулы (4.41) необходимо учитывать вышеуказанные температурные коэффициенты увеличения вязкости сапропеля в размере $k_\mu^t = 1,56$ и напряжения сдвига в размере $k_\tau^t = 1,2$. Тогда уравнение расхода сапропеля естественной влажности в условиях залежи в $\text{м}^3/\text{час}$ может быть записано следующим образом:

$$Q = \frac{3600 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \tau_\infty \cdot k_\tau^t}{\mu_{p\infty} (3+m) \cdot k^m \cdot k_\mu^t} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{Am}{2+m} - \frac{2A^2(m+A)}{(2+m)(1+m)} \right], \quad (4.48)$$

при этом A примет вид:

$$A = \frac{2l \cdot \tau_o \cdot k_\tau^t}{R \cdot \Delta P} \quad (4.49)$$

С учетом того, что значения вязкости и напряжения сдвига измеряются, как правило, при температуре $18 \div 20^\circ\text{C}$, формулу (4.48) можно записать следующим образом с учетом обозначения данных из таблицы 1.28:

$$Q = \frac{3600 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \tau_w^t}{\mu_w^t (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{Am}{2+m} - \frac{2A^2(m+A)}{(2+m)(1+m)} \right], \quad (4.50)$$

при этом A примет вид:
$$A = \frac{2l \cdot \tau_o^t}{R \cdot \Delta P}, \quad (4.51)$$

где:

$\tau_w^t = \tau_\infty \cdot k_\tau^t$ - значение напряжения сдвига на переходном участке кривой, когда скорость не превышает 1 м/с;

$\mu_w^t = \mu_o \cdot k_\mu^t$ - значение пластической вязкости на переходном участке кривой, когда скорость не превышает 1 м/с;

$\tau_o^t = \tau_o \cdot k_\tau^t$ - значение предела текучести, с превышением которого начинается процесс течения на переходном участке течения.

Кривую течения сапропелей естественной влажности (4.26) для температурных условий залежи необходимо снимать с использованием реометра, подключенного к системе термостатирования с контролем температуры по нижней пластине (Peltier-Plate/ETC-Electronic Temperature Control).

Взаимосвязь расхода сапропеля естественной влажности ($\text{м}^3/\text{ч}$) со скоростью его гидро-транспортирования в горизонтальном трубопроводе (м/с) определяется по известной формуле:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2 \cdot 3600} \quad (4.52)$$

Потери давление ΔP в Па в горизонтальном трубопроводе рекомендуется рассчитывать по известной формуле Бэкингема-Рейнера, но с учетом температурных коэффициентов для вязкости и напряжения сдвига:

$$\Delta P = \Delta P_o + \Delta P_{\text{тр}} = \frac{4 \cdot \tau_o \cdot k_\tau^t \cdot L}{D} + \frac{32 \cdot \mu_{\text{пл}} \cdot k_\mu^t \cdot L \cdot v}{D^2} \quad (4.53)$$

где:

ΔP_o - потери давления на преодоление предела текучести τ_o ,

$\Delta P_{тр}$ - потери давления на трение от пластической вязкости $\mu_{пл}$.

Ниже приведены расчёты расхода сапропеля по предложенному уравнению для шести исследуемых озёр с построением кривых зависимостей расхода от радиуса (диаметра), начального напряжения сдвига, пластической вязкости, давления и длины трубопровода, что позволило визуально отобразить закономерности гидро-транспортирования сапропелей естественной влажности и понять методику установки параметров технологического процесса.

Расчёты расхода и графики зависимостей с подбором технологических параметров рассчитаны с использованием ПО в среде Excel на основании техзадания автора (Приложение В).

Результаты всех расчётов сведены в таблицу (см. табл. 4.2), проведен анализ полученных результатов и сделаны выводы.

4.2.1. Расчёт параметров гидро-транспортирования для оз. Веверу (Q1).

$W_{\text{отн1}} = 96,78\%$ - относительная влажность сапропеля во взятых образцах,

C_o - содержание сухого остатка в сапропеле, определяем по формуле:

$$C_{o1} = 100 - W_1 = 100\% - 96,78\% = 3,22\%, \quad (4.54)$$

k_1 – безразмерный коэффициент содержания сухого остатка рассчитываем исходя из графика (рис. 4.4) по формуле (4.44):

$$k_1 = 5,52 - 0,39 \cdot C_o = 5,52 - 0,39 \cdot 3,22 = 4,2642 \quad (4.55)$$

m_1 – безразмерный коэффициент содержания твердого рассчитываем исходя из того же графика (рисунок 4.4) по формуле (4.45):

$$m_1 = 0,29 \cdot C_o + 0,18 = 0,29 \cdot 3,22 + 0,18 = 1,1138 \quad (4.56)$$

n_1 – коэффициент нелинейного содержания органики определяем по формуле

$$n_1 = l_1 : m_1 = 1400 : 1,1138 = 1257 \quad (4.57)$$

Значения вязкости и напряжения сдвига принимаем из таблицы 1.30, строка 1.

Расход сапропеля Q_1 , согласно уравнению (4.50) при расчётном диаметре трубопровода $D_1 = 180$ мм, составляет $Q_1 = 24,3$ м³/час (рис. 4.6).

Среднюю скорость течения в трубе v_1 определяем по известной формуле:

$$v_1 = \frac{4Q_1}{\pi D^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 24,3}{3,14 \cdot 0,18^2 \cdot 3600} = 0,265 \text{ м/с} \quad (4.58)$$

Пусковое давление $\Delta P_{\text{пуск1}}$, при котором начнется движение гидросмеси в заполненном трубопроводе, определим из формулы (4.53), принимая скорость $v_{\text{мин}} = 0,01$ м/с при максимальной пластической вязкости:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{пуск1}} &= \frac{4 \cdot 17,32 \text{ Па} \cdot 1400 \text{ м}}{0,18 \text{ м}} + \frac{32 \cdot 3,843 \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot 1400 \text{ м} \cdot 0,01 \text{ м/с}}{(0,18 \text{ м})^2} = \\ &= 538\,844 \text{ Па} + 53138 \text{ Па} = 591\,982 \text{ Па} = 0,592 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (4.59)$$

Ниже (см. рис. 4.6) приведена распечатка программного файла расчёта для расхода Q_1 при диаметре $D_1 = 180$ мм и длине трубопровода $l_1 = 1400$ м для оз. Веверу, выполненного на основе уравнения (4.48). Реологические параметры приняты из таблицы 1.30 строка 1.

Вычисление потока жидкости:

$$\textcircled{\bullet} Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{\text{psc}} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\textcircled{\circ} Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{\text{psc}}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Козф. нелинейности содержания органики	n	1257,0000	
Безразмерный коэф. содержания твердого	k	4,2642	
Пластическая вязкость	μ_{psc}	3,8430	Па/с
Радиус трубопровода	R	0,0900	м
Длина трубопровода	l	1400,0000	м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000	Па
Напряжение сдвигу	τ_{∞}	65,5200	Па
Предел текучести	τ_0	17,3200	Па
Расход жидкости	Q	0,006749392	м ³ /сек x
		0,40496352	м ³ /мин x
		24,29781123	м ³ /час x

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Падение давления на длине l

Начальное значение параметра: 600000,0000

Конечное значение параметра: 2400000,0000

Шаг: 150000,0000

Размерность:

☐ Поток жидкости в секунду

☐ Поток жидкости в минуту

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

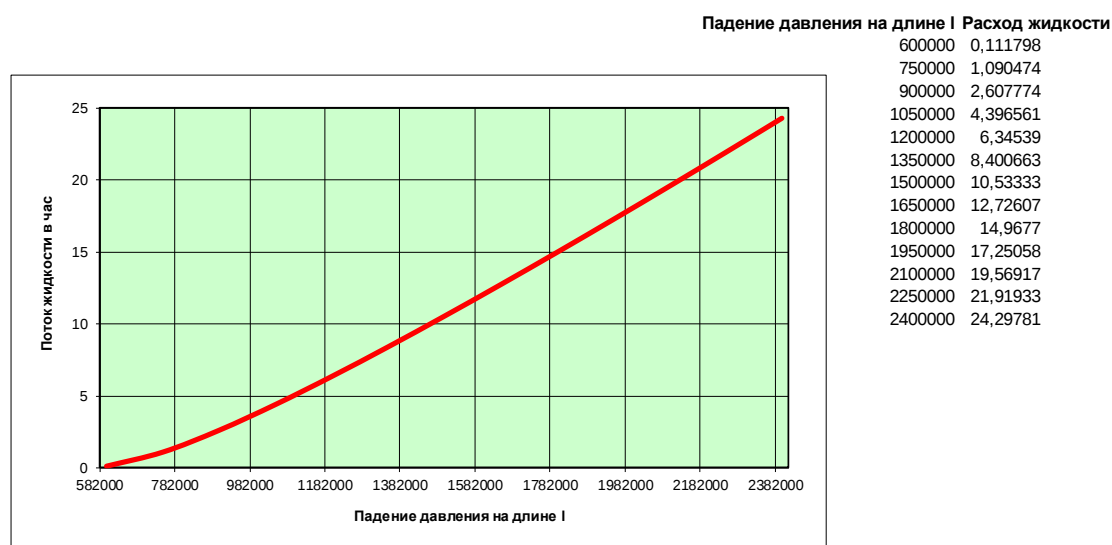


Рисунок 4.6 - Распечатка программного файла для расчёта расхода Q_1 при диаметре $D_1 = 180$ мм и длине трубопровода $l_1 = 1500$ м для оз. Веверу.

Потери давления при $\vartheta_1 = 0,2755 \text{ м/с}$ составят:

$$\Delta P_{\text{раб1}} = \frac{4 \cdot 17,32 \cdot 1400}{0,18} + \frac{32 \cdot 3,843 \cdot 1400 \cdot 0,265}{0,18^2} = 538\,844 \text{ Па} + 1\,408\,151 \text{ Па} = 2\,002\,790 \text{ Па} = 1,947 \text{ МПа} \quad (4.60)$$

При диаметре $D = 0,18 \text{ м}$ насос сможет выдать только $24,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, но нас не устраивает такая производительность. Поэтому увеличиваем диаметр до $0,22 \text{ м}$ и делаем перерасчёт.

При увеличении диаметра до $0,22 \text{ м}$ расход увеличился до $60,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ (см. рис. 4.7), а скорость подачи при этом составила $0,44 \text{ м/с}$:

$$\vartheta_1 = \frac{4Q_1}{\pi D^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 60,2}{3,14 \cdot 0,22^2 \cdot 3600} = 0,44 \text{ м/с} \quad (4.61)$$

Пусковое давление при начальной $\vartheta_{\text{min}} = 0,01 \text{ м/с}$ составит $0,48 \text{ МПа}$:

$$\Delta P_{\text{пуск1}} = \frac{4 \cdot 17,32 \cdot 1400}{0,22} + \frac{32 \cdot 3,843 \cdot 1400 \cdot 0,01}{0,22^2} = 440\,873 \text{ Па} + 35\,572 \text{ Па} = 476\,445 \text{ Па} = 0,48 \text{ МПа} \quad (4.62)$$

Рабочее давление для рабочей скорости $\vartheta_1 = 0,44 \text{ м/с}$ составит:

$$\Delta P_{\text{раб1}} = \frac{4 \cdot 17,32 \cdot 1400}{0,22} + \frac{32 \cdot 3,843 \cdot 1400 \cdot 0,44}{0,22^2} = 440\,873 \text{ Па} + 1\,565\,149 \text{ Па} = 2\,006\,022 \text{ Па} = 2,01 \text{ МПа} \quad (4.63)$$

Находим число Рейнолдса в рабочем режиме для $v_1 = 0,44 \text{ м/с}$:

$$R_e^1 = \frac{v_1 D_1 \rho_1}{\mu_1} = \frac{0,44 \cdot 0,22 \cdot 1050}{3,843} = 27 \quad (4.64)$$

При увеличении скорости до $0,44 \text{ м/с}$ произойдет уменьшение вязкости, но на сколько она уменьшится можно узнать лишь при снятии показаний реометра, показывающего одновременно изменения напряжения сдвигу и псевдо-пластической вязкости с подключением к системе термостатирования с контролем температуры по нижней пластине для охлаждения образцов до $3-4 \text{ }^\circ\text{C}$. Для этого нужен реометр типа Anton Paar MSR с ПО Rheo V2.8 и с регулятором температуры, типа Peltier-Plate/ETC-Electronic Temperature Control.

Уравнение Бэкингема (4.42) не учитывает тиксотропию (рост напряжения сдвига τ_∞ при увеличении скорости сдвига и уменьшение псевдо-пластической вязкости. Предложенное уравнение (4.48) учитывает рост напряжения сдвига и

снижение псевдо-пластической вязкости. При отсутствии реометра, показывающего значение псевдо-пластической вязкости и соответствующие ей значения напряжения сдвига и скорости сдвига, мы используем максимальное значение пластической вязкости и динамического напряжения сдвигу, тем самым занижаем расчетный расход, но при этом завышаем рабочие потери напора, что гарантирует преодоление сопротивления, возникающего в трубопроводе полностью заполненного сапропелем даже после остановки его работы на срок до нескольких недель (при каком-то ремонте, например).

Нужно подчеркнуть, что напряжения сдвигу возрастает с ростом скорости сдвига и становится выше значения предела текучести, а это означает, что скачка давления при начале движения не будет, поскольку течение в трубе после преодоления предела текучести продолжает расти за счет плавного повышения давления эксцентриковым винтовым насосом для преодоления сопротивления вязкости. Другими словами, в рабочем режиме рабочее давление всегда будет выше, чем пусковое давление, в отличие от работы грязевого центробежного насоса.

Увеличение расхода до $69,75 \text{ м}^3/\text{ч}$ (см. рис. 4.7) по уравнению Бэкингема (4.42) для диаметра $0,22\text{м}$ приводит к увеличению скорости гидротранспортирования до $0,51\text{м/с}$, а значит и к повышенному расходу энергии.

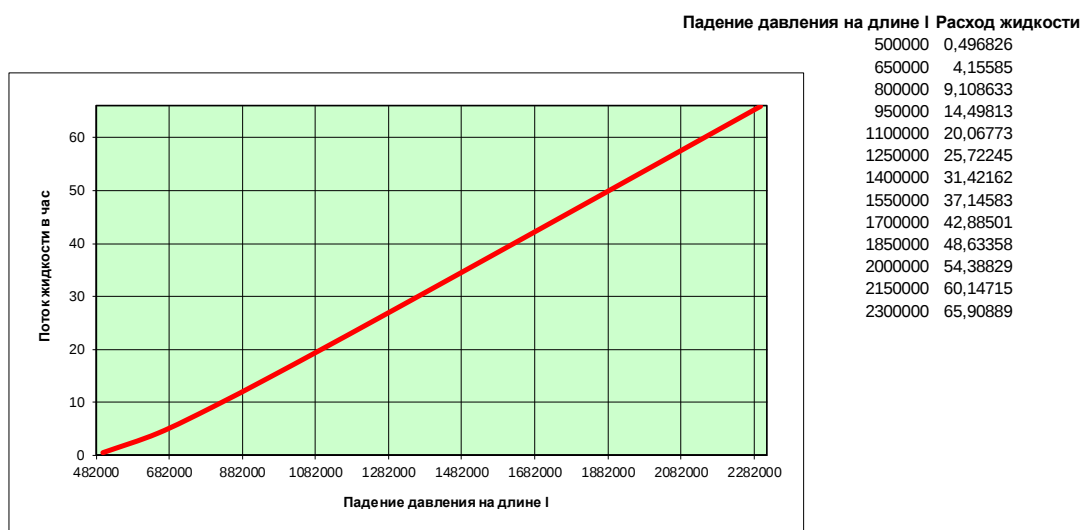


Рисунок 4.7 – Кривые расход-перепад давления, рассчитанная по уравнению Бэкингема (4.42)

На рисунке 4.8 приведен объединенный график кривых расхода по уравнению (4.48) для расхода $Q=60 \text{ м}^3/\text{ч}$ и по уравнению Бэкингема (4.42) с расходом $Q=69,75 \text{ м}^3/\text{ч}$ для диаметра $D_1=220 \text{ мм}$, длины $L_1=1400 \text{ м}$.

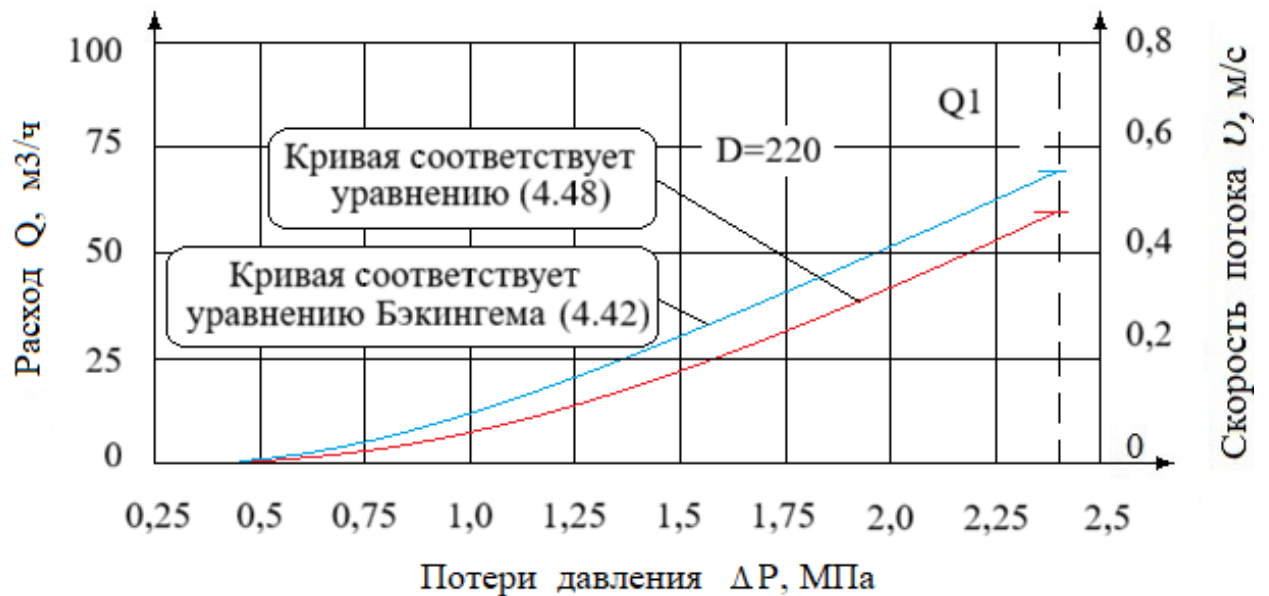


Рисунок 4.8 - Зависимость расхода Q_1 от потери давления и скорости гидро-транспортирования при $D_1 = 220 \text{ мм}$ на оз. Веверу.

Ниже приведены программные файлы зависимостей расхода для сапропеля естественной влажности Q1 с $D_1=220\text{мм}$ и $L=1400\text{м}$ (рис. 4.9–4.13).

Вычисление потока жидкости:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_0}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Козф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коэф. содержания твердого k

Пластическая вязкость μ_{px} Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_0 Па

Предел текучести τ_0 Па

Расход жидкости Q м³/сек ☒

м³/мин ☐

м³/час ☐

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

Падение давления на длине l Расход жидкости

500000	0,282187
650000	2,740036
800000	6,409315
950000	10,64132
1100000	15,19609
1250000	19,96547
1400000	24,89265
1550000	29,94411
1700000	35,09823
1850000	40,34003
2000000	45,65858
2150000	51,04558
2300000	56,49445

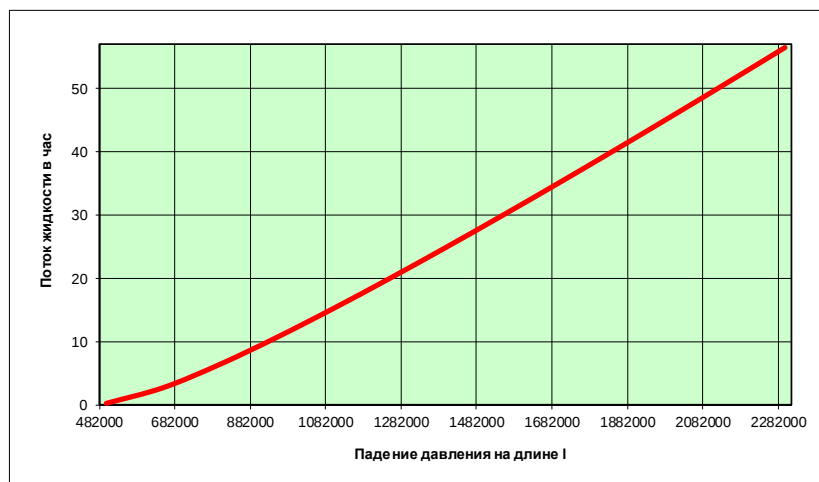


Рисунок 4.9 - Распечатка программного файла для расчёта расхода Q_1 при диаметре $D_1 = 220$ мм и длине трубопровода $L = 1400$ м для оз. Веверу (Q_1)

Вычисление потока жидкости:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{\text{рас}} \cdot (3+m) \cdot k^m \left(\frac{1}{A} - 1\right)^m} \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{\text{рас}}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Кэф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коэф. содержания твердого k

Пластическая вязкость $\mu_{\text{рас}}$ Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_{∞} Па

Предел текучести τ_0 Па

Расход жидкости Q м³/сек +
 м³/мин +
 м³/час +

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

Радиус трубопровода Расход жидкости

0,03	0,057582
0,04	0,404411
0,05	1,400562
0,06	3,552373
0,07	7,517576
0,08	14,10903
0,09	24,29781
0,1	39,21595
0,11	60,15875

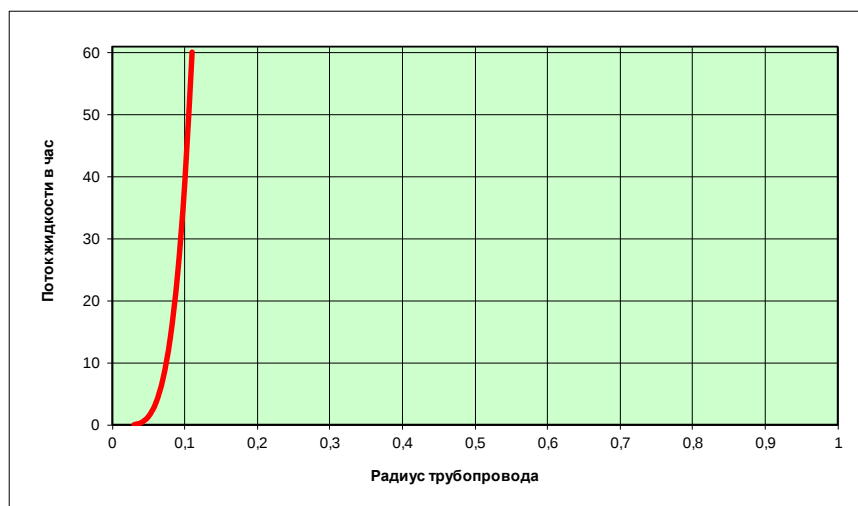


Рисунок 4.10 - Вариант Q1 (D=220мм). Кривая расход-радиус трубопровода

Вычисление потока жидкости:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_0}{\mu_{pz} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{pz}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Козф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коэф. содержания твердого k

Пластическая вязкость μ_{pz} Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_0 Па

Предел текучести τ_0 Па

Расход жидкости Q м³/сек ☐

м³/мин ☐

м³/час ☒

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

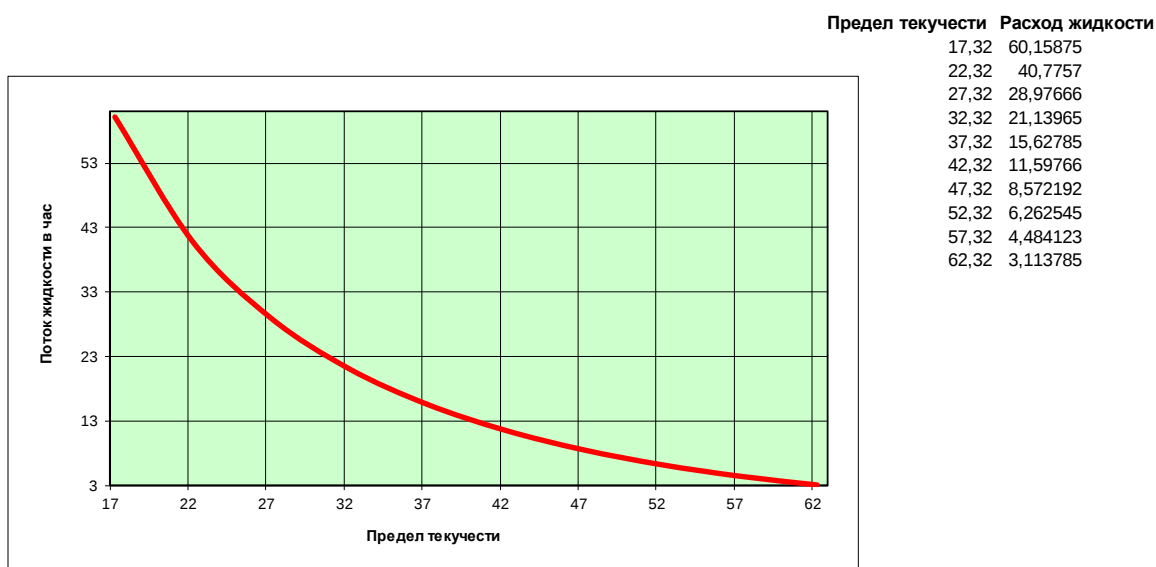


Рисунок 4.11 - Вариант Q1 (D=220мм). Кривая расход-предел текучести

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_0}{\mu_{\text{пл}} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{\text{пл}}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Кэф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коэф. содержания твердого k

Пластическая вязкость $\mu_{\text{пл}}$ Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_0 Па

Предел текучести τ_0 Па

Расход жидкости Q м³/сек ☐

м³/мин ☐

м³/час ☒

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

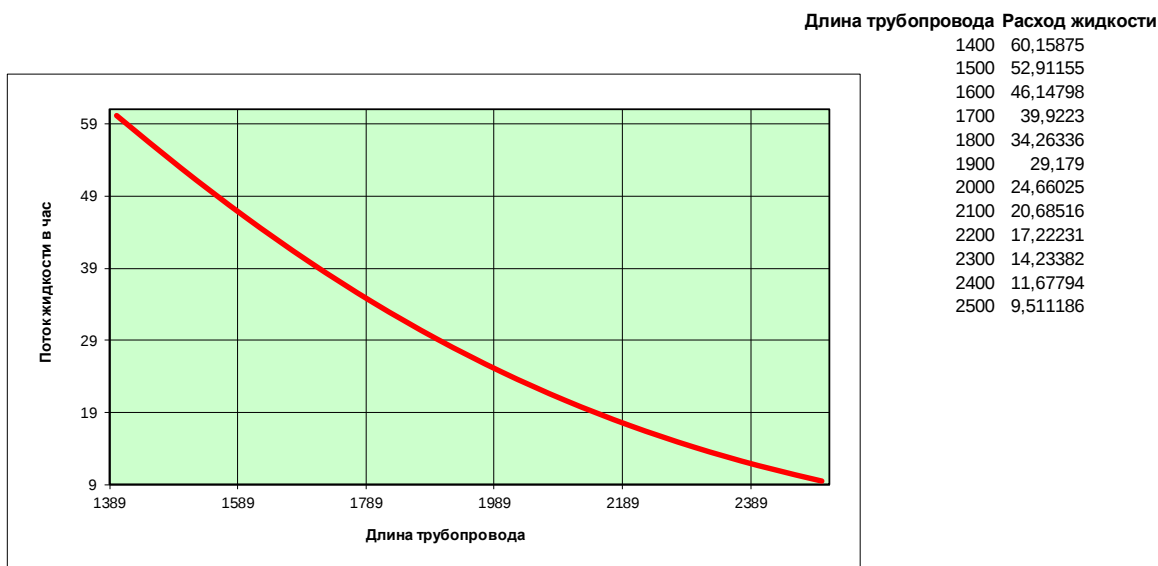


Рисунок 4.12 - Вариант Q1 (D=220мм). Кривая расход-длина трубопровода

Вычисление потока жидкости:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty}{\mu_{psc} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{psc}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Кэф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коэф. содержания твердого k

Пластическая вязкость μ_{psc} Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_∞ Па

Предел текучести τ_0 Па

Расход жидкости Q м³/сек ☐

м³/мин ☐

м³/час ☒

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

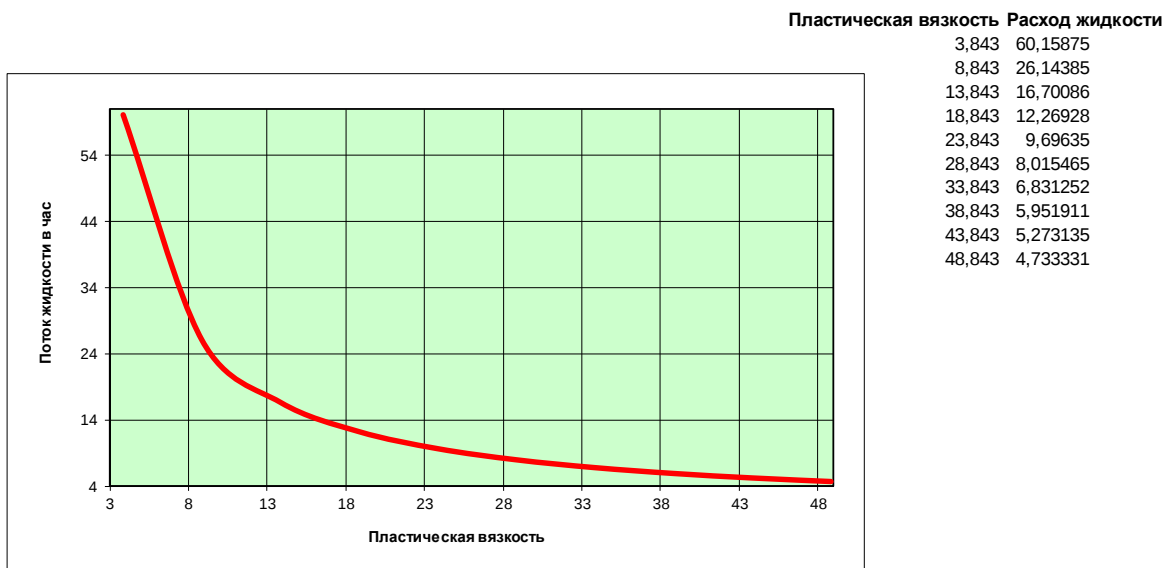


Рисунок 4.13 - Вариант Q1 (D=220мм). Кривая расход-вязкость пластическая

4.2.2. Расчёт гидро-транспортирования для оз. Пильвелю (Q4).

$$C_c = 100\% - 96,41\% = 3,59\% \quad (4.65)$$

$$k_4 = 5,52 - 0,39 \cdot C_c = 5,52 - 0,39 \cdot 3,59 = 4,1199 \quad (4.66)$$

$$m_4 = 0,29 \cdot C_c + 0,18 = 0,29 \cdot 3,59 + 0,18 = 1,2211 \quad (4.67)$$

$$n_4 = l_4 : m_4 = 1400 : 1,2211 = 1146,5 \quad (4.68)$$

$$D_4 = 280 \text{ мм}, l_4 = 1400 \text{ м}, Q_4 = 114 \text{ м}^3/\text{час} \quad (4.69)$$

$$\vartheta_4 = \frac{4Q_4}{\pi D^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 114}{3,14 \cdot 0,28^2 \cdot 3600} = 0,51 \text{ м/с} \quad (4.70)$$

Пусковое давление определим для скорости $\vartheta_{min} = 0,01 \text{ м/с}$:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{пуск}4} &= \frac{4 \cdot 20,88 \cdot 1400}{0,28} + \frac{32 \cdot 5,342 \cdot 1400 \cdot 0,01}{0,28^2} = 417\,600 \text{ Па} + 30\,526 \text{ Па} = \\ &= 448\,126 \text{ Па} = 0,448 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (4.71)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{раб}4} &= \frac{4 \cdot 20,88 \cdot 1400}{0,28} + \frac{32 \cdot 5,342 \cdot 1400 \cdot 0,51}{0,28^2} = 417\,600 \text{ Па} + 1\,556\,812 \text{ Па} = \\ &= 1\,974\,412 \text{ Па} = 2,0 \text{ МПа} \end{aligned}$$

$$R_e^4 = \frac{v_4 D_4 \rho}{\mu_4} = \frac{0,51 \cdot 0,28 \cdot 1058}{5,342} = 28 \quad (4.72)$$

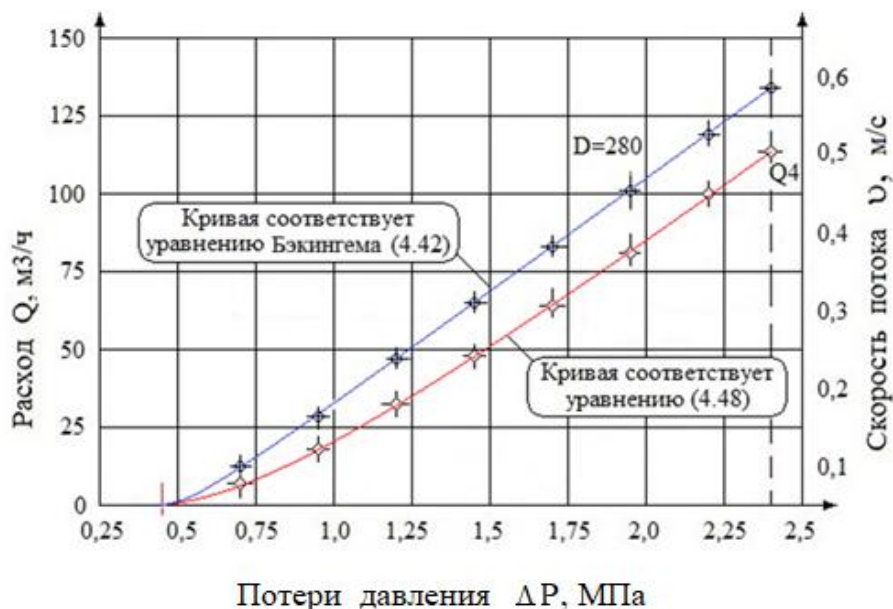


Рисунок 4.14 - Зависимость расхода для Q_4 от давления и скорости на оз. Пильвелю для двух моделей течения.

Из рис. 4.14 видно, что уравнение Бэкингема дает завышенный результат расхода. Ниже приведены расчетные файлы для Q_4 (рис. 4.15–4.19).

