

На правах рукописи



Дементьев Владимир Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ
САПРОПЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ
ПОГРУЖНЫМИ ГРУНТОЗАБОРНЫМИ КАМЕРНЫМИ
КОМПЛЕКСАМИ**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2026

Работа выполнена на кафедре геотехнологических способов и физических процессов горного производства ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ)

Научный консультант:	Дробаденко Валерий Павлович , доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ), заслуженный деятель науки РФ.
Официальные оппоненты:	Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич , доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машиностроения» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». Тальгамер Борис Леонидович , доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Разработка месторождений полезных ископаемых» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИРНИТУ). Рахутин Максим Григорьевич , доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Горного оборудования, транспорта и машиностроения» ФГБОУ «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ «МИСИС»).
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «21» октября 2026 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.364.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» по адресу: 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая дом 23 в аудитории 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» и на сайте <http://mgri.ru/>

Автореферат разослан « ____ » июля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



____ И.Н. Салахов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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.

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 объемной концентрацией твердого $2\div 3\%$ в береговые чеки-отстойники, расположенные на больших площадях, где происходит его промораживание и сушка продолжительностью до 10 месяцев и более. 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.

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/м^3 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±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 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_0^t до 600 Па, пластической вязкостью μ_p^t до 50 Па·с и плотностью ρ_c до 1600 кг/м³ с глубины до 40 метров способом скреперной траншеи в объёме до 120 м³/ч, применимые 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 $h_{\text{покp}}$, сопротивлением сдвигу сапропеля в залежи n_{ccc} , 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, ОГГАУ, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы идея и цель исследования; установлены задачи исследования; представлены основные научные положения, их научная новизна, подтверждена достоверность и обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций; указаны исследования, выполненные лично автором, а также практическая значимость, реализация и апробация результатов работы.

В первой главе представлен аналитический обзор результатов исследований, подтверждающих высокий биоэкономический потенциал сапропеля, приведены результаты исследований физико-реологических особенностей сапропеля, влияющие на эффективность его добычи, установлены повышающие температурные коэффициенты для повышения точности инженерных расчётов.

Во второй главе выполнен анализ известных способов и средств добычи сапропеля, показаны их недостатки; представлена патентно-чистая принципиальная схема нового погружного грунтозаборного камерного комплекса (ПГКК) для добычи

сапропеля естественной влажности, обоснованы технические параметры его конструктивных устройств, приведена новая расчётная схема определения гидравлических потерь без учёта критических скоростей, представлены напорно-расходные характеристики эксцентриковых винтовых насосов, рекомендуемых для работы погружного комплекса.

В третьей главе на основании экспериментальных данных построена трехмерная математическая модель геомеханического процесса формирования выемки с учётом реологии структурированного геомассива сапропеля в залежи. Установлены параметры оптимальных объёмов выемки и выполнено математическое обоснование для трех способов разработки залежи по двум критериям: мощности покрывающего слоя и сопротивления сдвигу. Результаты расчётов сведены в график зонирования залежи, являющийся инструментом для выбора оптимального способа добычи сапропеля. Разработаны технологические карты отработки залежи комбинированием указанных способов, минимизирующих негативное воздействие на окружающую среду.

В четвертой главе систематизированы и проанализированы модели течения вязкопластических и тиксотропных сред, оптимизировано уравнение расхода сапропеля естественной влажности в напорном трубопроводе введением эмпирических коэффициентов температурной коррекции, получены кривые зависимостей расхода от реологических параметров сапропеля (вязкости и напряжения сдвига) и технологических (диаметра трубопровода, перепада давления в трубопроводе и его длины). Обоснован низкоскоростной режим транспортирования сапропеля естественной влажности в напорном трубопроводе без учёта критических скоростей и гидравлической крупности. Дана методика определения оптимальных рабочих параметров гидро-транспортирования при работе на сверхмалых скоростях.

В пятой главе предложена методика выбора сапропелевого месторождения для строительства завода по круглогодичному производству торфо-сапропелевых смесей (ТСС) при сезонной добыче сапропеля естественной влажности; приведена технологическая схема ускоренного безотходного производства ТСС, дана экономическая эффективность предложенной технологии.

В шестой главе дана оценка эффективности проведенных автором исследований с учетом энергоэффективности, негативного воздействия на окружающую среду и потребительского качества производимой продукции.

Заключение содержит основные выводы и рекомендации по результатам выполненных исследований. **В приложениях** представлены копии акта внедрения результатов диссертации, техзаданий на разработку программного обеспечения, патентов на изобретения.

На основе выполненных исследований обоснованы научные положения, вынесенные автором на защиту и приведенные ниже.

Первое защищаемое научное положение: 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%.

Предел текучести τ_0 и пластическая вязкость $\mu_{пл}$ являются основными показателями в уравнениях потерь напора и расхода вязкопластических сред, какой является сапропель. На основании полевых исследований по отбору проб из 10 озер в Латвии, Белоруссии и России было установлено, что температура сапропеля в залежи даже в летние месяцы не поднимается выше 4-5°C, а снятие реологических показателей со взятых образцов выполнено в лаборатории при стандартной температуре 20°C. Поэтому возник вопрос несоответствия используемых данных для условий добычи. Анализ исследований влияния температур на изменения реологических свойств органических сапропелей и торфов (Косаревиц, 1990) позволил установить увеличение пластической вязкости $\mu_{пл}$ на 56%, и напряжения сдвига τ_0 на 20% по сравнению с лабораторными показателями, снятыми при 20°C. Эти данные были сведены в таблицу 1 и использованы в практических расчётах.

Таблица 1 - Реологические показатели сапропелей в условиях залежи

№	Название озера	Вязкость, Па с				Напряжение сдвига, Па			
		Пластическая		Динамическая		Статическое		Динамическое	
		20 ⁰ С	4 ⁰ С $k_{\mu}^t=1,56$	20 ⁰ С	4 ⁰ С $k_{\mu}^t=1,56$	20 ⁰ С	4 ⁰ С $k_{\tau}^t=1,2$	20 ⁰ С	4 ⁰ С $k_{\tau}^t=1,2$
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	0,018	0,028	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

Поскольку исследования образцов сапропелей проводятся с помощью реометров при температуре 20°C, полученные результаты лабораторных анализов при расчётах потерь напора и расхода сапропеля для условий добычи необходимо умножать на повышающие температурные коэффициенты: для напряжений сдвига $k_{\tau}^t = 1,2$ и пластической вязкости и $k_{\mu}^t=1,56$.

Второе защищаемое научное положение: *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.*

С учётом опыта эксплуатации камерных устройств автором разработано и

внедрено патентно-чистое устройство в виде погружного грунтозаборного камерного комплекса (ПГКК) со встроенным эксцентриковым винтовым насосом (ЭВН), принципиальная схема которого приведена на рисунке 1 (патент автора на изобретение № 2745146 РФ). Погружная часть комплекса состоит из герметичной камеры 1 и ковша 2, который служит для неё опорным основанием, при этом камера 1 оснащена встроенным эксцентриковым винтовым насосом 3 и соединена с атмосферой и земснарядом транспортным рукавом 4, в котором размещен напорный трубопровод 5, шланги 6 гидравлической станции 8 и электропровод 7 датчика воды.

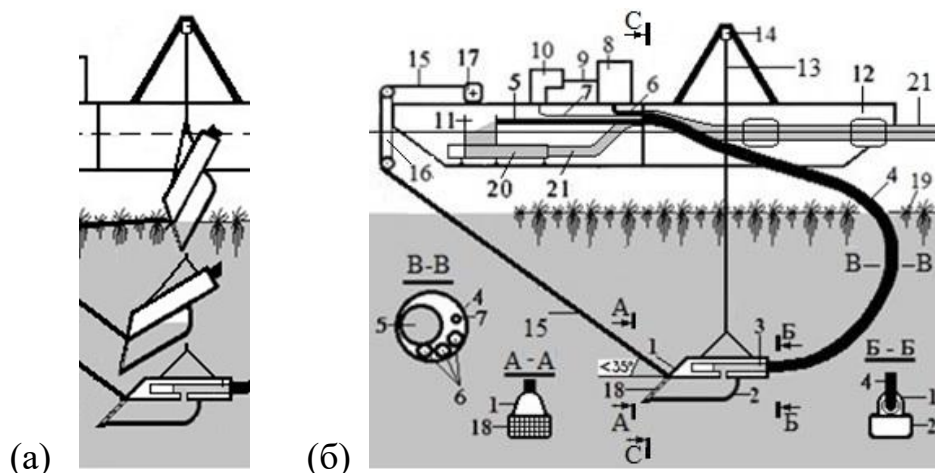


Рисунок 1 - Принципиальная схема грунтозаборного комплекса: (а) – схема внедрения погружной камеры комплекса в толщу залежи через покрывающий растительный слой, (б) – общий вид комплекса.

Комплекс оснащен системой из трёх тросов: тягового 15; погружного 13, и страховочного (не показан). Камера 1 погружается на тросе 13 с помощью лебедки 14 на заданную глубину под собственным весом, при этом угол наклона камеры к горизонту регулируется с помощью траверсы камеры 1 и натяжением троса 15 с углом наклона к горизонту до 35° (чтобы исключить выдёргивание). Наличие острой режущей кромки ковша 2 позволяет ему вместе с камерой 1 относительно легко проникать сквозь слой подводной растительности 19 и внедряться в толщу пласта на заданную глубину.