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_0}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коеф. нелинейности содержания органики	n	1146,5000
Безразмерный коеф. содержания твердого	k	4,1199
Пластическая вязкость	μ_{px}	5,3420 Па/с
Радиус трубопровода	R	0,1400 м
Длина трубопровода	l	1400,0000 м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000 Па
Напряжение сдвигу	τ_0	75,8400 Па
Напряжение сдвигу Т0	τ_0	20,8800 Па
Поток жидкости	Q	0,03179019 м ³ /мин
		1,907411429 м ³ /мин
		114,4446858 м ³ /мин

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Падение давления на длине l Размерность:

Начальное значение параметра 440000,0000 ☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра 2400000,0000 ☐ Поток жидкости в минуту

Шаг 250000,0000 ☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

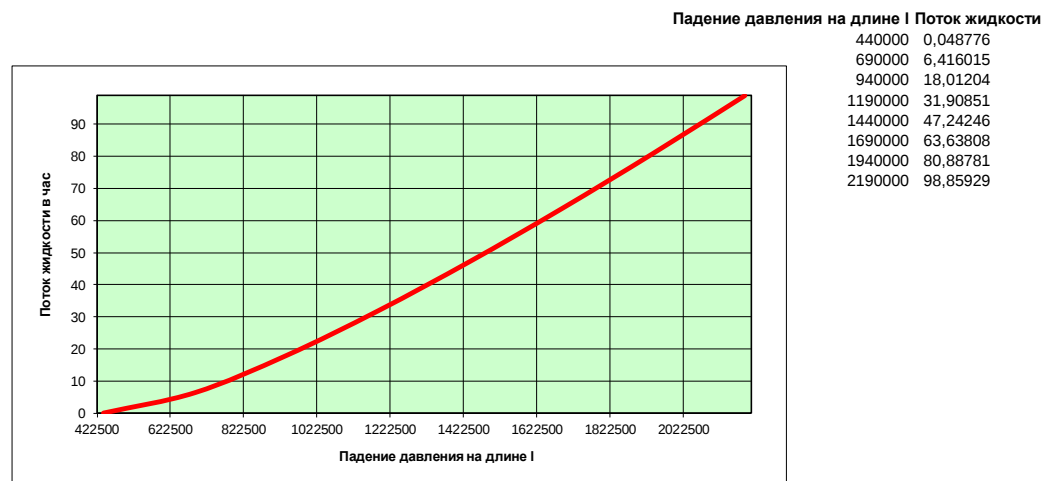


Рисунок 4.15 - Распечатка программного файла для расчёта расхода Q_4 при диаметре $D_4 = 280$ мм и длине трубопровода $l_4 = 1400$ м для оз. Пильвелю

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{\text{рас}} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{\text{рас}}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коеф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коеф. содержания твердого k

Пластическая вязкость $\mu_{\text{рас}}$ Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_{∞} Па

Напряжение сдвигу τ_0 Па

Поток жидкости Q м³/мин

x

x

x

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

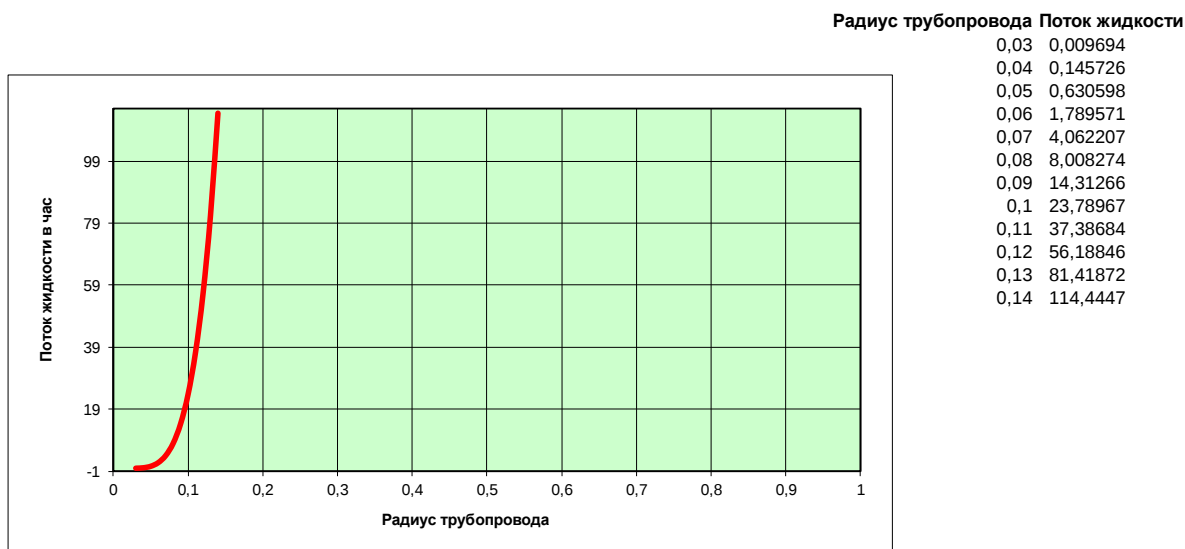


Рисунок 4.16 - Вариант Q4. Кривая расход-радиус трубопровода

Вычисление потока жидкости:

$$\odot \quad Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ \quad Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коеф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коеф. содержания твердого k

Пластическая вязкость μ_{px} Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_{∞} Па

Напряжение сдвигу Т0 τ_0 Па

Поток жидкости Q

 м³/мин

+

+

+

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать



Рисунок 4.17 - Вариант Q4. Кривая расход-напряжение сдвига

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{\text{psc}} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{\text{psc}}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Кэф. нелинейности содержания органики	n	1146,5000
Безразмерный коэф. содержания твердого	k	4,1199
Пластическая вязкость	μ_{psc}	5,3420 Па/с
Радиус трубопровода	R	0,1400 м
Длина трубопровода	l	1400,0000 м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000 Па
Напряжение сдвигу	τ_{∞}	75,8400 Па
Напряжение сдвигу Т0	τ_0	20,8800 Па
Поток жидкости	Q	0,03179019
		1,907411429
		114,4446858

м³/мин
x
x
x

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Длина трубопровода

Начальное значение параметра 1400,0000

Конечное значение параметра 2500,0000

Шаг 100,0000

Рассчитать

Размерность:

- ☐ Поток жидкости в секунду
- ☐ Поток жидкости в минуту
- ☒ Поток жидкости в час

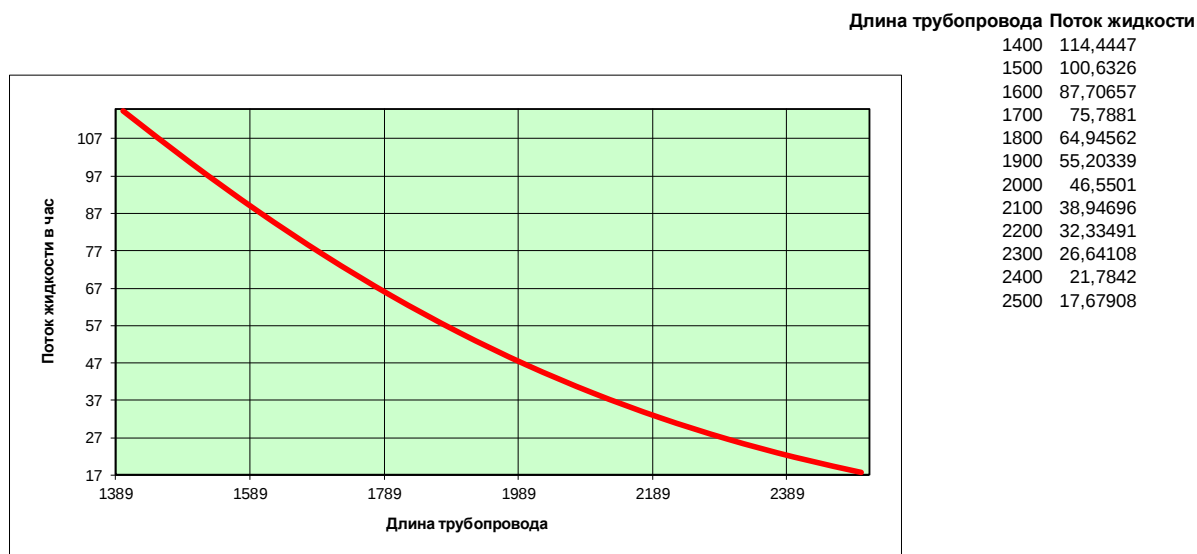


Рисунок 4.18 - Вариант Q4. Кривая расход-длина трубопровода

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коеф. нелинейности содержания органики	n	1146,5000
Безразмерный коеф. содержания твердого	k	4,1199
Пластическая вязкость	μ_{px}	5,3420 Па/с
Радиус трубопровода	R	0,1400 м
Длина трубопровода	l	1400,0000 м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000 Па
Напряжение сдвигу	τ_∞	75,8400 Па
Напряжение сдвигу τ_0	τ_0	20,8800 Па
Поток жидкости	Q	0,03179019
		1,907411429
		114,4446858

м³/мин
+
+
+

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Пластическая вязкость

Размерность:

Начальное значение параметра 5,3420

Конечное значение параметра 200,0000

Шаг 10,0000

- ☐ Поток жидкости в секунду
☐ Поток жидкости в минуту
☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

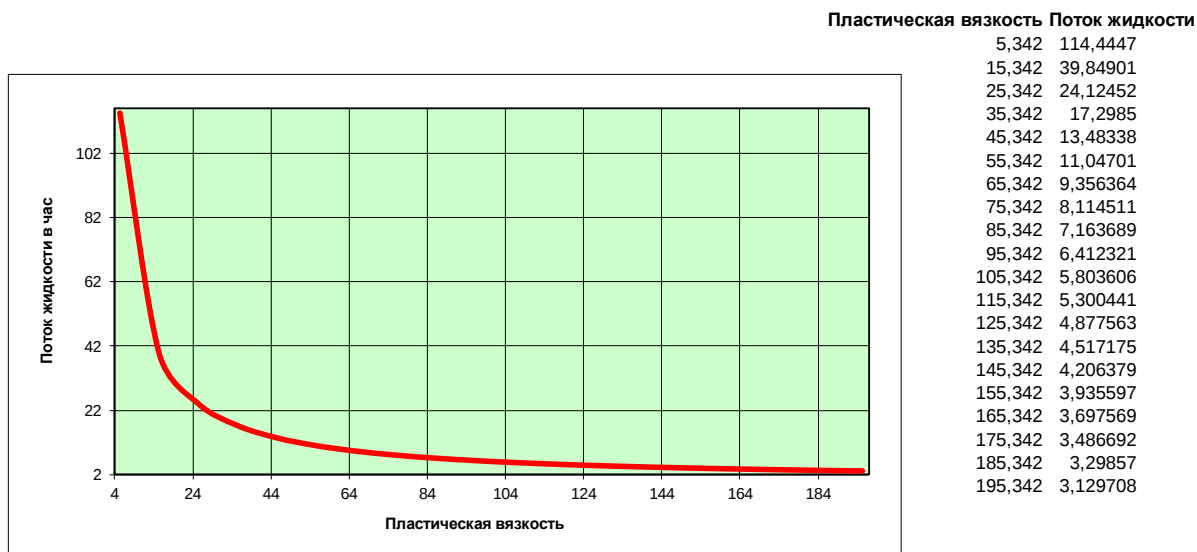


Рисунок 4.19 - Вариант Q4. Кривая расход-вязкость пластическая

4.2.3. Расчёт гидро-транспортирования для оз. Убаговас (Q5).

$$C_c = 100\% - 93,9\% = 6,1\% \quad (4.73)$$

$$k_5 = 5,52 - 0,39 \cdot C_c = 5,52 - 0,39 \cdot 6,1 = 3,141 \quad (4.74)$$

$$m_5 = 0,29 \cdot C_c + 0,18 = 0,29 \cdot 6,1 + 0,18 = 1,949 \quad (4.75)$$

$$n_5 = l_5 : m_5 = 1000 : 1,949 = 513,08 \quad (4.76)$$

$$D_5 = 280 \text{ мм}, l_5 = 1000 \text{ м}, Q_5 = 85,9 \text{ м}^3/\text{час} \quad (4.77)$$

$$v_5 = \frac{4Q_5}{\pi D^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 85,9}{3,14 \cdot 0,28^2 \cdot 3600} = 0,39 \text{ м/с} \quad (4.78)$$

Пусковое давление определим для минимальной скорости $v_{min} = 0,01 \text{ м/с}$:

$$\Delta P_{\text{пуск5}} = \frac{4 \cdot 31,8 \cdot 1000}{0,28} + \frac{32 \cdot 10,456 \cdot 1000 \cdot 0,01}{0,28^2} = 454\,286 \text{ Па} + 42\,678 \text{ Па} =$$

$$= 496\,964 \text{ Па} = 0,5 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_{\text{раб5}} = \frac{4 \cdot 31,8 \cdot 1000}{0,28} + \frac{32 \cdot 10,456 \cdot 1000 \cdot 0,39}{0,28^2} = 454\,286 \text{ Па} + 1\,664\,424 \text{ Па} =$$

$$= 2\,118\,710 \text{ Па} = 2,1 \text{ МПа} \quad (4.79)$$

$$R_e^5 = \frac{v_5 D_5 \rho}{\mu_5} = \frac{0,39 \cdot 0,28 \cdot 1123}{10,456} = 12 \quad (4.80)$$

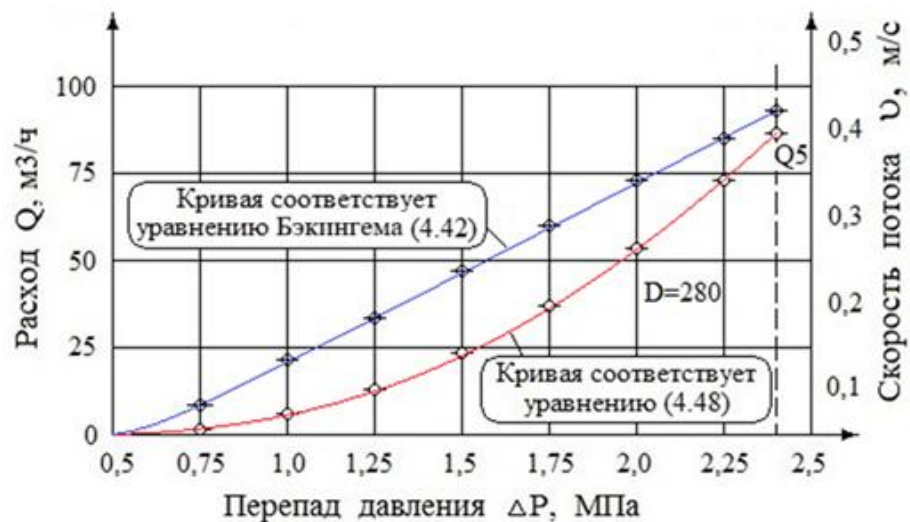


Рисунок 4.20 - Зависимость расхода Q_5 от потери давления и скорости гидро-транспортирования при $D_5 = 280$ мм, $l_5 = 1000$ м на оз. Убаговас

Из рисунка 4.20 видно, что с возрастанием напряжения сдвига увеличивается расхождение кривых по уравнениям (4.42) и (4.48), при этом уравнение Букингема (4.42) выдает завышенный результат расхода. Ниже приведены расчетные файлы для Q_5 (рис. 4.21–4.25).

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{ps} \cdot (3+m) \cdot k^m \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m} \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{ps}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коеф. нелинейности содержания органики n 513,8000

Безразмерный коеф. содержания твердого k 3,1410

Пластическая вязкость μ_{ps} 10,4560 Па/с

Радиус трубопровода R 0,1400 м

Длина трубопровода l 1000,0000 м

Падение давления на длине l Δp 2400000,0000 Па

Напряжение сдвигу τ_{∞} 87,6000 Па

Напряжение сдвигу τ_0 31,8000 Па

Поток жидкости Q 0,023856652

1,431399143 м³/мин

85,8839486

x

x

x

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Падение давления на длине l

Размерность:

Начальное значение параметра 500000,0000

Конечное значение параметра 2400000,0000

Шаг 250000,0000

☐ Поток жидкости в секунду

☐ Поток жидкости в минуту

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

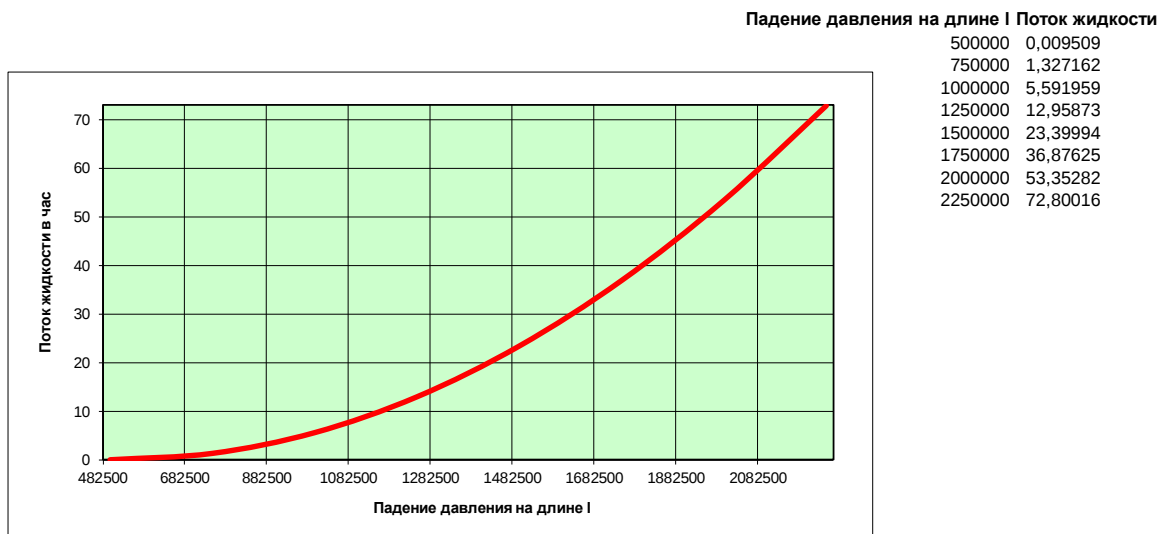


Рисунок 4.21 - Распечатка программного файла для расчёта расхода Q_5 при диаметре $D_5 = 280$ мм и длине трубопровода $l_5 = 1000$ м для оз. Убаговас.

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Козф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коэф. содержания твердого k

Пластическая вязкость μ_{px} Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_{∞} Па

Напряжение сдвигу T_0 τ_0 Па

Поток жидкости Q

 м³/мин

+

+

+

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

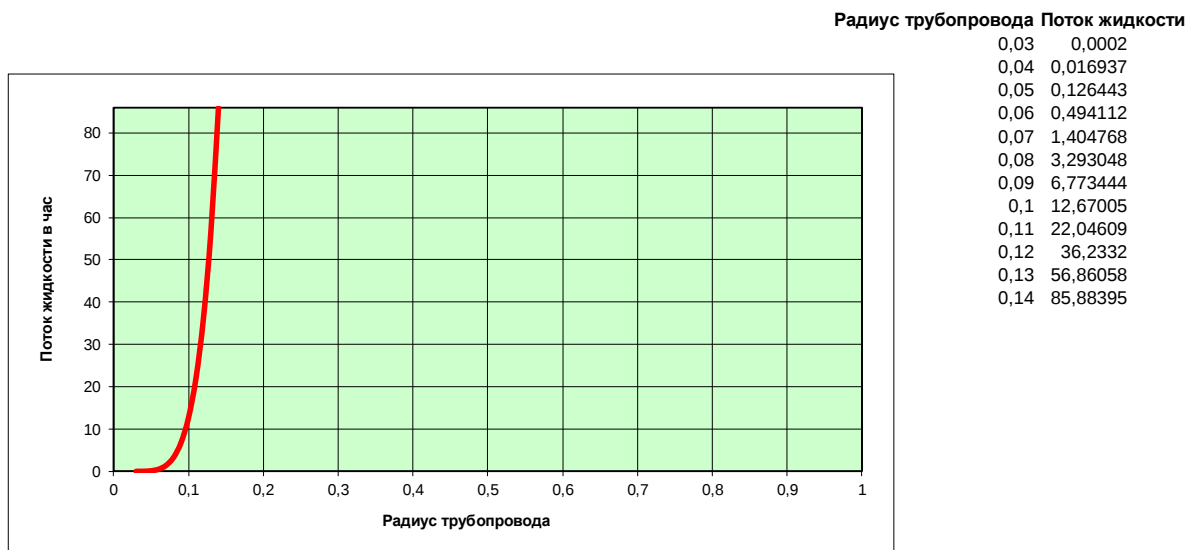


Рисунок 4.22 - Вариант Q5. Кривая расход-радиус трубопровода

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m \left(\frac{1}{A} - 1\right)^m} \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Козф. нелинейности содержания органики	n	513,8000
Безразмерный коэф. содержания твердого	k	3,1410
Пластическая вязкость	μ_{px}	10,4560 Па/с
Радиус трубопровода	R	0,1400 м
Длина трубопровода	l	1000,0000 м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000 Па
Напряжение сдвигу	τ_∞	87,6000 Па
Напряжение сдвигу $T0$	τ_0	31,8000 Па
Поток жидкости	Q	0,023856652
		1,431399143 м ³ /мин
		85,8839486

+

+

+

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Напряжение сдвигу $T0$

Размерность:

Начальное значение параметра 31,8000

Конечное значение параметра 87,6000

Шаг 5,0000

- ☐ Поток жидкости в секунду
- ☐ Поток жидкости в минуту
- ☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

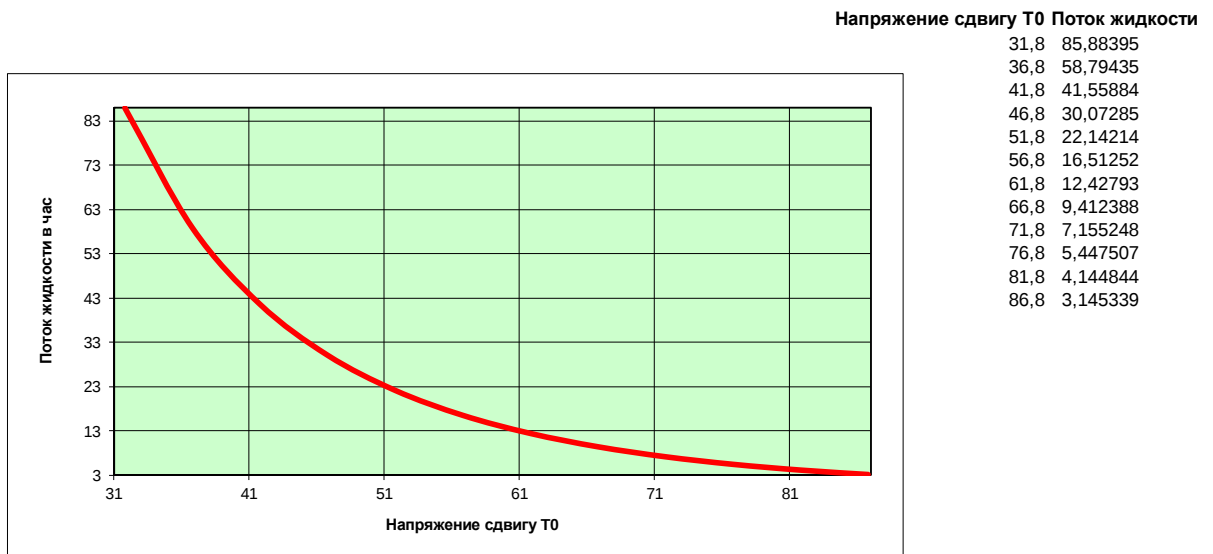


Рисунок 4.23 - Вариант Q5. Кривая расход-напряжение сдвига

Вычисление потока жидкости:

$$\odot \quad Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m} \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ \quad Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Козф. нелинейности содержания органики	n	513,8000
Безразмерный коэф. содержания твердого	k	3,1410
Пластическая вязкость	μ_{px}	10,4560 Па/с
Радиус трубопровода	R	0,1400 м
Длина трубопровода	l	1000,0000 м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000 Па
Напряжение сдвигу	τ_∞	87,6000 Па
Напряжение сдвигу T_0	τ_0	31,8000 Па
Поток жидкости	Q	0,023856652
		1,431399143
		85,8839486

+

+

+

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Длина трубопровода

Начальное значение параметра 1000,0000

Конечное значение параметра 1500,0000

Шаг 100,0000

Рассчитать

Размерность:

- ☐ Поток жидкости в секунду
- ☐ Поток жидкости в минуту
- ☒ Поток жидкости в час

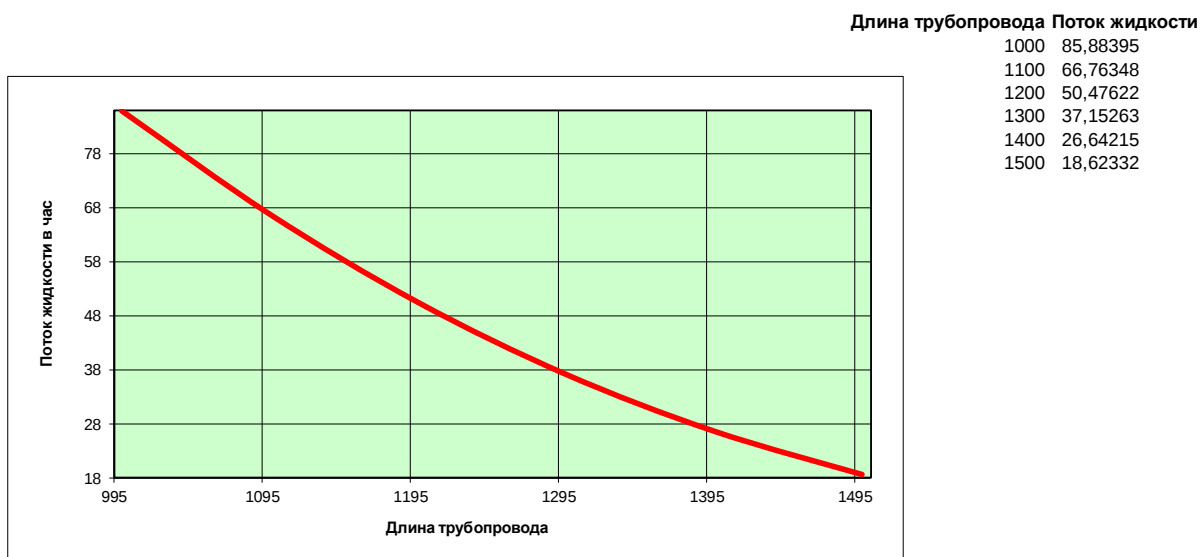


Рисунок 4.24 - Вариант Q5. Кривая расход-длина трубопровода

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m} \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Козф. нелинейности содержания органики	n	513,8000
Безразмерный коэф. содержания твердого	k	3,1410
Пластическая вязкость	μ_{px}	10,4560 Па/с
Радиус трубопровода	R	0,1400 м
Длина трубопровода	l	1000,0000 м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000 Па
Напряжение сдвигу	τ_{∞}	87,6000 Па
Напряжение сдвигу T_0	τ_0	31,8000 Па
Поток жидкости	Q	0,023856652
		1,431399143 м ³ /мин
		85,8839486

x
x
x

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Пластическая вязкость

Начальное значение параметра: 10,4650

Конечное значение параметра: 200,0000

Шаг: 10,0000

Рассчитать

Размерность:

- ☐ Поток жидкости в секунду
- ☐ Поток жидкости в минуту
- ☒ Поток жидкости в час

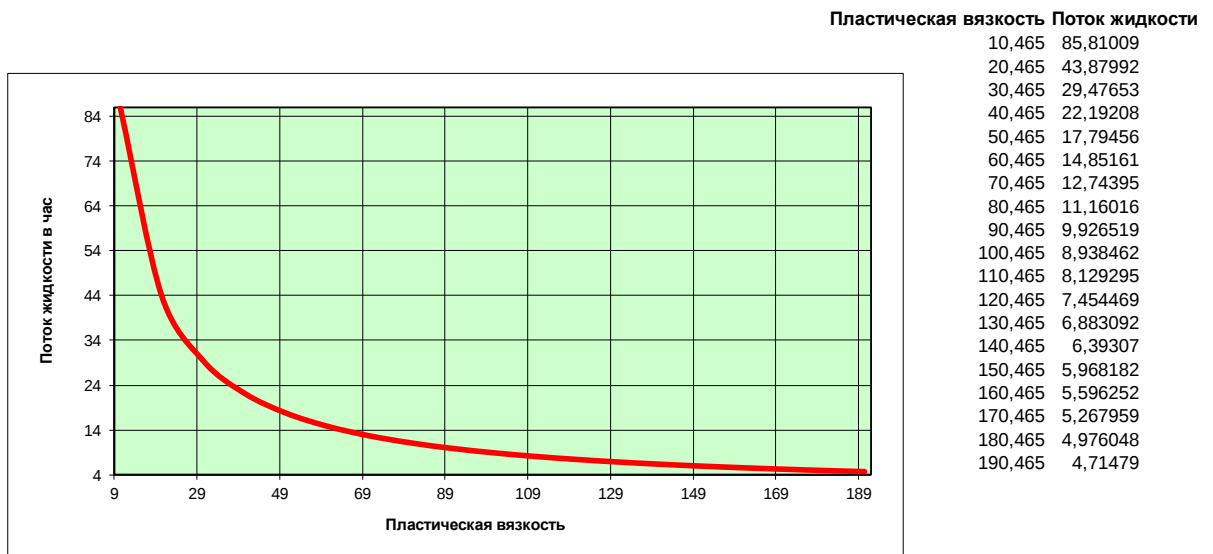


Рисунок 4.25 - Вариант Q5. Кривая расход-вязкость пластическая

4.2.4. Расчёт гидро-транспортирования для оз. Пуришу (Q6).

$$C_c = 100\% - 95,35\% = 4,65\% \quad (4.81)$$

$$k_6 = 5,52 - 0,39C_c = 5,52 - 0,39 \cdot 4,65 = 3,7065 \quad (4.82)$$

$$m_6 = 0,29C_c + 0,18 = 0,29 \cdot 4,65 + 0,18 = 1,5285 \quad (4.83)$$

$$n_6 = l_6 : m_6 = 800 : 1,5285 = 523,39 \quad (4.84)$$

$$D = 280 \text{ мм}, L = 800 \text{ м}, Q_6 = 110 \text{ м}^3/\text{час} \quad (4.85)$$

$$\vartheta_6 = \frac{4Q_6}{\pi D^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 110,4}{3,14 \cdot 0,28^2 \cdot 3600} = 0,5 \text{ м/с} \quad (4.86)$$

Пусковое давление для минимальной скорости $\vartheta_{min} = 0,01 \text{ м/с}$:

$$\Delta P_{\text{пуск6}} = \frac{4 \cdot 47,88 \cdot 800}{0,28} + \frac{32 \cdot 4,686 \cdot 800 \cdot 0,01}{0,28^2} = 547\,200 \text{ Па} + 15\,301 \text{ Па} =$$

$$= 562\,501 \text{ Па} = 0,56 \text{ МПа} = 0,6 \text{ МПа}.$$

$$\Delta P_{\text{раб6}} = \frac{4 \cdot 47,88 \cdot 800}{0,28} + \frac{32 \cdot 4,686 \cdot 800 \cdot 0,5}{0,28^2} = 547\,200 \text{ Па} + 765\,061 \text{ Па} =$$

$$= 1\,312\,261 \text{ Па} = 1,31 \text{ МПа}. \quad (4.87)$$

$$R_e^6 = \frac{v_6 D_6 \rho}{\mu_6} = \frac{0,5 \cdot 0,28 \cdot 1098}{4,686} = 33 \quad (4.88)$$

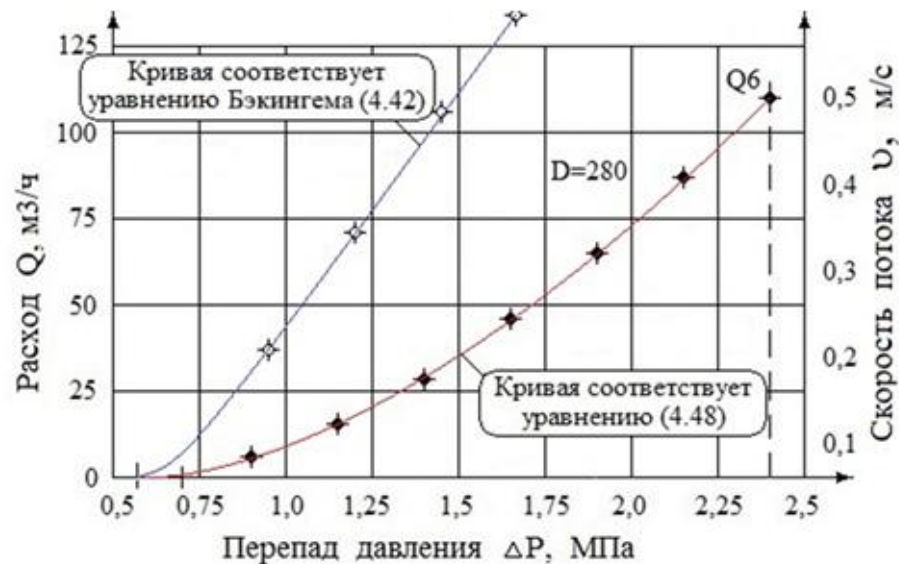


Рисунок 4.26 - Зависимость расхода Q_6 от потери давления и скорости гидро-транспортирования при $D_6 = 280 \text{ мм}$, $l_6 = 800 \text{ м}$ на оз. Пуришу.

Из графика видно, что при высоком начальном напряжении сдвига расхождение между кривыми возрастает. Ниже приведены распечатки программных файлов для Q_6 (рис. 4.27–4.31).

Вычисление потока жидкости:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \cdot \tau_{\infty}}{\mu_{\text{про}} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{\text{про}}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коэф. нелинейности содержания органики	n	523,3900	
Безразмерный коэф. содержания твердого	k	3,7065	
Пластическая вязкость	$\mu_{\text{про}}$	4,6860	Па/с
Радиус трубопровода	R	0,1400	м
Длина трубопровода	l	800,0000	м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000	Па
Напряжение сдвигу	τ_{∞}	98,4000	Па
Напряжение сдвигу τ_0	τ_0	47,8800	Па
Поток жидкости	Q	0,030661319	
		1,83967912	м³/мин
		110,3807472	

X
X
X

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Падение давления на длине l

Начальное значение параметра: 600000,0000

Конечное значение параметра: 2400000,0000

Шаг: 250000,0000

Размерность:

☐ Поток жидкости в секунду

☐ Поток жидкости в минуту

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать



Рисунок 4.27 - Распечатка программного файла для расчёта расхода Q_6 при диаметре $D_6 = 280$ мм и длине трубопровода $l_6 = 800$ м для оз. Пуришу.

Вычисление потока жидкости:

$$\odot \quad Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{\text{psc}} \cdot (3+m) \cdot k^m \left(\frac{1}{A} - 1\right)^m} \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ \quad Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{\text{psc}}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коеф. нелинейности содержания органики	n	523,3900
Безразмерный коеф. содержания твердого	k	3,7065
Пластическая вязкость	μ_{psc}	4,6860 Па/с
Радиус трубопровода	R	0,1400 м
Длина трубопровода	l	800,0000 м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000 Па
Напряжение сдвигу	τ_{∞}	98,4000 Па
Напряжение сдвигу T_0	τ_0	47,8800 Па
Поток жидкости	Q	0,030661319
		1,83967912
		110,3807472

м³/мин

+
+
+

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Радиус трубопровода

Начальное значение параметра: 0,0400

Конечное значение параметра: 0,1400

Шаг: 0,0100

Размерность:

☐ Поток жидкости в секунду

☐ Поток жидкости в минуту

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

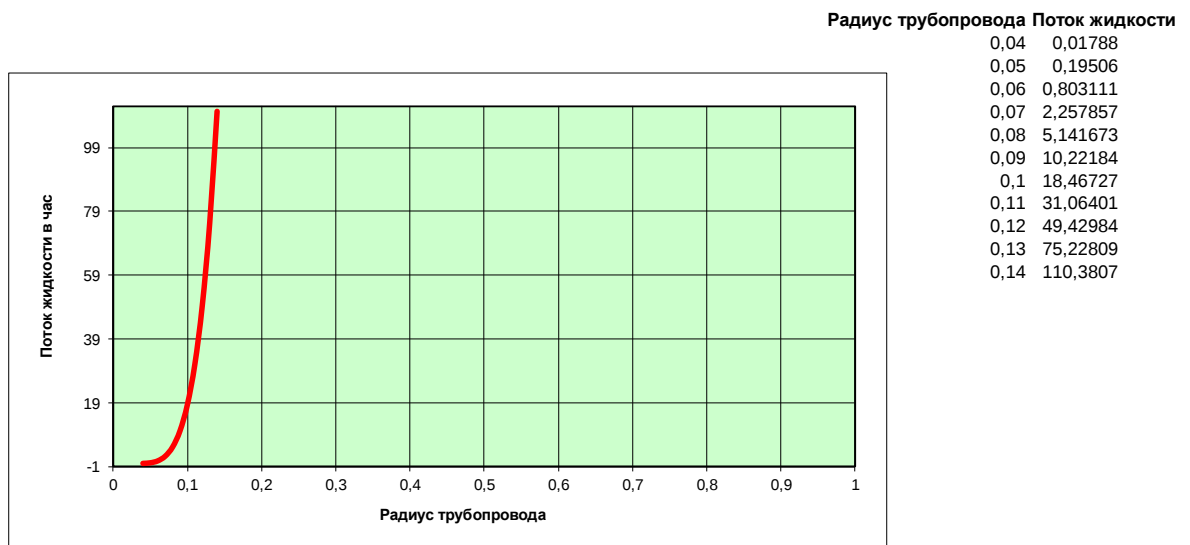


Рисунок 4.28 - Вариант Q6. Кривая расход-радиус трубопровода

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m \left(\frac{1}{A} - 1\right)^m} \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\bigcirc Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коеф. нелинейности содержания органики	n	523,3900
Безразмерный коеф. содержания твердого	k	3,7065
Пластическая вязкость	μ_{px}	4,6860 Па/с
Радиус трубопровода	R	0,1400 м
Длина трубопровода	l	800,0000 м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000 Па
Напряжение сдвигу	τ_{∞}	98,4000 Па
Напряжение сдвигу T_0	τ_0	47,8800 Па
Поток жидкости	Q	0,030661319
		1,83967912
		110,3807472
		м ³ /мин

+

+

+

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Напряжение сдвигу T_0

Начальное значение параметра 47,8800

Конечное значение параметра 180,0000

Шаг 25,0000

Размерность:

- ☐ Поток жидкости в секунду
- ☐ Поток жидкости в минуту
- ☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

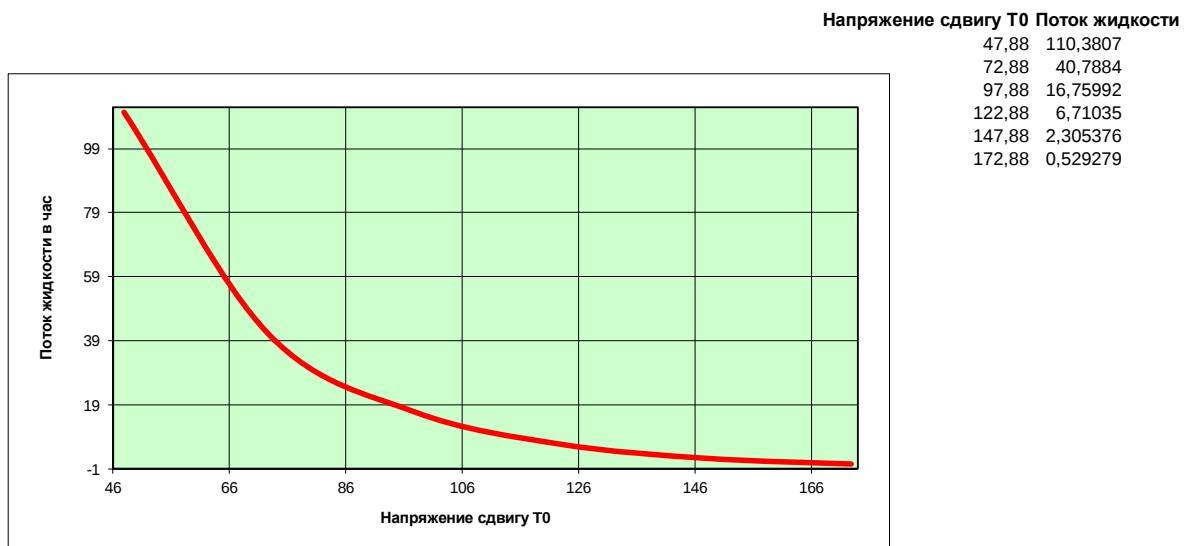


Рисунок 4.29 - Вариант Q6. Кривая расход-напряжение сдвига

Вычисление потока жидкости:

$$\odot \quad Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m} \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ \quad Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Козф. нелинейности содержания органики	n	523,3900
Безразмерный коэф. содержания твердого	k	3,7065
Пластическая вязкость	μ_{px}	4,6860 Па/с
Радиус трубопровода	R	0,1400 м
Длина трубопровода	l	800,0000 м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000 Па
Напряжение сдвигу	τ_∞	98,4000 Па
Напряжение сдвигу $T0$	τ_0	47,8800 Па
Поток жидкости	Q	0,030661319
		1,83967912 м ³ /мин
		110,3807472

x

x

x

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Длина трубопровода

Размерность:

Начальное значение параметра 800,0000

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра 1500,0000

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг 100,0000

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

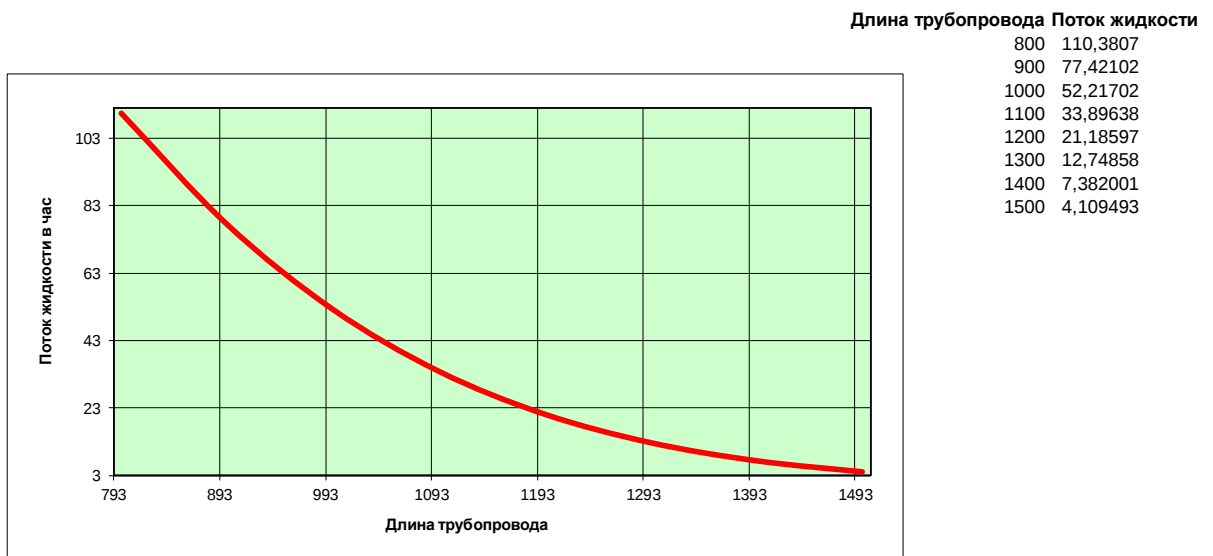


Рисунок 4.30 - Вариант Q6. Кривая расход-длина трубопровода

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_0}{\mu_{ps} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{ps}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коеф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коеф. содержания твердого k

Пластическая вязкость μ_{ps} Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_0 Па

Напряжение сдвигу Т0 τ_0 Па

Поток жидкости Q

 м³/мин

+

+

+

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

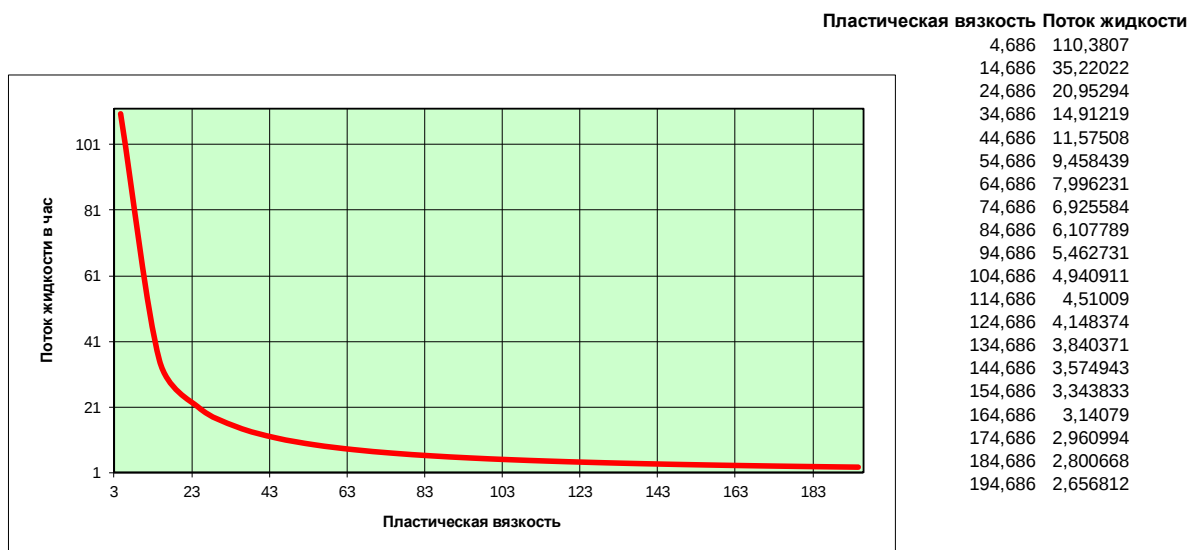


Рисунок 4.31 - Вариант Q6. Кривая расход-вязкость пластическая

4.2.5. Расчёт гидро-транспортирования для оз. Вейно (Q8).

$$C_c = 100\% - 87,7\% = 12,3\% \quad (4.89)$$

Т.к. содержание органики в твердом менее 50% переходим на расчет коэффициентов k и m (рис. 4.5) по формулам (4.28) и (4.29) соответственно:

$$k_8 = 2,72 - 0,075 C_c = 2,72 - 0,075 \cdot 12,3 = 1,7975 \quad (4.90)$$

$$m_8 = 0,16 C_c + 0,5 = 0,16 \cdot 12,3 + 0,5 = 2,468 \quad (4.91)$$

$$n_8 = l_8 : m_8 = 950 : 2,468 = 384,927 \quad (4.92)$$

$$D_8 = 402 \text{ мм}, l_8 = 950 \text{ м}, Q_8 = 49 \text{ м}^3/\text{час} \quad (4.93)$$

$$v_8 = \frac{4Q_8}{\pi D^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 49}{3,14 \cdot 0,402^2 \cdot 3600} = 0,11 \text{ м/с} \quad (4.94)$$

$$\Delta P_{\text{пуск8}} = \frac{4 \cdot 108 \cdot 950}{0,402} + \frac{32 \cdot 28,86 \cdot 950 \cdot 0,01}{0,402^2} = 977 \, 143 \text{ Па} + 54 \, 290 \text{ Па} =$$

$$= 1 \, 075 \, 186 \text{ Па} = 1,03 \text{ МПа}.$$

$$\Delta P_{\text{раб8}} = \frac{4 \cdot 108 \cdot 950}{0,402} + \frac{32 \cdot 28,86 \cdot 950 \cdot 0,11}{0,402^2} = 977 \, 143 \text{ Па} + 597 \, 187 =$$

$$= 1 \, 574 \, 330 \text{ Па} = 1,58 \text{ МПа} . \quad (4.95)$$

$$R_e^8 = \frac{v_8 D_8 \rho}{\mu_8} = \frac{0,11 \cdot 0,402 \cdot 1305}{28,86} = 2 \quad (4.96)$$

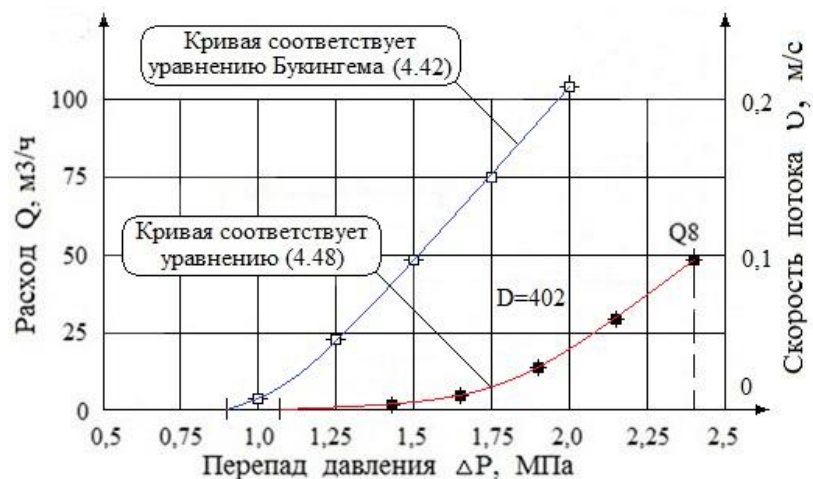


Рисунок 4.32 - Зависимость расхода Q_8 от потери давления и скорости гидротранспортирования при $D_8 = 402$ мм, $l_8 = 950$ м на оз. Вейно.

Из графика видно, что расчет по уравнению Букингема (4.4) дает сильно завышенные результаты расхода по сравнению с уравнением (4.48). Ниже приведены расчетные файлы для Q_8 (рис. 4.33–4.37).

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_0}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Козф. нелинейности содержания органики	n	384,9270
Безразмерный коэф. содержания твердого	k	1,7975
Пластическая вязкость	μ_{px}	28,8600 Па/с
Радиус трубопровода	R	0,2010 м
Длина трубопровода	l	950,0000 м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000 Па
Напряжение сдвигу	τ_0	244,8000 Па
Напряжение сдвигу T_0	τ_0	108,0000 Па
Поток жидкости	Q	0,013638974
		0,818338442
		49,10030652

x
x
x

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Падение давления на длине l

Начальное значение параметра: 1100000,0000

Конечное значение параметра: 2400000,0000

Шаг: 250000,0000

Размерность:

☐ Поток жидкости в секунду

☐ Поток жидкости в минуту

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

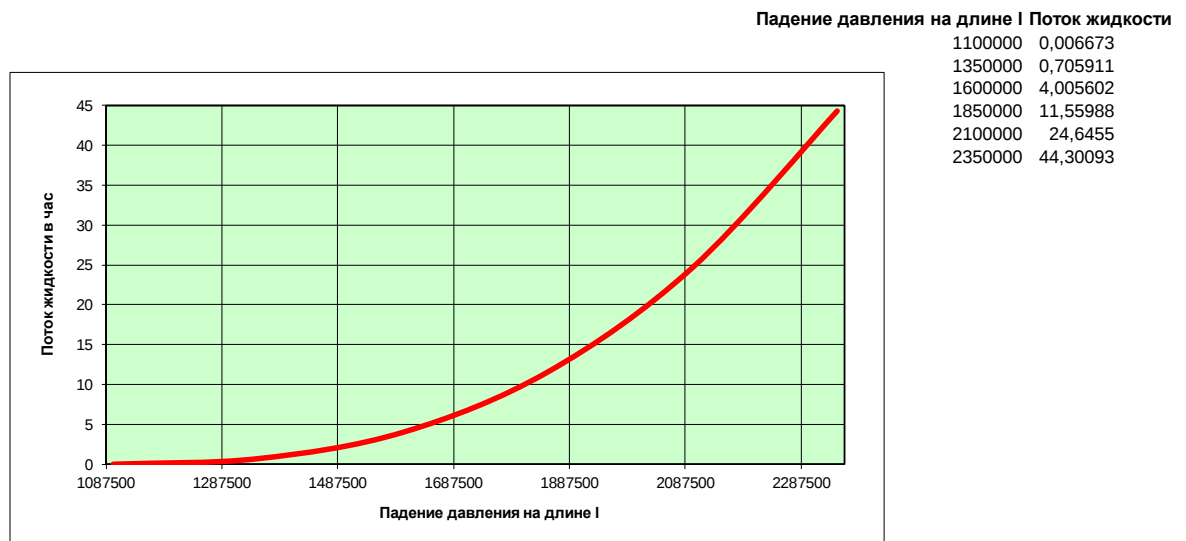


Рисунок 4.33 - Распечатка программного файла для расчёта расхода Q_8 при диаметре $D_8 = 402$ мм и длине трубопровода $l_8 = 950$ м для оз. Вейно.

Вычисление потока жидкости:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{\text{psc}} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{\text{psc}}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коеф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коеф. содержания твердого k

Пластическая вязкость μ_{psc} Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_{∞} Па

Напряжение сдвигу τ_0 Па

Поток жидкости Q м³/мин

+

+

+

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

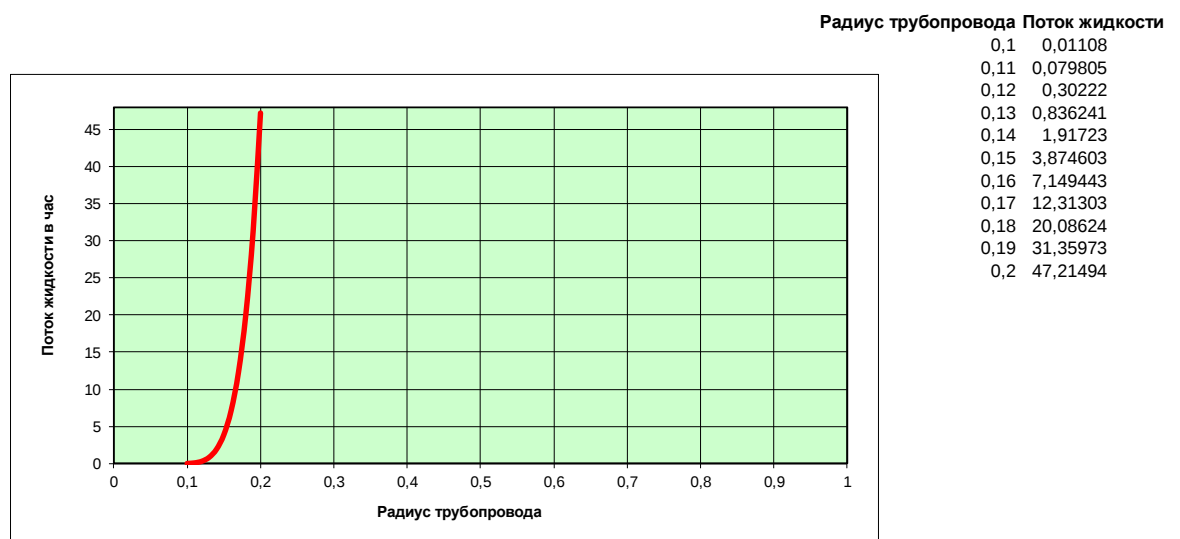


Рисунок 4.34 - Вариант Q8. Кривая расход-радиус трубопровода

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m \left(\frac{1}{A} - 1\right)^m} \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коеф. нелинейности содержания органики	n	384,9270
Безразмерный коеф. содержания твердого	k	1,7975
Пластическая вязкость	μ_{px}	28,8600 Па/с
Радиус трубопровода	R	0,2010 м
Длина трубопровода	l	950,0000 м
Падение давления на длине l	Δp	2400000,0000 Па
Напряжение сдвигу	τ_∞	244,8000 Па
Напряжение сдвигу T_0	τ_0	108,0000 Па
Поток жидкости	Q	0,013638974
		0,818338442
		49,10030652
		м ³ /мин

+

+

+

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Напряжение сдвигу T_0

Начальное значение параметра 108,0000

Конечное значение параметра 244,8000

Шаг 15,0000

Рассчитать

Размерность:

- ☐ Поток жидкости в секунду
- ☐ Поток жидкости в минуту
- ☒ Поток жидкости в час

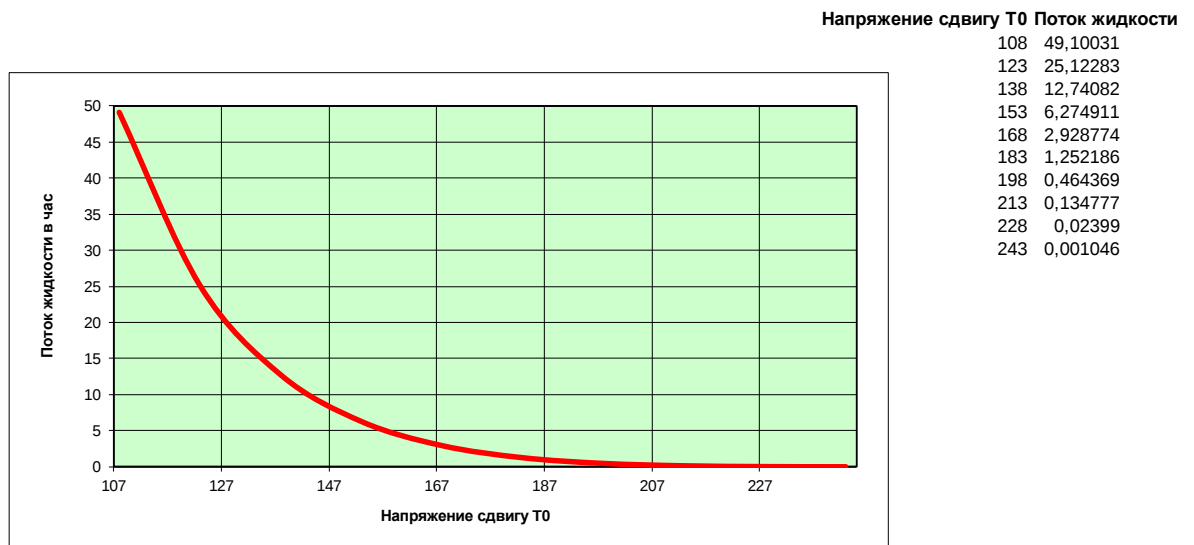


Рисунок 4.35 - Вариант Q8. Кривая расход-напряжение сдвига

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_\infty}{\mu_{px} \cdot (3+m) \cdot k^m \left(\frac{1}{A} - 1\right)^m} \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{px}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Коеф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коеф. содержания твердого k

Пластическая вязкость μ_{px} Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_∞ Па

Напряжение сдвигу T_0 τ_0 Па

Поток жидкости Q

 м³/мин

x

x

x

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

Длина трубопровода Поток жидкости

950 49,10031

1050 24,68487

1150 11,29273

1250 4,657157

1350 1,70872

1450 0,54752

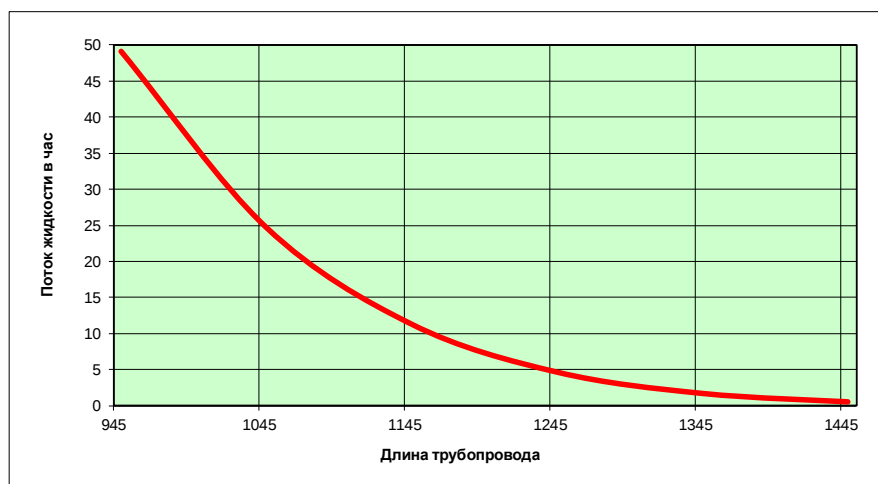


Рисунок 4.36 - Вариант Q8. Кривая расход-длина трубопровода

Вычисление потока жидкости:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{\text{psc}} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{\text{psc}}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Козф. нелинейности содержания органики n 384,9270

Безразмерный коэф. содержания твердого k 1,7975

Пластическая вязкость μ_{psc} 28,8600 Па/с

Радиус трубопровода R 0,2010 м

Длина трубопровода l 950,0000 м

Падение давления на длине l Δp 2400000,0000 Па

Напряжение сдвигу τ_{∞} 244,8000 Па

Напряжение сдвигу τ_0 108,0000 Па

Поток жидкости Q 0,013638974 м³/мин

x
x
x

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр: Пластическая вязкость

Размерность:

Начальное значение параметра 28,8600

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра 200,0000

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг 10,0000

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

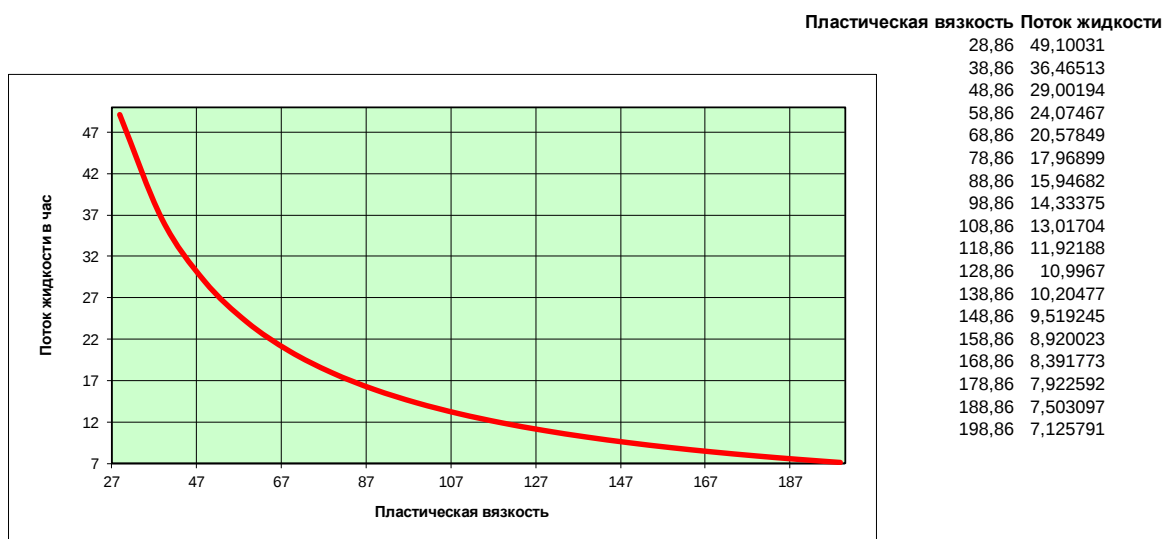


Рисунок 4.37 - Вариант Q8. Кривая расход-вязкость пластическая

4.2.6. Расчёт гидро-транспортирования для оз. Савельево (Q10).

$$W_{\text{отн}}=84\%, \quad \text{ОМ}=64\%.$$

$$C_c = 100\% - 84\% = 16\% \quad (4.97)$$

$$K_{10} = 2,72 - 0,075 \cdot C_c = 2,72 - 0,075 \cdot 16 = 2,72 - 1,2 = 1,52 \quad (4.98)$$

$$m_{10} = 0,16 \cdot C_c + 0,5 = 0,16 \cdot 16 + 0,5 = 2,56 + 0,5 = 3,06 \quad (4.99)$$

$$n_{10} = l_{10} : m_{10} = 760 : 3,06 = 248,366 \quad (4.100)$$

$$\tau_o = 180,1 \text{ Па}, \quad \tau_{\infty} = 471,6 \text{ Па}, \quad \mu_o = 18,28 \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad \mu_{\infty} = 1,062 \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (4.101)$$

Принимаем $D_{10} = 426 \text{ мм}$, $l_{10} = 760 \text{ м}$, и получаем расход $Q_{10} = 101 \text{ м}^3/\text{ч}$.

$$v_{10} = \frac{4Q_8}{\pi D^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 101}{3,14 \cdot 0,426^2 \cdot 3600} = 0,197 \text{ м/с} \quad (4.102)$$

Пусковое давление при минимальной скорости $v_{\min} = 0,01 \text{ м/с}$:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{пуск}10} &= \frac{4 \cdot 180,1 \cdot 760}{0,426} + \frac{32 \cdot 18,28 \cdot 760 \cdot 0,01}{0,426^2} = 1\,713\,628 \text{ Па} + 24\,408 \text{ Па} = \\ &= 1\,738\,036 \text{ Па} = 1,74 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{раб}10} &= \frac{4 \cdot 180,1 \cdot 760}{0,426} + \frac{32 \cdot 18,28 \cdot 760 \cdot 0,2}{0,426^2} = 1\,713\,628 \text{ Па} + 489\,949 \text{ Па} = \\ &= 2\,203\,577 \text{ Па} = 2,2 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (4.103)$$

$$R_e^{10} = \frac{v_{10} \cdot D_{10} \cdot \rho_{10}}{\mu_8} = \frac{0,2 \cdot 0,426 \cdot 1356}{18,28} = 6 \quad (4.104)$$

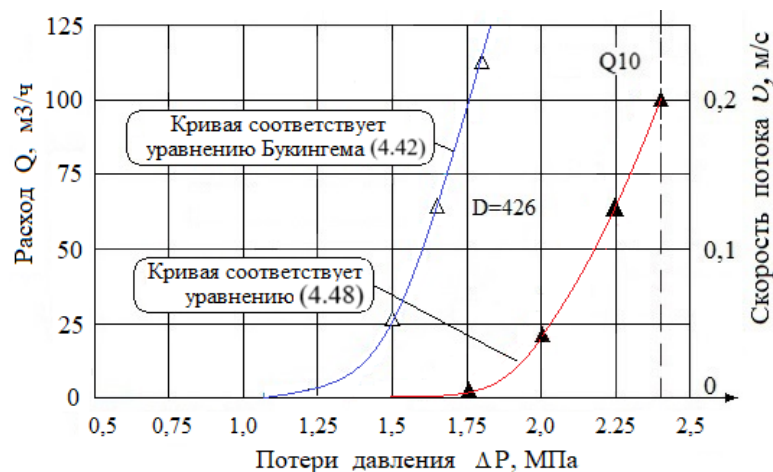


Рисунок 4.38 - Зависимость расхода Q_{10} от потери давления и скорости гидротранспортирования при $D_{10} = 426 \text{ мм}$, $l_{10} = 760 \text{ м}$ на оз. Савельево.

Уравнение Бэкингема (4.42) дает сильно завышенные результаты расхода по сравнению с уравнением (4.48). Ниже приведена распечатка программного файла расхода для Q10 согласно уравнения (4.48) (рис. 4.43).

Вычисление потока жидкости:

$$\odot Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_0}{\mu_{\text{пл}} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right]$$

$$m = l / n$$

$$A = \frac{2l\tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

$$\circ Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8l \cdot \mu_{\text{пл}}} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p} \right)^4 \right]$$

Козф. нелинейности содержания органики n

Безразмерный коэф. содержания твердого k

Пластическая вязкость $\mu_{\text{пл}}$ Па/с

Радиус трубопровода R м

Длина трубопровода l м

Падение давления на длине l Δp Па

Напряжение сдвигу τ_0 Па

Предел текучести τ_0 Па

Расход жидкости Q	0,02806209	м ³ /сек	+
	1,683725384	м ³ /мин	+
	101,0235231	м ³ /час	+

Расчет зависимости величины потока от параметра:

Параметр:

Размерность:

Начальное значение параметра

☐ Поток жидкости в секунду

Конечное значение параметра

☐ Поток жидкости в минуту

Шаг

☒ Поток жидкости в час

Рассчитать

Падение давления на длине l Расход жидкости

1290000	19,58592
1390000	36,5518
1490000	61,72196
1590000	96,88727
1690000	143,8721
1790000	204,5265
1890000	280,7216
1990000	374,3456

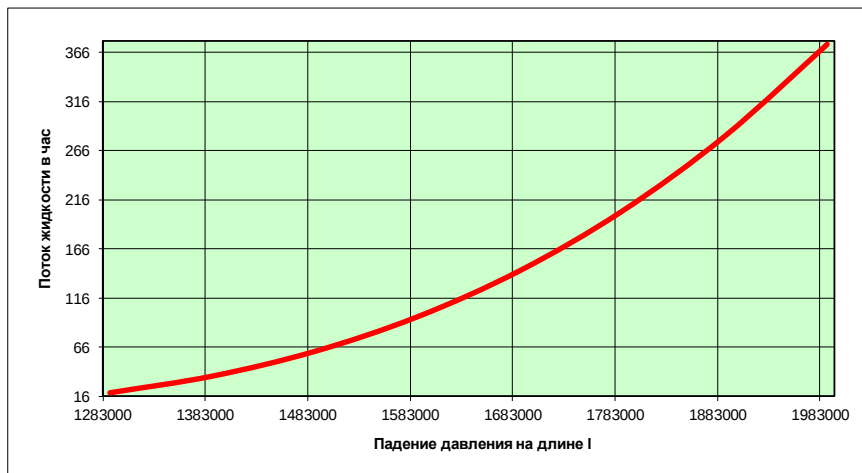


Рисунок 4.39 - Вариант Q10. Кривая расход-перепад давления

Результаты всех выше выполненных расчетов сведены в таблицу 4.2.

Предложенное уравнение расхода (4.48) позволяет выбрать экономически оптимальный режим транспортирования сапропеля естественной влажности по горизонтальному трубопроводу в спектре сверхмалых скоростей от 0,1 до 0,6 м/с, используя расчётные физико-реологические и технологические параметры, приведённые в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Расчётные параметры транспортирования сапропеля

Обозначение и название параметров		Q1 Веверу	Q4 Пильвелю	Q5 Убаговас	Q6 Пуришу	Q8 Вейно	Q10 Савельево
ρ	Плотность, кг/м ³	1050	1058	1123	1098	1305	1356
$W_{\text{отн}}$	Влажность относительная, %	96,78	96,41	93,9	95,35	87,7	84
C_0	Масс. доля сухого вещества, %	3,22	3,59	6,1	4,65	12,3	16
ОВ	Содержа. органики в сухом остатке, %	83,5	82,4	72,4	85,5	48,4	64
μ_0	Пластическая вязкость при 4°C, Па·с	3,843	5,342	10,456	4,686	28,86	18,28
μ_{∞}	Динамическая вязкость при 4°C, Па·с	0,094	0,109	0,281	0,297	0,28	1,062
τ_0	Предел текучести, (Па) при 4°C	17,32	20,88	31,8	47,88	108	180,1
τ_{∞}	Динамическое напряжение сдвига (Па) при 4°C	65,52	75,84	87,6	98,4	244,8	471,6
n	Коэфф. содержания органики	1257	1146,5	513,8	523,39	384,93	248,37
k	Коэфф. содержания твёрдого	4,2642	4,1199	3,141	3,7065	1,7975	1,52
m	Безразмерный коэффициент	1,1138	1,2211	1,949	1,5285	2,468	3,06
D	Диаметр трубопровода, мм	220	280	280	280	402	426
P	Макс. давление насоса, МПа	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
$\Delta P_{\text{пуск}}$	Пусковое давление, МПа	0,48	0,45	0,5	0,6	1,03	1,74
$\Delta P_{\text{раб}}$	Рабочее давление, МПа	2,01	2,0	2,1	1,31	1,58	2,2
L	Длина трубопровода, м	1400	1400	1000	800	950	760
Q	Расход, м ³ /ч	60	114	86	110	49	101
ν	Скорость течения, м/с	0,44	0,51	0,39	0,5	0,11	0,197
Re	Число Рейнольдса	27	28	12	33	2	6

4.3. Обоснование скоростного режима гидро-транспортирования сапропеля естественной влажности в напорном трубопроводе.

«Сапропель - это донные отложения пресноводных водоёмов, состоящие из органических (50-80%) и минеральных веществ, находящихся в состоянии естественной влажности» [157, с. 15], [158, с. 3]. «Его транспортирование представляет собой процесс перемещения структурированной неньютоновской жидкости, для которой *определяется критическая скорость* не столько условиями предотвращения осаждения крупных частиц (как для песка), сколько условиями разрушения коагуляционной структуры и перехода в турбулентный режим течения для *минимизации гидравлических сопротивлений*» [159, с.118]. Данное утверждение для сапропелей естественной влажности вызывает большое сомнение в справедливости.

Минимальная скорость для сапропеля зависит от влажности (W), которая определяет реологические свойства пульпы (плотность ρ , вязкость μ , статическое напряжение сдвига τ_0). Данные получены на основе экспериментальных и промышленных исследований [158], [160].

Ниже в таблице 4.3 приведены минимальные скорости, рекомендуемые для гидро-транспортирования сапропелей.

Таблица 4.3 – Минимальные скорости гидротранспортирования сапропелей

№	Консистенция	Влажность, %	Плотность, кг/м ³	Минимальная скорость (м/с)	Источник
1	Жидкая (сильно разжиженная)	95	1010-1050	0,5 - 0,7	[160, с. 25]
2	Текучая	90-95	1050-1080	0,7 - 1,0	[158, с. 112]
3	Связная (средняя)	85-90	1080-1120	1,0 - 1,4	[158], [161]
4	Густая (пастообразная)	80-85	1120-1160	1,4 - 1,8	[158], [160]
5	Пластичная	< 80	1160	> 1,8 нецелесообразно	[159]

Для ориентировочной оценки критической скорости для сапропелевых пульп обычно используются модифицированные эмпирические зависимости.

а) Формула, учитывающая реологические свойства [159, с. 120]:

$$v_{кр} = (1,1 - 1,3) \cdot \sqrt{\tau_0 / \rho_p}, \quad (4.105)$$

где: $(1,1 - 1,3)$ - коэффициент для сапропелей,

τ_0 – статическое напряжения сдвига, Па (для сапропеля влажностью 90% $\tau_0 = 5 - 15$ Па, для 85% $\tau_0 = 15 - 40$ Па [159].

ρ_p – плотность пульпы, кг/м³.

б) Практическая формула ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева для органических илов [160]:

$$v_{мин} = 0,4 + 0,02 \cdot C_v \quad (4.106)$$

где: C_v – объёмная концентрация твердого в пульпе, в %.

Согласно проведенных исследований и отчетов ВНИИГ [161] минимальная скорость транспортирования в практических расчётах принимается в диапазоне 0,7-1,4 м/с.

При этом практически рекомендуется увеличивать минимальные скорости с ростом концентрации твердого в пульпе.

С увеличением диаметра трубопровода D минимальная скорость немного уменьшается (табл. 4.4).

Таблица 4.4 – Рекомендуемые диаметры и скорости [161]

№	Диаметр (D), мм	$v_{мин}$, м/с
1	150 – 250	1,0 - 1,5
2	300 – 500	0,8 - 1,2

Таким образом, согласно существующей практики, для сапропелей естественной влажности минимальная скорость гидро-транспортирования обычно принимается 0,7 – 1,5 м/с, и это справедливо для центробежных грязевых насосов, рабочее давление которых пропорционально скорости вращения рабочего колеса

насоса. Рабочее давление эксцентрикового винтового насоса определяется не частотой вращения ротора, а длиной гироторной пары (статор-ротор), поэтому может обеспечить рабочее давление на очень малых оборотах, что важно при работе с высоковязкими и пластичными средами.

Из результатов исследований (таблица 4.2) следует, что с уменьшением естественной влажности ($W_{отн}$) происходит рост концентрации сухого вещества (C_c), рост предела текучести (τ_0), рост вязкости (μ_0), а транспортирование сапропеля при этом происходит с увеличением диаметра трубопровода (D) и уменьшением скорости (v). Так, при повышении концентрации твердого до 16% (Q_{10}), скорость транспортирования составила всего 0,21 м/с.

Однако, эмпирическая формула минимальной скорости гидро-транспортирования сапропеля ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [162] предлагает обратное решение:

$$v_{min} = 0,4 + 0,02C_v = 0,4 + 0,02 \cdot 16\% = 0,72 \text{ м/с} \quad (4.107)$$

Согласно данной формулы при росте концентрации твердого (C_v) минимальная скорость транспортирования должна возрастать, и при концентрации твердого до 16% должна составлять не менее 0,72 м/с, а рабочая скорость при этом рекомендуется еще выше (1-1,2 м/с) с целью предотвращения закупорки трубопровода.

На практике объёмы сапропеля естественной влажности с высоким напряжением сдвига, поданного фактически в береговые накопительные бункера, оказались значительно меньше объёмов, рассчитанных по уравнению Бэкингема (4.42), то есть уравнение (4.42) выдавало завышенные результаты расхода при гидро-транспортировании.

Ниже приведены сводные графики зависимостей расхода сапропеля естественной влажности от давления (рис. 4.40), радиуса (рис. 4.41), предела текучести (рис. 4.42) и пластической вязкости (рис. 4.43), рассчитанные по предложенному уравнению 4.48.

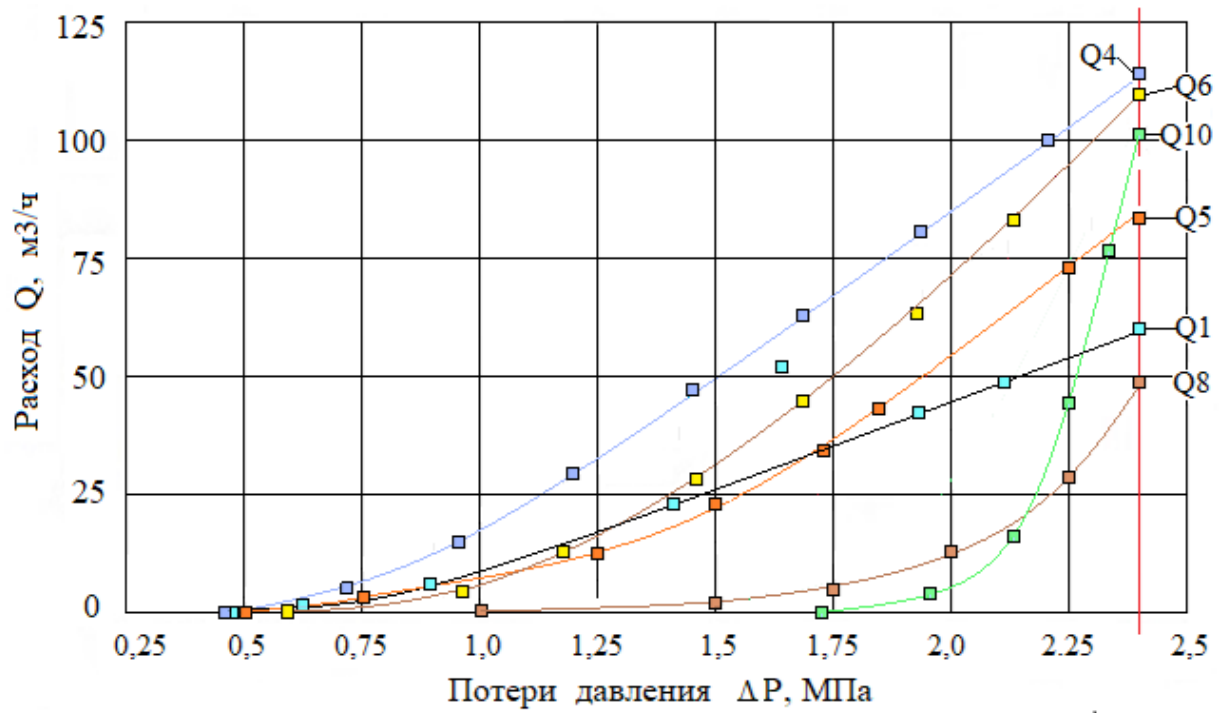


Рисунок 4.40 - Расходно-напорные характеристики гидро-транспортирования исследуемых сапропелей

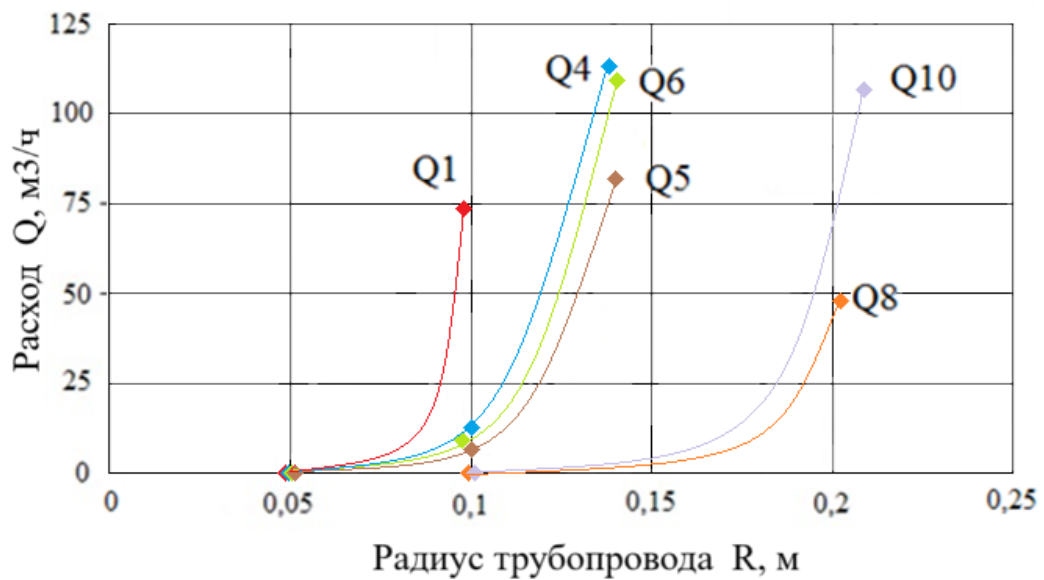


Рисунок 4.41 - Зависимость расхода от радиуса трубопроводов для исследуемых сапропелей

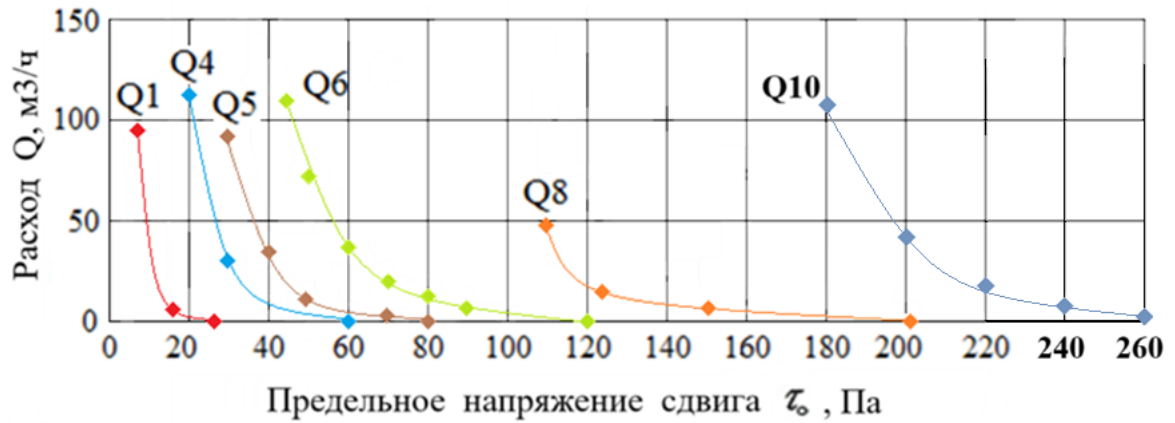


Рисунок 4.42 - Зависимость расхода от предельного напряжения сдвига для исследуемых сапропелей

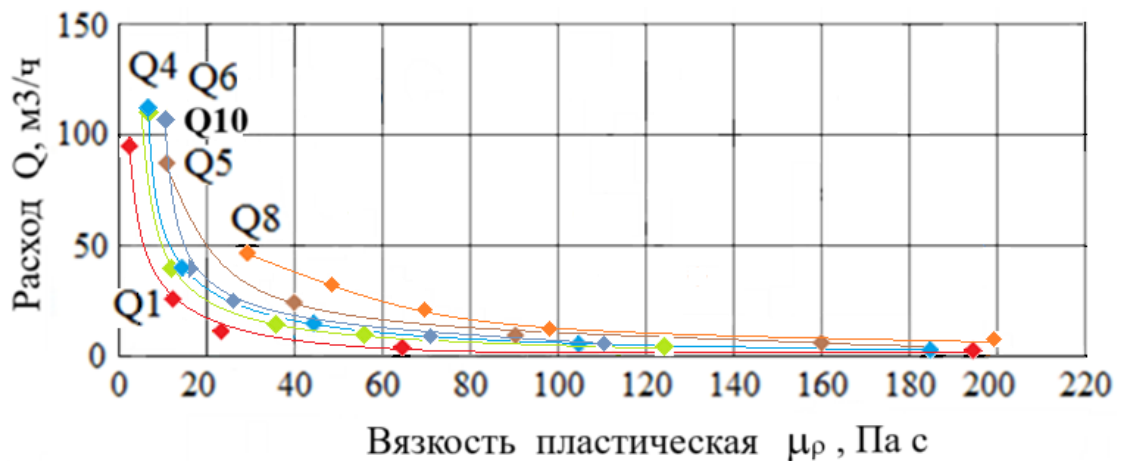


Рисунок 4.43 - Зависимость расхода от пластической вязкости исследуемых сапропелей

Большая кривизна кривых (рис. 4.41-4.43) указывает на то, что диаметр трубопровода, напряжение сдвига τ_0 и пластическая вязкость μ_p оказывают решающее влияние на расход сапропеля, поэтому эффективность его гидротранспортирования в напорном трубопроводе зависит от правильности выбора его диаметра с учетом реологических показателей, а использование уравнения (4.48) позволяет подобрать оптимальное соотношение между длиной, диаметром трубопровода и требуемым рабочим давлением насоса.