В таблице 2 приведены параметры ковша, рассчитанные по критерию допустимой экологической скорости. Исследования (Дементьев, 2010) показали, что

Таблица 2 - Зависимость производительности ЭВН от размеров ковша и экологической скорости его продвижения с залежи

№ №	Скорость ГЗУ $U_{ГЗУ}$, м/ч (м/с)	Высота ковша h_k , м	Ширина ковша b_k , м	Площадь поперечного сечения ковша, m^2	Производительность насоса, $m^3/ч$
1	108÷180 (0,03÷0,05)	0,3 м	0,8 м	0,24	25,9÷43,2
2	108÷180	0,4 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	0,6 м	1,4 м	0,84	90,72÷120,96

экологически безопасная скорость перемещения грунтозаборных устройств в подводном забое для илистых грунтов, обеспечивающая концентрацию взвеси менее 1,9 ppm в придонной зоне, лежит в пределах 108-180м/час (0,03–0,05м/с). С учетом этого рассчитана зависимость производительности встроенного ЭВН от площади поперечного сечения ковша, и установлено, что производительность ЭВН ограничена до 120м³/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 подпором от внешнего гидростатического давления. Увеличение глубины разработки увеличивает внешний гидростатический подпор, что облегчает работу насоса при всасывании и облегчает запуск насоса после остановки.

Сапропель естественной влажности является седиментационно-устойчивой структурированной вязкопластической дисперсией, что исключает проявление гидравлической крупности и критической скорости седиментации, поэтому позволяет отказаться от гидравлического разбавления и повернуть главное классическое правило на 180°: чем гуще и плотнее сапропель, тем ниже скорость его гидро-транспортирования и ниже энергозатраты.

На рисунке 2 приведена расчётная схема потерь напора в ПГКК, которая включает следующие местные потери давления: в ножевой решетке, скреперном ковше, на входе в камеру, входном патрубке, в эксцентриковом винтовом насосе, а также на трение при всасывании сапропеля.

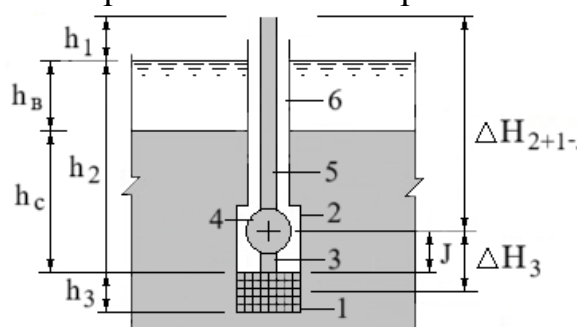


Рисунок 2 - Расчетная схема для потерь напора в ПГКК:

- 1 – ковш с ножевой решеткой,
- 2 – погружная камера,
- 3 – входной патрубок насоса,
- 4 – насос ЭВН,
- 5 – напорный трубопровод,
- 6 – транспортный рукав.

Камера ПГКК будет испытывать внешнее гидростатическое давление согласно основному уравнению гидростатики от столба воды h_v и столба сапропеля h_c . При этом полное давление на входе в камеру 2 с учетом атмосферного давления можно записать следующим образом:

$$P_n = P_a + \rho_v \cdot g \cdot h_v + \rho_c \cdot g \cdot h_c, \quad (1)$$

где: ρ_v и ρ_c – плотность, h_v и h_c – мощность покрывающего слоя воды и сапропеля 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:

$$h_{\text{макс}} = \tau_0 / (\rho_c \cdot g). \quad (2)$$

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), рассчитаны значения максимальных высот столба сапропелей $h_{\text{макс}}$ (см. табл. 3).

Таблица 3 – Максимальная высота столба сапропелей удерживаемого без течения

Обозначение и название параметров		Q1 Веверу	Q4 Пильвелю	Q5 Убаговас	Q6 Пуришу	Q8 Вейно	Q10 Савельево	Мах
ρ_c	Плотность, кг/м ³	1050	1058	1123	1098	1305	1356	1600
τ_0^t	Предел текучести с учетом k_τ^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 предел текучести в 600Па слишком мал, чтобы повлиять на ситуацию при большой мощности покрывающего слоя.

Чтобы сапропель потек нужно не только преодолеть предел текучести ($\Delta P > \Delta P_{\text{min}}$, где $\Delta P_{\text{min}} \sim (2\tau_0 \cdot L)/R$ для течения в трубе – условие начала течения), но надо также обеспечить перепад давления для преодоления пластичного сопротивления. Пластическая вязкость влияет на скорость течения.

Потери давления на всасывающем участке ПГКК можно записать следующим уравнением:

$$\Delta H_3 = J(\rho_c/\rho_o) + \Delta H_\xi + \Delta H_L \quad (3)$$

где: h_3 - высота ковша, м; J – высота от крышки ковша до центра приемной камеры насоса, м; $J(\rho_c/\rho_o)$ - потери напора на подъёме гидросмеси (м), где: ρ_c плотности сапропеля, кг/м³; ρ_o – 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 (4), приняв скорость всасывания в ковше как максимальную экологическую 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 (5) (Идельчик,1992):

$$\Delta H_\xi = \sum \frac{\xi_{\text{реш}} \cdot v^2}{2g} \quad (4)$$

$$\xi_{\text{реш}} = \left(1 + \frac{0,707}{\sqrt{1 - \frac{F_1}{F_2}}} \right)^2 \left(\frac{F_2}{F_1} - 1 \right)^2 \quad (5)$$

где: $F_1 = 0,7168\text{м}^2$ - площадь ячеек сетки; $F_2 = 0,859\text{м}^2$ - площадь поперечного сечения ковша (см. табл. 2, п.4).

Коэффициент сопротивления входного патрубка, установленного заподлицо с верхней крышкой ковша, определим по формуле (6) (Харин, Новиков, 1989):

$$\xi_{\text{вх}} = \frac{15}{(v_{\text{вс}} - 0,2)^{0,8}} \quad (6)$$

Средняя скорость потока гидросмеси на входном патрубке в м/с определяется по формуле (7), и при максимальной производительности насоса $Q_n = 120\text{м}^3/\text{ч}$ и диаметре входного патрубка $D = 250\text{мм}$ составит:

$$v_{\text{вс}} = \frac{4Q_n}{\pi D^2 \cdot 3600} \quad (7)$$

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

$$\Delta h_{\text{вх}} = \frac{\xi_{\text{вх}} \cdot v_{\text{вс}}^2}{2g} \quad (8)$$

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 (9) (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 $\rho_c = 1600\text{ кг/м}^3$:

$$\Delta h_{\text{тр}} = \left(\frac{4\tau_0 \cdot k_t^t}{\rho_c g} + \frac{32\mu_0 \cdot k_\mu^t \cdot v}{D \rho_c g} \right) \frac{L}{D} \quad (9)$$

Тогда общие потери на входе согласно уравнения (3) при высоте ковша $h_3 = 0,6\text{м}$ и $J = 0,4\text{м}$ составят 5,9м:

$$\Delta H_3 = J \frac{\rho_c}{\rho_0} + \Delta H_\xi + \Delta H_L = 5,85\text{м} \quad (10)$$

Поскольку насос максимально приближен к всасу (длина L мала) и скорость всасывания v тоже мала (меньше 1м/с), низкие гидравлические потери 5,85м на входе в ГЗУ гарантируют устойчивое всасывание сапропеля естественной влажности в залежи при плотности $\rho_c = 1600\text{кг/м}^3$, пластической вязкости $\mu_{\text{пл}} = 50,0\text{Па}\cdot\text{с}$, напряжении сдвига $\tau_0 = 600\text{Па}$ и даже на глубине разработки до 1м, так как ЭВН создает собственное разряжение до 7м.

Потери давления на трение на гидроподъёме 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:

$$\Delta H_{1+2-J} = (h_2 + h_1 - J) \frac{\rho_c}{\rho_0} + 2\Delta \xi_\phi \frac{\rho_c}{\rho_0} + \left(\frac{4\tau_0 \cdot k_t^t}{\rho_c g} + \frac{32\mu_0 \cdot k_\mu^t \cdot v}{D \rho_c g} \right) \frac{L_{\text{тр}}}{D} \quad (11)$$

где: $\tau_0 = 500\text{Па}$; $\mu_0 = 32\text{Па}\cdot\text{с}$; $h_1 = 1,5\text{м}$ высота подъёма гидросмеси над уровнем воды, м; $h_2 = 39,4\text{м}$ - глубина погружения днища камеры (уровень всаса), м; $J = 0,25\text{м}$ -

высота подъема оси насоса над днищем камеры, м; $\rho_c = 1600 \text{ кг/м}^3$; $\Delta\xi_\phi = 5\text{м}$ -местные потери на выходе из насоса и выходе из трубопровода; $D=0,28\text{м}$ - диаметр напорного трубопровода, м; v - скорость транспортировки, м/с; $L_{\text{тр}}$ – длина напорного трубопровода с учетом кривизны определяется по следующей формуле:

$$L_{\text{тр}} = \frac{\pi(h_1+h_2-J)}{2} + l_{\text{зс}} \quad (12)$$

где: $l_{\text{зс}} = 10 \text{ м}$ - длина напорного трубопровода от точки подъема на земснаряде до входа в трюмный бункер. $L_{\text{тр}}$ составляет 73,8 м.

Средняя скорость подъема гидросмеси при расходе $Q=120 \text{ м}^3/\text{ч}$ определяется по формуле (7) и составляет 0,54 м/с.

Подставляем указанные выше значения в уравнение (11), находим потери напора на подъеме в размере 173 м или 1,7 МПа.

Максимальная глубина разработки в 40м 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.

Третье защищаемое научное положение: *объем 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, объем которой вычисляется по установленному уравнению*

$$V_{\text{ободт}} = \frac{\pi(h_{\text{покp}}^7 - 1,11465n_{\text{ccc}}^2)}{7n_{\text{ccc}}^2} + \frac{(h_{\text{покp}}^4 - (1,11465n_{\text{ccc}}^2)^{4/7}) L_{\text{пут}}}{2n_{\text{ccc}}} \quad (13)$$

В процессе исследований в натурных условиях, были измерены радиусы воронок, время всасывания сапропеля естественной влажности, мощность покрывающего слоя, реологические характеристики сапропеля, что позволило рассчитать объемы воронок, образующихся в сапропелевой залежи и прийти к заключению, что форма воронки, которая образуется над всасом ГЗУ, не является конической, поскольку ее фактический объем не соответствует формуле объема прямого конуса $V = \frac{1}{3}h\pi r^2$, а намного меньше его. Это позволило рассчитать уравнение объема идеальной депрессионной воронки и предложить 3D модель процесса её формирования (рис. 3).