4.3. Достоверность данных, используемых в предложенном уравнении расхода.

Следует остановиться на вопросе достоверности данных, вводимых в расчётное уравнение (4.48). Реометр, или ротационный вискозиметр, производит замеры вязкости и напряжения сдвига периодическим нарастанием скорости сдвига, или градиента скорости $\dot{\gamma} = \frac{du}{dy}$ в с^{-1} , которая определяется по формуле

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{\infty}}{\mu_{\infty}} \quad (4.108)$$

и показывает, насколько быстро слои жидкости движутся друг относительно друга. Для неньютоновской жидкости в круглой трубе связь между $\dot{\gamma}$ и v нелинейна, и зависит от реологической модели. Для ориентировочной оценки можно использовать упрощенное соотношение $\dot{\gamma} = \frac{8v}{D}$, тогда $v = \frac{\dot{\gamma} \cdot D}{8}$. (4.109)

Линейная скорость v – это физическая средняя скорость движения частиц жидкости вдоль оси трубопровода, измеряется в м/с и рассчитывается по классической формуле $v = \frac{4Q}{\pi D^2}$. Ниже (табл. 4.5) приведены значения начальных скоростей сдвига и соответствующие им линейные скорости для сапропелей исследуемых озёр.

Таблица 4.5 – Сравнение начальной скорости сдвига с линейной скоростью

№	Начальная скорость сдвига в реометре	Начальная линейная скорость в реометре	Расчётная v , м/с
Q1	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{0.1}}{\mu_{0.1}} = \frac{17,32\text{Па}}{3,843\text{Па} \cdot \text{с}} = 4,5\text{с}^{-1}$	$v_1 = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_1}{8} = \frac{1,9 \cdot 0,22}{8} = 0,12\text{м/с}$	$v_1 = 0,44$
Q4	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{0.4}}{\mu_{0.4}} = \frac{20,88\text{Па}}{5,342\text{Па} \cdot \text{с}} = 3,9\text{с}^{-1}$	$v_4 = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_4}{8} = \frac{3,9 \cdot 0,28}{8} = 0,14\text{м/с}$	$v_4 = 0,51$
Q5	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{0.5}}{\mu_{0.5}} = \frac{31,8\text{Па}}{10,456\text{Па} \cdot \text{с}} = 3,04\text{с}^{-1}$	$v_5 = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_5}{8} = \frac{3,04 \cdot 0,28}{8} = 0,11\text{м/с}$	$v_5 = 0,39$
Q6	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{0.6}}{\mu_{0.6}} = \frac{47,88\text{Па}}{4,686\text{Па} \cdot \text{с}} = 10,21\text{с}^{-1}$	$v_6 = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_6}{8} = \frac{10,21 \cdot 0,28}{8} = 0,36\text{м/с}$	$v_6 = 0,5$
Q8	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{0.8}}{\mu_{0.8}} = \frac{108\text{Па}}{28,86\text{Па} \cdot \text{с}} = 3,74\text{с}^{-1}$	$v_8 = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_8}{8} = \frac{3,74 \cdot 0,402}{8} = 0,19\text{м/с}$	$v_8 = 0,11$
Q10	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{0.10}}{\mu_{0.10}} = \frac{180,1\text{Па}}{18,28\text{Па} \cdot \text{с}} = 9,85\text{с}^{-1}$	$v_{10} = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_{10}}{8} = \frac{9,85 \cdot 0,426}{8} = 0,52\text{м/с}$	$v_{10} = 0,21$

Ниже в таблице 4.6 приведены значения динамических скоростей сдвига и соответствующие им линейные скорости для исследуемых сапропелей.

Таблица 4.6 – Сравнение динамической скорости сдвига с линейной

№	Конечная скорость сдвига в реометре	Конечная линейная скорость в реометре	Скорость расчетная
Q1	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{\infty,1}}{\mu_{\infty,1}} = \frac{65,52 \text{ Па}}{0,094 \text{ Па} \cdot \text{с}} = 697 \text{ с}^{-1}$	$v_1 = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_1}{8} = \frac{697 \cdot 0,22}{8} = 19,17 \text{ м/с}$	$v_1 = 0,44 \text{ м/с}$
Q4	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{\infty,4}}{\mu_{\infty,4}} = \frac{75,84 \text{ Па}}{0,109 \text{ Па} \cdot \text{с}} = 696 \text{ с}^{-1}$	$v_4 = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_4}{8} = \frac{696 \cdot 0,28}{8} = 24,36 \text{ м/с}$	$v_4 = 0,51 \text{ м/с}$
Q5	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{\infty,5}}{\mu_{\infty,5}} = \frac{87,6 \text{ Па}}{0,281 \text{ Па} \cdot \text{с}} = 312 \text{ с}^{-1}$	$v_5 = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_5}{8} = \frac{312 \cdot 0,28}{8} = 10,92 \text{ м/с}$	$v_5 = 0,39 \text{ м/с}$
Q6	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{\infty,6}}{\mu_{\infty,6}} = \frac{98,4 \text{ Па}}{0,297 \text{ Па} \cdot \text{с}} = 331 \text{ с}^{-1}$	$v_6 = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_6}{8} = \frac{331 \cdot 0,28}{8} = 11,59 \text{ м/с}$	$v_6 = 0,5 \text{ м/с}$
Q8	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{\infty,8}}{\mu_{\infty,8}} = \frac{244,8 \text{ Па}}{0,28 \text{ Па} \cdot \text{с}} = 874 \text{ с}^{-1}$	$v_8 = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_8}{8} = \frac{874 \cdot 0,402}{8} = 43,9 \text{ м/с}$	$v_8 = 0,11 \text{ м/с}$
Q10	$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{\infty,10}}{\mu_{\infty,10}} = \frac{471,6 \text{ Па}}{1,062 \text{ Па} \cdot \text{с}} = 444 \text{ с}^{-1}$	$v_{10} = \frac{\dot{\gamma} \cdot D_{10}}{8} = \frac{444 \cdot 0,426}{8} = 23,54 \text{ м/с}$	$v_{10} = 0,21 \text{ м/с}$

Из расчётных данных (табл. 4.6) следует, что для использования значений динамической вязкости μ_{∞} необходимо развить линейную скорость в трубопроводе в пределах 11–44 м/с, что практически невозможно. А значения начальной линейной скорости (табл. 4.5) очень близки к рассчитанным средним скоростям гидро-транспортирования (таб. 4.2).

Отсутствие критической скорости седиментации у сапропеля естественной влажности обеспечивает ряд неоспоримых преимуществ. Поскольку осадения нет, нет и необходимости в минимальной скорости для его предотвращения. Поток не должен быть турбулентным, чтобы «взбалтывать» частицы, поскольку для приведения сапропеля в движение необходимо преодолеть начальное напряжение сдвига τ_0 , после чего он начинает течь вдоль стенок сплошным стержнем без разрушения структуры, и его пластическая вязкость μ_0 начинает снижаться с увеличением скорости сдвига и напряжения сдвига (рис. 4.44).

При этом в начальный момент сдвига происходит резкий вертикальный

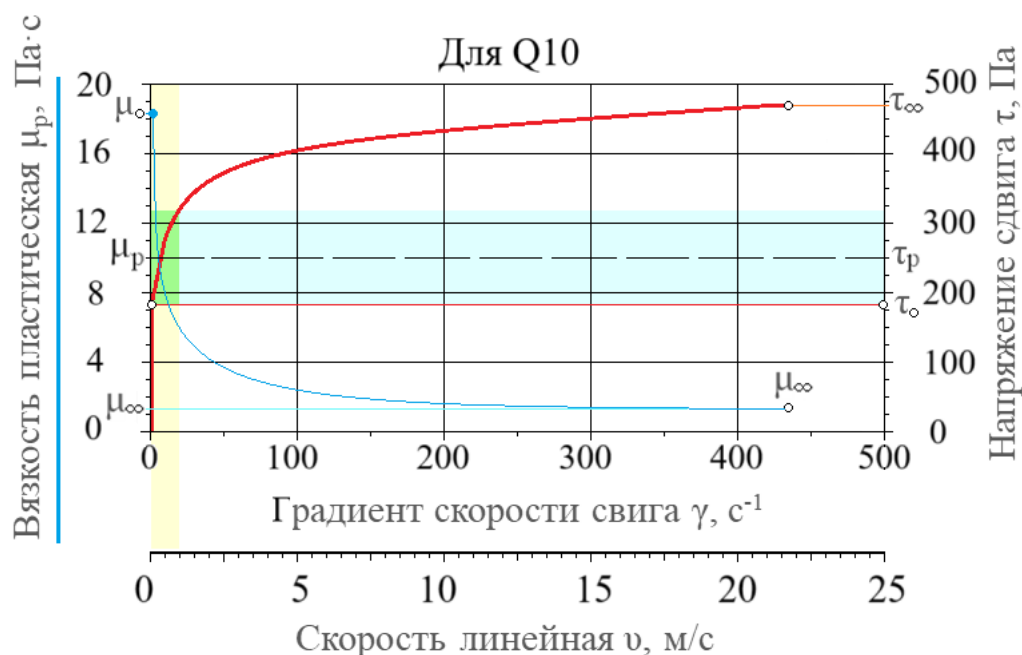


Рисунок 4.44 – Зависимость пластической вязкости μ_p и напряжения сдвига τ от скорости гидротранспортирования сапропеля для Q10

скачок вязкости (самое высокое начальное значение пластической вязкости μ_0 , причем этот скачек тем выше, чем выше концентрация твердого, и чем разнороднее частицы, образующие пространственную структуру сапропеля, что полностью соответствует эмпирической модели Кригера-Догерти, описывающей резкое возрастание вязкости при увеличении концентрации твердого выше определённого предела [163],[164]. Дальнейшее самое незначительное увеличение напряжения сдвига, превышающее τ_0 , приводит к падению вязкости вниз практически по вертикальной прямой, подтверждая факт начала движения сапропелевой пробки с начальным разрушением структурных связей и сдвигом пробки у стенки трубопровода. Дальнейшее повышение напряжения ведет к еще большему падению вязкости до значения эффективной, когда пространственная структура сапропеля полностью разрушена и сапропель начинает течь по всему радиусу с разрушением пробки. При этом скорость течения тоже возрастает, и главной задачей при выборе режима течения является контроль скорости течения в зеленой зоне (рис. 4.48), что практически неосуществимо для центробежного насоса, так как давление, которое он развивает, напрямую связано со скоростью

потока и скоростью вращения рабочего колеса насоса. В эксцентриковом винтовом насосе выдаваемое давление не зависит от скорости вращения ротора, а зависит от длины гироторной пары, поэтому скоростью вращения в ЭВН можно точно регулировать скорость потока без оглядки на падение давления, выбирая тем самым оптимальный вариант с наименьшим удельным расходом энергии.

Все известные методики расчёта транспортирования гидросмесей, включая сапропелевые пульпы, сводятся к определению критической скорости для предотвращения осаждения крупных частиц или для разрушения коагуляционной структуры и перехода в турбулентный режим течения для минимизации гидравлических сопротивлений [159]. Предлагаемая методика расчёта скорости гидро-транспортирования сапропеля естественной влажности построена на критерии не критической скорости, а на критерии наименьшей расчётной скорости, и руководствуется обратным принципом: выше концентрация твердого $\rightarrow$ меньше скорость (0,6 м/с - 0,1 м/с). Пример такой транспортировки показан ниже (рис. 4.45).



Рисунок 4.45- Подача сапропеля естественной влажности в береговой накопительный бункер по предложенной технологии

Для Q10 при концентрации твердого 16%, диаметре 0,426 м и длине трубопровода 760м, расход лежит в пределах 93-108 м³/ч при рабочей скорости

в пределах $u_{10} = 0,18 - 0,22$ м/с, что вполне допустимо для ЭВН.

Методика расчета параметров гидро-транспортирования сапропеля естественной влажности согласно уравнению 4.48 включает следующие действия:

1 – взятие образцов сапропеля из разных горизонтов залежи с определением максимальных и минимальных глубин по воде, по мощности залегающих горизонтов.

2 – определение реологических и физических параметров образцов (см. табл. 4.2) с учетом поправочных температурных коэффициентов или с реометра, подключенного к системе термостатирования с контролем температуры по нижней пластине (Peltier-Plate/ETC-Electronic Temperature Control) для охлаждения образцов до 3-4 С°.

3 – отбор результатов образцов по самым высоким значениям напряжения сдвига, вязкости, плотности, содержания твердого.

4 – распечатку и отбор файлов реометра по совмещенному отображению кривых напряжения сдвига и вязкости (рисунок 4.46).

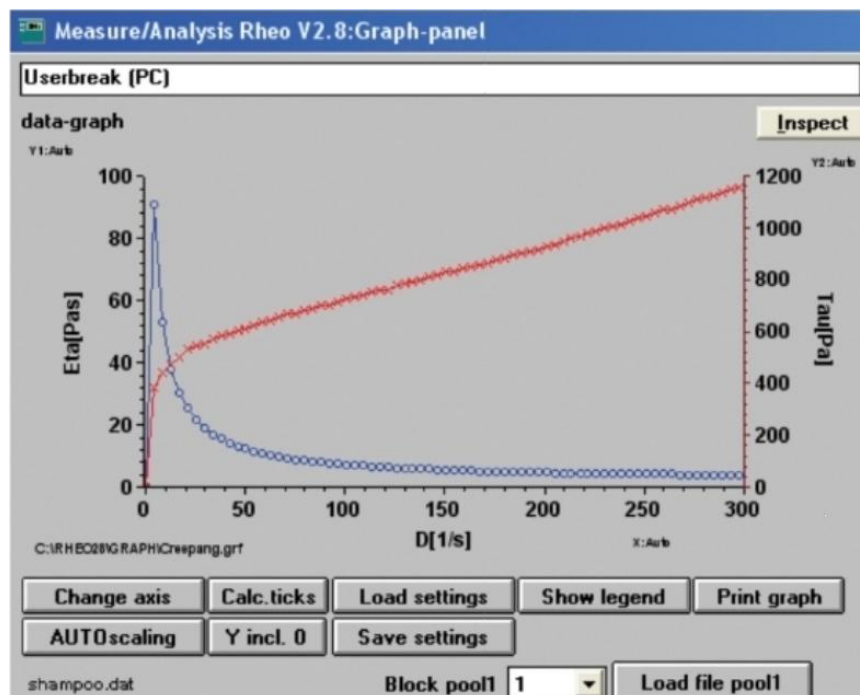


Рисунок 4.46 – Вид совмещенных кривых вязкости и напряжения сдвига на мониторе реометра Anton Paar MCR с программным обеспечением Rheo V2.8

5 – расчет расхода по уравнению (4.48) с подбором диаметра, максимальной длины, средней скорости и потерь напора по уравнению Бэкингема-Рейнера (4.53);

6 – проверка значений расхода по рабочим значениям напряжения сдвига и вязкости, снятых с реограммы в «зеленой зоне»;

7 – расчет потерь напора или давления по всей технологической цепочке от точки выемки (на максимальной глубине), до точки выгрузки (на максимальной высоте) с учетом горизонтального участка трубопровода.

8 – расчет мощности насосов

9 – выбор насосов ЭВМ по спецификациям производителей.

4.5. Выводы по главе 4

1. Впервые научно обоснована и подтверждена на практике возможность гидро-транспортирования сапропеля с концентрацией твердого C_0 до 16% без учета критической скорости и гидравлической крупности; до этого считалось, что такой сапропель необходимо разбавлять водой с уменьшением C_0 до 5%;

2. Впервые теоретически и экспериментально доказано новое главное правило течения сапропеля естественной влажности: чем выше концентрация твердого, тем ниже скорость его гидро-транспортирования; до этого считалось наоборот: чем выше концентрация твердого, тем выше скорость гидро-транспортирования.

3. Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать *четвертое научное положение*:

эффективное транспортирование сапропелей естественной влажности с концентрацией твердого до 16% обеспечивается применением разработанного загрузочного устройства, оснащенного эксцентриковым винтовым насосом с развиваемым давлением до 2,4 МПа в структурно-ламинарном режиме при скоростях потока до 0,6 м/с, при этом с ростом концентрации твердого скорость транспортирования уменьшается до 0,1 м/с, диаметр трубопровода увеличивается

до 426мм, а расход сапропеля рассчитывается по установленной зависимости (4.48).

4. Технологическое решение вопроса выемки сапропеля естественной влажности с последующим гидро-транспортированием в береговой накопительный бункер, позволяет перейти к рассмотрению триединого вопроса эффективности предложенной автором геотехнологии: энергоемкости процесса, воздействия на экосистему, и сохранности потребительских свойств сапропеля.

ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЯ УСКОРЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ТОРФО-САПРОПЕЛЕВЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ДОБЫЧИ САПРОПЕЛЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ

Результатом разработанной автором концепции является запущенное в 2018 году на озере Савельево в Ярославской области опытно промышленное предприятие с применением ПГКК для добычи сапропеля естественной влажности и производства торфо-сапропелевых смесей на его основе (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 - Общий вид завода по производству торфо-сапропелевых смесей (ТСС): 1 – экологически чистое озеро Савельево, общая площадь 44 га; 2 – магистральный береговой пульпопровод; 3 – сборный ж/бетонный бункер сапропеля объёмом 500 м³; 4 – тентовый ангар 24м x 36 м x 6м (h) для производства ТСС.

Главная идея ускоренного производства сапропелевого удобрения 60% влажности заключается в способе понижения влажности, при котором влажный продукт (сапропель естественной влажности) смешивается с сухим продуктом (адсорбентом), обладающим высокой влагоемкостью, после чего часть влаги из влажного сапропеля перераспределяется на объём адсорбента, при этом влажность

получаемой двухкомпонентной смеси уменьшается по мере добавления в неё сухого адсорбента.

Проведенные опыты, а затем производственные эксперименты, показали, что, смешивая сапропель естественной влажности с сухим торфом, можно быстро получать гранулированную торфо-сапропелевую смесь с товарной влажностью 60%.

5.1. Методика выбора сапропелевого месторождения для строительства завода по производству ТСС

Для принятия решения о строительстве завода по производству ТСС необходимо выполнить целый ряд исследований, без которых невозможно принять правильного решения по инвестированию средств в строительство предприятия. Ниже приводится перечень исследований, выполняемых в хронологической последовательности:

1. выбрать одно, а лучше несколько вариантов озер для предполагаемой добычи сапропеля;
2. взять отбор проб и сделать лабораторные анализы сапропеля на показатели химической и радиационной безопасности, а также на соответствие санитарно-эпидемиологическим требованиям, в том числе:
 - химико-токсикологические: содержание тяжелых металлов, мышьяка, токсичных органических соединений (пестициды, фунгициды, полихлорированные бифенилы, нефтепродукты и др.);
 - радиационные: удельная активность естественных и искусственных радионуклидов;
 - санитарно-паразитологические и микробиологические;
3. на основании результатов лабораторных анализов выбрать месторождение с чистым сапропелем, и затем из него взять пробы для проведения лабораторных анализов на агро-химические показатели и реологические;
4. получить, по возможности, геологическую информацию по объему залежи, виду сапропеля, зольности, влажности, плотности, или при отсутствии таковой

заказать геологическую съемку месторождения;

5. при наличии информации о качестве и объеме залежи можно планировать производительность завода;

6. все вышеперечисленные исследования необходимо провести и с торфом, или получить необходимые образцы у торфодобывающего предприятия, и при положительных результатах договориться о возможности закупок торфа;

7. на основании геологической информации, геологической (максимальная глубина выемки, максимальная дальность транспортирования, высота точки выгрузки) сделать инженерный расчет гидравлических потерь и определить необходимую мощность ЭВН, длину и диаметр напорного трубопровода, технологическую схему добычи сапропеля;

8. то же самое необходимо выполнить для добычи торфа;

9. при выборе месторождения под строительство завода кроме указанных выше факторов, необходимо также учитывать факторы, могущие оказать значительное влияние на экономику и эффективность проекта:

- глубина выемки, размер озера, расстояние до завода от уреза воды, рельеф местности (влияет на высоту точки выгрузки);

- наличие ЛЭП, подъездных авто и ж/д дорог, речного транспорта.

Зная вышеуказанную информацию, можно переходить к формированию полного перечня оборудования согласно принятой технологической схемы производства ТСС.

5.2. Принципиальная технологическая схема производства ТСС из сапропеля естественной влажности.

Производственные эксперименты показали, что влажность сапропеля можно понизить за счет смешивания его с сухим адсорбентом в определенной пропорции, и наилучшие результаты были получены при смешивании сапропеля с сухим измельченным торфом [211].

В результате проведенных экспериментов было установлено, что в

результате непрерывного смешивания сырого сапропеля с сухим торфом происходит процесс равномерного перераспределения влаги на дозируемый объём поступающего в смеситель торфа и сапропеля с одновременным их гранулированием (окатыванием) в более крупные устойчивые агрегаты с размерами частиц от 0,5мм до 10мм, что обеспечивает воздушность (рыхлость) получаемой смеси с объёмным весом в упаковке до 750кг/м³, а насыпным 370-440кг/м³.

Сапропель, ввиду коллоидной структуры, имеет низкий коэффициент фильтрации $k_f=0,0009\div0,0014\text{м/сутки}$, поэтому достичь равномерного распределения влаги в каком-то большом объёме сапропеля за короткое время довольно сложно (табл. 5.1)

Для ускорения процесса фильтрации необходимо обеспечить непрерывное смешивание сапропеля и торфа при непрерывной дозированной подачи обоих компонентов в расчетной пропорции.

Таблица 5.1 - Классификация твердых частиц для грунтов

Размер гранул	Классификация твердых частиц в зависимости от их размера для грунтов
0,001÷0,9 мкм	Органические частицы сапропеля Образуют непроницаемую пленку
1 ÷ 5мкм	Глинистые частицы, Образуют непроницаемую пленку
5 ÷ 500 мкм	Пылеватые грунты, Плохая фильтрация
500мкм ÷2мм	Песчаные грунты Хорошая фильтрация

Смешивание сапропеля с торфом в расчетной пропорции в смесителе непрерывного действия с дозированной подачей обоих компонентов дает ряд преимуществ как для эффективности производства (обеспечивается поточность технологического производства, снижается энергоёмкость смешивания), так и для качества получаемого продукта.

Для обеспечения равномерного проникновения частиц торфа и сапропеля

друг к другу смеситель оснащен лопастями в виде спиц, установленных по спирали вокруг осей смесителя, вращающихся в противоположные друг другу стороны, при этом диаметр спиц и расстояние между ними соответствует максимальному диаметру получаемых гранул в продукте.

Если торф и сапрпель мешать в объёмной мешалке, не разбивая сырые и сухие комья спицами, то на выходе будет получаться готовый продукт в виде крупных комьев различной величины и различной влажности. Это затруднит его равномерное перемешивание с грунтом, увеличит время перемешивания для получения однородности, затруднит его хранение, так как большие комья будут сильно слеживаться, будет происходить выдавливание влаги, структура продукта будет неустойчивой, не гомогенной, готовый продукт будет не качественным. При этом из-за вязкости и липкости сапрпеля установленная мощность объёмной мешалки будет в несколько раз выше по сравнению с проходной мешалкой непрерывного действия.

Результаты экспериментов, неоднократно проводимые в полевых условиях по эффективности торфо-сапрпелевых продуктов между торфо-сапрпелевой смесью 60% влажности в виде сферических гранул размером до 10 мм, произведенной по настоящей технологии (производитель фирма “Эковит”, Россия), и торфо-сапрпелевой смесью влажностью 40 %, представляющую из себя порошок молотого сухого торфа и сапрпеля с размерами частиц до 250мкн (производитель фирма АРИД ГРОУ, Белоруссия), показали большое преимущество гранулированного продукта 60% влажности перед порошкообразным 40% влажности.

В 2006 году автором была разработана и внедрена технология ускоренного производства торфо-сапрпелевых смесей , на которую в 2008 году был получен патент № 2336253 Российской Федерации на изобретение [212], а в 2010 году был получен патент № 2407724 РФ [213] на новый продукт, торфо-сапрпелевую смесь, полученный на основе сапрпеля естественной влажности по принципиальная схема которого приведена ниже на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 - Принципиальная технологическая схема производства торфо-сапропелевых удобрительных смесей (ТСС)

Производительность одной технологической линии составляет до 4 т/час по готовому продукту и ограничивается производительностью кинематического дезинтегратора KDS, осуществляющего одновременно измельчение, сушку и стерилизацию торфа.

Сапропель естественной влажности 84% по напорному трубопроводу подается в береговой накопительный бункер, из которого насосом-дозатором подается в смеситель непрерывного действия, где смешивается с сухим измельченным торфом, подаваемым дозированно от КДС.

Производимая по данной технологии торфо-сапропелевая смесь является замечательным продуктом, выполняющим, с одной стороны, функции органического удобрения, поскольку содержит в себе полный набор БАВ, а с другой, выполняющим функции мелиоранта, поскольку содержит торф, улучшающий структуру почвы и ее влагопоглощающую способность.

Особенностью данного производства является его безотходность, поскольку отходом производства является только водяной пар, выбрасываемый в атмосферу из КДС при сушке и измельчении торфа.

Ниже в таблице 5.2 приведены технические характеристики кинематического дезинтегратора (поставщик - канадская фирма FASC).

Таблица 5.2 – Технические характеристики кинематического дезинтегратора

№	Показатели	Модель КДС
1	Производительность	1-4 т/ч
2	Размер частиц на входе	До 150мм
3	Размер частиц на выходе	100 – 2000 мкм
4	Размер оборудования	564 см – высота 458 см – длина 366 см - ширина
5	Вес установки	4170 кг
6	Установленная мощность	226 кВт
7	Энергоемкость	130 – 175 кВт/ч
8	Влажность загружаемого сырья	До 70%

На рисунке 5.3. показан общий вид кинематического дезинтегратора КДС, обеспечивающего непрерывность (поточность) подготовки торфа перед его подачей в смеситель для смешивания с влажным сапропелем.



Рисунок 5.3 - Общий вид технологического оборудования на озере Савельево Ярославской области: 1 – транспортер, 2 – КДС, 3 – смеситель.

Универсальность КДС заключается в том, что он при обработке торфа одновременно производит три операции: измельчение торфа, сушку и его стерилизацию.

5.3. Влияние применяемых способов обезвоживания и сушки сапропеля на качество получаемых удобрений.

Свежедобытый сапропель, используемый для приготовления продукта, является устойчивым коллоидом, частицы которого имеют размер менее 1 микрона ($0,001 \div 0,1$ мкм, или $0,000001 \div 0,0001$ мм, или $10^{-9} \div 10^{-7}$ м). Наличие nano частиц в составе сапропеля позволяет отнести его к категории природного nano продукта. За счет такой малости размера частицы, сапропель обладает очень высокой адсорбционной способностью, так как суммарная активная поверхность частиц 1 см^3 сапропеля может составлять до 600 м^2 , поэтому они связывают большой объем молекул воды ($3 \div 16\%$ сухого вещества связывает $84 \div 97\%$ воды), при этом чем выше % органики в сухом остатке, тем выше влажность сапропеля.

Принято считать и доводить влажность сапропеля перед использованием до 60% влажности, потому что при такой влажности сапропель становится рассыпчатым, не липнет к рукам или к рабочим инструментам, легко перемешивается с грунтом, удобно хранится как в мешках, так и в жесткой таре. Все попытки снижения влажности сапропеля до 60% с помощью сепараторов, центрифуг, фильтров, пресс-фильтров, геотубов оказались безуспешными. Проблема снижения влажности сапропеля решалась двумя способами: промораживанием в чеках-отстойниках с последующей сушкой на солнце, или сушкой в различного рода сушилках с использованием энергоносителей (газ, дизтопливо, древесные и торфяные гранулы).

В обоих случаях с потерей влаги происходила потеря ценных БАВ, и биологическая активность товарного продукта резко падала на 20-25% .

Известна практика смешивания сырого сапропеля с торфом в обычных мешалках, позволяющая получать торфо-сапропелевую смесь. Если смешивать

сапропель с обычным торфом, то для получения рассыпчатого продукта с влажностью 60% необходимо внести большое количество торфа, и поскольку торф имеет волокна длиной до 15 см, получить однородный рассыпчатый продукт из обычного торфа было невозможно. Поэтому такую смесь подвергают сушке в барабанной сушилке с последующим измельчением в муку на молотковой мельнице. Кроме этого, перемешивание вязкого сырого сапропеля с торфом в объемной мешалке требует больших энергозатрат из-за повышения напряжения сдвига сапропеля на начальной стадии смешивания его с торфом. Наличие длинных волокон торфа также осложняет работу мешалки, так как они наматываются на лопасти мешалки и увеличивают нагрузку на электропривод.

На практике также используют способ послойного смешивания торфа с сапропелем, когда слой из 5см торфа сверху покрывают слоем 5см сапропеля, и так далее чередуя слои. Но такой способ занимает большую площадь покрытия, требует сухой погоды, не исключает попадания посторонних предметов (пыли, мусора, семян сорных растений) в конечный продукт, и в результате получается слоёный продукт, который требует дополнительного перемешивания и измельчения для получения однородной массы перед его использованием.

Задачей исследования, с одной стороны, остался вопрос уменьшения влажности сапропелевого удобрения до 60%, а с другой - сохранения биологической активности получаемого удобрения.

5.4. Формула дозирования и смешивания компонентов

При измельчении торфа до 100÷150 микрон в несколько десятков раз увеличивается его суммарная поверхность, он становится однородным. Это позволяет при смешивании его с влажным сапропелем равномерно распределить его по объему сапропеля, обеспечить возможность впитать в себя часть влаги из объема сапропеля, получить однородный гранулированный рассыпчатый продукт.

Количество смешиваемого торфа и сапропеля, определено экспериментально и рассчитано для получения гранул с соотношением компонентов, масс. %: торф

40–60, сапропель 60–40. Смешивание сапропеля с торфом в указанном соотношении компонентов дает ряд преимуществ для повышения качества получаемого продукта (табл. 5.3) за счет максимального сохранения органических веществ в получаемых гранулах при оптимальной влажности готового продукта в $60 \pm 5\%$

Таблица 5.3 – Пропорции смешивания сапропеля с торфом

Компоненты	Мас. %	Содержание влаги в ТСС ($W_{пр}$), % при исходной влажности $W_c=95\%$ $W_T=40\%(30\%)$	Содержание органики в ТСС, ($OB_{пр}$),% при исходной органике торфа $OB_{торф}=95\%$ сапропеля $OB_{сапр}=70\%(80\%)$
Торф Сапропель	30 70	78,5 (75,5)	77,5 (84,5)
Торф Сапропель	40 60	73 (69)	79,99 (86)
Торф Сапропель	50 50	67,5 (62,5)	82,5 (87,5)
Торф Сапропель	60 40	62 (56)	85 (89)
Торф Сапропель	70 30	56,5 (49,5)	87,5 (90,5)

Вариант торф/сапропель как 70/30, тоже можно исключить, так как он даёт влажность ниже 50%, что также нежелательно, так как ухудшит качество продукта, снизит его активность.

Важное значение имеет так же размер получаемых гранул торфо-сапропелевой смеси, выходящей из смесителя. При размере гранул менее 250 мкм их трудно равномерно распределить в почвенном слое, поскольку такой размер меньше размеров почвенных агрегатов, которых составляет $0,25 \div 10 \text{ мм}$ [212, 213]. Гранулы, размером менее 250 мкм просыпаются между почвенными агрегатами и размещаются на дне слоя почвы, в который они вносятся. Все питательные вещества проходят в нижние слои почвы, не оказывая влияния на оструктурирование верхнего слоя почвы, в котором располагаются корни культурных растений, не оказывают влияние на улучшение свойств почвы за счет обогащения ее

органическими веществами.

Каждая гранула это законченный по форме и по физическим свойствам новый продукт сферической формы, в котором определенному объему торфа соответствует определенный объем сапропеля и определенный объем влаги, которая равномерно распределена в объеме гранулы.

Капля воды в силу своего поверхностного натяжения стремиться иметь форму шара. Смешивая торф и сапропель, формируется шарообразная форма гранул, эта форма идеальна для размещения в ней влаги.

Если получаемую гранулу сильно сдавить, то на поверхности появиться влага. Если не сдавливать, то влага будет долго находиться внутри гранулы. Если гранулу поместить в сухой грунт, то после высыхания грунта (испарения влаги и при фильтрации её в грунт) гранула будет постепенно отдавать влагу окружающему грунту, обогащая его органическими веществами.

Поскольку гранула имеет упругость, которую ей придает многослойность оболочки, внесенные и равномерно перемешанные в грунте, они придают грунту рыхлость, воздухопроницаемость, грунт дышит, что позитивно сказывается на развитии и росте растений. При этом расход массы торфа m_T и массы сапропеля m_C в 1 тонне готовой торфо-сапропелевой смеси определяется по установленному уравнению:

$$m_T = M_{TCC} \frac{(C_{TCC} - C_C)}{(C_T - C_C)} \quad \text{и} \quad m_C = M_{TCC} \frac{(C_T - C_{TCC})}{(C_T - C_C)} \quad (5.1)$$

где: $M_{TCC} = 1000$ кг – масса 1 тонны товарной торфо-сапропелевой смеси 60% влажности; m_T – масса сухого торфа в 1 тонне товарной смеси, кг; m_C – масса сапропеля в 1 тонне товарной смеси, кг; C_{TCC} – доля сухого вещества в смеси; C_T – доля сухого вещества в торфе; C_C – для сухого вещества в сапропеле.

При этом первым и главным вопросом для успешной реализации проекта оставался вопрос добычи сапропеля естественной влажности с использованием нового погружного грунтозаборного камерного комплекса (ПГКК), оснащенного встроенным в камеру эксцентриковым винтовым насосом.

Поскольку ПГКК является навесным оборудованием, для опытно-промышленного производства не было необходимости в строительстве нового земснаряда, и заказчик проекта (ООО УК «ЮГРАГИДРОСТРОЙ, учредитель ООО «Эковит») собрал земснаряд из имеющихся старых понтонов (рис. 5.4)



Рисунок 5.4 - Вид земснаряда на озере Савельево с плавающим пульпопроводом из резиноктаневых труб, обернутых поплавками

Практика применением ПГКК показала, что расчёты по выемке и гидро-транспортированию сапропеля естественной влажности (см. рис. 5.5, рис.5.6) в



Рисунок 5.5 - Подача сапропеля естественной влажности с помощью ПГКК в приёмный бункер земснаряда для его дальнейшей транспортировки по напорному трубопроводу в береговой накопительный бункер сапропеля.

береговой накопительный бункер были выполнены верно, в результате чего производство было обеспечено сапропелем естественной влажности в нужном объёме.



Рисунок 5.6 - Вид сапропеля закаченного в береговой накопительный бункер на озере Савельево в Ярославской области.

Результатом опытно-промышленного эксперимента стала производимая торфо-сапропелевая смесь (рис. 5.7).



Рисунок 5.7 - Вид гранул торфо-сапропелевой смеси, производимой предприятием ООО Эковит на озере Савельево в Ярославской области.

5.5. Экономическая эффективность проекта по производству ТСС производительностью до 4 тонн в час (20 тыс. тонн в год).

Оценка эффективности инвестиций в создание предприятия по добыче и производству торфо-сапропелевых удобрительных смесей ТСС выполнена в соответствии с «Методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования», утвержденными Госстроем РФ, Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ от 21.06.1999 г. № ВК 477 и «Практическими рекомендациями по оценке эффективности и разработке проектов и бизнес-планов в электроэнергетике», утвержденными распоряжением РАО «ЕЭС России» от 04.02.1997 г. № 3р.

Эффективность рассматриваемого проекта определена на основе моделирования и анализа денежного потока, генерируемого в течение всего расчетного периода из потоков денежных поступлений и расходов.

Критериями эффективности проекта являются следующие показатели:

- а) NPV – чистый дисконтированный доход, т.е. накопленный за расчетный период чистый денежный поток;
- б) IRR – внутренняя норма доходности, при которой проект безубыточен;
- в) РВ – срок окупаемости инвестиций;
- г) DPB – дисконтированный срок окупаемости инвестиций;
- д) PI – коммерческая эффективность или окупаемость капитала, т.е. соотношение наличной ценности и дисконтированной стоимости инвестиционных затрат.

Начало расчетного периода принято условно начало календарного года, (с учетом продолжительности периода добычи сапропеля 7 месяцев в году).

Продолжительность эксплуатации завода принята 20 лет. Горизонт расчета включает срок строительства и эксплуатации.

Расчеты проводились в долларах США .

Курс доллара США к рублю принят по состоянию на 01.07.2018 г. - 62,76

Курс евро к рублю принят по состоянию на 01.07.2018 г. - 73,47

1. Перечень строительных работ, технологического и вспомогательного оборудования на объекте озеро Савельево.

1.1. Строительные работы:

- строительство подъездной дороги;
- строительство ЛЭП (с установкой КТП и пункта учета);
- строительство ангара (тентовое или из сэндвич-панелей);
- оборудование административно-бытового городка;
- монтаж технологического оборудования в цехе;
- монтаж электрической части в цехе;
- монтаж бункеров для хранения сапропеля $V=500 \text{ м}^3$ (2 шт.);
- благоустройство территории.

1.2. Изготовление добычного оборудования:

- земснаряд (плавающее основание) для добычи сапропеля;
- ПГКК для выемки сапропеля естественной влажности;
- комплекс трехмерного позиционирования земснаряда;
- плавучий пульпопровод;
- береговой пульпопровод;
- бункера для хранения сапропеля;

1.3. Технологическое цеховое оборудование:

- приемник торфа (Россия);
- транспортер торфа (Россия)
- галогеновая (инфракрасная) сушилка (Канада);
- кинематический измельчитель торфа КДС (Канада)
- дозатор торфа (Россия);
- дозатор сапропеля (Италия);
- смеситель (Германия);
- шкафы управления (Канада, Россия);
- транспортер готовой продукции (Россия);
- реверсивный транспортер (Россия);

- дозатор добавок (Россия);
- дозатор гравитационный ДГК-2000-МКР (фасовка в БИГ-БЭГИ)(Россия);
- вибростол (неподъемный);
- площадка обслуживания выдвижная с ограждением для дозатора ДГК-2000-МКР;
- вертикальная упаковочная машина в мешки по 10кг (Италия).

1.4. Приобретение стандартного основного и вспомогательного оборудования:

- береговой магистральный пульпопровод;
- лодка рабочая г/п 700 кг (2 шт.);
- якоря г/п 1.5 тн (4 шт);
- буксирный катер типа БМК -130
- аварийно-спасательный инвентарь;
- задвижка Ду300 (1 шт.);
- выпуск Ду100 (1 шт.);
- обратный клапан Ду300;
- магистральный трубопровод Ду=200 (30 п.м.);
- насос для подачи сапропеля (влажностью 95%) из хранилища в цех переработки;
- вилочный погрузчик грузоподъемностью 1.5 т;
- бульдозер Т-100;
- технический компрессор, производительностью 600-1000 л/мин;
- гидравлический манипулятор для погрузки биг-бегов в контейнера;
- дизельная электростанция 40 кВт (аварийная);
- кабельная продукция, опоры ж/б, изоляторы, провода, светильники (внутренние и внешние), наконечники и т.д.;
- приобретение КТП-630/10/0.4 мощностью 630 кВт;
- приобретение пункта учета на границе разделения ответственности;
- приобретение Мини АЗС – типа Титан на 5000 л;
- приобретение палет;
- приобретение пакетов БИГ-БЭГ;

- комплект сварочного и слесарного оборудования;
- дизельное топливо и бензин;
- комплект противопожарного оборудования;
- спецодежда;
- бытовка металлическая утепленная – 6 шт.
- проходная – 1шт;
- забор металлический для ограждения территории.

1. Этапы строительства предприятия и их стоимость

Таблица 5.4 – Этапы строительства и их стоимость

№	Наименование работ	Продолж. работ, мес.	Стоимость работ, дол. США
1	Этап 1. Подготовительный этап		
1.1	Выбор месторождения из архива разведки местной администрации	0,3	296,15
1.2	Государственные торги в департаменте природных ресурсов на приобретение месторождения	1	296,15
1.3	Дополнительная разведка для уточнения запасов сапропеля и определения контуров месторождения с камеральной обработкой и лабораторными исследованиями на предмет использования сапропеля	1	5922,89
1.4	Утверждение запасов в департаменте природных ресурсов области.	1	296,15
1.5	Разработка проекта обоснования границ горного и земельного отвода Государственная экспертиза проекта	2	48666,43
1.6	Утверждения границ горного и земельного отвода	1	296,15
1.7	Получение государственной лицензии на право разработки месторождения	1	296,15
1.8	Оформление земельного и горного отвода и заключение договора аренды земли под гидромеханизированное предприятие.	1	296,15

Продолжение таблицы 5.4

№	Наименование работ	Продолж. работ, мес.	Стоимость работ, дол. США
1.9	Получение решения на использование озера в качестве месторождения сапропеля	1	296,15
1.10	Приобретение земельного участка под строительство предприятия	3	987,15
1.11	Получение разрешения на строительство гидромеханизированного предприятия по добыче сапропеля	1	296,15
1.12	Разработка технического проекта на разработку месторождения сапропеля.	4	87 303,43
1.13	Экспертиза и утверждение технического проекта в департаменте природных ресурсов.	1	5 348,75
1.14	Разработка проекта “План горных работ”	2	10 697,5
1.15	Утверждение проекта “План горных работ” в РосАтомЭнергонадзоре	1	296,15
1.16	Разведочное бурение скважин под строительную часть предприятия (3-4 скважины, глубиной до 10 м)	0,5	2961,45
1.17	Разработка строительного проекта гидромеханизированного предприятия по производству ТСС на основе сапропеля (при необходимости - экспертиза проекта)	3	124 881,86
1.18	Обучение эксплуатационного персонала на действующем предприятии (6 человек)	0,5	8 246,50
1.19	Содержание дирекции созданного предприятия Отчисления 27% от ФЗП	24	577 672,56
	Итого подготовительный этап:		875 353, 87
	Этап II. Строительство предприятия		
2.1	Строительство подъездной грунтовой дороги в объеме до 1 км	2	29 614,
2.2	Оборудование административно-бытового гор.	2	19 466,08
2.3	Монтаж технологич. оборудования в цехе	2	1 352 709,03
2.4	Благоустройство территории.	1	21 977,08
2.5	Монтаж землесосного снаряда и плавучего пульпопровода	1	
2.6	Укладка магистрального и распределительного пульпопроводов в объеме 1000 п.м Ду350	0,5	644 804,33
2.7	Пусконаладочные работы технологии получения продукции	0,5	7 511,65

Окончание таблицы 5.4

№	Наименование работ	Продолж. работ, мес.	Стоимость работ, дол. США
2.8	Строительство производственного ангара и установка хранилища сапропеля	3	232 823,29
2.9	Заключение договора с МРСК-центр на получение мощности 500 кВ (проект, строительство ЛЭП, настройка головной подстанции, присоединение к ЛЭП МРСК-Центр	12	177 686,77
2.10	Пуско-наладочные работы	2	30 000,00
Итого строительство предприятия			2 516 592,70
3.1	Производство товарной продукции	7 мес.	
3.2	Себестоимость производимой продукции	Руб/т дол. США	5 505,75 87,73

Таблица 5.5 – Сводный сметный расчет стоимости строительства

Строительство цеха по производству ТСС на озере Савельево Ярославской области							
Составлен в ценах по состоянию на		01.07.2018г.					
Курс доллара к рублю принят по состоянию на 01.07.2018 г.		62,7565					
Единица измерения		дол. США					
№ п/п	Номера сметных расчетов и смет	Наименование глав, объектов, работ и затрат	Сметная стоимость, дол. США.				Общая сметная стоимость, дол. США
			строит. работ	монтаж. работ	оборуд., мебели, инвентаря	прочих затрат	
1	2	3	4	5	6	7	8
		Глава 1. Подготовка территории стр-ва.	0,00	0,00	0,00	7250,24	7 250,24
		в том числе:					
1		Выбор месторождения из архива разведки местной админ.				239,02	239,02
2		Государственные торги в департаменте природных ресурсов на приобретение месторождения				239,02	239,02
3		Доп. разведка для уточнения запасов, контуров месторожд. с камер. обработкой и лаб. исслед. предмет использования сапроп.				4780,38	4 780,38

Продолжение таблицы 5.5

№ п/п	Номера сметных расчетов и смет	Наименование глав, объектов, работ и затрат	Сметная стоимость, дол. США.				Общая сметная стоимость, дол. США
			строит. работ	монтаж. работ	оборуд., мебели, инвентаря	прочих затрат	
1	2	3	4	5	6	7	8
4		Утверждение запасов в департаменте природных ресурсов				239,02	239,02
5		Утверждения границ горного и земельного отвода				239,02	239,02
6		Получение гос. лицензии на право разработки месторож.				239,02	239,02
7		Оформление земельн. и горного отвода, заключение договора аренды земли под предприятие				239,02	239,02
8		Получение решения на использование озера в качестве месторождения сапропеля				239,02	239,02
9		Приобретение земельного участка под строительство предприятия					796,73
		Глава 2. Основные объекты строительства	71705,72	63838,42	1537234,59	0,00	1672778,72
		в том числе:					
2.1		Цех по переработке сапропеля. Архитектурно- строительные решения	70112,26				70 112,26
2.2		Монтаж технологического оборудования		52584,19	1025675,43		1078259,62
2.3		Оборудование АБК		100,00	3 883,65		3 983,65
2.5		Монтаж гидромеханизированн ого комплекса	1 593,46	11154,22	507675,51		520 423,19
		Глава 3. Объекты подсобного и обслуж. назначения.	100,00	56,00	1 593,46	0,00	1 749,46
		в том числе:					

Продолжение таблицы 5.5

№ п/п	Номера сметных расчетов и смет	Наименование глав, объектов, работ и затрат	Сметная стоимость, дол. США.				Общая сметная стоимость, дол. США
			строит. работ	монтаж. работ	оборуд., мебели, инвентаря	прочих затрат	
1	2	3	4	5	6	7	8
3.1		Дизель-генераторная (4 шт.)	100	56	1 593,46		1 749,46
		Глава 4. Объекты энергетического хозяйства	33462,67	46210,35	63738,42	0,00	143 411,44
		в том числе:					
4.1		Строительство ЛЭП- 10 кВ, монтаж ТКП, мощность 500 Кв.	33462,67	46210,35	63738,42		143 411,44
		Глава 5. Объекты транспортного хозяйства и связи.	27464,25	0,00	0,00	0,00	27 464,25
		в том числе:					
5.1	ЛСР 05-01	Внеплощадочные автомобильные дороги	23901,91				23 901,91
5.2	ОСР № 5-4 (аналог ДТЭС)	Грузовая проходная (1 шт)	3 562,34				3 562,34
		Глава 6. Наружные сети и сооружения водоснабжения, канализации, теплоснабжения и газоснабжения	15600,00	39200,00	63000,00	0,00	117 800,00
		в том числе:					
6.1	ОСР № 6-3 (аналог ДТЭС)	Сооружения хозяйственно- бытовых стоков	15 600,00	39 200,00	63 000,00		117 800,00
		Глава 7. Благоустройство и озеленение территории.	14175,42	0,00	0,00	0,00	14 175,42
		в том числе:					
7.1	ОСР № 7-2 (аналог ДТЭС)	Благоустройство и озеленение	2 390,19				2 390,19
7.2	ОСР № 7-3 (аналог ДТЭС)	Ограждение территории	5 889,43				5 889,43

Продолжение таблицы 5.5

№ п/п	Номера сметных расчетов и смет	Наименование глав, объектов, работ и затрат	Сметная стоимость, дол. США.				Общая сметная стоимость, дол. США
			строит. работ	монтаж. работ	оборуд., мебели, инвентарь	прочих затрат	
1	2	3	4	5	6	7	8
7.3	ОСР № 7-4 (аналог ДТЭС)	Прожекторные мачты 2 шт	5 895,80				5 895,80
		Итого по главам 1 - 7	162508,06	149304,77	1665566,46	7250,24	1984 629,54
		Глава 8. Временные здания и сооружения.	5 200,26	4 777,75	0,00	0,00	9 978,01
		в том числе:					
8.1		Временное здания и сооружения,3,2%	5 200,26	4 777,75			9 978,01
		Итого по главам 1 - 8	167708,32	154082,52	1665566,46	7250,24	1994 607,55
		Глава 9. Прочие работы и затраты.	1 173,96	1 078,58	0,00	41538,43	43 790,96
		в том числе:					
9.1		Дополнительные затраты при производстве строительно- монтажных работ в зимнее время - 0,7%	1 173,96	1 078,58			2 252,54
9.2	Письмо Госкомит ета по строитель ству № 8 от 09.03.1987г.	Затраты на перевозку работников строительн. и монтаж. организаций на расстояние более 3км от вахтового поселка до места работы - 2,5% от СМР (главы 1-8)				8044,77	8 044,77
9.3		Средства на покрытие затрат строительных организации по платежам (страховым взносам) на добровольное страхование в т.. Строительных рисков - 1% от СМР (гл. 1-8)				3217,91	3 217,91
9.4		Затраты на проведение пуско- наладочных работ				30275,75	30 275,75
		Итого по главам 1 - 9	168882,28	155161,10	1665566,46	48788,67	2038 398,51
		Глава 10. Содержание дирекции (тех. надзор)	0,00	0,00	0,00	587118,24	587 118,24

Окончание таблицы 5.5

№ п/п	Номера сметных расчетов и смет	Наименование глав, объектов, работ и затрат	Сметная стоимость, дол. США.				Общая сметная стоимость, дол. США
			строит. работ	монтаж. работ	оборуд., мебели, инвентарь	прочих затрат	
1	2	3	4	5	6	7	8
		в том числе:					
10.1		Содержание дирекции (технический надзор) строящегося предприятия				496800,00	496 800,00
10.2		Строительный контроль -0,2%				90318,24	90 318,24
		Глава 11. Подготовка эксплуатационных кадров.	0,00	0,00	0,00	70462,82	70 462,82
		в том числе:					
11.1		Подготовка эксплуатационных кадров.				70462,82	70 462,82
		Глава 12. Проектные и изыскательские работы, авторский надзор	0,00	0,00	0,00	41668,99	41 668,99
		в том числе:					
12.1		Изыскательские работы				2390,19	2 390,19
12.2		Проектные работы. Рабочая документация				38243,05	38 243,05
12.3		Средства на оплату проведения экспертизы предпроектной и проектно-сметной документации				1035,75	1 035,75
		Итого по разделам 1 - 12	168882,28	155161,10	1665566,46	748038,72	2737 648,56
		Средства на возмещение расходов по оплате непредвиденных работ и затрат -5%	8 444,11	7 758,06	83278,32	37401,94	136 882,43
		Итого по разделам с непредвиденными расходами	177326,39	162 919,16	1748844,79	785440,66	2874 530,99
		НДС 18 %	31918,75	29325,45	314 792,06	141379,32	517 415,58
		ИТОГО ПО РАСЧЕТУ	209245,14	192244,60	2063636,85	926819,98	3 391 946,57

3. Основные технико-экономические показатели

3.1. Оценка эффективности инвестиций

Стоимость строительно-монтажных работ по строительству предприятия по производству торфа-сапропелевого органического удобрения определялась на основании принятых технических решений и по объектам - аналогам.

Показатели стоимостей объектов-аналогов приведены к стоимости строительства посредством отраслевых коэффициентов изменения стоимости строительно-монтажных работ в зависимости от территориально-климатических районов и зон Российской Федерации.

В стоимости строительства объекта учтены затраты на строительство временных зданий и сооружений, прочие работы и затраты, затраты по управлению проектом (инжиниринг), затраты на проектирование и авторский надзор.

Стоимость основного оборудования определялась по объекту–аналогу и по предварительным запросам заводам-поставщикам.

Транспортные расходы на поставку российского оборудования определялась по действующим тарифам на перевозку соответствующих грузов.

Сводная смета на строительство объектов капитального строительства представлена в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Оценка стоимости строительства

№ п/п	Наименование	Стоимость с НДС, долл. США		
		ПГКК по добыче сапропеля	Завод по производству ТСС	ВСЕГО; Предприятие (гр.3+гр.4)
1	2	3	4	5
1	Строительно-монтажные работы			401 489,74
2	Оборудование			2 063 636,85
3	Прочие			926 819,98
	Всего по объекту:	0,00	0,00	3 391 946,57
	Удельная стоимость 1 т ТСС, долл. США без НДС			7,98

Таблица 5.7 – Штатное расписание

№ п/п	Наименование должности	К-во раб.	Должностные обязанности	Месячный оклад, дол. США	Годовой оклад, дол. США	Приме.
1	2	3	4	5	6	7
	Дирекция					
1	Директор предприятия	1	Общее руководство	3 000,00	36 000,00	Пост.
2	Техдиректор (горный инженер)	1	Руководство тех. персоналом, ТБ и ОТ	2 700,00	32 400,00	Пост.
3	Главный бухгалтер	1	Бухучет и налоговый учет	1 800,00	21 600,00	Пост.
4	Менеджер продаж и логистика	1	Реализации готовой продукции	1 500,00	18 000,00	Пост.
5	Помощник директора	1	Делопроизводство, АХО, работа с персоналом, кадры	750,00	9 000,00	Пост.
	Персонал при руководстве					
6	Водитель	1	Доставка работников, обеспечение производства	600,00	7 200,00	Пост.
	ИТОГО:	6			124 200,00	Пост.
	Участок добычных работ (УДР)					
	Руководство участка (ИТР)					
1	Начальник участка	1	Руководство участком	1 500,00	18 000,00	Пост.
2	Главный энергетик участка	1	Служба главного энергетика	1 080,00	12 960,00	Пост.
3	Главный механик участка	1	Служба главного механика	1 080,00	12 960,00	Пост.
	Персонал при руководстве					
4	Водитель	2	Доставка работников, обеспечение производства	600,00	14 400,00	Пост.
	ИТОГО:	5			58 320,00	Пост.
	Рабочие производства					
5	Начальник земснаряда (бригадир)	1	Руководство работой земснаряда	1 080,00	12 960,00	Пост.
6	Машинист земснаряда	3	-	972,00	34 992,00	Смена

Окончание таблицы 5.7

№ п/п	Наименование должности	К-во раб.	Должностные обязанности	Месячный оклад, дол. США	Годовой оклад, дол. США	Приме.
1	2	3	4	5	6	7
7	Машинист мех.оборудования	3	-	691,20	24 883,20	Смена
8	Машинист электр оборудования	3	-	907,20	32 659,20	Смена
9	Слесари ремонтники	12		450,00	64 800,00	Смена
10	Газоэлектросварщик	3		600,00	21 600,00	Смена
11	Дежурный дизелист- электрик	3		900,00	32 400,00	Смена
	ИТОГО рабочие производства	28			224 294,40	
	ИТОГО участок добычных работ	33			282 614,40	
	ВСЕГО :	39			406 814,40	

Таблица 5.8 – Стоимость оборудования

№ п/п	Наименование основных средств	Количество, шт	Стоимость единицы, дол.США	Общая стоимость, дол. США
1	2	3	4	5
1	Земснаряд с плавучим пульпопроводом 200 пм	1	513 731,65	513 731,65
2	Кран-завозня г/п 2 тн	1	15 807,13	15 807,13
3	Катер БМК -130	1	15 807,13	15 807,13
4	Лодка рабочая	2	1 383,12	2 766,24
5	Бульдозер Б10М 0122-2ВМ	1	63 228,51	63 228,51
6	Вилочный погрузчик Hyundai HD20, электрич., г/п 2000 кг	1	69 156,18	69 156,18
7	Бытовки прорабские утепленные S=15 м ² 6000х2440х2870	3	1 580,71	4 742,14
8	Бытовки типа “Обь”	6	1 580,71	9 484,26
9	Автомашина “Газель” пассажирская (8 мест)	1	3 951,78	3 951,78
10	Автомашина “УАЗ-патриот”	1	11 855,35	11 855,35

Окончание таблицы 5.8

№ п/п	Наименование основных средств	Количество, шт	Стоимость единицы, дол.США	Общая стоимость, дол. США
11	Автомашина Урал 4320 с КМУ	1	74 645,21	74 645,21
12	ДЭС –40 кВт	1	1 975,89	1 975,89
13	КТП	1	39 517,82	39 517,82
14	ЛЭП-10 кВ	1	39 517,82	39 517,82
15	Бункера сапропеля по 500 м ³ стальные (изготовление, доставка, монтаж)	2	82 987,42	165 974,84
16	Питатель -загрузчик торфа	1	39 517,82	39 517,82
17	Водопровод, канализация	1	81 268,96	81 268,96
18	Конвейера и фасовочное устройство (Россия)	1	118 553,46	118 553,46
19	КДС, галогеновая сушилка, смеситель (Латвия)	1	790 356,38	790 356,38
20	Штабелер ручной гидравлический	1	1 778,30	1 778,30
	Итого основных средств:			2 063 636,85

Таблица 5.9 – Расход горюче-смазочных материалов

[illegible]

Таблица 5.10 – Расход электроэнергии

№ п/п	Наименование основных средств	Ед. измер.	Норма расхода	Кол. , час	Всего, кВт/час	С-ть ед. долл. США	Всего, долл. США
6	Цех готовой продукции	кВт/ч	853	3200,00	2729 600,00	0,05673	154842,54

Таблица 5.11 – Исходные данные для расчета эффективности проекта

№	Наименование	Ед. измерения	Ст-ть
1.1	Отпускная цена ТСС для зарубежных потребителей без стоимости доставки (оплата доставки принята по факту)	дол. США/тонн	174,01
		Рубль	10 920,87
1.2	Средняя зарплата	дол. США/месяц	869,26
1.3	Капвложения с НДС	дол. США.	3 391 946,57
2	Налоги		
2.1	Налог на прибыль		20%
2.2	НДС		18%
2.3	ЕСН		26%
2.4	Налог на имущество		2,2%
2.5	Налог на недра		4%
2.6	Налог на воду		4,88%
2.7	Налог на выбросы		1,35%
3	Амортизация		
3.1	Здания, сооружения		2,2%
3.2	Оборудование		4%
3.3	Прочие		5%
4	Ремонт	% от стоимости оборудования	2%
5	Условия финансирования		
5.1	Собственный капитал		100%
5.2	Заемный капитал		
5.3	Лизинг		
6	Ставка дисконтирования		10%
7	Перечень исходных данных		
7.1	Годовой объем продукции	тонн	20 000
7.2	Годовые выбросы окислов азота в атмосферу	тонн	0
7.3	Годовая потребность в технической воде	Тыс. м ³	0
7.4	Численность персонала	человек	39

Таблица 5.12 – План реализации продукции по проекту

По годам реализации проекта	Торфо-сапропелевое органическое удобрение (ТСС)	
	тонн	долл. США
1 год	0	0,00
2 год	0	0,00
3 год	20 000,00	3 480 200,00
4 год	20 000,00	3 480 200,00
5 год	20 000,00	3 480 200,00
6 год	20 000,00	3 480 200,00
7 год	20 000,00	3 480 200,00
8 год	20 000,00	3 480 200,00
9 год	20 000,00	3 480 200,00
10 год	20 000,00	3 480 200,00
11 год	20 000,00	3 480 200,00
12 год	20 000,00	3 480 200,00
13 год	20 000,00	3 480 200,00
14 год	20 000,00	3 480 200,00
15 год	20 000,00	3 480 200,00
16 год	20 000,00	3 480 200,00
17 год	20 000,00	3 480 200,00
18 год	20 000,00	3 480 200,00
19 год	20 000,00	3 480 200,00
20 год	20 000,00	3 480 200,00
Итого:	360 000,00	62 643 600,00
В среднем в год, руб.	218 405 171,30	

Таблица 5.13 – Амортизационные отчисления

№ п/п	Наименование оборудования	Ед. изм	Кол -во	Единичная стоимость, дол. США	Балансовая стоимость, дол. США	Аморти- зация в год в %	Срок аморти- зации (мес.)	Лет	Ежегодно
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ПГКК	К-т	1	617 070,74	617 070,74	5%	240	20	30 854
2	Фабрика по производству ТСС	К-с	1		2 774 875,84	4,56%	314	26	126 612
	в том числе:								
3	здания и сооружения	к-с	1	1018560,48	1018560,48	2,20%	545	45	22 408

Окончание таблицы 5.13

№ п/п	Наименование оборудования	Ед. изм	Кол -во	Единичная стоимость, дол. США	Балансовая стоимость, дол. США	Амортизация в год в %	Срок амортизации (мес.)	Лет	Ежегодно
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	оборудование	к-с	1	1446566,11	1446566,11	4%	300	25	57 863
5	прочие	к-с	1	926 819,98	926 819,98	5%	240	20	46 341
	Итого:				3391 946,57	4,64%	301	25	157 466
Амортизационные отчисления на 1 т продукции, дол. США									7,87

Таблица 5.14 - Стоимость эксплуатации машин и оборудования

№№	Статья затрат	Земснаряд с ПГКК	Фабрика ТСС
1	2	3	4
1	Амортизационные отчисления на полное восстановление (Аас)	5,31	18,25
	$A_{ас} = (В_{си} \times Н_{а} \times К_{а}) / (Т \times 100)$		
	Вси (восстановительная стоимость), долл. США	617 071	2 774 876
	На (норма отчислений), %	5,00%	3,82%
	Ка (режим интенсивности)	1,00	1,00
	Т (годовой режим работы), маш.час	5 808,00	5 808,00
2	Затраты на выполнение всех видов ремонта и техническое обслуживание (Р)	11,05	12,43
	$R = (В_{си} \times Н_{р} \times К_{к}) / (Т \times 100) + З_{прр}$		
	Р без отчислений на ЗП ремонтных рабочих (доллар США)	8,50	9,56
	Вси (восстановительная стоимость), долл. США	617 071	2 774 876
	Нр (годовые затраты на ремонт и техническое обслуживание машин), %	8%	2%
	Кк (коэффициент корректировки годовой нормы затрат на ремонт и техническое обслуживание)	1,00	1,00
	Т (годовой режим работы), маш.час	5 808,00	5 808,00
	Отчисления на зарплату ремонтных рабочих (%)	30,00%	30,00%
	Зпрр - отчисления на ЗП ремонтных рабочих (руб.)	2,55	2,87
3	Затраты на замену быстроизнашивающихся частей (Б) (2,5% в год от ст-ти оборуд)	2,66	11,94
	в т.ч. на оплату труда ремонтных рабочих, руб.	0,61	2,76
	$B = ((Ц + З_{дбч} + З_{пбч} \times (1 + Н + П)) \times К_{бч}) / Т_{р}$		
	Ц (цена запчастей), руб.		

Продолжение таблицы 5.14

№№	Статья затрат	Земснаряд с ПГКК	Фабрика ТСС
1	2	3	4
	Здбч (затраты на доставку быстро изнашивающихся частей), % или К к Ц		
	Зпбч (оплата труда ремонтных рабочих), руб.		
	Кбч (количество быстроизнашивающихся частей), шт.		
	1 + Н + П (накладные расходы и сметная прибыль от ЗП ремонтных рабочих), К		
	Тр (нормативный срок службы быстроизнашивающихся частей), час		
4	Оплата труда	43,39	26,65
	$З = С_{мз} / 168$		
	Заработная плата (среднемесячная)	11 791,20	8 700,00
	Надбавка за выслугу лет, премия, %	20,00%	20,00%
	Итого С _{мз}	14 149,44	10 440,00
5	Топливо, смазочные материалы, электроэнергия (Таб.4.3.)	40,67	26,66
	$Эб = Нд \times Кп \times (Цд \times Здд)$		
	Нд (норма расхода топлива в технологическом режиме), кг/маш.-час (пересчет из литров с учетом плотности топлива 0,86)	58,88	0,00
	Кп (учет работы пускового двигателя), к	1,00	1,00
	Цд (стоимость топлива), руб.	0,76	0,76
	Здд (учет стоимости доставки топлива), %	0,15	0,15
6	Торф	0,00	11,48
	ИТОГО прямых затрат	103,07	107,41
	Накладные расходы % от ФОТ	56,76	34,86
	Итого себестоимость маш.час	159,83	142,27
	Сметная прибыль, 0% от себестоимости	0,00	0,00
	Итого сметная стоимость	159,83	142,27
	НДС 18%	28,77	25,61
	ВСЕГО	188,60	167,88
	Нормативный показатель годового режима работы (Т)	5 808,00	5 808,00
	$T = [365 - (52 \times 2 + Пд + М + Р + П)] \times Крс \times Кс$		
	Работа в выходные дни (1-нет, 0-да)	0,00	0,00
	Пд -количество праздничных дней в году	3,00	3,00

Окончание таблицы 5.14

	М -Количество нерабочих дней по климатических условиям	0,00	0,00
	Р-ремонт, техническим обслуживанием, включая перевозку машины до ремонтной базы и обратно	30,00	30,00
	П - перебазировка с одной строительной площадки (базы механизации) на другую строительную площадку (базу механизации)	0,00	0,00
	Крс - нормативная продолжительность рабочей смены, маш.-ч/смена	8,00	8,00
	Кс - коэффициент сменности работы машины в течение года, смена/день	3,00	3,00
	% накладных расходов от ФОТ	130,80%	130,80%
	% сметной прибыли от себестоимости	0,00	0,00
	Коэффициент удорожания оборудования (относит. Балансовой стоимости)	1,50	1,50
	Стоимость топлива (доллар США/кг)	0,65	0,65

Таблица 5.15 - Калькуляция себестоимости 1 тонны ТСС при годовом объеме производства 20 000 тонн

№№	Статья	Ед. изм.	Кол-во	С/ст-ть ед.	Сумма долл. США	На 1 тонну
Прямые затраты						
1	Гидромеханизированный комплекс	м-час	5808,00	159,83	928 313,62	46,42
2	Фабрика ТСС	м-час	5808,00	142,27	826 325,81	41,32
Итого прямые затраты					1 754 639,43	87,73
Косвенные (распределяемые)						
4					0,00	0,00
5					0,00	0,00
Итого косвенные затраты					0,00	0,00
Итого затрат					1 754 639,43	87,73
НДС (18%)					315 835,10	15,79
Итого с НДС					2 070 474,53	103,52

Таблица 5.16 – Оценка эффективности проекта на основании выполненных расчётов

Чистая приведенная стоимость (NVR) при ставке дисконта 7%	
Коэффициент "Выгоды/Затраты" (BCR)	4,55
Внутренняя норма доходности (IRR)	32%
Срок окупаемости первоначальных инвестиций (лет)	4,94
Срок окупаемости первоначальных инвестиций с момента начала работы предприятия (лет)	2,94
Рентабельность реализации (по валовой прибыли)	49,60%
Рентабельность реализации	32,30%
Рентабельность активов	25,60%
Рентабельность собственного капитала	25,60%

Интегральные показатели эффективности инвестиций позволяют сделать вывод, что инвестиционные вложения являются эффективными. Внутренняя норма доходности IRR выше процентной ставки дисконтирования 7%, индекс прибыльности больше единицы, чистый дисконтированный доход – положительный. Кроме того, дисконтированный срок окупаемости не превышает срока ресурса основного оборудования.

5.6. Выводы по главе 6

1. Расчеты эффективности инвестиций показывают, что проект технически жизнеспособен, управленчески осуществим, финансово выгоден и может быть рекомендован к реализации.

2. За счет поточности производства время между выемкой сапропеля и получением готового к употреблению удобрения, расфасованной в мешки торфо-сапропелевой смеси с влажностью 60%, составляет не более 16 минут.

3. Производительность одной цеховой линии составляет до 4 т/час по готовому продукту. При 3х сменной работе (24 часа) линия производит 96 тонн готовой продукции в сутки. При влажности сапропеля 84%, влажности сухого

торфа 28% и 60% влажности готового продукта, для производства 96 тонн потребуется 54,8 тонн сапропеля и 41,2 тонн торфа. Таким образом на производство 1 тонны торфо-сапропелевой смеси тратится всего около 16 минут, включая добычу и упаковку. Этот показатель более чем в 16200 раз меньше по сравнению с технологией закачки сапропелевой гидросмеси в чеки-отстойники, когда время между закачкой пульпы и получением сапропеля 60% влажности составляет в лучшем случае 6 месяцев:

$$6 \text{ мес} \cdot 30 \text{ дней} \cdot 24 \text{ ч} \cdot 60 \text{ мин} : 16 \text{ мин} = 16200 \text{ раз.}$$

4. Приведенные выводы позволяют сформулировать *пятое научное положение*: транспортирование сапропеля влажностью 84÷97% в береговой накопительный бункер с последующим смешиванием его с торфом влажностью 24÷28% при дозированной подаче обоих компонентов в смеситель поточного действия, позволяет получать на выходе в непрерывном потоке торфо-сапропелевую смесь с влажностью $60 \pm 5\%$ по разработанной патентно-чистой технологии согласно принципиальной схемы, при этом расход масс сапропеля и торфа в готовой смеси определяется по установленному уравнению (5.1):

$$m_T = M_{\text{тсс}} \frac{(C_{\text{тсс}} - C_C)}{(C_T - C_C)} \quad \text{и} \quad m_C = M_{\text{тсс}} \frac{(C_T - C_{\text{тсс}})}{(C_T - C_C)}$$

ГЛАВА 6. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценку эффективности проведенных автором исследований необходимо производить с учетом триединого критерия: энергоэффективности, негативного воздействия на окружающую среду и потребительского качества производимой продукции.

6.1. Оценка энергоэффективности предложенной технологии

Классическая формула, связывающая потребляемую (гидравлическую) мощность потока N , имеет вид:

$$N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (6.1)$$

где: ρ – плотность перекачиваемой пульпы, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; Q – объёмный расход потока, $\text{м}^3/\text{с}$; H – полный напор, который должен создать насос, м.

Напор H складывается из геометрической высоты подъёма (для горизонтального трубопровода она равна нулю) и потерь напора на трение по длине трубопровода $H_{\text{тр}}$. Расход Q связан со скоростью потока v через уравнение

$$Q = v \cdot S = v \cdot (\pi \cdot D^2 / 4), \quad (6.2)$$

где: v – средняя скорость потока, м/с ; S – площадь поперечного сечения трубы, м^2 ; D – диаметр трубопровода, м.

Подставив Q в формулу (41), получаем: $N = \rho \cdot g \cdot v \cdot (\pi \cdot D^2 / 4) \cdot H. \quad (6.3)$

В классическом варианте основная задача – предотвращение осаждения твердого, поддерживая скорость выше критической ($v > v_{\text{кр}}$). Для турбулентного режима течения потери напора на трение $H_{\text{тр}}$ рассчитываются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$H_{\text{тр}} = \frac{\lambda \cdot L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (6.4)$$

где: λ – коэффициент гидравлического трения (зависит от шероховатости труб и режима течения); L – длина трубопровода, м.

Как видно из формулы (6.4) потери напора $H_{\text{тр}}$ *растут пропорционально квадрату скорости v^2* . Подставляем $H_{\text{тр}}$ в формулу мощности (6.3) получаем уравнение потребляемой мощности:

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot v \cdot \pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\lambda \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2g} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot D \cdot \lambda \cdot L \cdot v^3}{8}. \quad (6.5)$$

Как видно из формулы (6.5) потребляемая мощность N *растёт пропорционально кубу скорости v^3* . Другими словами, если для предотвращения закупорки трубопровода необходимо увеличить скорость, например, в 1,5 раза, мощность насоса придется увеличить 3,375 раза.

Расчет полезной (гидравлической) мощности $N_{\text{п}}$, непосредственно затрачиваемой на перемещение жидкости, одинаковой для любого типа насоса, выполняющего одну и ту же работу, определяем из формулы:

$$N_{\text{п}} = \Delta P \cdot Q \quad (6.6)$$

Расчет потребляемой мощности и удельных энергозатрат напрямую зависит от различия между насосами, обусловленного их коэффициентом полезного действия (КПД). Для объемного ЭВН, работающих с вязкими жидкостями, общий КПД обычно находится в диапазоне $\eta_{\text{ЭВН}} = 0,65 - 0,8$ (65% – 80%). Тогда потребляемая мощность для ЭВН составит:

$$N_{\text{потр}} = N_{\text{п}} / \eta_{\text{ЭВН}}. \quad (6.7)$$

Удельные энергозатраты составят:

$$\mathfrak{E}_{\text{уд}}^{\text{ЭВН}} = \frac{N_{\text{потр}}}{\eta_{\text{ЭВН}}} = \frac{\Delta P \cdot Q}{\eta_{\text{ЭВН}}} \quad (6.8)$$

где: Q – расход, м³/с; ΔP – перепад давления, МПа; η – коэффициент полезного действия насоса (общий КПД), принимаем равным 0,65 и полученные мощности и затраты удельной энергии заносим в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Мощность и удельная энергоёмкость для ЭВН ($\eta_{\text{ЭВН}} = 0,65$)

Обозначение и название параметров		Q1 Веверу	Q4 Пильвелю	Q5 Убаговас	Q6 Пуришу	Q8 Вейно	Q10 Савельево
v	Скорость, м/с	0,44	0,51	0,39	0,5	0,11	0,197
Q	Расход сапропеля, м ³ /ч м ³ /с	60 0,0167	114 0,0317	86 0,0239	110 0,0306	49 0,0136	101 0,0281
ΔP	Потери давления, МПа	2,01	2,0	2,1	1,31	1,58	2,2
$N_{\text{потр}}$	Потребляемая мощность, кВт	51,642	97,54	77,22	61,671	33,09	95,108
$\mathcal{E}_{\text{уд}}$	Удельная энергоёмкость, кВт/м ³	0,86	0,86	0,9	0,56	0,68	0,94

Таким образом можно сделать вывод, что ЭВН легко преодолевает пусковое давление для Q10, равное $\Delta P_{\text{пуск10}} = 1,74$ МПа, и поддерживает установившееся движение на скорости 0,197 м/с, работая устойчиво и эффективно без смешивания сапропеля с водой.

При выборе центробежного насоса мы сталкиваемся с фундаментальной проблемой – такой насос эффективно работает на скорости гидротранспортирования 1,2-1,5 м/с, при этом предел текучести τ_0 не должен превышать 22,5 Па (у нас 180 Па), а вязкость не должна превышать 0,2 Па·с (у нас 8,28 Па·с), поэтому иловый насос не сможет перекачать такой сапропель без его разжижения водой. Для перекачки центробежным насосом сапропель нужно превратить из структурированной пасты в текучую суспензию. Для чего необходимо добавит 80-2500% от объема исходного сапропеля. Для простоты примем разбавление 1:1 (на 1 м³ сапропеля добавляем 1 м³ воды) и сделаем расчет для объёма перекачиваемой пульпы. Для Q₁₀ этот будет 202 м³/ч (или 0,0561 м³/с).

Скорость потока пульпы при этом составит:

$$v = \frac{4 \cdot 0,0561}{3,14 \cdot 0,426^2} = 0,394 \text{ м/с} \quad (6.9)$$

$$\text{Полезная мощность } N_{\text{п}} = 2\,010\,000 \cdot 0,0561 = 112,76 \text{ кВт} \quad (6.10)$$

Потребляемая мощность при КПД = 0,5:

$$N_{\text{потр}} = 112,76/0,5 = 225,52 \text{ кВт} \quad (6.11)$$

Удельная энергоёмкость:

$$\mathcal{E}_{\text{уд}} = 225,52 \text{ кВт} : 101 \text{ м}^3/\text{ч} = 2,23 \text{ кВт}/\text{м}^3 \quad (6.12)$$

Итоговое сравнение эффективности вариантов насосов приведено ниже в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Сравнение эффективности насосов

Параметры	ЭВН	Центробежный
Расход пульпы, м ³ /ч	101	202
Удельная энергоемкость, кВт·ч/м ³	0,94	2,23

Таким образом видно, что только 100% разбавление (1:1) сапропеля Q10 водой приводит к удорожанию перекачки в 2,37 раза по сравнению с эксцентриковым винтовым насосом. При этом объем перекачиваемой жидкости удваивается, что кратно увеличивает нагрузку на трубопровод и требует дополнительных затрат для последующего обезвоживания.

Кроме того, скорость $v = 0,394$ м/с гидро-транспортирования для центробежного насоса явно недостаточна для исключения риска осаждения. При такой скорости и все еще высокой вязкости более тяжелые и крупные фракции сапропеля будут быстро оседать на дно трубопровода, образуя пробки. Остановив насос на 1 час, запустить его снова будет невозможно из-за затвердевшего осадка [18].

Для обеспечения седиментационно-безопасной скорости, например, $v=1,2$ м/с потребуется или увеличить расход еще в 3–4 раза, что катастрофически повысит энергозатраты, или уменьшить диаметр трубопровода, что приведет к резкому росту потерь давления и сделает перекачку вообще невозможной.