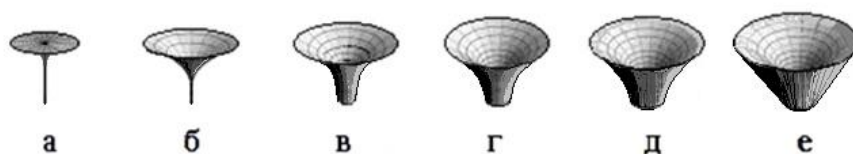


Рисунок 3 - 3D модель процесса формирования депрессионной воронки с трансформацией в воронку эрозионного размыва.

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, б). Это форма идеальной депрессионной воронки без учёта оползания и выполаживания откосов, на которое требуется продолжительное время.

Текучесть воды может до $30 \cdot 10^3$ раз превышать текучесть сапропеля, поэтому депрессионная воронка (рис. 3, б) полностью заполняется водой. В случае продолжения всасывания на входной патрубок начинает поступать сапропелевая гидросмесь со все возрастающим количеством воды, которая размывает стенки параболического конуса и формирует растущую по объёму воронку эрозионного размыва (рис. 3, в-г-д-е).

Для расчёта технологических параметров выемки, автором предложена математическая модель формирования идеальной депрессионной воронки (ИДВ). Расчёты показали, что образующие кривые конусов такой воронки (рис. 4) могут быть описаны параболической функцией (кубическая парабола)

$$x = y^3 / n_{ccc} \quad \text{или} \quad R_{дв} = h_{покp}^3 / n_{ccc} \quad (14)$$

где: x – радиус депрессионной воронки, y – мощность покрывающего слоя, n_{ccc} – коэффициент сопротивления сдвигу сапропеля в залежи.

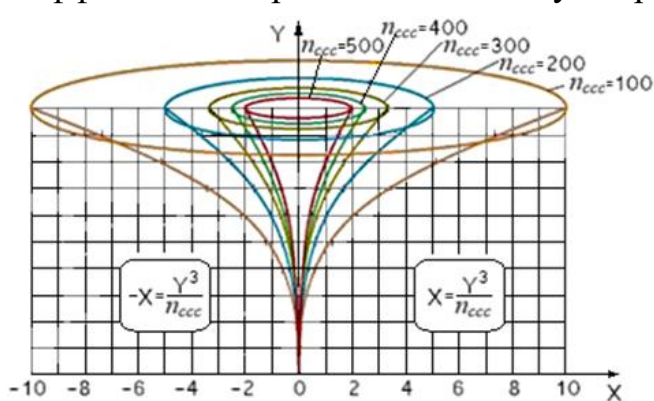


Рисунок 4 - Образующие кривые и конусы идеальных депрессионных воронок $V^{ИДВ}$ для различных значений y и n_{ccc}

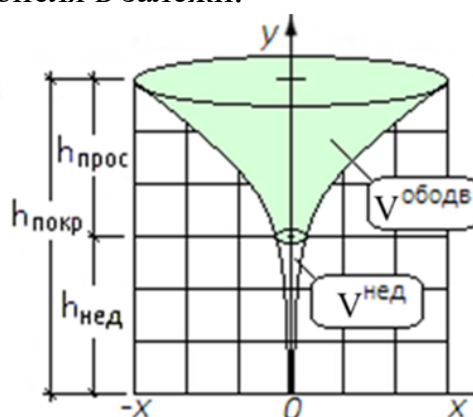


Рисунок 5 - Расчётная схема оптимально безопасного объёма депрессионной воронки $V^{ободв}$ с глубиной проседания $h_{прос}$.

В физическом смысле коэффициент n_{ccc} является предельным напряжением сдвигу τ_0 , измеренного в Па (паскалях), определенный для сапропеля естественной влажности в температурных условиях залежи. Согласно проведенных исследований коэффициент n_{ccc} для различных сапропелей в залежи может принимать значения в интервале от 18 до 600. Чем больше коэффициент n_{ccc} , тем круче образующая 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 ограничимся мощностью покрывающего слоя до $h_{покp} \leq 10$ метров.

Объём идеальной депрессионной воронки рассчитан по уравнению:

$$V^{ИДВ} = \pi \int_a^b [f(y)]^2 dy = \pi \int_a^b x^2 dy \quad (15)$$

Если радиус горизонтального сечения депрессионной воронки R соответствует значению x , которое изменяется по кривой $x = y^3/n_{ccc}$ в зависимости от y , где y – мощность покрывающего слоя $h_{\text{покр}}$ над входом в камеру, а образующая кривая вращается вокруг оси y , тогда (15) можно записать следующим образом

$$\begin{aligned} V^{\text{идв}} &= \pi \int_0^h x^2 dy = \pi \int_0^h \left(\frac{y^3}{n_{ccc}} \right)^2 dy = \pi \int_0^h \frac{y^6}{n_{ccc}^2} dy = \\ &= \pi \left[\frac{y^7}{7n_{ccc}^2} \right]_0^{h_{\text{покр}}} = \frac{\pi \cdot h_{\text{покр}}^7}{7n_{ccc}^2} \end{aligned} \quad (16)$$

Оптимально безопасный объём депрессионной воронки $V^{\text{ободв}}$, исключаяющий всасывание свободной воды, можно найти как разницу между объёмом идеальной депрессионной воронки $V^{\text{идв}}$ и объёмом недобора, для чего интегрируем уравнение (16) по dy от $h_{\text{нед}}$ до $h_{\text{покр}}$ и получаем уравнение (17) оптимально безопасного объёма депрессионной воронки $V^{\text{ободв}}$, или уравнение объёма выемки сапропеля естественной влажности:

$$V^{\text{ободв}} = \int_{h_{\text{нед}}}^{h_{\text{покр}}} \pi r^2 dh = \frac{\pi(h_{\text{покр}}^7 - h_{\text{нед}}^7)}{7n_{ccc}^2} \quad (17)$$

Фиксируем объём недобора $V^{\text{нед}}$ в размере до $0,5 \text{ м}^3$ и выражаем $h_{\text{нед}}$ из (16):

$$V^{\text{нед}} = \frac{\pi \cdot h_{\text{нед}}^7}{7n_{ccc}^2} \leq 0,5 \text{ м}^3, \text{ тогда } h_{\text{нед}} \leq \sqrt[7]{\frac{7n_{ccc}^2 \cdot V^{\text{нед}}}{\pi}} = \sqrt[7]{\frac{7n_{ccc}^2 \cdot 0,5}{3,14}} = \sqrt[7]{1,11465n_{ccc}^2} \quad (18)$$

Подставляя значение $h_{\text{нед}}$ из (18) в уравнение (17), мы избавляемся от показателя $h_{\text{нед}}$, и получаем расчётное уравнение выемки оптимально безопасного объёма депрессионной воронки (19) по двум критериям: $h_{\text{покр}}$ – геологический, n_{ccc} структурно-реологический, и это 1-ое слагаемое уравнения (13):

$$V^{\text{ободв}} = \frac{\pi(h_{\text{покр}}^7 - h_{\text{нед}}^7)}{7n_{ccc}^2} = \frac{\pi\left(h_{\text{покр}}^7 - \sqrt[7]{1,11465n_{ccc}^2}\right)}{7n_{ccc}^2} = \frac{\pi(h_{\text{покр}}^7 - 1,11465n_{ccc}^2)}{7n_{ccc}^2}. \quad (19)$$

Математическое моделирование позволило выявить объём депрессионной траншеи (рис.6), складывающийся из объема воронки и прямолинейного участка траншеи длиной $L^{\text{пут}}$ с площадью поперечного сечения $S^{\text{пут}}$ (рис.7) путем интегрирования расстояния между кривыми от $h_{\text{нед}}$ до $h_{\text{покр}}$ по оси Y , когда x изменяется от $-\frac{y^3}{n_{ccc}}$ до $\frac{y^3}{n_{ccc}}$:

$$\begin{aligned} S^{\text{пут}} &= \int_{h_{\text{нед}}}^{h_{\text{покр}}} \left(\frac{y^3}{n_{ccc}} - \left(-\frac{y^3}{n_{ccc}} \right) \right) dy = \int_{h_{\text{нед}}}^{h_{\text{покр}}} \frac{2y^3}{n_{ccc}} dy = \frac{2}{n_{ccc}} \int_{h_{\text{нед}}}^{h_{\text{покр}}} y^3 dy = \\ &= \frac{2}{n_{ccc}} \left[\frac{y^4}{4} \right]_{h_{\text{нед}}}^{h_{\text{покр}}} = \frac{2}{n_{ccc}} \left(\frac{h_{\text{покр}}^4 - h_{\text{нед}}^4}{4} \right) = \frac{h_{\text{покр}}^4 - h_{\text{нед}}^4}{2n_{ccc}}. \end{aligned} \quad (20)$$

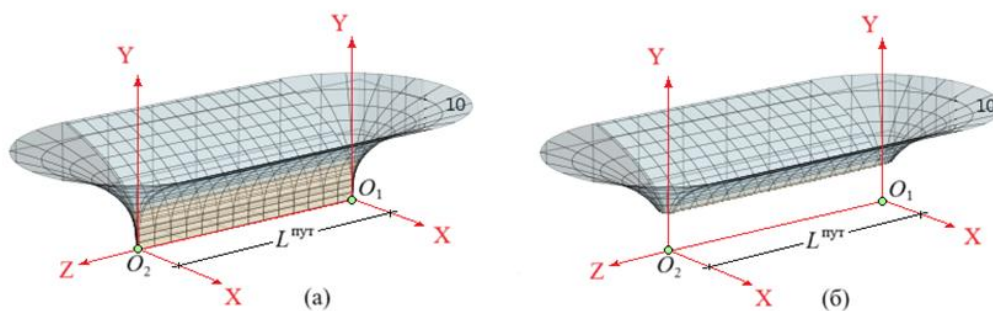


Рисунок 6 - 3D модели объёма $V^{\text{идт}}$ идеальной депрессионной траншеи (а) и $V^{\text{ободт}}$ оптимально безопасного объёма выемки депрессионной траншеи

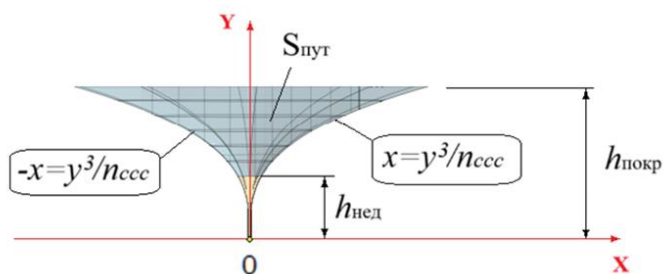


Рисунок 7 - Расчётная схема для определения площади поперечного сечения прямолинейного участка депрессионной траншеи $S^{\text{пут}}$.