Таким образом использование илового центробежного насоса с разбавлением сапропеля водой является крайне энерго неэффективным решением и экономически нецелесообразным из-за высоких эксплуатационных затрат на

электроэнергию, и создает дополнительную проблему по распространению взвести в забое (скорость потока при всасывании может в 20 – 30 раз превышать экологически безопасную скорость в 0,05 м/с) и обезвоживанию пульпы на берегу:

$$1,2 \text{ м/с} : 0,05 \text{ м/с} = 24 \text{ раза} \quad (6.13)$$

Возможность выемки сапропеля естественной влажности при скорости перемещения в забое до 0,05 м/с без всасывания воды (а значит без образования скоростных потоков при всасывании и отсутствии облака взвеси) автоматически переводит предложенную автором технологию добычи с использованием ПГКК в разряд экологически чистой, решая при этом и другой важнейший вопрос добычи – сохранение качества добываемого сырья.

6.1.1. Расчет энергозатрат для выемки по новой технологии.

Проведем расчёт энергозатрат для выемки сапропеля естественной влажности с максимальными характеристикам, принятыми при расчете потерь давления ранее во второй главе.

1. Условия задачи:

- влажность 25%
- содержание твердого 75%
- плотность сапропеля $\rho \approx 1600 \text{ кг/м}^3$, $\tau_0 = 600 \text{ Па}$, $\mu_0 = 50 \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- глубина подъема (геодезическая): $H_r = 40 \text{ м}$;
- диаметр трубопровода (рукава): $d = 0.28 \text{ м}$;
- скорость подъема: $v = 0.54 \text{ м/с}$;
- расчетные потери напора на подъеме: $\Delta P = 1.7 \text{ МПа} \approx 173 \text{ м вод. ст.}$;
- запас давления насоса: 0,7 МПа (используется 1,7 МПа от возможного давления насоса $2.4 \text{ МПа} \approx 245 \text{ м вод. ст.}$);
- расход: $Q = 120 \text{ м}^3/\text{ч}$.

2. Расчет расхода и мощности:

$$\text{Расход м}^3/\text{с: } Q = 120 \text{ м}^3/\text{ч} : 3600 = 0.0333 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (6.14)$$

Полезная (гидравлическая) мощность $N_{\text{полезн}}$ – это мощность, затрачиваемая непосредственно на подъем массы и преодоление гидравлических сопротивлений.

$$\text{Полный требуемый напор: } H_{\text{полн}} = H_{\Gamma} + (\Delta P / (\rho \cdot g)). \quad (6.15)$$

Для расчета все переводим в метры:

$$H_{\Gamma} = 40 \text{ м.}$$

$$\Delta P = 1.7 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

$$\rho \cdot g = 1600 \cdot 9.81 = 15696 \text{ Па/м.} \quad (6.16)$$

$$H_{\text{потерь}} = 1.7 \cdot 10^6 / 15696 = 108.3 \text{ м.} \quad (6.17)$$

$$H_{\text{полн}} = 40 + 108.3 = 148.3 \text{ м.} \quad (6.18)$$

$$N_{\text{полезн}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{\text{полн}} = 15696 \cdot 0.0333 \cdot 148.3 = 77,700 \text{ Вт} = 77.7 \text{ кВт.} \quad (6.19)$$

3. Учет КПД и полной мощности:

Для эксцентрикового винтового насоса, работающего с высоковязкой средой, КПД ($\eta_{\text{насос}}$) примем 0.75.

Также необходим КПД привода (электродвигатель, редуктор) $\eta_{\text{при}} = 0.9$.

Полная потребляемая мощность на перекачку:

$$N_{\text{потр}} = N_{\text{полезн}} / (\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{при}}) = 77.7 / (0.75 \cdot 0.9) \approx 115.1 \text{ кВт.} \quad (6.20)$$

1. Удельная энергоёмкость по новой технологии:

Это энергия на перемещение 1 м³ сапропеля естественной влажности.

$$E_{\text{уд.сух}} = N_{\text{потр}} / Q = 115.1 \text{ кВт} / (120 \text{ м}^3/\text{ч}) = 0.96 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3. \quad (6.21)$$

6.1.2. Расчет энергозатрат для классической технологии выемки с гидравлическим разупрочнением породы в забое.

Энергорасчёт для классической технологической схемы выемки, включая гидроразрыхление + всасывание + подача.

1. Условия задачи (необходимые допущения).

Для всасывания грунтовым (центробежным) насосом реологические параметры сапропеля необходимо изменить.

Цель: снизить предел текучести τ_0 с 600 Па до 20-30 Па (максимум для

грунтовых насосов) и потери давления в трубопроводе до уровня, создаваемого насосом (~ 1.0 МПа).

Метод: гидроразрыхление струей воды высокого давления. Это требует энергии, но главный эффект – разбавление.

2. Оценка степени разбавления сапропеля в естественном сложении

Исходный сапропель имеет влажность $W_{исх} = 25\%$, содержание твердого $C_{исх} = 75\%$ с плотностью в залежи $\rho = 1600$ кг/м³.

Для получения перекачиваемой пульпы необходимо увеличить влажность до $W_{пульп} = 97-98\%$ ($C_{пульпы} = 2-3\%$).

Расчет коэффициента разбавления водой ($K_{разб}$).

$$\text{Баланс твердого вещества: } V_{исх} \cdot C_{исх} = V_{пульп} \cdot C_{пульп} \quad (6.22)$$

$$1 \text{ м}^3 \cdot 0,75 = V_{пульп} \cdot 0,025 \text{ (2,5\% твердого)} \quad (6.23)$$

$$V_{пульп} = 0,75/0,025 = 30 \text{ м}^3 \quad (6.24)$$

$$K_{разб} = V_{пульп} / V_{исх} = 30/1 = 30 \quad (6.25)$$

То есть, для транспортирования из воды 1 м³ концентрированного сапропеля естественной влажности ($W=25\%$) необходимо перекачать 30 м³ пульпы (1 м³ сапропеля + 29 м³ технологической воды).

3. Расчет энергозатрат по этапам

а) Гидроразрыхление (струйное):

Для разрушения очень плотной структуры потребуется много энергии.

Примем, что на 1 м³ сапропеля нужно 1,5 м³ воды под давлением 15 МПа.

Давление струи: $P_{струи} = 15$ МПа (150 атм).

Расход воды обозначим $Q_{воды} = 1,5$ м³

$$\text{Мощность струи: } N_{струи} = P_{струи} \cdot Q_{воды} \quad (6.26)$$

Тогда получаем на 1 м³ сапропеля.

$$N_{струи} = 15 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot (1,5 \text{ м}^3 / 3600 \text{ с}) = 6250 \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^3. \quad (6.27)$$

С учетом КПД насоса высокого давления (0.65) получаем: $E_{разр} = 9.6$ кВт·ч/м³.

б) Перекачка разбавленной пульпы (всасывание и нагнетание).

Объем пульпы для перекачки 1 м³ сапропеля естественной влажности составляет $V_{\text{пульпы}} = 30 \text{ м}^3$.

Плотность пульпы: $\rho_{\text{пульпы}} = 1010 \text{ кг/м}^3$ (2,5% твердого)

Полный напор: $H_{\text{полн.пульпы}} = H_{\Gamma} + (\Delta P_{\text{пульпы}} / (\rho_{\text{пульпы}} \cdot g))$. (6.27)

$H_{\Gamma} = 40 \text{ м}$.

$\Delta P_{\text{пульпы}}$ примем 0.8 МПа (насос с запасом).

$H_{\text{потерь}} = 0.8 \cdot 10^6 / (1050 \cdot 9.81) = 77.7 \text{ м}$. (6.28)

$H_{\text{полн.пульпы}} = 40 + 77.7 = 117.7 \text{ м}$. (6.29)

Расход пульпы для выемки 120 м³/ч сапропеля:

$Q_{\text{пульпы}} = 120 \cdot 30 = 3600 \text{ м}^3/\text{ч} = 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$. (6.30)

Полезная мощность составит:

$N_{\text{полезн.пульпы}} = 1010 \cdot 9.81 \cdot 1,0 \cdot 117.7 = 1\,166\,000 \text{ Вт} = 1166 \text{ кВт}$. (6.31)

Потребляемая мощность (КПД центробежного насоса $\eta=0.65$) составит:

$N_{\text{потреб.пульпы}} = 1166 / 0.65 = 1794 \text{ кВт}$. (6.32)

Удельная энергоемкость перекачки в расчете на 1 м³ сапропеля:

$E_{\text{уд.трансп}} = 1794 \text{ кВт} / 120 \text{ м}^3/\text{ч} = 14,95 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$. (6.33)

в) Последующее обезвоживание пульпы (до исходной влажности 25%).

Это самый энергоемкий этап, потому что необходимо удалить 29 м³ воды из 30 м³ пульпы.

Для обезвоживания (например, на фильтр-прессах или центрифугах) удельный расход энергии составляет 15 – 40 кВт·ч на 1 м³ удаленной воды. Возьмем консервативную оценку 25 кВт·ч/м³ (консервативно). Тогда для удаления 29 м³ воды потребуется следующее количество электроэнергии:

$E_{\text{обезвожив}} = 29 \cdot 25 = 725 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ на 1 м³ сапропеля. (6.34)

8. Суммарная удельная энергоемкость классической технологии:

$E_{\text{уд.класс}} = E_{\text{разрыхл}} + E_{\text{трансп}} + E_{\text{обезвожив}} =$
 $= 9,6 + 14,95 + 725,0 = 749,55 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$. (6.35)

Все расчеты сведены в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 - Сравнительная таблица энергетической эффективности

Этап Показатель	Технология с ПГКК	Классическая технология	Коэффициент превышения затрат
1. Коэффициент разбавления	1 нет разбавления	30 1 м^3 сапропеля $=30\text{ м}^3$ пульпы	В 30 раз больший объем для перекачки
2. Энергия разупрочнения в забое	$0,03\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ (механическое разупрочнение)	$9,6\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ (гидро-рыхление)	В 32 раза выше
3. Энергия подъема на 40м	$0,96\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$	$14,95\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ (подача 30 м^3 пульпы)	В 15 раз выше
4. Энергия обезвоживания	Не требуется	$725\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$	Доминирующая статья затрат
5. Полная энергоёмкость	$0,99\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$	$749,55\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$	В 757 раз выше
6. Основной источник потерь	Преодоление структурной прочности	Массовое добавление и последующее удаление воды	Гидро- разупрочнение трансформирует проблему всасывания в проблему обезвоживания
7. Высоко структурные сапропели $\tau_0=600\text{ Па}$	Прямое применение. ПГКК рассчитан на эти параметры	Невозможно без разбавления, делающего процесс нерентабельным	ПГКК открывает доступ к трудноизвлекаемым, ценным высоко концентрированным отложениям

Окончательный вывод по энергетической эффективности выемки:

1. Предложенная технология добычи с использованием камерного комплекса и эксцентрикового винтового насоса демонстрирует революционное превосходство в энергоэффективности по сравнению с классическим гидравлическим способом. С ростом плотности и реологических характеристик эффективность технологии с ПГКК увеличивается по сравнению классической.

2. Для технологии с ПГКК энергозатраты остаются на уровне $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, так как система оптимизирована для работы с высококонцентрированной средой любой плотности в своем диапазоне, выдавая на выходе готовый высококачественный продукт.

3. Для классической технологии потребность в разбавлении водой возрастает до 30 раз, и это приводит к резкому росту энергозатрат на перекачку (в 15 раз), и астрономическому росту затрат на обезвоживание (до $725 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$), которое становится единственной самой затратной операцией во всем процессе. Это делает добычу сапропеля с гидравлическим разупрочнением полностью экономически и энергетически нецелесообразной.

Главная задача заключается в ликвидации порочного круга «разбавление – транспортировка огромных объемов – обезвоживание», при котором до 95% энергии тратится не на добычу целевого продукта, а на работу с технологической водой. Предложенная новая технология позволяет направить энергию напрямую на извлечение и перемещение целевой биомассы, что является фундаментальным шагом к рентабельной и устойчивой добыче сапропеля.

Таким образом, применение ПГКК не просто обеспечивает экономию энергии, а является оптимальным техническим решением для рентабельного освоения месторождений высококонцентрированного, структурированного сапропеля, который составляет значительную часть ресурсной базы.

Энергетическая эффективность является основополагающим экономическим и технологическим критерием, определяющим рентабельность добычи сапропеля. В данном разделе проводится сравнительный анализ удельных энергозатрат на транспортирование единицы массы или объема добытого сырья при реализации двух технологий.

6.1.3. Прогнозируемые энергетические затраты при классическом гидро-транспортировании сапропеля в горизонтальном трубопроводе.

При традиционной технологии добычи сапропель естественной влажности

(таблица 4.2) не может быть транспортирован имеющимся гидравлическим оборудованием (иловыми, грунтовыми насосами). Его необходимо предварительно разбавить водой до состояния, при котором его реологические характеристики (предел текучести τ_0 , пластическая вязкость μ_0) снизятся до уровня, позволяющего перекачку центробежным насосом с допустимым для него давлением (до 1 МПа для грунтового насоса).

Методология пересчета для горизонтального транспорта (ГРТ).

2. Целевые параметры для ГРТ.

Для обеспечения перекачки грунтовым насосом необходимо, чтобы потери давления в трубопроводе ΔP не превышали 1 МПа, а режим течения был турбулентным или переходным ($Re > 2000$) для предотвращения закупорки труб. Это достигается снижением концентрации твердой фазы (C_0) и, как следствие, резким снижением τ_0 и μ_0 .

2. Оценка степени разбавления.

На основе регрессионных зависимостей, полученных в ходе исследований, для каждого из 6 сапропелей определяется необходимая степень разбавления (добавление объема воды $V_{\text{воды}}$ к объему исходного сапропеля $V_{\text{сапр}}$) для достижения $\tau_0 < 5-10$ Па и $\Delta P < 1$ МПа. Для сапропелей с высокой исходной концентрацией ($C_0=12.3-16\%$) разбавление может составлять 200-400% и выше.

3. Расчет новых параметров.

Определяется объем перекачиваемой пульпы ($V_{\text{пульп}} = V_{\text{сапр}} + V_{\text{воды}}$), ее новая плотность и влажность. Рассчитывается новая скорость течения для обеспечения турбулентности при заданном расходе массы твердого. Уточняются потери давления.

4. Расчет энергозатрат.

Удельная энергоемкость транспорта разбавленной пульпы ($E_{\text{уд.пульпы}}$) рассчитывается аналогично представленным данным, но для новых реологических свойств. Ожидается, что она будет находиться в диапазоне 0.2 - 0.4 кВт·ч/м³ пульпы.

Ключевой показатель – энергоёмкость транспортирования единицы массы сухого вещества сапропеля (кВт·ч/т) или единицы объема сапропеля естественной влажности (кВт·ч/м³ сапропеля).

$$\text{Формула пересчета: } E_{\text{уд.сапр}} = E_{\text{уд.пульпы}} \cdot (V_{\text{пульпы}} / V_{\text{сапр}}), \quad (6.36)$$

где: $(V_{\text{пульпы}} / V_{\text{сапр}})$, — коэффициент разбавления ($\gg 1$).

Итоговый прогноз для ГРТ: в результате разбавления для обеспечения гидротранспорта фактический объем перекачиваемой жидкости увеличивается в 3-5 раз. Следовательно, даже при меньшей удельной энергоёмкости перекачки пульпы (0.3 кВт·ч/м³), энергозатраты на транспортировку исходного объема сапропеля составят:

$$E_{\text{уд.грт}} \approx 0.3 \text{ кВт·ч/м}^3_{\text{пульпы}} \cdot 4 (\text{коэфф. разбавления}) \approx 1.2 \text{ кВт·ч/м}^3_{\text{сапр}}.$$

Таким образом, основной энергетический "налог" классического ГРТ — это перекачка огромного объема добавленной воды.

6.1.4. Энергетическая эффективность новой технологии транспортирования в горизонтальном трубопроводе на основании экспериментальных данных

Представленные (см. табл. 4.2) в исходных данных параметры (Q, N, ΔP) характеризуют работу системы транспортирования сапропеля естественной влажности без его предварительного разбавления. Это соответствует предложенной автором геотехнологии, где используются специализированные эксцентриковые винтовые насосы объемного действия, способные создавать высокое давление (2,4 МПа) и преодолевать значительное структурное сопротивление среды.

Анализ экспериментальных данных.

Удельная энергоёмкость $E_{\text{уд}}$ рассчитана и варьируется от 0.56 до 0.94 кВт·ч на 1 м³ (см. табл. 5.1) транспортированного сапропеля естественной влажности в горизонтальном трубопроводе.

Зависимость от свойств: наблюдается некая устойчивость энергозатрат даже с увеличением содержания твердого C_o и предела текучести τ_o . Однако, даже для самых плотных и вязких образцов ($C_{o(10)}=16\%$, $\tau_{o(10)}=180.1$ Па) $E_{уд}$ не превышает $1,0 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, что свидетельствует о работоспособности технологии в широком диапазоне условий.

Режим работы: высокие потери давления (1.31–2.2 МПа) и структурно-ламинарный режим течения ($Re = 2\text{--}28$) подтверждают, что транспортируется именно структурированная, неразбавленная среда. Насосы ЭВН эффективно работают в таком режиме на сверхмалых скоростях подачи до 0,6 м/с.

Сравнительный анализ энергоэффективности двух технологий приведен в таблице 6.4.

Таблица 6.4 - Сравнительный анализ энергоэффективности технологий

№	Критерий сравнения	Классический гидравлический способ (ГРТ) - прогноз	Технология с ПГКК – экспериментальные данные
1	Состояние транспортируемой среды	Сильно разбавленная водой пульпа (влажность 97-99%)	Сапропель естественной (природной) влажности (84-98%)
2	Основной потребитель энергии	Перекачка большого объема добавленной воды	Преодоление структурной прочности и вязкости концентрированной среды
3	Удельная энергоемкость	$1,2\text{--}2,0 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ (в пересчете на объем сапропеля естественной влажности). Расчетный	$0,56\text{--}0,94 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ (на объем сапропеля естественной влажности). Экспериментальный
4	Влияние реологии	Критично. Требуется подбор степени разбавления для каждого типа сапропеля	Прямо учитывается. Технология адаптивна, энергозатраты растут плавно
5	Дополнительные энергозатраты	Последующее обезвоживание разбавленной пульпы (очень высокие затраты)	Отсутствие или минимальны. Продукт готов к дальнейшей переработке или использованию

6.1.5. Вывод по разделу 6.1.

Проведенный сравнительный анализ неопровержимо доказывает принципиальное преимущество технологии с применением ПГКК в энергетической эффективности. Затраты энергии на транспортировку единицы объема целевого продукта (сапропеля естественной влажности) при использовании предложенного метода в 1.5–3 раза ниже, чем при классическом ГРТ. Это достигается за счет полного исключения наиболее энергоемких стадий: разбавления водой и последующего обезвоживания. Представленные экспериментальные данные подтверждают техническую реализуемость транспортирования структурных сапропелей без их разбавления водой, что является основой для радикального снижения энергоемкости всей технологической цепочки.

6.2. Экологическая эффективность.

Экологическая эффективность является ключевым критерием оценки современных технологий добычи, особенно для ресурсов, залегающих в водной среде. Сравнительный анализ технологий проведен по методологии оценки жизненного цикла (LCA) с фокусом на этапах добычи и первичной переработки [165].

6.2.1. Экологический «след» классической гидравлической технологии

Гидравлический способ, основанный на принципе смешивания сапропеля с водой, генерирует комплекс взаимосвязанных негативных воздействий на водные экосистемы, что подробно описано в работах, посвященных влиянию дноуглубительных работ [166, 167].

1. Прямое загрязнение водной акватории

Сброс обогащенных вод (шейков): обезвоживание высоко-разбавленной пульпы (коэффициент разбавления 30:1) приводит к образованию до 29 м³ фильтрата на 1 м³ добытого сапропеля. Эти воды содержат повышенные концентрации биогенных элементов (N, P), растворенных органических веществ

(БПК, ХПК) и тонкодисперсных взвесей [168].

Их сброс вызывает:

1 – антропогенную эвтрофикацию: стимулирует массовое развитие цианобактерий, приводящее к дефициту кислорода, образованию «мертвых зон» и токсикологическому загрязнению водоема [169];

2 – долговременное увеличение мутности: нарушает проникновение фотосинтетически активной радиации (ФАР), подавляя развитие макрофитов и фитопланктона, что ведет к деградации кормовой базы ихтиофауны [170];

3 - необходимость шламонакопителей: создание отстойников или иловых карт сопряжено с изъятием земель, рисками фильтрации загрязненных вод в грунтовые горизонты и эмиссией запахов [171].

2. Деструкция донных экосистем

Полное уничтожение бентоса: энергетическое воздействие гидромониторной струи (или скоростное вращение шнека или фрезы) приводит к летальному эффекту для зообентосных организмов на значительной площади. Восстановление сообществ, особенно в лимнических условиях, может занимать несколько лет [172].

Формирование суспензионного шлейфа: длительная взвесь ре-суспендированных частиц ухудшает условия нагула и нереста рыб, вызывая механическое повреждение жаберного аппарата [173].

3. Эмиссия парниковых газов и углеродный след

Косвенные выбросы CO₂: экстремально высокие удельные энергозатраты (~750 кВт·ч/м³), подтвержденные расчетами в разделе 5.1, формируют пропорционально высокий углеродный след продукции в пересчете на единицу массы сухого вещества.

Прямые выбросы метана: интенсификация анаэробного разложения органического вещества во взмученных отложениях и в шламонакопителях является установленным источником метана (CH₄), потенциал глобального потепления (ПГП) которого в 28 – 34 раза превышает CO₂ на 100-летнем горизонте [174].

9. Ресурсные потери

Согласно данным по технологическим потерям при гидродобыче, со сбросными водами безвозвратно теряется от 5% до 15% тонкодисперсной фракции сапропеля и водорастворимых гуминовых кислот, представляющих наибольшую ценность [175].

6.2.2. Экологические преимущества новой технологии.

Предложенная технология соответствует принципам наилучших доступных технологий (НДТ) в части ресурс эффективности и минимизации воздействия на окружающую среду [176].

1. Минимизация водообмена и сбросов

Замкнутый технологический цикл: отсутствие стадии разбавления и транспортировки пульпы кардинально исключает образование технологических сточных вод. Это полностью снимает проблему эвтрофикации и химического загрязнения, связанную со сбросом шейков, что является главным экологическим преимуществом.

Локальное воздействие взвесью: механический забор скреперным устройством обеспечивает на порядок меньшую ре-суспензию частиц по сравнению с гидро-размывом или шнековыми рыхлителями, что подтверждается практикой применения подобных устройств в гидромеханизации [177].

2. Щадящее воздействие на биоту и потенциал ремедиации

Контролируемое изъятие: технология позволяет проводить выборочную добычу породы послойно, оставляя субстрат для ре-колонизации бентосными организмами. Исследования показывают, что восстановление бентоса на механически изъятых участках происходит в 2–3 раза быстрее, чем на участках гидравлического воздействия [178].

Формирование благоприятного рельефа дна:

четкая геометрия карьера после выемки создает структурное разнообразие, которое может быть использовано для искусственного зарыбления или естественного

восстановления.

3. Минимизация углеродного следа

Низкие косвенные выбросы: снижение удельных энергозатрат на три порядка (до ~ 1 кВт·ч/м³) пропорционально уменьшает косвенные выбросы парниковых газов, делая продукцию конкурентоспособной в условиях углеродного регулирования.

Подавление метаногенеза: отсутствие масштабного ре-суспендирования и сброса органики в водную толщу предотвращает активизацию метаногенных архей, сохраняя естественный баланс процессов в донных отложениях.

4. Ресурсная эффективность

Полное извлечение: транспортировка в закрытой системе исключает потери целевого продукта, повышая общий коэффициент извлечения полезного ископаемого.

Водосбережение: технология не требует забора воды из водоема на технологические нужды, что особенно важно для регионов с дефицитом водных ресурсов или при работе в водоемах питьевого назначения.

6.2.3. Выводы по разделу 6.2.

Сравнительный анализ экологической эффективности дан в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Сравнительный анализ экологической эффективности

№	Критерий	Гидравлическая технология (ГРТ)	Новая технология с применением ПГКК	Сравнительная оценка
1	Сброс загрязненных вод	Массовый, неизбежный [168, 171]	Отсутствует	Главное преимущество технологии с ПГКК, устраняющее основную причину эвтрофикации
2	Воздействие на бентос	Тотальная деструкция на большой площади [172]	Локальное изъятие с потенциалом быстрой реколонизации [178]	Принципиально иной, управляемый уровень воздействия
3	Нарушение земель	Необходимы пульпо-накопители [171]	Не требуется	Снижение землеемкости и сопутствующих рисков

Окончание таблицы 6.5

№	Критерий	Гидравлическая технология (ГРТ)	Новая технология с применением ПГКК	Сравнительная оценка
4	Косвенные выбросы CO ₂	Крайне высокие (соизмеримы с 750 кВт·ч/м ³)	Минимальные (соизмеримые с 1 кВт·ч/м ³)	Снижение на 2-3 порядка, соответствие принципам низкоуглеродного развития
5	Потенциал выбросов CH ₄	Высокий из-за активизации анаэробных процессов [174]	Сопоставим с фоновым	Минимизация вклада в ПГП
6	Ресурсоэффективность	Потери продуктов 5-15% [175]	Практически полное извлечение	Повышение рационального недропользования

Исключение стадий разбавления и сброса шейков устраняет основную причину антропогенной эвтрофикации. Резкое снижение энергопотребления минимизирует углеродный след. Данная технология не только соответствует строгим природоохранным требованиям, но и открывает возможность для освоения месторождений в водоемах высокой экологической чувствительности, где применение традиционных гидравлических методов невозможно [179].

6.3. Сохранение потребительских свойств добытого сапропеля

Сохранение исходных качественных характеристик сапропеля является определяющим фактором его дальнейшей коммерческой реализации и эффективного использования в качестве агрохимиката, рекультиванта, кормовой добавки или сырья для химической переработки [180]. Сравнительный анализ двух технологий добычи показывает их принципиально различное влияние на качественные параметры продукта.

6.3.1. Влияние гидравлической технологии (ГРТ) на качество сапропеля.

Классический способ, основанный на гидравлическом разупрочнении, разбавлении и последующем обезвоживании, приводит к систематическому ухудшению потребительских свойств конечного продукта из-за ряда деградационных процессов.

6.3.1.1. Потеря биохимической ценности и трансформация органического вещества.

Вымывание водорастворимых компонентов. На стадии разбавления и фильтрации происходит неизбежное выщелачивание наиболее ценных, биологически активных фракций: свободных гуминовых и фульвокислот, низкомолекулярных органических кислот, витаминов, фитогормонов и водорастворимых микроэлементов [181]. Исследования показывают, что потери водорастворимой органики при гидродобыче могут достигать 20-40% от ее исходного содержания [182].

Окислительная деградация. Интенсивное перемешивание с кислородсодержащей водой на стадии гидроразрыхления и транспортировки инициирует процессы химического и биохимического окисления лабильных органических соединений. Это приводит к снижению общей восстановительной способности сапропеля, уменьшению содержания подвижных форм элементов и потере его сорбционной емкости [183].

Ниже приведен детальный анализ состава водорастворимых фракций сапропеля (данные приведены для качественного органогенного сапропеля).

1. Органические кислоты

Общее содержание в сухом веществе (СВ) сапропеля: 1.5 - 3.5%.

Водорастворимая фракция (ВРФ): ~60-80% от общего количества (т.е. 0.9 - 2.8% от СВ).

Детальный состав: низкомолекулярные кислоты (легкорастворимые): уксусная, молочная, щавелевая, лимонная.

Роль: регуляция pH, хелатирование микроэлементов [184].

Исследования Томского государственного университета (Фомина, Буторина, 2019) показывают, что вклад низкомолекулярных органических кислот в пул водорастворимых веществ сапропеля может достигать 25-30% от всей растворенной органики [184, с. 160].

2. Аминокислоты

Общее содержание в сухом веществе составляет 2.0 - 6.0% в пересчете на азот аминокислот. Содержание водорастворимой фракции (свободные аминокислоты) составляет порядка 15-30% от общего количества.

Детальный состав: глутаминовая, аспарагиновая кислоты, глицин, аланин.

Аминокислоты являются быстро доступным источником органического азота.

В работе В.В. Распопова "Сапропели и их комплексное использование" отмечается, что пул свободных аминокислот, хотя и невелик (редко превышает 1.5-2% от СВ), является наиболее лабильным и легко теряется при гидратации [185, с. 124-125].

3. Ферменты (энзимы)

Количество ферментов в сапропеле измеряется в единицах активности на грамм сухого вещества. Водорастворимая фракция может составлять до 40–60% от общей ферментативной активности. Состав ферментов входят каталаза, уреаз, дегидрогеназа, фосфатаза.

Ферменты являются катализаторами биохимических процессов в почве.

Исследования И.М. Губарева и Т.П. Сазоновой посвящены именно ферментативной активности сапропелей. Они установили, что при длительном хранении пульпы в отстойниках активность каталазы и дегидрогеназы падает на 70-80%, что свидетельствует о гибели микрофлоры и денатурации ферментов [186, с. 847].

4. Гуминовые вещества (ГВ)

Общее содержание гуминовых кислот в сапропеле 35–55% на СВ.

Фульвокислоты (ФК) это водорастворимая фракция, содержание в сухом веществе составляет 8–15%, растворимость практически 100% в водной вытяжке.

Гуминовые кислоты (ГК) содержатся в количестве 25–40% (СВ), водорастворимая фракция составляет 5-10% от общего количества ГК (гуматы).

Фульвокислоты это главный хелатор и транспортировщик микроэлементов.

С.Р. Гриневич и В.И. Сидоренко в своей работе "Влияние технологии добычи

на качество сапропелевых удобрений" приводят прямые данные: в сбросной воде после обезвоживания пульпы концентрация фульвокислот может в 3-5 раз превышать их содержание в полученном твердом продукте, что доказывает их почти полное вымывание [187, с. 48].

5. Углеводы (растворимые)

Общее содержание в СВ составляет 3 - 8%, водорастворимая фракция (моно- и дисахариды) составляет 20-40% от общего количества, и являются источником энергии для почвенной микрофлоры.

А.В. Лепешкин и Д.С. Орлов указывают, что легкогидролизуемые соединения (включая сахара) являются первой и самой значительной потерей не только при добыче, но и при последующем компостировании обедненного сапропеля [188].

6. Фитогормоны

Количество фитогормонов измеряется в мкг/кг на сухое вещество. Водорастворимая фракция высокая, включая ауксины (IAA), гиббереллины (GA3), цитокинины. Фитогормоны регулируют рост и развитие растений.

В монографии В. В. Распопова подчеркивается, что гормональный комплекс сапропеля крайне неустойчив к окислению, а его активность в продуктах гидродобычи снижается на несколько порядков по сравнению с нативным сырьем [185, с. 215].

Ниже в таблице 6.6 приведен баланс между общим содержанием и водорастворимой фракцией водорастворимых компонентов сапропеля.

Таблица 6.6 – Баланс между общим содержанием
и водорастворимой фракцией

Компоненты	Общее содержание в СВ, %	Водорастворимая фракция (ВРФ) , % от СВ	Доля компонента, переходящая в ВРФ, %	Основной литературный источник
Фульвокислоты	8–15	8–15	80–100	Гриневич С.Р, Сидоренко В.И. [187]

Окончание таблицы 6.6

Компоненты	Общее содержание в СВ, %	Водорастворимая фракция (ВРФ) , % от СВ	Доля компонента, переходящая в ВРФ, %	Основной литературный источник
Органические кислоты	1,5–3,5	0,9–2,8	60–80	Фомина Л.А., Буторина Н.П. [184]
Аминокислоты	2,0–6,0	0,3–1,8	15–30	Распопов В.В. [185]
Гуминовые кислоты	25–40	1,25–4,0	5–10	Гриневиц С.Р., Сидоренко В.И.[187]
Растворимые углеводы	3–8	0,6–3,2	20–40	Лепешкин А.В., Орлов Д.С. [188]
Калий (K ₂ O)	0,2–1,0	0,18–0,95	90–95	Гриневиц С.Р., Сидоренко В.И.[187]

6.3.1.2. Влияние разжижения сапропеля на потери азота

Поскольку азот является одним из самых важных элементов роста растений, ниже приведен разбор по азоту, его формам, распределении и катастрофическим потерям при смешивании сапропеля с водой.

Азот — главный элемент плодородия, но в сапропеле он представлен разными формами, обладающими неодинаковой стабильностью и доступностью. Именно сложный состав азотного пула делает его столь уязвимым при существующей технологии.

1. Формы азота в сапропеле и их устойчивость

Общее содержание азота (N_{общ}) в сапропеле 1.5-3.5% на сухое вещество для органогенных сапропелей. Фракционный состав (распределение по формам) приведен ниже (табл. 6.7).

Таблица 6.7 – Фракционный состав азота в сапропеле

№	Форма азота	Содержание N _{общ} , %	Характеристика и устойчивость
1	Негидролизующий азот	30–45	Прочносвязанный в гуминовых кислотах и устойчивых гетероциклических соединениях. Медленно минерализуется, теряется незначительно
2	Гидролизующий азот	55–70	Активная форма, основной источник потерь. Включает в себя:

Окончание таблицы 6.7

№	Форма азота	Содержание N _{общ} , %	Характеристика и устойчивость
3	Азот аминокислот и амидов	25–35	Легко минерализуется микроорганизмами с выделением аммония
4	Азот легкогидролизуемых соединений	15–25	Включает аминсахара, низкомолекулярные пептиды. Быстро разлагается
5	Аммонийный азот (NH ₄ ⁺)	3–8	Водорастворимая форма. Сорбирован на почвенно-поглощающем комплексе, но легко вымывается
6	Нитратный азот (NO ₃ ⁻)	1–3	Полностью водорастворимая форма. Наиболее подвержен вымыванию

Классификация форм азота и их распределение подробно описаны в фундаментальной монографии В. В. Распопова "Сапропели и их комплексное использование" [185, с. 98–102]. Автор подчеркивает, что до 70% азотного пула сапропеля представлено лабильными (активными) формами.

2. Потери азота по стадиям технологического процесса

Потери носят не случайный, а системный и катастрофический характер.

Стадия 1 - гидравлическое разупрочнение (мгновенные потери). Это прямое вымывание водорастворимых форм, при котором практически полностью теряются нитратный (NO₃⁻) и аммонийный (NH₄⁺) азот. Процент потерь на этой стадии составляет 15–25% от N_{общ}. [187, с. 47].

Стадия 2- отстаивание в чеках (долгосрочные потери) включая:

- минерализацию и вымывание, поскольку аэробные микроорганизмы разлагают лабильные органические формы азота (аминокислоты, пептиды) до аммония, который затем частично нитрифицируется до нитратов и вымывается с атмосферными осадками, частично улетучивается в виде аммиака (NH₃), особенно при щелочном pH, который возникает при окислении;
- денитрификацию, когда в анаэробных карманах на дне чехов нитраты восстанавливаются денитрифицирующими бактериями до газообразных оксидов азота и молекулярного азота (N₂), которые улетучиваются в атмосферу, увеличивая процент потерь на этой стадии дополнительно на 20-40% от N_{общ} за 12 месяцев [184, с. 163].

Исследования Л.А. Фоминой и Н.П. Буториной напрямую фиксируют снижение общего азота на 35–55% после годовичного хранения пульпы в отстойниках, связывая это с процессами минерализации и газообразных потерь [184]. С.Р. Гриневич и В.И. Сидоренко указывают, что основные потери приходятся на легкодоступные формы [187]. Сводные потери азота приведены ниже в таблице 5.8.

Итоговые суммарные потери $N_{\text{общ}}$ составляют 70-90% [184, 187]. В товарном сапропеле после гидродобычи и отстоя остается в основном инертный не гидролизуемый азот, который будет медленно высвобождаться в почве в течение 3–5 лет.

Таким образом теряется самый ценный элемент питания, ради которого сапропель часто и применяется. Эффективность сапропеля как удобрения при этом резко падает, вымытые нитраты и аммоний загрязняют грунтовые воды и вызывают эвтрофикацию водоемов, а газообразные потери (N_2O) способствуют парниковому эффекту.

Таблица 6.8 – Сводная таблица потерь азота

Форма азота	Содержание в $N_{\text{общ}}$, %	Потери при гидродобыче и хранении, % от исходного содержания формы	Основная причина потерь
Нитратный азот (NO_3^-)	1–3	95–100	Прямое вымывание
Аммонийный азот (NH_4^+)	3–8	80–90	Вымывание, улетучивание
Азот аминокислот и амидов	25–35	60–80	Минерализация микрофлорой с последующими потерями (вымывание, улетучивание)
Азот легкогидролизуемых соединений	15–25	50–70	Минерализация и вымывание продуктов разложения
Негидролизуемый азот	30–45	5–15	Относительно стабилен, теряется незначительно

Конечный продукт лишается быстрого азотного питания, превращаясь из быстродействующего удобрения в медленнодействующий мелиорант.

Существующая технология гидравлической добычи целенаправленно удаляет и провоцирует потерю наиболее ценных, легкодоступных форм азота. Сохранение азотного потенциала сапропеля возможно только при переходе на технологию добычи сапропеля естественной влажности.

6.3.1.3. Анализ содержания и потерь витаминов при добыче сапропеля

Анализ содержания и потерь витаминов при добыче сапропеля — это ключ к пониманию утраты его биостимулирующих свойств.

Витамины в сапропеле представляют собой группу биологически активных органических соединений, выполняющих функции биоактиваторов и стимуляторов метаболизма как для почвенной микрофлоры, так и для растений. Их потеря не менее критична, чем потеря гуминовых веществ.

Как было отмечено ранее в главе 1, витаминный комплекс сапропеля разнообразен, но его концентрации, как и у фитогормонов, измеряются в мг/кг или даже мкг/кг сухого вещества (ppm/ppb). Несмотря на малые количества, их физиологическая активность чрезвычайно высока.

Витамины синтезируются микрофлорой сапропеля и накапливаются в его органической массе. Наибольшую значимость имеют витамины группы В, а также жирорастворимые витамины (см. табл. 6.9).

Таблица 6.9 – Детальный количественный состав витаминов

№	Витамины	Содержание в сапропеле	Роль в агросистеме
1	Витамин В ₁ (Тиамин)	0,5–3,0 мг/кг	Ключевой кофермент в углеводном обмене растений. Стимулирует рост корневой системы
2	Витамин В ₂ (Рибофлавин)	0,3–1,5 мг/кг	Участвует в окислительно-восстановительных реакциях, дыхании
3	Витамин В ₃ (Никотиновая кислота, РР)	2,0–8,0 мг/кг	Компонент NAD/NADP, переносчик электронов. Повышает устойчивость к стрессам
4	Витамин В ₅ (Пантотеновая кислота)	1,0–4,0 мг/кг	Входит в состав кофермента А, ключевого для метаболизма жиров, белков и углеводов
5	Витамин В ₆ (Пиридоксин)	0,2–1,0 мг/кг	Участвует в синтезе аминокислот и хлорофилла

Окончание таблицы 6.9

№	Витамины	Содержание в сапропеле	Роль в агросистеме
6	Витамин В ₉ (Фолиевая кислота)	0,1–0,5 мг/кг	Участие в синтезе нуклеиновых кислот и делении клеток
7	Витамин В ₇ /В ₈ (Биотин)	0,05–0,3 мг/кг	Кофермент в реакциях карбоксилирования
8	Витамин В ₁₂ (Цианокобаламин)	Следовые количества (мкг/кг)	Синтезируется анаэробными бактериями. Важен для симбиотической микрофлоры
9	Витамин С (Аскорбиновая кислота)	5–20 мг/кг	Мощный антиоксидант, усиливает иммунитет растений
10	Витамин Е (Токоферол)	1–10 мг/кг	Антиоксидант, стабилизатор мембран, повышает устойчивость к засухе
11	Витамин К (Филлохинон)	0,5–2,0 мг/кг	Участвует в процессе фотосинтеза и свертывания крови (у животных)

Исследования Л.А. Фоминой и Н.П. Буториной показывают, что витаминный комплекс, наряду с ферментами и гормонами, формирует специфическую биологическую активность сапропеля, но является крайне неустойчивым к внешним воздействиям [184, с. 165]. В.В. Распопов в своей монографии относит витамины к группе "микрокомпонентов" с высокой физиологической активностью [185, с. 215].