Подставляя (18) в (20) и умножая результат на $L^{\text{пут}}$ получаем выражение объёма прямолинейного участка траншеи, и это 2-ое слагаемое уравнения (13):

$$V^{\text{обопут}} = \frac{(h_{\text{покр}}^4 - (1,11465 \cdot n_{\text{ccc}}^2)^{4/7}) \cdot L^{\text{пут}}}{2n_{\text{ccc}}} \quad (21)$$

Таким образом безопасный объем депрессионной траншеи предлагается рассчитывать по уравнению (13). На основании уравнения (13) получен график зависимости объёма выемки депрессионной траншеи по трём критериям: $h_{\text{покр}}$, n_{ccc} и $L^{\text{пут}}$ (рис. 8), при $L^{\text{пут}} = 100\text{м}$.

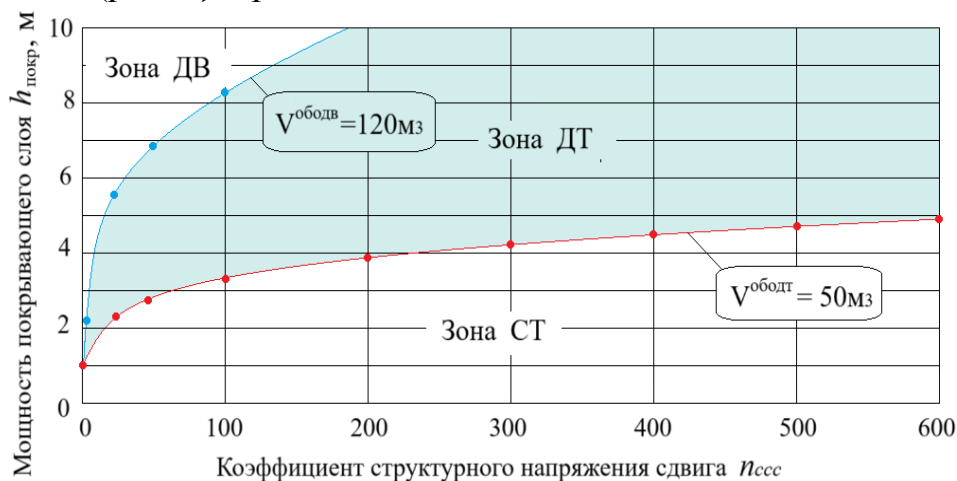


Рисунок 8 - Зонирование залежи по способам разработки: ДВ - депрессионной воронки, ДТ – депрессионной траншеи, СТ- скреперной траншеи.

Зону ДВ разрабатывают способом депрессионной воронки, когда расчётный объём выемки депрессионной воронки $V^{\text{ободв}} > 120\text{м}^3$; зону ДТ – способом депрессионной траншеи, когда объём выемки воронки $V^{\text{ободв}} < 120\text{м}^3$ и объём выемки траншеи $V^{\text{ободт}} > 50\text{м}^3$; зону СТ – способом скреперной траншеи, когда объём выемки депрессионной траншеи $V^{\text{ободт}} < 50\text{м}^3$.

Для выбора оптимального способа выемки по графику зонирования (рис. 8) необходимо соответствие двум критериям: мощности покрывающего слоя $h_{\text{покр}}$ (геологический показатель) и сопротивлению сдвига n_{ccc} (реологический показатель).

На рисунке 9 приведена технологическая карта разработки обводненного сапропеля при мощности покрывающего слоя $h_{\text{покр}} = 10$ м. Разработка залежи начинается способом депрессионных воронок (ДВ) с проседанием кровли на $h_{\text{прос}}$. При этом шаг A между центрами смежных рядов воронок можно определить по формуле (22), где радиус R определяется по формуле (14), как значение x :

$$A = \sqrt{(2R)^2 - R^2} = \sqrt{3R^2} = \sqrt{3x^2} = \sqrt{3\left(\frac{y^3}{n_{\text{ccc}}}\right)^2} = \sqrt{\frac{3y^6}{n_{\text{ccc}}^2}} = \sqrt{\frac{3h_{\text{покр}}^6}{n_{\text{ccc}}^2}} \quad (22)$$

После отработки залежи способом депрессионной воронки и проседания кровли на глубину $h_{\text{прос}}$, приступают ко второму этапу разработки способом депрессионной траншеи (ДТ) с последующим проседанием кровли на величину $h_{\text{прос}2}$.

При этом расстояние B между осями смежных траншей можно определить по следующей формуле:

$$B = 2R = 2x = 2\frac{y^3}{n} = \frac{2(h_{\text{покр}2})^3}{n} = \frac{2(h_{\text{нед}})^3}{n} \quad (23)$$

Недобренный слой $h_{\text{нед}2}$ отрабатывают способом скреперной траншеи, для чего расстояние между осями скреперных траншей C уменьшается до 2-х размеров ширины ковша. Ширина ковша при этом не превышает 1,4м.

Способы депрессионной воронки и депрессионной траншеи имеют ограничения по высоте недобора. В способе скреперной траншеи проседание и недобор отсутствуют, поэтому объём выработки забоя возрастает до 90-95%.

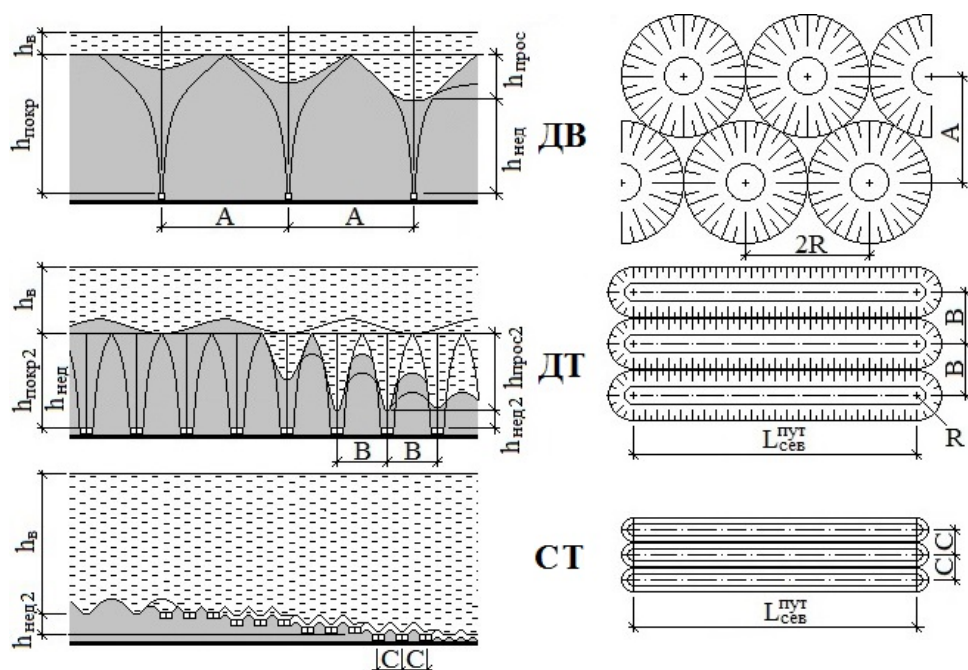


Рисунок 9 - Технологическая карта выемки сапропеля комбинированным способом: ДП-депрессионной воронки с шагом A , ДТ-депрессионной траншеи с шагом B , СТ-скреперной траншеи с шагом C .

Четвертое защищаемое 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 потока уменьшается до 0,1 м/с, диаметр трубопровода увеличивается до 426 мм, а расход сапропеля рассчитывается по установленной зависимости

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \cdot \tau_{\infty} \cdot k_{\tau}^t \cdot 3600}{\mu_{p\infty} (3+m) \cdot k^m \cdot k_{\mu}^t} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{Am}{2+m} - \frac{2A^2(m+A)}{(2+m)(1+m)} \right] \quad (24)$$

где: π – число Пи; R – радиус трубопровода, м; τ_{∞} – динамическое напряжение сдвига, определенное при 20°C, Па; k_{τ}^t – температурный коэффициент повышения напряжения сдвига в залежи; $\mu_{p\infty}$ – вязкость псевдо-пластическая, определенная при 18°C, Па с; k_{μ}^t – температурный коэффициент повышения вязкости в залежи; k – безразмерный коэффициент содержания твёрдого; m – безразмерный коэффициент нелинейности содержания органики; величина $A = \frac{2l\tau_0 k_{\tau}^t}{R \cdot \Delta P}$ выражает начальные условия движения массы в трубопроводе, при $A \geq 1$ $Q=0$ (движение в трубе не происходит), при $A < 1$ $Q > 1$ (начинается движение в трубе); τ_0 – начальное напряжение сдвига (предел текучести) при 20°C, Па; l – длина горизонтального трубопровода, м; ΔP – потери давления на длине l , Па.

Исследования реологических особенностей сапропеля показали, что его пластическая вязкость μ_p (μ_{nl}) 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 (рис. 10, г). 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.

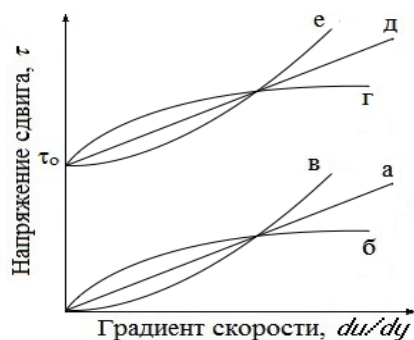


Рисунок 10 - Реологические кривые течения жидкостей:

а - ньютоновских; б - Освальда де Вейла по степенному закону; в - дилатантных по степенному закону (загустевающих), д - бингамовских, г - тиксотропных, е - реопектических.

Пластические (пастообразные) жидкости и суспензии, к которым принадлежит и сапропель, начинают течь только если превышен предел текучести τ_0 . Течение идеальной пластической жидкости описывает уравнение Шведова-Бингама (рис. 10, д). Бингамовским жидкостям не свойственна тиксотропия и их пластическая вязкость и напряжение сдвига не меняются от времени и скорости деформации, как это происходит у сапропеля.

Анализируя полученный в ходе эксперимента характер кривой текучести сапропеля различной влажности и, сравнивая его с разными моделями текучести пластических жидкостей, было получено равенство (25) (Какитис, 1999), которое хорошо описывает текучесть сапропеля натуральной влажности в лабораторных условиях при 18°C:

$$\tau = \tau_0 \left(1 + k \left(\frac{\mu_p}{\tau_0} \frac{du}{dy} \right)^n \right). \quad (25)$$

Оно включает безразмерные коэффициенты k и n , величина которых изменяется в зависимости от содержания твердого и органического вещества. Чтобы найти их значения и установить соответствие равенства (25) реальному потоку сапропеля, была произведена серия замеров с его различной влажностью. В результате исследований реологических свойств сапропеля были установлены пластическая вязкость и предельное напряжения сдвига, на основании которых построена кривая изменения напряжения деформации в зависимости от градиента скорости потока сапропеля натуральной влажности с содержанием органического вещества в сухом остатке 62% при температуре 18°C (рис.11).

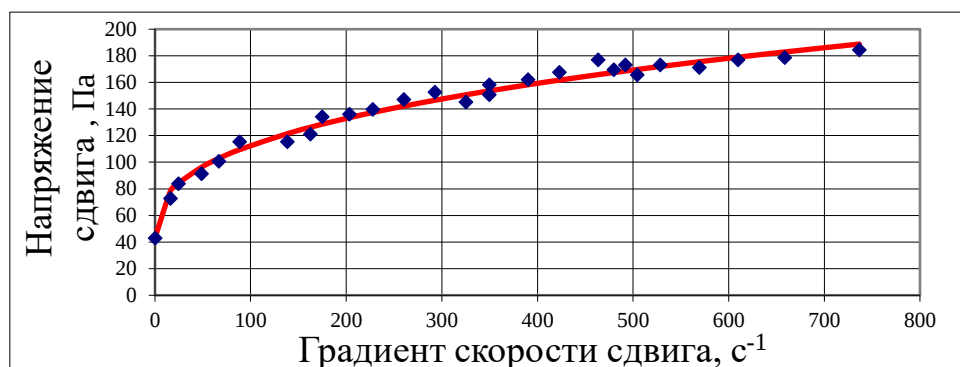


Рисунок 11 - Зависимость изменение напряжения сдвига в зависимости от градиента скорости. Влажность относительная $W = 91,2 \%$, содержание органики в сухом остатке $ОВ = 62\%$

На основании кривых текучести сапропеля были установлены коэффициенты k - содержания твердого и n – содержания органики в твердом. Используя компьютерную программу SPSS, были установлены значения коэффициентов $k=2.66$ и $n=0.43$ равенства. Показатели пластической вязкости $\mu_{p\infty} = 0.11$ Па·с и начального предельного сопротивления сдвига $\tau_0 = 42.8$ Па соответствуют жидкости с полностью разрушенной структурой. Установлено следующее уравнение изменения напряжения сдвига в зависимости от градиента скорости (26):

$$\tau = \tau_0 \left(1 + 2,66 \left(\frac{\mu_p}{\tau_0} \frac{du}{dy} \right)^{0,43} \right) \quad (26)$$

Для расчёта потока сапропеля в трубопроводах (Какетис, 1999) было получено следующее уравнение расхода для сапропеля в м³/с:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^3 \cdot \tau_{\infty}}{\mu_{p\infty}(3+m) \cdot k^m} \left(\frac{1}{A} - 1 \right)^m \left[1 - \frac{Am}{2+m} - \frac{2A^2(m+A)}{(2+m)(1+m)} \right] \quad (27)$$

Уравнение (27) описывает течение вязкопластических (пастообразных) жидкостей по круглому трубопроводу в зависимости от потери давления Δp по длине трубопровода l . Оно определяет структурно-ламинарный режим движения потока. Принимая $m=1$ и $k=1$, после алгебраических преобразований получаем уравнение расхода Бэкингема, которое описывает течение пластических жидкостей Шведова-Бингама в круглом трубопроводе:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8l \mu_p} \left(1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta P} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2l \cdot \tau_0}{R \cdot \Delta P} \right)^4 \right) \quad (28)$$

В случае абсолютной жидкости (Ньютоновская жидкость) $\tau_0 = 0$ и $\mu_p = \mu$ получаем равенство Пуазеля. Для установления соответствия равенства (27) реальному потоку, была произведена серия экспериментов, в которых исследовалось течение сапропеля натуральной влажности в зависимости от падения давления на отрезках трубопровода различной длины и диаметра. Для установления влияния изменения массы сухого и органического веществ сапропеля на коэффициенты k и m была проведена серия экспериментов на сапропелях с различным содержанием сухого и органического вещества, в результате которых было установлено, что коэффициент k уменьшается с увеличением сухого вещества, а коэффициента m возрастает при увеличении массы сухого вещества. На рисунке 12 и рисунке 13 приведены графики зависимостей изменения указанных коэффициентов для образцов сапропеля с высоким и низким содержанием органического вещества.

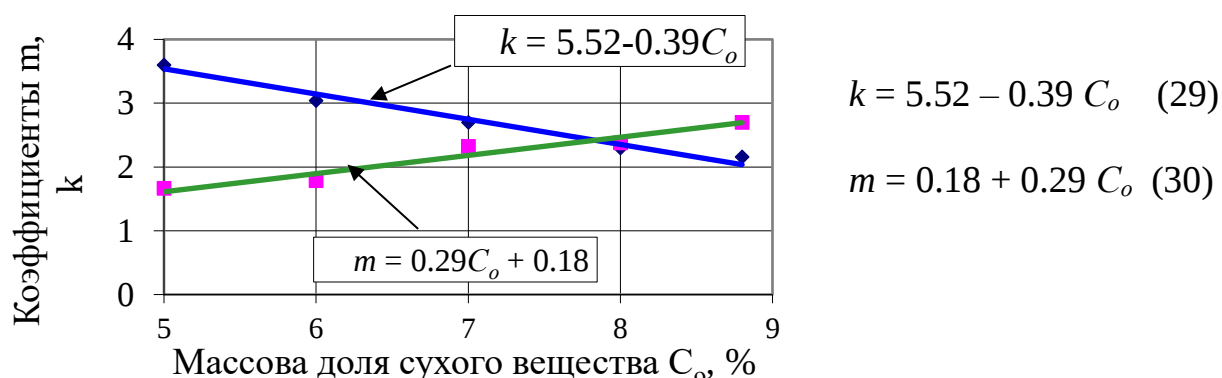


Рисунок 12 - Зависимость коэфф. k , m от состава сухого вещества C_o при ОВ=61%

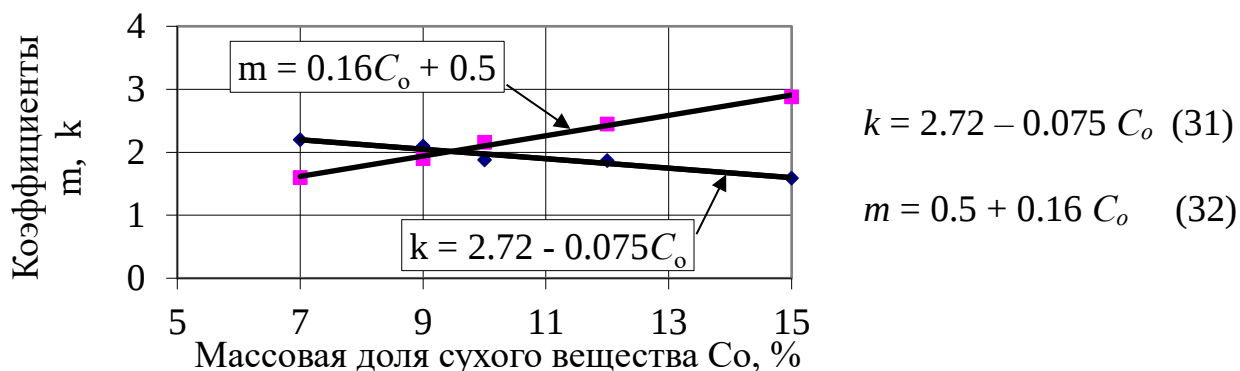


Рисунок 13 - Зависимость коэфф. k , m от состава сухого вещества C_o при ОВ=21,7%

Практические замеры объёмов сапропеля, поданного фактически в накопительные бункера и рассчитанные по уравнению (27), показали на 10-12% меньший расход по сравнению с расчётным. Вышеуказанные недостатки были устранены, когда в уравнение (27) были введены вышеуказанные температурные коэффициенты k_μ^t и k_τ^t для вязкости и напряжения сдвига, после чего уравнение (27) приняло вид окончательного расчётного уравнения расхода сапропеля (24). По этой же причине уравнение течения сапропеля (25) для условий залежи примет следующий вид:

$$\tau = \tau_0 k_\tau^t \left(1 + k \left(\frac{\mu_p}{\tau_0} \frac{k_\mu^t}{k_\tau^t} \frac{du}{dy} \right)^n \right) \quad (33)$$

Потери давления в напорном трубопроводе для условий залежи рекомендуется рассчитывать по уравнению Бэкингема-Рейнера (34), но с учетом установленных температурных коэффициентов:

$$\Delta P = \Delta P_o + \Delta P_{тр} = \frac{4 \cdot \tau_o \cdot k_t^t \cdot L}{D} + \frac{32 \cdot \mu_{пл} \cdot k_{\mu}^t \cdot L \cdot v}{D^2} \quad (34)$$

Сапропель в естественном сложении является седиментационно-устойчивой структурированной средой, поэтому не имеет критической скорости транспортирования, что позволяет вести его гидро-транспортирование в структурно-ламинарном (пробковом) режиме на сверхмалых скоростях от 0,1 до 0,6 м/с, при самых низких числах Рейнольдса. Ниже в таблице 4 приведены результаты всех расчётных параметров сапропелей исследуемых озёр.