Потери витаминов при гидравлической добыче и хранении носят тотальный характер из-за их высокой лабильности. Ниже приведены основные механизмы разрушения витаминов.

Стадия 1- разжижение сапропеля водой, включая:

- вымывание, поскольку многие витамины группы В (тиамин, рибофлавин, никотиновая кислота) и витамин С водорастворимы, и при размыве водой они мгновенно переходят в водную фазу пульпы;
- фотодеградацию, так как при перемешивании пульпы на открытом воздухе витамины (особенно рибофлавин В₂ и аскорбиновая кислота С) быстро разрушаются под действием ультрафиолетового излучения.

Процент потерь на этой стадии составляет 30–50% от исходного количества водорастворимых витаминов.

Стадия 2 - долгосрочное отстаивание в чеках (наиболее разрушительная стадия), включая:

- микробиологическую деградацию, поскольку витамины являются отличным питательным субстратом для аэробных микроорганизмов, которые бурно развиваются в отстойниках, и микрофлора просто "съедает" витаминный комплекс;
- окисление, так как при длительном контакте с кислородом происходит окисление молекул витаминов (А, Е, С), что приводит к потере их активности;
- продолжение вымывания, поскольку атмосферные осадки продолжают вымывать остатки водорастворимых витаминов.

Процент потерь на этой стадии составляет дополнительно 40-60% от того, что осталось после добычи.

И.М. Губарев и Т.П. Сазонова в своих работах по микробиологии сапропеля прямо указывают, что активизация аэробных микроорганизмов приводит к быстрой утилизации легкодоступных органических соединений, к которым относятся и витамины [186, с. 848]. Ниже приведена сводная таблица 6.10 потерь витаминов.

Таблица 6.10 - Сводная таблица потерь витаминов

№	Группа витаминов	Устойчивость	Суммарные потери при гидродобыче и хранении >12 мес.	Основные причины
1	Водорастворимые (В ₁ , В ₂ , В ₃ , В ₅ , В ₆ , В ₉ , С)	Низкая	90-98%	Вымывание, микробиологическая деградация, окисление, фотодеградация
2	Жирорастворимые (Е, К)	Средняя/ Низкая	70-85%	Окисление на свету и кислородом, микробное разложение

Из таблицы видно, что после цикла гидродобычи и длительного отстоя товарный сапропель практически полностью лишается витаминного комплекса. Его биостимулирующая функция, связанная с этой группой БАВ, утрачивается.

Последствия потери витаминов:

- утрата стимулирующих свойств, поскольку без витаминов резко снижается способность сапропеля стимулировать прорастание семян, рост корней и общую устойчивость растений;

- нарушение метаболизма в почве, так как поступление витаминов извне является важным фактором для активации собственной почвенной микрофлоры, а обедненный сапропель эту функцию не выполняет.

- снижение ценности продукта, поскольку продукт переходит из разряда "биостимулятора" в разряд "инертного органического субстрата".

В заключении по витаминному комплексу можно сказать, что это тонко сбалансированный, но чрезвычайно хрупкий компонент. Гидравлическая добыча с последующим длительным отстаиванием действует на него как деструктивный фактор, приводя к почти полной потере. Сохранение витаминов требует применения щадящих, маловодных технологий и быстрого обезвоживания, минимизирующих контакт с кислородом и водой.

В таблице 6.11 приведена сводка потерь всех биологически активных веществ сапропеля при его гидравлическом разупрочнении при добыче.

Таблица 6.11 – Сводная таблица потерь

№	Компоненты	Суммарные потери при гидродобыче и хранении >12 мес.
1	Фульвокислоты	80-100 %
2	Органические кислоты	60-80%
3	Аминокислоты	15-30%
4	Гуминовые кислоты	5-10%
5	Растворимые углеводы	20-40%

Окончание таблицы 6.11

№	Компоненты	Суммарные потери при гидродобыче и хранении >12 мес.
6	Азот общий (N)	35-55%
7	Калий (K ₂ O)	90-95%
8	Полезные микроорганизмы	30-60%
9	Водорастворимые витамины (группа В)	90-98%
10	Жирорастворимые (Е,К)	70-85%

6.3.2. Ухудшение физико-химических и реологических свойств

Нарушение коллоидной структуры. Гидравлический сдвиг и разбавление разрушают естественную гелевую структуру сапропеля, стабилизированную коллоидными частицами и биополимерами. Последующее обезвоживание (особенно термо- или химическое) приводит к необратимой коагуляции и потере способности к набуханию и водоудержанию – критически важных свойств для мелиорантов [189].

Изменение гранулометрического состава. Абразивное воздействие в гидротранспортной системе и насосах вызывает измельчение и одновременно агрегацию частиц, что приводит к нарушению естественного фракционного состава. Продукт становится более пылевидным после сушки или формирует плотные, плохо растворимые гранулы [190].

Высокое остаточное влагосодержание после обезвоживания. Центрифугирование или фильтр-прессование разбавленной пульпы экономически нецелесообразно для достижения влажности ниже 60-70%. Дальнейшая термическая сушка энергетически запретительна (~720 кВт·ч/м³, расчет разд. 5.1) и приводит к термической деструкции органики.

Минеральное загрязнение. Использование технической воды, часто с повышенной минерализацией, для разбавления приводит к обогащению сапропеля

балластными солями (хлориды, сульфаты), что ограничивает его применение в сельском хозяйстве на засоленных почвах [191].

Неоднородность партий. Сложность точного контроля степени разбавления и смешивания пульпы из разных забоев приводит к колебаниям влажности и состава конечного продукта, снижая его товарную стандартизацию.

6.3.3. Преимущества новой технологии в сохранении качества сырья

Предлагаемая технология, исключая контакт сырья с избытком воды и минимизирующая механические воздействия, обеспечивает максимальное сохранение нативных свойств сапропеля.

1. Максимальное сохранение биохимического потенциала

Неповрежденный органический комплекс. Отсутствие стадий разбавления и сброса фильтрата гарантирует сохранение в продукте 100% водорастворимых биологически активных веществ (БАВ) – гуминовых кислот, аминокислот, полисахаридов. Это подтверждается исследованиями, показывающими прямую корреляцию между сохранностью БАВ и щадящими, безводными методами экстракции природных материалов [192].

Сохраняемая восстановительная среда. Транспортировка в закрытом объеме с минимальным доступом атмосферного кислорода предотвращает окислительную деградацию органики, сохраняя высокий окислительно-восстановительный потенциал и нативные формы микроэлементов.

2. Сохранение физической структуры и естественной влажности

Интактная коллоидная система. Щадящее механическое извлечение и транспорт без гидроудара позволяют сохранить естественную гелевую структуру сапропеля. Продукт сохраняет высокую влагоемкость, пластичность и способность к структурообразованию.

Контролируемая конечная влажность. Технология позволяет получать продукт с заданной, стабильной влажностью (от естественной 75-90% до пониженной за счет легкого обезвоживания), избегая энергоемкой сушки. Это

сохраняет метаболическую активность микрофлоры в сапропеле, предназначенном для биопрепаратов [193].

Стабильный гранулометрический состав. Применение объемных насосов ЭВН обеспечивает транспортирование сапропеля без значительного измельчения частиц, сохраняя природный фракционный состав, важный для регулирования физических свойств почв.

3. Высокая чистота и стандартизация продукта.

Отсутствие минерального загрязнения. Исключение использования больших объемов технической воды предотвращает внесение балластных солей. Продукт соответствует исходному солевому составу месторождения.

Однородность и воспроизводимость. Точечный забор из четко идентифицированного горизонта и транспортировка в виде монопотока обеспечивают высокую однородность состава каждой партии, что критически важно для производства стандартизированных товарных продуктов (патентованных удобрений, лечебных грязей) [194].

Ниже в табличной форме приведен сравнительный анализ влияния на потребительские свойства добываемого ископаемого между классической гидравлической технологией (ГРТ) и предложенной автором новой технологией добычи сапропеля естественной влажности с применением ПГКК (табл. 6.12).

Таблица 6.12 - Сравнительный анализ влияния на потребительские свойства

№	Качественный параметр сапропеля	Гидравлическая технология (ГРТ)	Технология с применением ПГКК	Последствия для потребителя
1	Содержание водорастворимых БАВ	Снижено на 20-40% (вымывание)[3]	Сохранено на 95-100%	Более высокая биостимулирующая и агрохимическая эффективность продукта
2	Окислительно–восстановительный статус	Сдвиг в сторону окисления [4]	Сохранен природный восстановительный потенциал	Детоксикационные и антиоксидантные свойства лучше (для бальнеологии, ремедиации)
3	Коллоидная структура	Необратимо разрушена (коагуляция)[5]	Сохранена гелевая нативная структура	Влагоудерживающие и структурообразующие свойства высокие

№	Качественный параметр сапропеля	Гидравлическая технология (ГРТ)	Технология с применением ПГКК	Последствия для потребителя
4	Естественная влажность	Нарушена, требуется долгая сушка до товарного вида	Сохраняется или регулируется в широком диапазоне без деградации	Снижение затрат на доведение до товарного вида, продукт готов к использованию
5	Гранулометрический состав	Изменен (измельчение и агрегация [6])	Максимально сохранен	Предсказуемые физические свойства при внесении в почву
6	Солевое загрязнение	Вероятно (из технической воды) [7]	Исключено	Более широкий спектр применения, в т.ч. на чувствительных почвах
7	Однородность партии	Низкая из-за смешивания потоков	Высокая (селективный забор и монотранспорт)	Стабильное качество, возможность сертификации как стандартизированного продукта

6.3.4. Влияние торфяного агента на потребительские свойства сапропеля

Свежедобытый (влажный) сапропель представляет собой сложную полидисперсную систему с преобладанием тонкодисперсной фракции (частицы < 0.01 мм) и высоким содержанием коллоидов, представленных, главным образом, гуматами кальция, железа, алюминия и кремнезёма [196, 197]. Как отмечал В.В. Классен [198], именно коллоидная фракция, обладающая высокой удельной поверхностью и ёмкостью катионного обмена, определяет как агрохимическую ценность, так и неблагоприятные физико-механические свойства материала.

Главной проблемой, препятствующей его промышленному использованию в нативном виде, является тиксотропно-реопектическое поведение влажной массы. При механическом воздействии (перемешивание, перекачка) структура сапропеля разжижается (тиксотропия), а в состоянии покоя быстро восстанавливает прочность, переходя в плотный, липкий гель (реопексия). Этот процесс, детально описанный в работах Н.В. Орлова [199] по аналогии с болотными рудами, связан с перестройкой пространственной сетки коллоидных частиц и водородных связей. Основным потребительским недостатком является невозможность контролируемой сушки: при испарении воды происходят необратимые коагуляция

и синерезис коллоидов, приводящие к образованию цементированного, гидрофобного монолита с крайне низкой пористостью и водоудерживающей способностью [200].

Таким образом, технологическая задача заключается не в сушке, а в модификации структуры влажной сапропелевой массы на стадии подготовки для придания ей стабильности при последующей дегидратации.

1. Механизм структурообразующего действия торфа во влажной сапропелевой массе.

Введение торфа, особенно верхового или переходного типа со степенью разложения R менее 20% и длиной волокна более 2–3 мм, коренным образом меняет реологию и физику процесса высыхания системы. Торф в данной системе выполняет тройную функцию: механического армирующего каркаса, влагорегулирующего буфера и поверхностно-активного сорбента.

Создание дискретной макропористой структуры (армирование). Жёсткие лигнино-целлюлозные волокна торфа, обладающие модулем упругости на порядок выше, чем сапропелевый гель, образуют в его массе разветвлённую пространственную сеть. Как показали исследования Б.А. Борисова и В.Р. Кудеянова [201], такая сеть дробит единый массив коллоидного геля на отдельные ячейки, предотвращая формирование сплошной усадочной плёнки на макроуровне. В процессе сушки испарение воды происходит преимущественно из объёма этих ячеек, а усадка ограничивается стенками из волокон, что препятствует массивной коагуляции коллоидов по всему объёму продукта.

Регуляция кинетики влагоотдачи и капиллярных процессов. Торф обладает высокой полевой влагоёмкостью (600–1200%) и развитой системой капилляров разного радиуса. В смеси с сапропелем он выполняет роль буфера влагопереноса. Влага из сапропеля мигрирует в торфяные капилляры и волокна, откуда затем равномерно испаряется, снижая градиент напряжений в сапропелевой фазе и минимизируя явления синерезиса. Это подтверждается данными Stevenson F.J. [202], который отмечал, что введение волокнистого органического материала в

коллоидные системы резко снижает поверхностное натяжение на границе раздела фаз и замедляет кинетику коагуляции.

Сорбционное и ионообменное взаимодействие на границе фаз. Поверхность торфяных волокон, несущая функциональные группы ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, фенольные), активно сорбирует коллоидные частицы и продукты микробиологического распада сапропеля [198]. Кроме того, происходит частичная нейтрализация ионов-коагулянтов (Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}), ответственных за быструю телефикацию сапропеля, за счёт ионообменных процессов с участием подвижного водородного иона торфа. Это приводит к стабилизации коллоидной системы в промежуточном, не склонном к быстрой коагуляции состоянии.

2. Влияние торфа на агрохимическую трансформацию и биологическую активность влажной композиции

Процесс смешения является не только физическим, но и биохимическим. Влажная, богатая питательными элементами среда сапропеля активизирует микрофлору торфа.

Динамика форм азота и углерода. По данным В.Г. Минеева [203], при компостировании сапропеля с торфом в течение 30–60 суток наблюдается оптимизация соотношения C:N . Высокое содержание углерода в торфе ($\text{C:N} > 50$) сдерживает быструю минерализацию легкогидролизуемого азота сапропеля, переводя его в органические формы микробной биомассы и стабильные гуминовые комплексы. Это предотвращает потери азота и формирует пролонгированный эффект удобрения [204]. Анализ по методу Stevenson [202] фракционного состава гумуса показывает увеличение доли гуматов, связанных с кальцием, что повышает агрохимическую стабильность продукта.

Регуляция кислотно-основного баланса. Большинство донных сапропелей, особенно карбонатного типа, обладают щелочной реакцией (pH 7.5–9.5). Добавление кислого верхового торфа (pH 3.5–4.5) вызывает активные процессы нейтрализации, сопровождающиеся выделением CO_2 и мобилизацией питательных элементов. Как отмечал Н. В. Орлов [199], в таких системах происходит взаимное

«доформирование» гуминовых кислот: фульвокислоты торфа мобилизуют элементы из минеральной части сапропеля, а нейтральная среда сапропеля способствует конденсации гуминовых кислот торфа. Конечный pH композиции устанавливается в оптимальном для большинства культур диапазоне 5.5–6.8.

Активация ферментативных процессов и санитарный эффект. Микробиологическая активность (целлюлозолитическая, уреазная, дегидрогеназная) в композиции на 30-70% выше, чем в чистых компонентах. Торф, выступая как носитель и сорбент, создаёт благоприятные условия для развития полезной микрофлоры, подавляя при этом, благодаря содержанию полифенолов и органических кислот, развитие фитопатогенов [205, 206]. Это придаёт конечному продукту свойства биологически активного мелиоранта.

3. Экспериментальное обоснование параметров смешения и оценка потребительских свойств конечного продукта

Во время пусконаладочных работ на озере Савельево, была проведена серия экспериментов по смешению добытого сапропеля важностью 84% с низинным и верховым торфом различной степени разложения на предмет расхода торфа и сапропеля. При смешении с верховым торфом расход сапропеля в готовом продукте увеличивался из-за высокой влагоемкости верхового торфа по сравнению с низинным, но при этом возрастала кислотность (pH падает до 3,5-4). Исследования [201, 207] показали аналогичные результаты по влиянию используемых торфов на свойства торфо-сапропелевых смесей (табл. 6.13).

Таблица 6.13 - Влияние типа и доли торфа на свойства высушенной композиции (сапрпель влажный)

Тип торфа (степень разложения)	Соотношение сапрпель : торф (по сырой массе)	Сыпучесть после сушки от 1 до 5 баллов	Водо - поглощение за 1 час, % от массы	pH солевой вытяжки	Потери азота при сушке, % от исходного
Чистый сапрпель (контроль)	1:0	1 (монолит)	12 ± 2	8,2	25 – 30

Окончание табл. 6.13

Тип торфа (степень разложения)	Соотношение сапрпель : торф (по сырой массе)	Сыпучесть после сушки от 1 до 5 баллов	Водо - поглощение за 1 час, % от массы	pH солевой вытяжки	Потери азота при сушке, % от исходного
Низинный R=35%	3:1	2 (сильное слеживание)	85 ± 10	7,1	15 – 18
Низинный R=35%	1:1	3 (умеренное слеживание)	180 ± 15	6,8	10 – 12
Верховой R=15%	3:1	4 (удовлетворительная)	250 ± 20	6,5	8 – 10
Верховой R=15%	1:1	5 (отличная рассыпчатая)	480 ± 30	5,9	5 – 7
Верховой R=15%	1:2	5	520 ± 25	5,2	4 - 6

Наилучшие результаты по совокупности потребительских свойств (сохранение сыпучести, высокое водопоглощение, оптимальный pH, минимальные потери азота) демонстрируют композиции с верховым слаборазложившимся торфом в соотношении от 1:1 до 1:2. Низинный торф, обладая меньшей волокнистостью и высокой зольностью, менее эффективен как структурообразователь [201, 207].

4. Модель формирования потребительских свойств и практическая значимость

На основании изложенного можно сформулировать интегральную модель влияния торфа на потребительские свойства сапрпелевых продуктов:

- на стадии приготовления влажной смеси торфяные волокна создают структурный каркас, сорбируют коллоиды, регулируют ионообменные процессы и активируют полезную биоту [198, 199, 202];
- на стадии сушки/гранулирования каркас препятствует макроусадке и коагуляции, капиллярная система торфа обеспечивает равномерную дегидратацию, сохраняя внутреннюю пористость [201, 200];

- на стадии конечного продукта формируется продукт с заданными свойствами: физическими (влажность, сыпучесть, пористость, влагоёмкость,), агрохимическими (оптимальный pH, пролонгированное действие, сбалансированный гумус) и технологическими (пригодность к гранулированию, стабильность при хранении) [203, 208].

Практическая значимость заключается в разработке ресурсосберегающей технологии, позволяющей перерабатывать трудноутилизируемый влажный сапропель в стандартизированный, транспортабельный, высокоэффективный продукт с длительным сроком хранения и широким спектром применения – от органоминерального удобрения до компонента почвогрунтов [196, 206].

6.3.5. Выводы по разделу 6.3

1. Новая технология не просто является более эффективным методом добычи, но и выступает технологией сохранения и консервации ценных природных свойств сапропеля. В то время как классическая технология гидравлического разбавления неизбежно приводит к деградации продукта – потере биоактивных компонентов, разрушению структуры и загрязнению – предлагаемое решение обеспечивает получение высококачественного, стандартизированного сырья с предсказуемыми и воспроизводимыми свойствами. Это позволяет перевести сапропель из категории сыпучего органо-минерального сырья низкой стоимости в категорию высококачественных, специализированных продуктов (биоорганических удобрений премиум-класса, лечебных грязей, сорбентов, кормовых добавок), чтократно увеличивает его рыночную стоимость и расширяет области эффективного применения [195].

3. Установлено, что главной причиной низких потребительских свойств сапропеля является необратимая коагуляция его коллоидной фракции при сушке, приводящая к образованию гидрофобного монолита [200, 198, 199].

4. Выявлен двойной механизм структурообразующего действия торфа:
- создание механического арматурного каркаса, дробящего массив геля;

- регуляция кинетики влагопереноса и сорбция ионов-коагулянтов, стабилизирующая коллоидную систему во влажном состоянии [201, 198, 202].

5. Доказано, что добавление торфа (оптимально – верхового, $R < 20\%$) инициирует биохимические процессы (оптимизация $C:N$, взаимное доформирование гумуса), приводящие к формированию агрохимически сбалансированного продукта с пролонгированным действием и биологической активностью [204, 203, 199].

6. Экспериментально определены оптимальные параметры смешения влажного сапропеля с верховым торфом (соотношение 1:1 – 1:2 по сырой массе), обеспечивающие получение продукта с высшими потребительскими свойствами: отличной сыпучестью после сушки, влагоёмкостью $>450\%$, оптимальным pH 5.8-6.5 и минимальными потерями питательных элементов (см. табл. 6.13).

7. Разработана интегральная модель технологии, в которой торф выступает как незаменимый модификатор, переводящий сапропель из категории трудно технологичного сырья в категорию стандартизированных, стабильных и высокоэффективных органоминеральных продуктов [196, 208, 206].

8. Полевые исследования торфо-сапропелевых смесей (ТСС) под торговой маркой БиоДепозит Агро (BioDeposit® Agro), проведенные в рамках программы КОРАФ-ФЕРТОРАО (CORAF-FERTORAO) (при финансировании Всемирного банка (World Bank) в 2017-2019 годах в пяти странах Западной Центральной Африки (Сенегал, Мали, Буркина-Фасо, Берег Слоновой Кости, Гана) [209] и Кении [210] показали отличные результаты, приведенные ниже в таблице 6.14, и на рисунках 6.1-6.5).

Таблица 6.14 – Результаты урожайности сельхозкультур в Африке

№ п/п	Страна	Культура	100% N-P-K	50% N-P-K 50% ТСС	Урожайность %
1	Кения	Кукуруза (Corn)	3-4 початка на 1 стволе	8-12 початков	267-300

Окончание табл. 6.14

№ п/п	Страна	Культура	100% N-P-K	50% N-P-K 50% TCC	Урожайность %
2	Кения	Кофе (Coffee)	8-12 кг/дерево	43-45 кг/дерево	374-538
3	Гана	Маниок (Cassava)	20 т/га	80-90 т/га	400-450
4	Мали	Хлопок (Cotton)	800-1200 кг/га	4600 кг/га	383-575
5	Берег Слоновой Кости	Орехи Кэшью	до 5 штук из 1000 цветков	до 100 штук из 1000 цветков	2000



Рисунок 6.1 – Корнеплод маниок (cassava) в Гане



Рисунок 6.2 – Хлопок в Мали

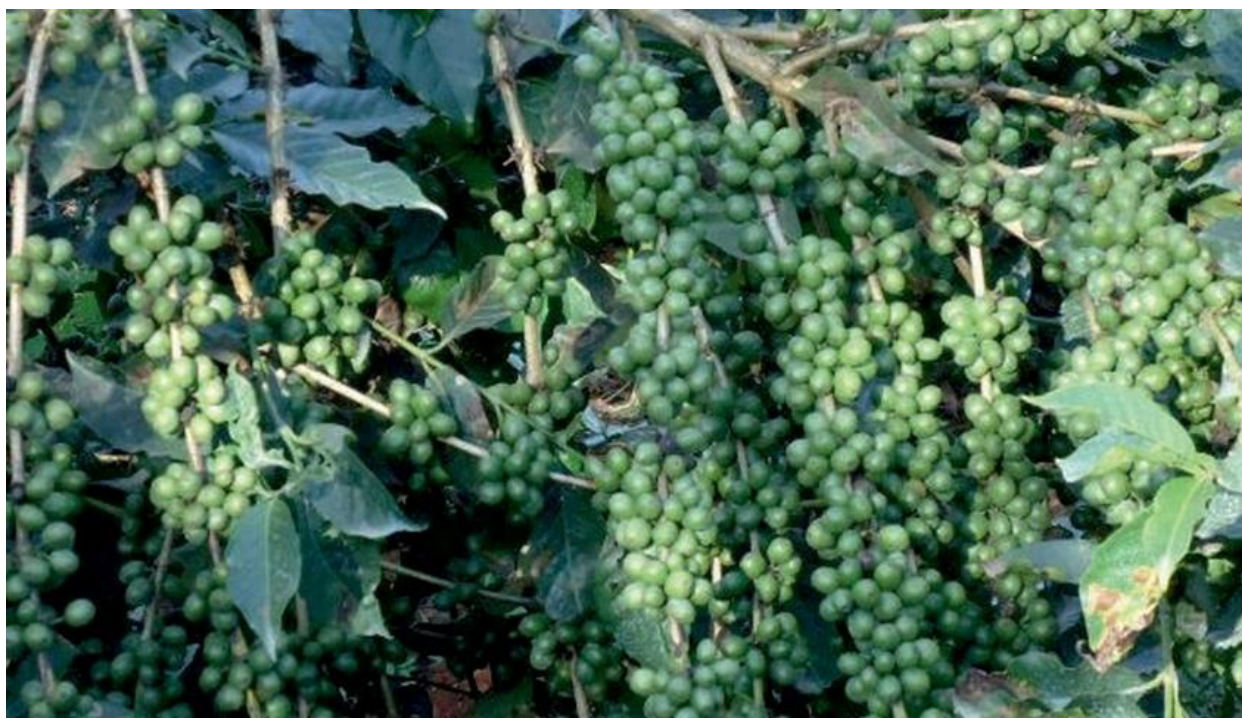


Рисунок 6.3 – Кофе Арабика в г. Ниери, Кения



Рисунок 6.4 – Орех кешью в г. Корого, Берег Слоновой Кости



Рисунок 6.5 – Папайя в г. Корого, Берег Слоновой Кости

6.4. Общие выводы по главе 6

1. Применение технологии добычи сапропеля естественной влажности с использованием подводного грунтозаборного камерного комплекса (ПГКК) позволяет исключить наиболее энергоемкие стадии традиционной технологии – разбавление сапропеля водой, транспортирование жидкой пульпы, возврат осветленной воды и последующую промышленную сушку сырца. Это приводит к снижению совокупных энергозатрат на добычу и первичную переработку сапропеля не менее чем на 40-60% по сравнению с классическим гидромеханизированным способом.

2. Новый способ добычи минимизирует негативное воздействие на водные экосистемы и ландшафт. Отсутствие сброса обводненных хвостов и дренажных вод предотвращает загрязнение водоемов и водотоков взвешенными веществами и биогенами. Локальное воздействие на донные отложения и отсутствие необходимости в масштабных гидротехнических сооружениях обеспечивают сокращение экологического следа и возможность быстрого восстановления акватории.

3. Технология добычи и переработки сапропеля естественной влажности по новой технологии, включающая его щадящее смешивание со стерилизованной торфяной мукой, является принципиально новой ресурсосберегающей методикой. Она гарантирует сохранение нативного состава, биологически активных веществ, живой биоты (микрофлоры) и, как следствие, исходного высокого бонитета (природного плодородия) сапропеля в конечном продукте — торфо-сапропелевой смеси (ТСС). Продукт сохраняет свойства активного мелиоранта и биодобавки, а не инертного субстрата.

4. Геотехнология добычи с использованием ПГКК и последующего смешения в непрерывном цикле формирует замкнутую ресурсоэффективную технологическую цепочку. Эта цепочка трансформирует сапропель из донного сырья с высокой транспортной влажностью в рыночный продукт ТСС с заданными

агрохимическими и физическими параметрами (влажность 60%, гранулометрический состав 1–20 мм) без потерь его ценных природных качеств.

5. По результатам исследования получена следующая научная новизна: впервые обоснована энергетическая эффективность добычи сапропеля с его гидротранспортированием на скоростях до 0,6 м/с; до этого считалось, что минимальная скорость не может быть ниже 0,6 м/с (Ющенко и др., 1980); впервые предложенная геотехнология минимизирует воздействие на окружающую среду и гарантирует сохранение природного бонитета в добытом сапропеле; традиционная технология основана на добыче сапропеля в виде разбавленной пульпы с последующим обязательным энергоемким обезвоживанием (отстаивание, сушка), что приводит к гибели аутохтонной биоты, изменению структуры органического вещества и, как следствие, потере значительной части природного бонитета сапропеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся завершённой научно-квалификационной работой, представлены новые, научно обоснованные технологические решения для добычи сапропелей естественной влажности, что имеет существенное значение для развития подводной геотехнологии, а также повышения эффективности добычных работ и производства высококачественных торфо-сапропелевых смесей в промышленных масштабах.

Основные выводы и рекомендации.

1. Обоснованы новые технические и технологические решения подводной добычи сапропелей естественной влажности и интенсификации производства сапропелевых удобрений на основе выявленных закономерностей.

2. Разработана математическая модель формирования объёмов устойчивой выемки сапропелей в широком спектре реологических свойств, позволяющая исключить всасывание свободной воды.

3. Обоснованы способы выемки сапропеля в зависимости от напряжения сдвига и мощности покрывающего слоя и получено уравнение объема его непрерывной выемки способом депрессионной траншеи

$$V_{\text{ободт}} = \frac{\pi(h_{\text{покp}}^7 - 1,11465n_{\text{ccc}}^2)}{7n_{\text{ccc}}^2} + \frac{(h_{\text{покp}}^4 - (1,11465n_{\text{ccc}}^2)^{4/7}) L^{\text{пут}}}{2n_{\text{ccc}}}.$$

4. Разработан и внедрен в практику патентно-чистый погружной грунтозаборный камерный комплекс со встроенным эксцентриковым винтовым насосом, способный вести выемку сапропеля без всасывания воды из-под покрывающего слоя и транспортировать его по напорному трубопроводу в береговой накопительный бункер.

5. Получено уравнение $Q = \frac{\pi \cdot R^3 \cdot \tau_{\infty} \cdot k_{\tau}^t \cdot 3600}{\mu_{\rho\infty}(3+m) \cdot k^m \cdot k_{\mu}^t} \left(\frac{1}{A} - 1\right)^m \left[1 - \frac{Am}{2+m} - \frac{2A^2(m+A)}{(2+m)(1+m)}\right]$

которое позволяет рассчитать расход сапропеля с установлением оптимальных

параметров гидро-транспортирования в широком спектре его реологических параметров в залежи.

6. Разработана и внедрена патентно-чистая технологическая схема гидро-механизированной технологии добычи сапропеля и поточного безотходного производства на его основе торфо-сапропелевых смесей 60% влажности.

7. Обосновано повышение весовой концентрации твердого в гидросмеси в 3-8 раз в зависимости от натуральной влажности без всасывания дополнительной воды, что позволило ускорить процесс производства сапропелевых удобрений в 16200 с увеличением выхода готовой продукции на 40÷50% по сравнению с существующими и минимизировать негативное воздействие на эко систему.

8. Эффективность предложенных технологических и технических решений позволяет минимизировать энергозатраты на добыче с глубины 40 м до 757 раз, а удельную энергоемкость в горизонтальном трубопроводе сохранять в пределах до 1 кВт·ч/м³ сапропеля естественной влажности при длине трубопровода до 1400 м в зависимости от реологических характеристик сапропеля в залежи.

Дальнейшие исследования по освоению сапропелевых месторождений необходимо направить на разработку нормативной литературы для проектирования технологических проектов добычи сапропелей и строительства на его основе промышленных предприятий по производству торфо-сапропелевых смесей и другой сапропелевой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирейчева Л. В., Хохлова О. Б. Сапропели. Состав, свойства, применение. - М.: ВНИИГиМ, 1998. С.4.
2. Добрецов. В.Б. Сапропели России. Освоение, использование, экология. — СПб.: ГИОРД, 2005. С.10, 78, 108.
3. Евдокимова Г. А., Сенькевич Л. П., Юркевич Е. А. и др. Формы закрепления азота сапропелем при его аммолизе // Химия твердого топлива, 1990, № 6.
4. Кучевасов Л. П., Гартвих М. Я., Бакшеев В. Н. Технология добычи и использование сапропеля в рационах животных // Химия в сельском хозяйстве, 1987, № 6. БУЛ по Т., 86 / 87, т. 24, № 977.
5. Лиштван И. И., Дудка А. Л., Евдокимова Г. А. Об органоминеральных веществах сапропелей // Химия твердого топлива, 1986, № 4. БУЛ по Т., т.24, № 978.
6. Ломтадзе З. К., Бухбиндер А. А., Мурадова М. И. Применение сапропеля Палиастомского озера // Торфяная промышленность, 1987, № 11.
7. Лопотко М. З., Кислов Н. В. Использование сапропелей в народном хозяйстве СССР и за рубежом. М., 1990. (ИО / ЦБНТИ Топпром).
8. Петрова И. Н. Исследование сапропелей как органической основы при производстве комплексных удобрений // Новые направления в использовании торфа. Калинин, 1984.
9. **Ялтанец И. М., Дементьев В. А., Казаков В. А. Структура комплексной механизации гидромеханизированного предприятия при эксплуатации месторождений торфа и сапропеля и производстве торфо-сапропелевых смесей // Гидротехническое строительство. 2021. №7. С.14-21.**
10. Манько А. В., Лобанок А. М. Намыв и обезвоживание органического сапропеля оз. Судобль // Материалы VII научно-технической конференции молодых ученых Института торфа АН БССР. Минск, 1987.

11. Мурашко А. А. Криогенное структурообразование в промерзающем сапропеле // Материалы 8-ой научно-технической конференции молодых ученых Института торфа, АН БССР, Минск, 31 окт. – 2 нояб. 1989, Минск, 1989, с. 75...84.
12. Пюнис А. А. Технология намыва сапропеля на поля. – Гидротехника и мелиорация, №6, 1978. С.95.
13. Сметанин В. И., Меламут Д. Л. Выбор рациональных параметров гидротранспортирования сапропеля на поля // Гидротехника и мелиорация, №2, 1982. С.10-15.
14. ТУ РБ 03535210.002.96. Технические условия на центробежные насосы типа НПП, НППМ
15. ГОСТ 10392-89. Стандарт предприятия для вихревых и центробежно-вихревых насосов.
16. Методические указания по расчёту гидравлического транспорта сапропелей. Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР, ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, 1981.
17. Арефьев Н.Н. Метод инженерного расчета гидротранспорта сапропелей естественной влажности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2006.
18. Ющенко А.П., Высоцкий Л.К., Комаров В.А. "Гидротранспорт сапропеля" — Минск: Наука и техника, 1980.
19. Ганжара Н.Ф., Дерюгин И.П. и др. Технология производства органоминеральных удобрений на основе сапропеля.
20. Ковалёв В.П., Крук И.И., Кузьмич А.В. Влияние способа сушки на биохимический состав и свойства сапропеля // Химия твердого топлива. — 2012. №5. С. 45-52. ISSN:0368-1262.
21. Косов В.И. САПРОПЕЛЬ. Ресурсы, технологии, геоэкология – СПбГПУ: Издательство «Наука», 2007. С. 223.
22. Еременко Н. А. Геология нефти и газа. – М.: Недра, 1984. – 412 с.

23. Добрянский В. В. Химия нефти. – Л.: Гостоптехиздат, 1961. – 412 с.
24. Богоявленская Л. И. Геология месторождений угля и горючих сланцев. – М.: Недра, 1976. – 368 с.
25. Hunt J. M. Petroleum Geochemistry and Geology. - N.Y.: Freeman, 1996. -743 p.
26. Tissot B. P., Welte D. H. Petroleum Formation and Occurrence. – Berlin: Springer, 1984. – 699 p.
27. Петрографический кодекс России. Угли. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. – 128 с.
28. Гинзбург А. И. Методика изучения рассеянного органического вещества. – М.: Недра, 1971. – 288 с.
29. Запицкий В. П. Сапропелиты и их генезис. – Киев: Наукова думка, 1961. – 184 с.
30. Геология и геохимия нефти и газа / Под ред. Карцева А. А. – М.: Недра, 1982. – 408 с.
31. Конторович А. Э. Геохимия органического в осадочном процессе. – Новосибирск: Наука, 1984. – 240.
32. Фомин А. Н. Каустобиолиты: генезис и классификация. – М.: Недра, 1992. – 216 с.
33. Organic Geochemistry / Ed. By M. Engel, S. Macko. – N.Y.: Plenum Press, 1993. – 861 p.
34. Coal and Coalbed Gas / Ed. by R. Flores. – Amsterdam: Elsevier, 2014. – 728 p.
35. Дистанов Э. Г. Сапропелитовые угли СССР. – М.: Недра, 1965. -192 с.
36. Organic Matter in Sedimentary Basins / Ed. by K. H. Wolf. – Amsterdam: Elsevier, 1976. – 376 p.
37. Coal Petrology / Ed. by E. Stach. – Berlin: Gebruder Borntraeger, 1982. -535 p.
38. Корде В.И. О номенклатуре и типологии сапропелевых отложений // Тр. лаб. сапропелевых отложений. Вып.6. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 5-33.
39. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Гуминовые кислоты и их роль в природе. – М.: МГУ, 1986. -325 с.

40. Головацкая И.Ф., Карнаухов В.Н. Биологически активные вещества сапропелей и их использование. – Томск: Изд-во ТГУ, 2005. – 180 с.
41. Кузнецов В.В., Дмитриев Е.А. Сапропель как комплексное органоминеральное удобрение. – СПб.: Лань, 2012. – 144 с.
42. Stevenson F.J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. – 2nd ed. – Wiley, 1994. – 512 p.
43. Yang H., et al. Structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides from sapropel // Carbohydrate Polymers. – 2018. – Vol. 192. – P.140-148.
44. Klavins M. et al. Sapropel as a natural resource: Bioactive compounds and functional properties // Science of The Total Environment. – 2020.- Vol. 722 – P. 137742-137750.
45. Pankratov D.A. et al. Amino acid composition of sapropelic organic matter // Molecules. – 2021. – Vol. 26(5). – P. 1285-1295.
46. Klavins M. Lipids in Sapropelic Systems. 2022.
47. Journal of Paleolimnology. DOI:10.1007/s10933-023-00294-9.
48. Zha X. et al. Enzyme stabilization in sapropel-based nanomaterials // International Journal of Biological Macromolecules. – 2022. – Vol. 209. – P. 1751-1760.
49. Egorova N.A. Geochemical features of vitamin accumulation in sapropels // Geochemistry. – 2023. – Vol. 83(1). – P. 125-134.
50. Liu Y. et al. Antimicrobial peptides from sapropelic communities // Algal Research. – 2023. – Vol. 70. – P. 102988-102995.
51. Kask K., Truu J., Oopkaup K., et al. Selenium-rich sapropel as a novel fertilizer: // Environmental Technology. – 2024. – Vol. 45(3). – P. 1-12. DOI:10.1080/09593330.2024.2311287.
52. Muller R. et al. Bioavailability of amino acids in sapropel-humic complexes // Journal of Agricultural Chemistry. – 2023. – Vol. 71(8). – P. 1755-1765.
53. Johansson C. Nanoparticle-mediated enzyme delivery // Advanced Materials. – 2023. – Vol. 35(12). – P. 2205110.