Таблица 4 - Расчётные параметры транспортирования сапропеля

Обозначение и название параметров		Q1 Веверу	Q4 Пильвелью	Q5 Убаговас	Q6 Пуришу	Q8 Вейно	Q10 Савельево
ρ	Плотность, кг/м ³	1050	1058	1123	1098	1305	1356
$W_{отн}$	Влажность относительная, %	96,78	96,41	93,9	95,35	87,7	84
C_o	Массовая доля сухого вещества, %	3,22	3,59	6,1	4,65	12,3	16
ОВ	Содержание органики в сухом остатке, %	83,5	82,4	72,4	85,5	48,4	64
μ_0	Пластическая вязкость (Па с) при 4°C	3,843	5,342	10,456	4,686	28,86	18,28
μ_{∞}	Динамическая вязкость (Па с) при 4°C	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_{∞}	Динам. напряжение сдвига (Па) при 4°C	65,52	75,84	87,6	98,4	244,8	471,6
n	Коэфф. нелинейности содержания органики	1257	1146,5	513,8	523,39	384,93	248,37
k	Коэффициент содержания твёрдого	4,2642	4,1199	3,141	3,7065	1,7975	1,52
m	Безразмерный коэфф.	1,1138	1,2211	1,949	1,5285	2,468	3,06
D	Диаметр трубопровода, мм	220	280	280	280	402	426
P	Макс. развиваемое давление насоса МПа	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
$\Delta P_{пуск}$	Пусковое давление, МПа	0,48	0,45	0,5	0,6	1,03	1,74
$\Delta P_{пуск}$	Рабочее давление, МПа	2,0	2,0	2,1	1,31	1,58	2,2
L	Длина трубопровода, (м)	1400	1400	1000	800	950	760
Q	Расход по (24), (м ³ /ч)	60,2	114	86	110	49	101
v	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

Из результатов исследований (табл. 4) следует, что с уменьшением естественной влажности $W_{отн}$ происходит рост концентрации сухого вещества C_0 , рост предела текучести τ_0 , рост вязкости μ_0 , а гидро-транспортирование сапропеля при этом происходит с увеличением диаметра D и уменьшением скорости u в структурно-ламинарном режиме (очень низкие значения чисел Рейнольдса). Так, при повышении концентрации твердого до 16% (Q10), диаметр увеличился до 426мм, а скорость транспортирования составляет всего 0,2 м/с.

Уравнение Бэкингема (28) по сравнению с предложенным (24), дает значения расхода с большой погрешностью и не может быть использовано в практике гидро-транспортирования сапропелей естественной влажности на столь малых скоростях (см. рис. 14).

Ниже приведены сводные графики зависимостей расхода от потерь давления (см. рис. 15), от радиуса пульпопровода (см. рис. 16), от предельного напряжения сдвига (см. рис. 17).

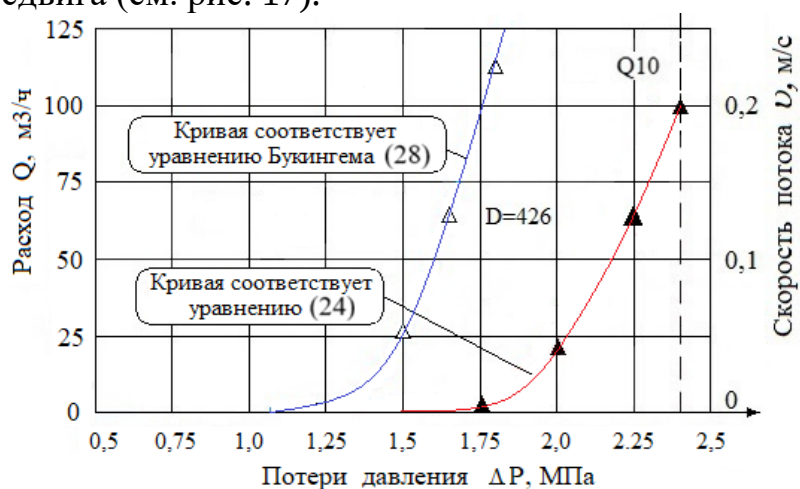


Рисунок 14 - Зависимость между потерей давления, расходом и скоростью потока в напорном трубопроводе $D_{10}=426$ мм, $l_{10}=760$ м для оз. Савельево (Q10) по уравнению (28) и (24)

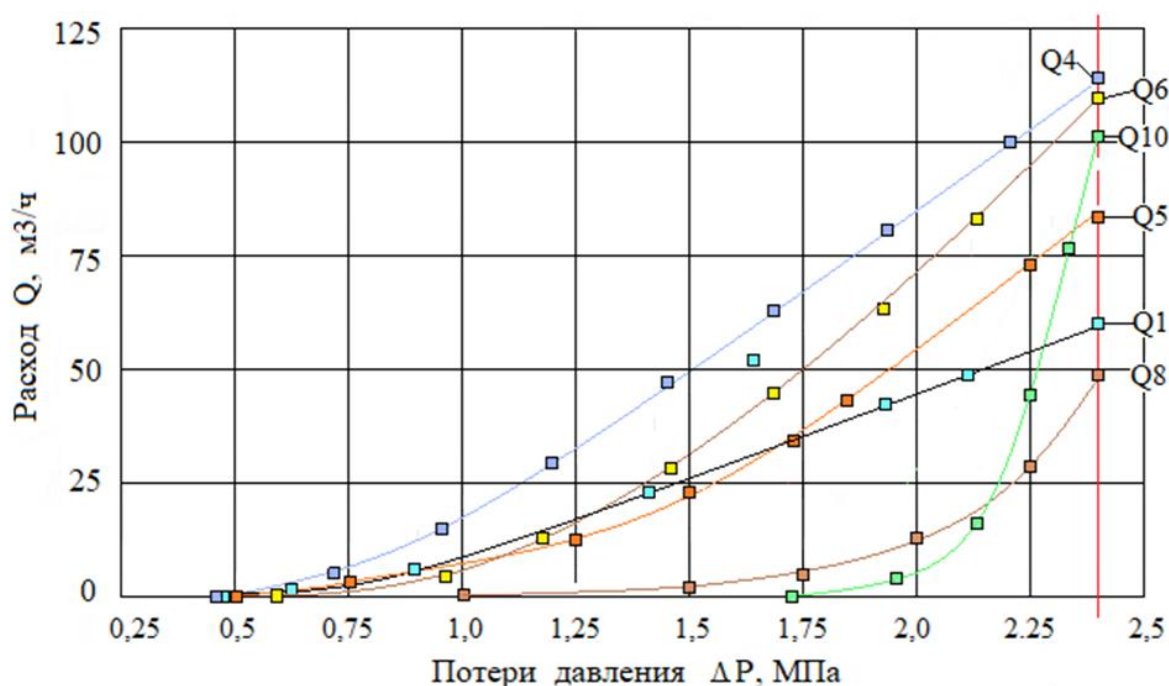


Рисунок 15 - Расходно-напорные характеристики гидро-транспортирования исследуемых сапропелей

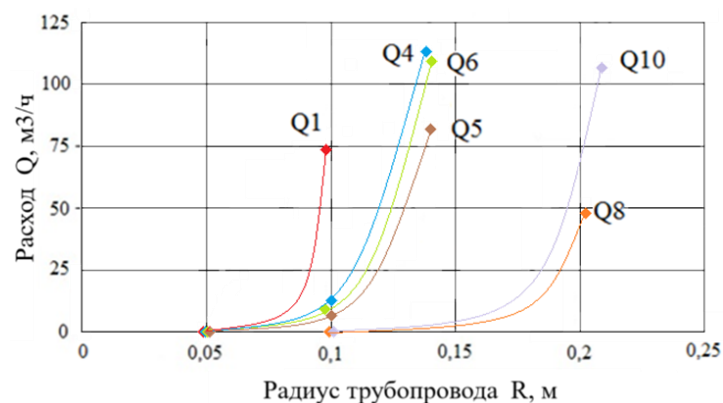


Рисунок 16 – Зависимость расхода от радиуса трубопроводов для исследуемых сапропелей

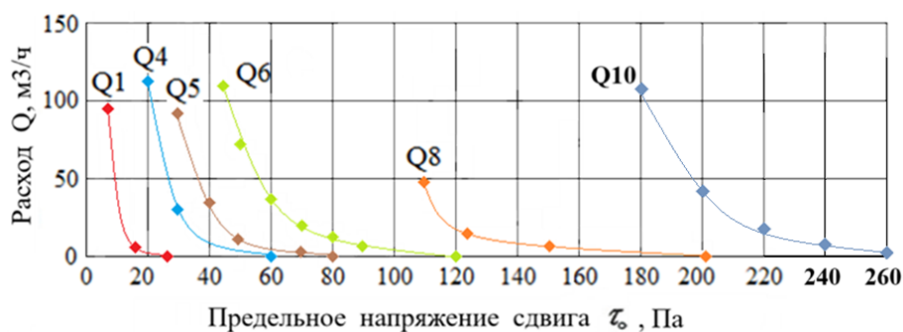


Рисунок 17 – Зависимость расхода от предельного напряжения сдвига для исследуемых сапропелей

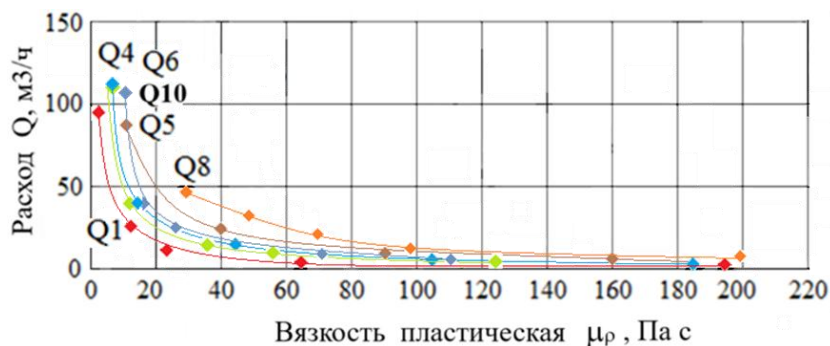


Рисунок 18 – Зависимость расхода от пластической вязкости исследуемых сапропелей

Отсутствие критической скорости седиментации у сапропеля естественной влажности обеспечивает ряд неоспоримых преимуществ. Поскольку осаждения нет, нет необходимости и в расчете 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.

Предлагаемая методика расчёта гидро-транспортирования сапропеля естественной влажности построена на критерии не критической скорости, так как её здесь просто нет, а на критерии возможной скорости, и руководствуется обратным принципом: выше вязкость, выше концентрация твердого – меньше скорость (0,6 м/с - 0,1 м/с). Для Q10 при концентрации твердого 16%, диаметре 0,426м и длине

трубопровода 760м, расход лежит в пределах 93-108м³/ч при рабочей скорости в пределах $v_{10} = 0,18 - 0,22$ м/с, что вполне допустимо для ЭВН.

Пятое защищаемое 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±5% по разработанной патентно-чистой технологии согласно принципиальной схемы, при этом расход масс сапропеля и торфа в готовой смеси определяется по установленному уравнению*

$$m_T = M_{TCC} \frac{(C_{TCC} - C_C)}{(C_T - C_C)} \quad \text{и} \quad m_C = M_{TCC} \frac{(C_T - C_{TCC})}{(C_T - C_C)} \quad (35)$$

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_0 – доля сухого вещества в сапропеле.

На рисунке 19 приведена принципиальная схема ускоренного производства торфо-сапропелевых смесей (патент на изобретение № 2336253) на основе подачи сапропеля естественной влажности (см. рис. 20) на озере Савельево (см. рис. 21).



Рисунок 19 – Принципиальная технологическая схема производства торфо-сапропелевых удобрительных смесей

Производимая по данной технологии торфо-сапропелевая смесь (см. рис. 22) является патентно-чистым продуктом (патент на изобретение № 2407724 РФ), выполняющим, с одной стороны, функции органического удобрения, поскольку содержит в себе все биологически активные компоненты сапропеля, а с другой, выполняющим функции мелиоранта, поскольку содержит торф, улучшающий структуру почвы и ее влагопоглощающую способность. Особенностью данного производства является его 100% безотходность.



Рисунок 20 - Подача сапропеля естественной влажности в накопительный бункер



Рисунок 21 - Вид технологической линии на оз. Савельево: 1 - безынерционная сушилка, 2-дезинтегратор кинематический, 3-смеситель поточного действия (Патент № 2336253 РФ)



Рисунок 22-Торфо -сапропелевая смесь, производимая предприятием на оз. Савельево. (Патент № 2407724 РФ)

Энергоэффективность проведенных исследований. В классической гидромеханизации основная задача это предотвращение осаждения твердого, поддерживая скорость выше критической ($v > v_{кр}$). Для турбулентного режима

течения потери напора на трение $H_{тр}$ рассчитываются по формуле Дарси-Вейсбаха, где они растут пропорционально квадрату скорости v^2 . Подставляя $H_{тр}$ в формулу мощности N , получаем уравнение потребляемой мощности:

$$N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H = \frac{\rho \cdot g \cdot v \cdot \pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\lambda \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2g} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot D \cdot \lambda \cdot L \cdot v^3}{8}, \quad (36)$$

из которой видно, что 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. Расчёт потребляемой мощности и удельных энергозатрат зависит от различия между насосами, обусловленного их коэффициентом полезного действия. Для ЭВН, работающих с вязкими жидкостями, общий КПД обычно находится в диапазоне $\eta_{эвн} = 0,65 - 0,8$. Результаты расчёта приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Мощность и удельная энергоёмкость для ЭВН ($\eta_{эвн} = 0,65$)

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	114	86	110	49	101
		0,0167	0,0317	0,0239	0,0306	0,0136	0,0281
ΔP	Потери давления, МПа	2,01	2,0	2,1	1,31	1,58	2,2
$N_{потр}$	Потребляемая мощность, кВт	51,642	97,54	77,22	61,671	33,09	95,108
$\mathcal{E}_{уд}$	Удельная энергоёмкость, кВт/м ³	0,86	0,86	0,9	0,56	0,68	0,94

Из расчетов видно, что ЭВН легко преодолевает пусковое давление для Q10, равное $\Delta P_{пуск10} = 1,74$ МПа (см. табл.4), и поддерживает установившееся движение на скорости 0,197 м/с, работая устойчиво без опасения забивки трубопровода.

При выборе центробежного насоса мы сталкиваемся с фундаментальной проблемой – такой насос эффективно работает на скорости гидро-транспортирования 1,2–1,5 м/с, при этом предел текучести τ_0 не должен превышать 22,5 Па, а вязкость не должна превышать 0,2 Па·с, поэтому иловый насос не сможет перекачать такой сапропель без его разбавления водой. Для перекачки центробежным насосом сапропель нужно превратить из структурированной пасты в текучую суспензию. Для чего необходимо добавит 80–2500% от объема исходного сапропеля. Примем разбавление 1:1 (1м³ сапропеля + 1м³ воды) для Q10. При расходе в 101 м³/ч по сапропелю получим объём перекачиваемой пульпы 202 м³/ч (или 0,0561 м³/с).

$$\text{Скорость потока при этом составит: } v = 0,394 \text{ м/с} \quad (37)$$

$$\text{Полезная мощность } N_{п} = 2\,010\,000 \cdot 0,0561 = 112,76 \text{ кВт} \quad (38)$$

$$\text{Потребляемая мощность при КПД} = 0,5 \quad N_{потр} = 112,76 / 0,5 = 225,52 \text{ кВт} \quad (39)$$

$$\text{Удельная энергоёмкость } \mathcal{E}_{уд} = 225,52 \text{ кВт} : 101 \text{ м}^3/\text{ч} = 2,23 \text{ кВт/м}^3 \quad (40)$$

Итоговое сравнение эффективности вариантов насосов приведено в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение эффективности насосов

Параметры	ЭВН	Центробежный
Расход пульпы, м ³ /ч	101	202
Удельная энергоёмкость, кВт·ч/м ³	0,94	2,23

Только 100% разбавление (1:1) сапропеля Q10 водой приводит к удорожанию перекачки в 2,37 раза по сравнению с ЭВН. При этом объём 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, поскольку при 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 (Ющенко и др., 1980). 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.

Результаты расчёта энергозатрат для выемки сапропеля естественной влажности с максимальными характеристикам (см. табл. 3, МАХ), приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Сравнительная таблица энергетической эффективности

Этап Показатель	Технология с ПГКК	Классическая технология	Коэффициент превышения затрат
1. Коэффициент разбавления	1 нет разбавления	30 1 м ³ сапр.=30 м ³ пульпы	В 30 раз больший объём для перекачки
2. Энергия продвижения в забое	0,30 кВт·ч/м ³ (механическое разупрочнение)	9,6 кВт·ч/м ³ (гидро-рыхление)	В 32 раза выше
3. Энергия подъема на 40м	0,96 кВт·ч/м ³	14,95 кВт·ч/м ³ (подача 30 м ³ пульпы)	В 15 раз выше
4. Энергия обезвоживания	Не требуется	725 кВт·ч/м ³	Доминирующая статья затрат
5. Полная энергоёмкость	0,99 кВт·ч/м ³	749,55 кВт·ч/м ³	В 757 раз выше
6. Основной источник потерь	Преодоление структурной прочности	Массовое добавление и последующее удаление воды	Проблема всасывания воды переходит в проблему обезвоживания
7. Высоко структурные сапропели $\tau_0=600$ Па	Прямое применение. ПГКК рассчитан на эти параметры	Невозможно без разбавления, делающего процесс нерентабельным	ПГКК открывает доступ к высоко концентрированным отложениям

Таким образом разбавление сапропеля естественной влажности водой является крайне энерго неэффективным решением и экономически нецелесообразным из-за высоких эксплуатационных затрат на электроэнергию, и создает дополнительную экологическую проблему по распространению взвеси в забое, так как скорость гидравлического размыва при всасывании может в 20-30 раз превышать экологически безопасную скорость (0,05 м/с): $1,2 \text{ м/с} : 0,05 \text{ м/с} = 24 \text{ раза}$ (41)

Энергетическая эффективность новой технологии транспортирования в горизонтальном трубопроводе представлена в таблице 8.

Таблица 8 - Сравнительный анализ энергоэффективности технологий транспортирования сапропеля в горизонтальном трубопроводе

№	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 влажности (84-98%)
2	Основной потребитель энергии	Перекачка большого объема добавленной воды	Преодоление структурной прочности и вязкости концентрированной среды
3	Удельная энергоемкость	1,2-2,0 кВт·ч/м ³ (в пересчете на объем сапропеля естественной влажности). Расчетный	0,56-0,94 кВт·ч/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

Таким образом выполненные расчеты показали высокую энергетическую эффективность применения ПГКК при выемке сапропелей естественной влажности с последующим транспортированием на сверхмалых скоростях в высоконапорном трубопроводе.