54. Santos P. et al. Seasonal dynamics of aromatic amino acids in sapropel // *Organic Geochemistry*. – 2024. – Vol. 178. – P. 102990-102998.
55. Liu Y., et. al. (2023). *Bioactive silver nanoparticles in sapropel: Natural synthesis and antimicrobial properties*. *Algal Research*, 70, 102988-102995. DOI: 10.1016/j.algal.2023.102988.
56. Yang H., et al. (2018). *Boron speciation in sapropelic organic matter*. *Chemical Geology*, 483, 56-63. DOI.: 10.1016/j.chemgeo.2018.02.018.
57. Kask K., et al. (2024). *Iodine-rich sapropel as potential dietary supplement*. *Environmental Technology*, 45(3), 1-12. DOI: 10.1080/09593330.2024.2311287.
58. Kask K., et al., 2024. *Barium cycling in sapropelic ecosystems*. *Environmental Scientific Technology*. DOI: 10.1021/acs.est.4c01234.
59. Liu Y., et al., 2023. *Bromine speciation in organic-rich sediments*. *Chemosphere*, 330, 138712. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138712.
60. Santos P. et al., 2024. *Ultra-trace analysis of Be in organic matrices*. *J. Hazard. Mater.*, 465, 133411. DOI.: 10.1016/j.jhazmat.2023.133411.
61. Pankratov D.A., et al. (2021). *Transition metals in sapropelic humic complexes*. *Molecules*, 25(5), 1289. DOI.: 10.3390/molecules26051289.
62. Марри Р. и др. Биохимия человека – М.: Бином, 2009, - 451 с.
63. Скальный А.В. Биоэлементы в медицине – М.: ОНИКС, 2004, - 272 с.
64. Linder M.C. *Biochemistry of the Essential Ultratrace Elements* – NY: Plenum Press, 1991, - 466 p.
65. Bowen H.J.M. *Environmental Chemistry of the Elements* – London: Academic Press, 1979. – 333 p.
66. Ермаков В.В. Биологическая роль микроэлементов – СПб: Наука, 2013, - 423 с.
67. Kuznetsova A.V. et al. (2023). *Biogeochemistry of Magnesium in Sapropelic Sediments*. *Geoderma*, Vol.429, 116245. DOI.: 10.1016/j.geoderma.2023.116245

68. Zha X., et al. (2022). *Biogenic silica from sapropel: Extraction and application*. *Macromolecules*, 209, 1751-1760. DOI.: 10.1016/j.ijbiomac.2022.04.158.
69. Овчаров К.Е. Минеральное питание растений – М.: Колос, 2010, - 328 с.
70. Школьник М.Я. Микроэлементы в жизни растений - Л.: Наука, 1989, - 279 с.
71. Egorova et al., 2023. *Low-molecular-weight organic acids in sapropel*. *Geochemistry*, 83(1), 125-143.
72. Perminova I.V. et al., (2001) *Madicinal Chemistry of Humic Substances*.
73. Ghasemi Y. et al. (2009) *Antibacterial and Antifungal Activity of Cyanobacteria*
74. Домрачева Л.И. и др. (2018). Биологически активные вещества сапропеля
75. Пивненко Т.В., Хамидулина Л.Ф. Исследование биологически активных веществ сапропеля озер Кировской области. *Вестник ВГУ, серия: Химия, Биология, Фармация*.
76. Дрозд М. Н., Усевич В. М. Сравнительная оценка эффективности кормовых добавок на основе торфо-сапропелевого концентрата при выращивании бройлеров //Аграрный вестник Урала, 2023, № 07 (236). С. 83-92.
77. Dedysh S.N., et al. (2020). *Microbial life in the peatlands of Western Siberia*. *Microbiology*. 89(5), 503-515.
78. Thauer R.K., et al. (2008). *Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation*. *Nature Reviews Microbiology*, 6(8), 579-591.
79. Baldrian P. (2017). *Forest microbiome: diversity, complexity and dynamics*. *FEMS Microbiology Reviews*, 41(2), 109-130.
80. Smol J.P., Stoermer E.F. (2010). *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press/
81. Wang B., et al. (2019). *Microalgae as a feedstock for biofuel production: current status and future prospects*. *Biotechnology Advances*, 37(7), 107421
82. Paerl H.W. et al. (2016). CyanoHABs: evolving global environmental and social challenges. *Environmental Microbiology*. 18(8), 2395-2410.

83. Sommer U., et al. (2012). *Plankton Ecology: Succession in Plankton Communities*. Springer Science & Business Media.
84. Palmer M.A., et al. (2015). *Ecology and management of stream macroinvertebrates*. *Freshwater Science*, 34(1), 1-15.
85. Keddy P.A. (2010). *Wetland Ecology: Principles and Conservation*. Cambridge University Press.
86. Foissner W., Berger H. (2021). *Soil Protozoa as Bioindicators: Practical Methods for Soil Ecosystems*. Springer.
87. Stevenson F.J. (2022). *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. John Wiley & Sons.
88. Schlesinger W.H., Bernhardt E.S. (2020). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Academic Press.
89. Israelachvili J.N. (2011). *Intermolecular and Surface Forces*. Academic Press.
90. Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. – Институт водных проблем РАН. – М.: Наука, 2010. – 243 с.
91. Кравченко И.К., Сиринов А.А. Активность и метаболический контроль образования метана в глубоких слоях торфа бореальных болот // Микробиология, 2007. (DOI): 10.1134/S0026261707060203.
92. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и их роль в плодородии. – М.: МГУ, 2017.
93. Петров К.Г. Агрохимия сапропелевых удобрений. – СПб.: Профи-Инфо, 2020.
94. Smith J. et al. Impact of sapropel on soil microbiome // *Applied Soil Ecology*. – 2021. – Vol. 158.
95. Данные ВНИИ агрохимии, 2022.
96. Иванов Л.П. Эффективность сапропеля в овощеводстве. – М.: Росинформагротех, 2019.
97. ГОСТ Р 54221-2021. Сапропель для кормовых целей.

98. Кузьмин В.А. Сорбционные свойства сапропеля. – Новосибирск: СО РАН, 2018.
99. Патент RU 2656789 Способ производства строительных блоков из сапропеля.
100. Рекомендации Минздрава РФ № 45-р/2020 по использованию лечебных грязей.
101. Environmental Science and Technology, 2023
102. Леонтьев Д.С., Семененко А.Ф. К вопросу о перспективах применения сапропелевых растворов при бурении и ремонте нефтяных и газовых скважин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. №6. 2024. С.115-126. DOI: 10.31660/0445-0108-2024-6-115-126
103. Лейбович Р.Е. Химия и технология буровых растворов
104. Тюльпанов В.В. Сапропели и их комплексное использование. – Л.: Недра, 1980.
105. ГОСТ Р 54000-2010. «Удобрения органические на основе сапропеля. Технические условия».
106. Классификация сапропелей и сапропелевых отложений. Методические указания. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1987.
107. Драчев С.М. Пресноводные сапропели и их использование в сельском хозяйстве. – М.: АН СССР, 1955.
108. Куренин М.М. Сапропель – ценное органическое удобрение // Агрохимический вестник. – 2004. - №3. С.28-29.
109. Тюльпанов В.В. Сапропели и их комплексное применение. – Л.: Недра, 1980. – 247 с.
110. Инструкция по разведке и геолого-экономической оценке месторождений сапропеля. – М.: Недра, 1984.
111. Драчев С.М. Пресноводные сапропели и их использование в сельском хозяйстве. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 199 с.

112. Курс технологии сапропеля / Под ред. А.М. Абрамовича. – Минск: Наука и техника, 1981.
113. ГОСТ Р 54000-2010. «Удобрения органические на основе сапропеля. Технические условия».
114. Добрецов. В.Б. Сапропели России. Освоение, использование, экология. – СПб.: ГИОРД, 2005. С.10, 78, 108.
115. Лопотко М. З. Сапропели БССР, их добыча и использование. Минск, Изд. Наука и техника, 1974. С.39
116. Косаревич И. В. Структурообразование в дисперсиях сапропелей. Минск. : Навука и тэхніка, 1990. С.114.
117. Косаревич И. В., Ляшевич В. В. Структурно-реологические свойства сапропелей различной глубины залегания // Каустоболиты и экология / Институт торфа АН ССР, Минск, 1989.
118. Лиштван И. И., Волков Г. Г. Влияние температуры на структуро-образование сапропелей текучей консистенции. Вестн АН БССР, сер ХІІ навук, 1978 №4, стр.59-62.
119. Патент RU №2256035. Устройство для очистки водоемов и добычи сапропеля. Дата публикации 2005.07.10. Аносов В.С, Лебедев А.В., Ильющенко Г.И., Ильющенко В.Ю., Чернявец В.В., Федоров А.А., Полозов О.Е.
120. Патент RU №2233821.Комплекс для добычи и переработки сапропеля. Дата публикации 2004.09.27. Тарасов Ю.Д., Рыжих А.Б., Прялухин А.Ф.
121. Арефьев Н. Н. Земснаряды с шнековыми нагнетателями для добычи сапропелей из открытых водоемов. ГИАБ. 2006
122. Арефьев Н. Н., Согин А. В., Тарасов А. В. Новые способы и средства повышения консистенции засасываемой земснарядом водогрунтовой смеси. ГИАБ. 2006.

123. Арефьев Н. Н. Новые средства для добычи и транспортирования сапропелей. Отдельный выпуск ГИАБ. Гидромеханизация - 2009. – М.: Издательство ГОРНАЯ КНИГА, 2009, С.175-181.
124. Арефьев Н. Н. Новые конструкции технологического оборудования плавучих установок для очистки водоемов. Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации, № 2 (10), 2013, с.186-200.
125. Дементьев В. А. Применение пневматических камерных насосов (ПКН) фирмы Pneuma (Италия) при добыче сапропелей. Материалы международной научно - практической конференции « Сапропель и продукты его переработки». - Омск: ОМГАУ, 2008. С.55-57.
126. Дементьев В. А. Применение пневматических камерных насосов (ПКН) фирмы Pneuma (Италия) при добыче сапропелей. Горный информационно- аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. Отдельный выпуск №1. С.256-262
127. Ялтанец И. М., Дементьев В. А. Устройство глубоководной разработки несвязных полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. Отдельный выпуск №1. С.129-144.
128. Дементьев В.А. Эксплуатация обводненных месторождений / Под ред. Ялтанца И.М. – М.: Издательство «Горная книга», 2010, с.170 -176.
129. Патент № 2348762 Российская Федерация, МПК E02F 5/28, 3/92. Устройство для очистки водоёмов от илистых отложений и добычи сапропеля (варианты): №2007124381/03: заявл. 29.06.2007: опубл. 10.03.2009 / В. А. Дементьев – с. 11.
130. Дементьев В. А. Способы и средства добычи сапропелей естественной влажности. Горный информационно - аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. №1. С.24-28.

131. **Патент № 2745146 Российская Федерация, МПК E02F 5/28. Устройство для очистки водоемов от илистых отложений и добычи сапропеля естественной влажности: №2020133942: заявл. 15.10.2020: опубл. 22.03.2021/В. А. Дементьев - с.16.**
132. Вебсайт www.kamimtex.com, ООО «Камимтех».
133. Вебсайт www.pumpunion.ru , ООО «ПампЮнион».
134. ГОСТ7669-80. Канат двойной свивки типа ЛК-РО.
135. ПБ 03-553-03. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом.
136. ГОСТ Р54435-2011/EN1492-1:2000. Лебедки. Требования безопасности.
137. ГОСТ 33710-2015 Краны грузоподъемные. Выбор канатов, барабанов и блоков.
138. Нурок Г.А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ. М., Недра, 1985.
139. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Под редакцией Штейнберга М.О. – М.: Машиностроение. 1992.
140. Харин А.И., Новиков М.Ф. Гидромеханизация земляных работ в строительстве. М.: Стройиздат, 1989.
141. E. Buckingham. On Plastic Flow through Capillary Tubes. Processing of the American Society for Testing and Materials, Vol. 21, 1921, pp.1154-1156.
142. R. Rarby. Hydraulics of Piping System: Non-Newtonian Fluids. Chemical Engineering Fluid Mechanics, 2001.
143. Штин С.М. Озерные сапропели и их комплексное освоение / Под редакцией Ялтанца И.М. – М.: издательство МГГУ, 2005. С.140,374.
144. A.A.Aleksandrov, M.S.Trakhtengerts, Viscosity of water at temperatures of –20 to 150°C// Journal of engineering physics, 2004. DOI:10.1007/BF00864022
145. **Дементьев В.А., Штин С.М. Промышленная добыча сапропеля уже в России // Гидротехника. 2019. № 1(54), с. 16–18.**

146. Дементьев В.А., Штин С.М. Проект по добыче и производству торфо-сапропелевого органического удобрения мощностью 20 000 тонн в год с влажностью $60 \pm 5\%$ // Ежегодный справочник Агробизнескарта. 2019. №12, с. 11-12.
147. Ялтанец И.М., Дементьев В.А. Перспективность сапропелевой индустрии России и её технологическая основа // Гидротехническое строительство. 2020. №10. С.39-45.
148. Пономарев С.В., Мищенко С.В., Дивин А. Г. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений. Книга 2. Изд-во ТГТУ, 2006.
149. Некрасов Б.В. Явление тиксотропии в глинистых грунтах // Известия Научно-экспериментального мерзлотного института. – 1928. – Т.VI. С. 5-42.
150. Некрасов Б.В. Тиксотропия глинистых грунтов. – М.: Изд-во АН СССР, 1940. С.100.
151. Ewing, J.A. Experimental Researches in Magnetism //Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1885.
152. Emich, F. Microchemical Laboratory Manual // New York: J. Wiley & Sons, 1932.
www.archive.org.
153. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1990.
154. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.
155. Какитис А. Реологические свойства сапропеля / Восстановление озер и искусственных водоемов / Материалы международной конференции. Каунас Академия Литвы, 1997. С.72-75.
156. Какитис А. Энергосберегающая технология добычи сапропеля. Автореферат диссертации на соискание степени доктора технических наук. Латышский сельскохозяйственный университет. Елгава, 1999.
157. Воронов Г.А., Якубов А.С., Зеляев В.Д. Гидротранспорт грунтов и полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. С.280.

158. Григорьев В.П., Козловский А.С. Исследование реологических характеристик сапропелевых пульп для проектирования систем гидротранспорта // Вестник МГСУ. – 2015. №10. С.114-123.
159. Карелин В.Я., Новиков Б.Е. Гидравлика транспортирующих установок. – М.: Стройиздат, 1976.
160. Петренко В.И., Семенов В.Г. Особенности гидротранспортирования сапропеля на малые расстояния // Механизация строительства. 2008. №5. С.25-27.
161. Отчеты ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Рекомендации по проектированию сооружений гидромеханизации. – Л., 1985.
162. Кнороз В.С. Расчеты гидротранспорта. – Л.: Стройиздат, 1980.
163. Krieger, I. M., & Dougherty. A Mechanism for Non-Newtonian Flow in Suspensions of Rigid Spheres // Transactions of the Society of Rheology, № 3(1), 1959. С.137-152.
164. Mewis, J., & Wagner, N. J. Colloidal Suspension Rheology. Cambridge University Press. 2012.
165. ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
166. Влияние дноуглубительных работ на водные экосистемы: обзор / Под. Ред. Корнеева К.Н. – СПб.: Гидрометеиздат, 2018. С.245.
167. Erftemeijer, P.L.A., & Lewis, R.R.R. (2006). Environmental impacts of dredging on seagrasses: A review. Marine Pollution Bulletin, 52(12), 1553-1572.
168. Сидоров А.В., Орлова М.П. Экологические аспекты добычи сапропеля / Водные ресурсы. -2020. Т. 47, №5. С. 546-578.
169. Smith, V.H., & Schindler, D.W. (2009). Eutrophication science: where do we go from here? Trends in Ecology & Evolution, 24(4), С.201-207.
170. Newcombe, C.P., & Jensen, J.O. (1996). Channel suspended sediment and fisheries: a synthesis for quantitative assessment of risk and impact. North American Journal of Fisheries Management, 16(4), 693-727.

171. Петров И. С. Оценка воздействия шламонакопителей на окружающую среду // Экология промышленного производства. – 2019. №3. С.45–52.
172. Bolam, S.G., & Rees, H.L. (2003). Minimizing impacts of maintenance dredger material disposal in the coastal environment: A habitat approach. *Environmental Management*, 32(2), 171-188.
173. Сущеня Л.М., Галковская Г.А. Влияние взвешенных веществ на гидробионтов. - Минск: БГУ, 2015. С.180.
174. IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changes*. Cambridge University Press.
175. Комаров В.Г. Технологические потери при гидромеханизированной добыче полезных ископаемых. – М.: Недра. 2012. С.198.
176. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (ИТС 16-2016). Добыча и обогащение полезных ископаемых.- М.: Бюро НДТ, 2016.
177. Никитин П.Д. Механические способы добычи подводных грунтов / Судостроение. – Л.: 1988. С.264.
178. Cooper, K/M., & Barry, J. (2017). A big data approach to macrofaunal baseline assessment, monitoring and sustainable exploitation of the seabed. *Scientific Reports*, 7, 12431.
179. Сапропель как объект рационального природопользования / Отв. ред. Остроумов С.А. -М.: ЛЕНАНД, 2021. С.320.
180. Справочник по сапропелю / Под ред. В.С. Жукова. – Минск: Белорусская наука, 2018. – 456 с.
181. Stevenson, F.J. (1994). *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. 2nd ed. John Wiley & Sons.
182. Новикова Т.К., Леонтьев А.Б. Исследование потерь органического вещества при гидравлической добыче сапропеля // Химия твердого топлива. – 2019. – № 4. – С. 67-73.

183. Orlov, D.S. (1985). Humus Acids of Soils. Russian Translations Series, A.A. Balkema.
184. Фомина Л.А., Буторина Н.П. изменение биохимического состава сапропеля при его складировании в накопителях // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2019. №2 (46). С.156-170.
185. Распопов В.В. Сапропели и их комплексное использование. – М.: Наука, 2015. – 312 с.
186. Губарев И.М., Сазонова Т.П. Микробиологическая деструкция органического вещества сапропеля в условиях техногенного воздействия // Почвоведение. 2017. №7. С.843-851.
187. Гриневич С.Р., Сидоренко В.И., Топоров А.А. Влияние технологии добычи на качество сапропелевых удобрений // Агрохимия. 2018. №4. С.45-52.
188. Лепешкин А. В., Орлов Д.С. Эколого-экономическая эффективность различных способов добычи сапропеля // Рациональное природопользование и экология. Сборник материалов международной научно-практической конференции. 2020.
189. Фролов Ю. Г. Коллоидная химия природных дисперсных систем . – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. – 348 с.
190. Соколов Г. И. Влияние способа добычи на гранулометрию сапропеля // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2021. - № 5. - С. 89-97.
191. Вершинин М. П. и др. Агрохимическая оценка сапропелей различных месторождений. – М.: Росинформагротех, 2016. – 112 с.
192. 8. Hayes, M.H.B., & Swift, R.S. (2020). Vindication of Humic Substances as a Key Component of Organic Matter in Soil and Water. Advances in Agronomy, 163, 1-37.
193. Григорьев Л. А. Микробиология и биохимия сапропелей. – Новосибирск: Наука, 2012. – 200 с.
194. Стандартизация и сертификация сапропелевой продукции / Отв. ред. И.Л. Марченко. – СПб.: Профессия, 2020. – 176 с.

195. Рынок сапропеля и продуктов его переработки: мировой и российский опыт / Аналитический отчет. – М.: НИИ «Экотоп», 2022. – 95 с.
196. Орлов Д. С., Шильников И. А. Сапропели и сапропелевые отложения: генезис, состав, свойства и использование. – М.: Наука, 1984. С.256.
197. Добровольский Г. В., Урусевская И. С. География почв: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 1984. С.416.
198. Классен П. В., Гришаев И. Г. Основы техники гранулирования (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии).-М., Химия, 1982. С.118-127.
199. Орлов Н. В. Реологические свойства гуминовых систем и их значение для мелиорации // Гуминовые вещества в биосфере: Сб. науч. тр. – М.: Наука, 1985. С.89-101.
200. Касатиков В. А., Бурыкина А. С. Эффективность органоминеральных удобрений на основе сапропеля и торфа // Агрохимический вестник. – 200. №4. С.20-21.
201. Борисов Б. А., Кудеянов В. Р. Технологические аспекты переработки сапропеля с использованием торфа-наполнителя // Химия в сельском хозяйстве. – 1998. Т.36, №5. С.34-38.
202. Stevenson F. J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. – 2nd ed. – New York^ John Wiley & Sons, 1994. – 496 p.
203. Минеев В. Г. Практикум по агрохимии. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2004. С.720.
204. Кидин В. В., Кудеянов В. Р. Агрохимия органоминеральных удобрений пролонгированного действия. -М.: Изд-во МСХА, 1999. С.186.
205. Бердюгин В. П., Фомина Н. В. Биологическая активность органоминеральных компостов на основе сапропеля // Агрохимия. 2008. №12. С.45-52.

206. Тюльпанов В. В., Орлов Д. С., Попов П. Д. и др. Исследования по использованию сапропелей в сельском хозяйстве. - Ленинград.: Гидрометеиздат, 1978. С.167.
207. Чернов В. А., Сизов А. П. Торфяные ресурсы и их рациональное использование. -М.: Недра, 1987. С.302.
208. Соколов О. А., Воинов П. Д. Технология получения и применения органоминеральных удобрений из сапропеля // Вестник РАСХНИЛ. 2005. №6. С.58-61.
209. Léon W. NITIEMA^{1*}, Fousséni TRAORE¹, Karim NEBIE¹, Romain W. SOALLA¹, Théodore Y. OUEDRAOGO¹, Bassirou S. SANON¹, Korodjouma OUATTARA. Effet du fertilisant minéral NPK et du biofertilisant BioDeposit® sur les insectes ravageurs et les maladies du niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp.) au centre-ouest du Burkina Faso. Original submitted in on 5th August 2019. Published online at www.m.elewa.org/journals/ on 30th November 2019. <https://dx.doi.org/10.4314/jab.v143i1.4>
210. Development Challenges, South-South Solutions: March 2014 Issue / e-newsletter of the United Nations Office for South-South Cooperation in UNDP. <http://fr.slideshare.net/DavidSouth1/development-challenges-march-2014-published-44135069>
211. Дементьев В. А. Применение пневматических камерных насосов (ПК) фирмы Pneuma (Италия) при добыче сапропелей // Материалы международной научно-практической конференции «Сапропель и продукты его переработки». – Омск: ОМГАУ, 2008. С.55-57.
212. Патент № 2336253 Российская Федерация, МПК C05F 7/00. Способ получения сапропелевого удобрения: № 2007105818/12: заявл. 16.02.2007: публ. 20.10.2008 / В. А. Дементьев, А. И. Маклаков; патентообладатель В. А. Дементьев - с. 5.
213. Патент № 2407724 Российская Федерация, МПК C05F 7/00. Продукт для улучшения свойств почвы: №2009120867/21: заявл. 02.06.2009: опубл.

27.12.2010 / В. А. Дементьев, А. И. Маклаков; патентообладатель В. А. Дементьев - с. 9.

- 214. Тюлин А.Ф. Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. М.,1965.
- 215. Six, J. Elliott, E.T., & Paustian, K. (2000). Soil macroaggregates turnover and microaggregate formation/ Soil Biology and Biochemistry.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Акт (справка) о внедрении результатов докторской диссертации

Утверждаю

Генеральный директор ООО «Эковит»

Большаков В.Ю.

Дата «15 декабря 2024 г.



АКТ (СПРАВКА)

о внедрении результатов

докторской диссертации

Дементьева Владимира Александровича

по научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Настоящим актом (справкой) подтверждается, что результаты диссертационной работы на тему «Обоснование геотехнологии добычи сапропелей естественной влажности погружными грунтозаборными камерными комплексами» использованы в производственном процессе деятельности ООО «Эковит» на операциях по добыче сапропеля на озере Савельево и производству торфо-сапропелевых смесей. Перечень результатов, внедренных на предприятии:

- Погружной грунтозаборный камерный комплекс со встроенным эксцентриковым винтовым насосом обеспечивает выемку сапропеля естественной влажности и его транспортировку по напорному трубопроводу в береговой накопительный бункер без возвратной воды.
- Смешивание сапропеля естественной влажности $84\div 97\%$ с измельчённым, сухим, стерилизованным торфом влажностью $24\div 28\%$ при непрерывной дозированной подаче обоих компонентов в смеситель непрерывного действия, позволили получить на выходе из смесителя в непрерывном потоке торфо-сапропелевую смесь с влажностью $60\pm 5\%$, готовую к применению.

Генеральный директор ООО
«Эковит»

Большаков В.Ю.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

Техническое задание на разработку программного обеспечения

Техническое задание № 2024/03-ТР от 10.12.2024

на разработку ПО выемки сапропелей естественной влажности

1. Общее описание

Написать ПО, которое сделает возможным расчёт и визуализацию процесса выемки сапропеля по данному уравнению:

$$Q^{\text{ободт}} = Q^{\text{ободв}} + S^{\text{пут}} \cdot L^{\text{пут}} = \frac{\pi(h_{\text{покр}}^7 - h_{\text{нед}}^7)}{7n_{\text{сс}}^2} + \frac{(h_{\text{покр}}^4 - h_{\text{нед}}^4) L^{\text{пут}}}{2n_{\text{сс}}}$$

Значения переменных (параметров), использованных в уравнении, приведены в Таблице:

№	Обозначение параметра	Название параметра	Ед. измерения	Обознач. Ед. изм.	Возможный интервал значений
1	$Q^{\text{ободт}}$	Оптимально безопасный объём депрессионной траншеи, (м ³)	Метр кубический	М ³	0 - 10000
2	$Q^{\text{ободв}}$	Оптимально безопасный объём депрессионной воронки, (м ³)	Метр кубический	М ³	0-1000
3	$S^{\text{пут}}$	Площадь вертикального сечения по x-y прямолинейного участка траншеи	Метр квадратный	М ²	0-50
4	$h_{\text{покр}} = y$	мощность покрывающего слоя сапропеля над погружной камерой (над ГЗУ), (м)	Метр	М	1 – 150
5	$h_{\text{нед}}$	мощность недобранного (защитного) слоя сапропеля над погружной камерой, (м)	Метр	М	1 – 10
6	$h_{\text{прос}}$	глубина проседания кровли воронки	метр	м	0-140

7	$n_{\text{ссс}}$	коэффициент структурного сопротивления сдвига сапропеля	-	-	5 – 600
8	π	число Пи	-	-	3,14
9	$L^{\text{пут}}$	Длина прямолинейного участка траншеи	метр	м	0-200

2. Основные принципы и требования для ПО:

2.1. ПО позволяет задать значения параметров № 4,5,7,9 в пределах заданных интервалов

2.2. ПО производит расчет функции (см. уравнение выше) используя заданные значения параметров

2.3. ПО позволяет выбрать один из параметров № 4,5,7,9, задать начальное значение, конечное значение и шаг для вычисления зависимости функции от исследуемых параметров

2.4. ПО расчет таблицы значений функции в зависимости от исследуемого параметра

2.5. На основе таблицы ПО строит двухмерный график зависимости функции от исследуемого параметра

2.6. ПО графически отображает в виде 3D модели объёмы выемки в параметрах № 1, 2,3,9

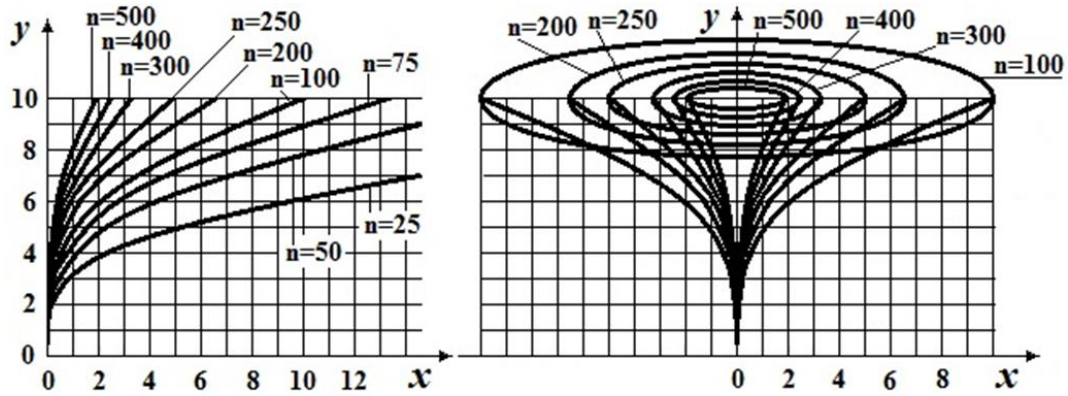
2.7. ПО графически отображает в 3D-изображении все этапы формирования выемки, включая:

2.7.1. точку 0 (ноль) в 3х мерных осях координат, как точку отсчета по трем осям (или точку погружения ГЗУ (грунто-заборного устройства) или ПГК (погружной грунто-заборный комплекс), которая первично располагается в крыше залежи

2.7.2. глубина погружения этой точки в толщу сапропеля соответствует значению параметра № 4 мощности покрывающего слоя $h_{\text{покр}}$ по оси y

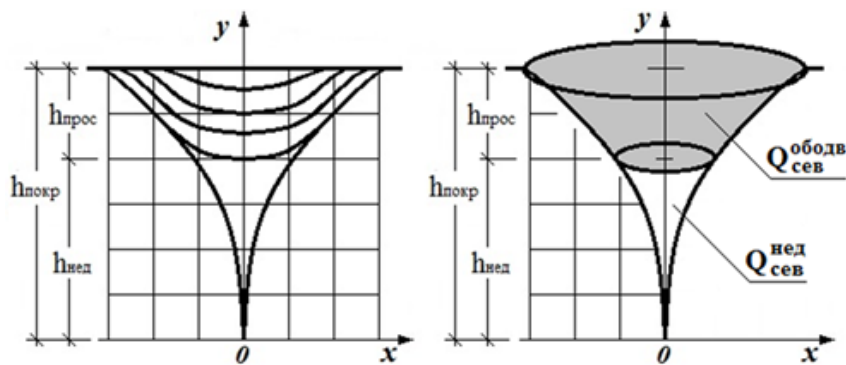
2.7.3. параметры № 4,7 являются первичными для построения идеальной депрессионной воронки, которая рассчитывается по формуле

$$Q_{идв} = \pi \int_0^h x^2 dy = \pi \int_0^h \left(\frac{y^3}{n_{ccc}} \right)^2 dy = \frac{\pi \cdot h_{покр}^7}{7n_{ccc}^2}$$



2.7.4. после введения параметра №5 $h_{нед}$ как величины недобора, на 3D-изображении идеальной воронки должна появиться выделенная цветом верхняя часть объёма воронки как параметр № 2 ($Q_{ободв}$) оптимально безопасный объём воронки, который рассчитывается по формуле

$$Q_{ободв} = \frac{\pi(h_{покр}^7 - h_{нед}^7)}{7n_{ccc}^2}$$

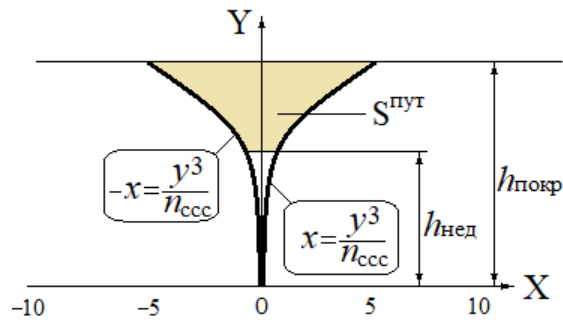


2.7.5. наведя курсор мышки в точку ноль (0) и перемещая его влево по оси Z мы начинаем создавать траншею над осью Z, как бы раздвигая воронку на две половинки на расстояние равное параметру №9 $L_{пут}$

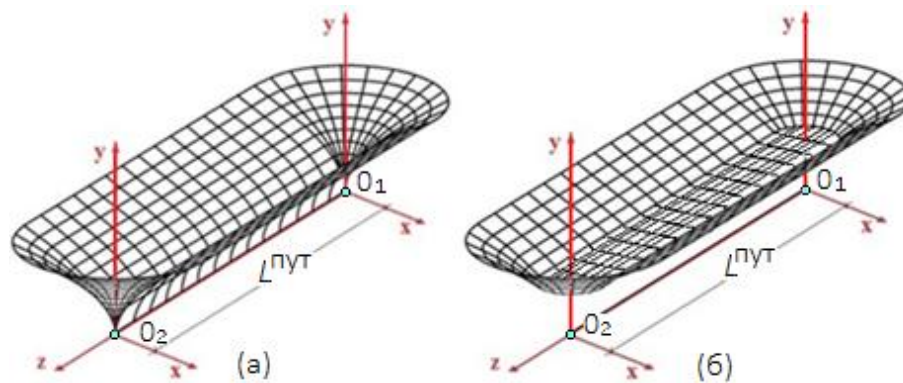
Тогда объём прямого участка траншеи определится формулой

$$S_{пут} \cdot L_{пут} = \frac{(h_{покр}^4 - h_{нед}^4) L_{пут}}{2n_{ccc}}$$

Если проведем вертикальное сечение плоскостью через оси x - y то получим площадь сечения верхней окрашенной зоны как параметр № 3 $S^{\text{пут}}$,



2.7.6. Изображение траншеи после перемещения курсора из точки O_1 в точку O_2 примет следующий вид, где на виде (б) выделен оптимально безопасный объем траншеи как параметр №1 $Q^{\text{ободт}}$ вычисленный по формуле, приведенной в начале ТЗ



3. 3D-изображения должны быть интерактивными, с возможностью увеличения и уменьшения масштаба, вращением вокруг вертикальной оси y на 360 градусов, и обзором воронки сверху и снизу, выделения указанных объёмов и отображения дополнительных данных при наведении курсора.

4. Пользовательский интерфейс:

- Программа должна обладать интуитивно понятным графическим интерфейсом пользователя (GUI), который позволяет легко загружать данные, настраивать параметры визуализации и сохранять результаты, делать снимки с экрана или сохранять выделенные изображения в виде отдельных файлов в формате, совместимом для переноса изображений в текстовые документы в Word

5. Технические требования

- Программа должна быть разработана в среде MATLAB версии R2023a или выше. Или в другой среде, обеспечивающей предъявляемые требования.
- Программа должна быть совместима с операционными системами Windows.
- Исходный код программы должен быть хорошо документирован.

6. Сроки выполнения

- Разработка прототипа программы: до 1 месяца.
- Тестирование и доработка: 2 недели.
- Финальная версия программы: 1.5 месяца от начала работы.

7. Тестирование и приёмка

Программа должна пройти тестирование на корректность обработки и визуализации данных. Заказчик проведет приемочные испытания и утвердит окончательную версию программы.

ТЗ разработал

Дементьев Владимир Александрович, к.т.н.

vladementjev@mail.ru

+7 915 707 6823 (Telegram)

ПРИЛОЖЕНИЕ В.

Техническое задание на разработку программного обеспечения

Техническое задание v0.03

Версия – Дата изменений – Автор изменений – Описание Изменений

v0.01 – 09.01.2022 – Евгений Евдокимов

Сокращения

ПО – программное обеспечение

ПК – персональный компьютер

ОС – операционная система

MS – Microsoft

Общее описание

Написать ПО, которое сделает возможным расчет данной формулы:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \tau_{\infty}}{\mu_{p\infty} \cdot (3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{A \cdot m}{2+m} - \frac{2 \cdot A^2 (m+A)}{(2+m)(1+m)} \right], \text{ где } m = l/n \quad A = \frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta p}$$

Значение переменных (параметров), использованных в функции, приведено в таблице переменных:

№	Название параметра	Обозначение параметра	Единица измерения	Обозначение единицы измерения	Возможный интервал значений
1.	Поток (расход) жидкости	Q	Метр кубический в секунду	м ³ /с	0,001
2.	Число Пи	π	---	---	3.14
3.	коэффициент нелинейности содержания органики	n	---	---	0,01
4.	Безразмерный коэф. содержания твердого	k	---	---	0,01
5.	Пластическая вязкость	$\mu_{p\infty}$	Паскаль в секунду	Па с	1,0

6.	Радиус трубопровода	R	метр	М	0,10
7.	Длина трубы	l	метр	М	(1,0)
8.	Падение давления на длине l	Δp	паскаль	Па	1,0
9.	Напряжение сдвига динамическое	τ_{∞}	Паскаль	Па	1,0
10.	Напряжение сдвига пластическое	τ_0	Паскаль	Па	1,0

Функциональность ПО

Ниже описаны основные принципы и требования для работы ПО:

- ПО позволяет задать значение параметров № 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 (см. таблицу выше) в пределах заданных интервалов.
- ПО производит расчет функции (см. формулу выше), используя заданные значения параметров.
- ПО позволяет выбрать один из параметров № 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 или 10, задать начальное значение, конечное значение и шаг для вычисления зависимости функции от исследуемого параметра.
- ПО производит расчет таблицы значений функции в зависимости от исследуемого параметра.
- На основе таблицы ПО строит двухмерный график зависимости функции от исследуемого параметра.

Предлагаемое решение

Для решения тех. задания предлагается использовать MS Excel + MS Visual Basic.

Плюсы:

- экстремальная простота написания соответствует простоте тех. задания.
- легкая модификации ПО. Возможно без использования услуг квалифицированного программиста. Для многих модификаций достаточно хорошего понимания пакета MS Excel.
- отсутствие программного кода, отдельного от ПО.
- возможность изменения ПО на любом ПК с установленным пакетом MS Office Excel.
- возможное изменение визуального оформления ПО без изменений программного кода.
- легкий перенос результатов вычислений из данного ПО в приложения пакетов MS Office, OpenOffice и др..

Минусы:

- Обязательное наличие пакета MS Office Excel на ПК.
- Открытость кода. Простота взлома даже при наличии стандартных защит от MS.
- Невозможность коммерческого использования ПО.
- Присутствие в программе "лишних" элементов управления, т.е. элементов пакета MS Excel.

Другие решения

Для решения возможно использовать инструменты (языки программирования) более низкого уровня. Например C++ или JavaSE.

Плюсы:

- закрытость кода.
- Возможное коммерческое использование ПО.
- огромные возможности для программирования.
- отсутствие необходимости использовать платные пакеты приложений, как в случае с MS Excel.
- возможная кроссплатформенность полученного ПО в случае, если это будет необходимо. Т.е. при необходимости можно создать программный код, с помощью которого легко будет скомпилировано ПО, которое можно будет использовать на ПК под управлением ОС, отличных от MS Windows. Например: Linux, MacOS или даже ОС для портативных устройств (например: Symbian, Maemo, Android, Windows Mobile и т.д.)

Минусы:

- Сложность и трудозатраты написания ПО значительно возрастают. Данное увеличение трудозатрат не соответствует поставленной задаче.
- Дальнейшая техническая поддержка, развитие и исправление возможных ошибок ПО будет невозможна без квалифицированного программиста.

ТЗ разработал:

Дементьев Владимир Александрович, к.т.н.

vladementjev@mail.ru

+7 915 707 6823 (Telegram)

ПРИЛОЖЕНИЕ Г.

Патент на изобретение: № 2745146



Приложение Д.
Патент на изобретение: № 2336253



ПРИЛОЖЕНИЕ Е.

Патент на изобретение: № 2407724

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2407724

ПРОДУКТ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВА ПОЧВЫ

Патентообладатель(ли): *Дементьев Владимир Александрович (LV)*

Автор(ы): *Дементьев Владимир Александрович (LV), Маклаков Андрей Игоревич (LV)*

Заявка № 2009120867
Приоритет изобретения 02 июня 2009 г.
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 декабря 2010 г.
Срок действия патента истекает 02 июня 2029 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

 Б.П. Симонов

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.

Патент на изобретение: № 2818871