Экологическая эффективность исследований. Возможность выемки сапропеля при скорости перемещения в забое до 0,05 м/с без образования взвеси и без его разбавления водой автоматически переводит предложенную геотехнологию в разряд экологически чистой, решая при этом и другой важнейший вопрос – сохранение качества добываемого сырья.

Сохранение потребительских свойств добытого сапропеля. Традиционная технология с размывом сапропеля в забое, всасыванием жидкой пульпы с содержанием твердого 1–5%, перекачкой пульпы на берег в чеки отстойники, длительным обезвоживанием, промораживанием, оттаиванием, сушкой, и получением товарного сапропеля 60% влажности только после 12 месяцев - это долгий процесс, приводящий к потере питательных веществ, в результате чего

товарный сапропель теряет свою активность, свой природный бонитет. Исследования потерь питательных и биологически активных веществ сапропеля при гидравлической добыче (Гриневиц и др., 2018), длительном хранении (Фомина и др., 2019), влияния технологии добычи на его агрохимические свойства (Лепешкин и др., 2020) и микробиологических процессов в отстойниках (Губарев и др., 2017) приведены в таблице 9.

Таблица 9 – 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%
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%

Исследования (Классен и др., 1982) показали, что добавление 20% торфа в сапропель снижает потерю гуминовых кислот на 25–40 % за 12 месяцев хранения, а смесь сапропеля с торфом 1:0,3 сохраняет на 30% больше азота после 6 месяцев хранения (Шильников и др., 2015). Торф содержит гуминовые кислоты, целлюлозу и лигнин, которые связывают подвижные формы металлов (Fe, Mn), предотвращая их окисление (Лепешкин и др., 2020); поглощают летучие соединения (NH₃, H₂S), уменьшая потери азота (Шильников и др., 2015); стабилизируют pH, препятствуют закислению (Stevenson F.J., 1994). Кроме этого, торф снижает скорость аэробного разложения органики за счет создания анаэробных зон в смеси (Борисов и др., 1998) и подавления активности термофильных микроорганизмов (Минеев, 2004), а также предотвращает пересыхание и растрескивание сапропеля (ГОСТ Р 54000–2010) и слеживание при хранении (Добровольский, 2006). Таким образом торф оказывает стабилизирующее (консервирующее) воздействие на биологически активные компоненты сапропеля, исключаяющее их потерю на последнем этапе производства, хранения и использования.

Таким образом анализ исследований в литературных источниках показал, что предложенная геотехнология коренным образом минимизирует воздействие на окружающую среду и гарантирует сохранение природного бонитета в добытом сапропеле, что подтверждено результатами проведенных исследований в ряде стран Западно-центральной Африки по программе Всемирного банка CORAF-FERTORAO, показавшими снижение использования минеральных удобрений на 50% при

совместном использовании ТСС с повышением урожайности культур в несколько раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся завершенной научно-квалифицированной 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 природоподобных 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 $Q = \frac{\pi \cdot R^3 \cdot \tau_{\infty} \cdot k_{\tau}^t \cdot 3600}{\mu_{p\infty} (3+m) \cdot k^m \cdot k_{\mu}^t} \left(\frac{1}{A} - 1\right)^m \left[1 - \frac{Am}{2+m} - \frac{2A^2(m+A)}{(2+m)(1+m)}\right]$

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 раз 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 энергоёмкость 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 ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Дементьев В. А. Влияние реологических и технологических параметров на расход сапропеля естественной влажности в напорном трубопроводе // Гидротехническое строительство. 2024. №8. С.50-55. DOI:
2. Дементьев В. А. Совершенствование способов гидро-механизированной выемки обводненных сапропелей // Горный информационно - аналитический бюллетень. 2021. №7. С.42-52. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_42.
3. Ялтанец И. М., Дементьев В. А., Казаков В. А. Структура комплексной механизации гидро-механизированного предприятия при эксплуатации месторождений торфа и сапропеля и производстве торфо-сапропелевых смесей // Гидротехническое строительство. 2021. №7. С.14-21. DOI: 10.34831/EP.2021.18.51.003.
4. Ялтанец И. М., Дементьев В. А. Перспективность развития сапропелевой индустрии России и её технологическая основа // Гидротехническое строительство. 2020. №10. С.39-45.
5. Дементьев В. А., Штин С. М. Промышленная добыча сапропеля уже в России // Гидротехника. 2019. №1(54). С. 64–66.
6. Дементьев В. А. Сапропель как источник альтернативной энергии и натуральных органических удобрений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. №6, С.67-70.
7. Дементьев В. А. Индустриализация добычи сапропеля и производства УМС (удобрительных мелиорирующих смесей) на его основе // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. №3. С.297-302.
8. Дементьев В.А. Способы и средства добычи сапропелей естественной влажности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. №1. С.24-28.
9. Дементьев В. А. Применение пневматических камерных насосов (ПКН) фирмы Рпейта (Италия) при добыче сапропелей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. Отдельный выпуск №1. С.256-262
10. Ялтанец И.М., Дементьев В.А. Установка глубоководной разработки несвязных полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. Отдельный выпуск №1. С.129-144.
11. Ялтанец И. М., Дементьев В. А. Применение пневматических камерных насосов для повышения глубины разработки грунтов земснарядами // Горный журнал. 2009. №1. С.67-70.

12. Дементьев В.А. Определение оптимальных технологических режимов работы погружного грунтового пневматического насоса (ПГПН) при разработке рыхлых горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. №1. С.253-258
13. Ялтанец И.М., Фальди Джованни, Дементьев В.А., Леванов Н.И. Повышение глубины разработки при добыче несвязных полезных ископаемых земснарядами с применением пневматических камерных насосов (ПКН) фирмы Pneuma // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. Тематическое приложение Гидромеханизация. С.73-89.
14. Дементьев В.А., Кожевников Н.Н. Устройство земснарядов для очистки глубоководных водоемов от илистых отложений и применение пневматических грунтовых насосов // Гидротехническое строительство. 2005. №1. С.25-30.
15. Дементьев В.А. Использование отстойников бункерного типа в технологиях очистки водоемов от донных отложений // Горный журнал. 2005. №3. С.65-66.
16. Дементьев В.А., Абдельрасул Ахмед Мекки. Технология удаления и переработки донных отложений водохранилища Высотной Асуанской плотины // Гидротехническое строительство. 2004. №12. С.36-42.
17. V. A. Dementjev. Effect of Rheological and Process Parameters on the Flow Rate of Sapropel with Natural Moisture Content in a Pressure Pipeline // Power Technology and Engineering, 2025, V.58, p. 811-815. <https://doi.org/10.1007/s10749-025-01886-3>.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10749-025-01886-3>.
18. I. M. Yaltanets, V. A. Dementyev, V. A. Kazakov. Structure of Integrated Mechanization at a Hydromechanized Enterprise in the Operation of Peat and Sapropel Fields and Production of Peat-Sapropel Fertilizers // Power Technology and Engineering, 2022, T. 55, p. 652-658. DOI: 10.1007/s10749-022-01412-9.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10749-022-01412-9>.

Статьи и доклады в научных сборниках, журналах и других изданиях:

1. Дементьев В. А., Штин С. М. Проект по добыче и производству торфо-сапропелевого органического удобрения мощностью 20 000 т/год с влажностью 60±5% // Ежегодный справочник Агробизнескарта, Краснодарский край, №12. 2019. С.11-12.
2. Дементьев В. А. Индустриализация добычи сапропелей и производства УМС на его основе / Сборник докладов VI съезда гидромеханизаторов России. М., издательство ООО «Центр инновационных технологий».2012. С.28-33.
3. Дементьев В. А. Эксплуатация обводненных месторождений / Под ред. Ялтанца И. М.-М.: издательство «Горная книга».2010. Учебное пособие.
4. 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.
5. Ялтанец И. М., Дементьев В. А. Способ добычи и транспортировки донных отложений в условиях озера Насер, Египет / ГИДРОМЕХАНИЗАЦИЯ-2003, выпуск III по материалам Третьего съезда гидромеханизаторов России. МГГУ. 2004. С.86-105.

Патенты на изобретения:

1. Патент № 2818871 Российская Федерация, МПК E21C 50/00, E02F 5/28, E02F 3/88. Устройство для глубоководной добычи илистых отложений и очистки водоемов: №2023129185: заявл. 10.11.2023: опубл. 06.05.2024 / В. А. Дементьев – с.17.
2. 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.
3. Патент № 2484074 Российская Федерация, МПК C05F 7/00. Способ обезвоживания сапропеля при получении сапропелевого продукта и устройства для его осуществления: № 2011122535/13: заявл. 03.06.2011: опубл. 10.06.2013 / В. А. Дементьев, А. И. Маклаков; патентообладатель В. А. Дементьев – с. 9.
4. Патент № 2472761 Российская Федерация, МПК C05F 11/02. Способ получения биологически активного гуминового продукта: №2011112692/13: заявл. 04.04.2011: опубл. 20.01.2013 / В. А. Дементьев, О. И. Бражко; патентообладатель В. А. Дементьев – с. 5.
5. Патент № 2447234 Российская Федерация, МПК E02F 3/88. Устройство для добычи сапропеля естественной влажности: №2010141384/03: заявл. 11.10.2010: опубл. 10.04.2012 / В. А. Дементьев, А. И. Маклаков; патентообладатель В. А. Дементьев - с. 10.
6. Патент № 2418914 Российская Федерация, МПК E02F 3/88. Устройство для добычи илистых отложений (варианты): №2010110453/03: заявл. 22.03.2010: опубл. 20.05.2011 / В. А. Дементьев, А. И. Маклаков; патентообладатель В. А. Дементьев – с. 8.
7. 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.
8. 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.
9. Патент № 2337047 Российская Федерация, МПК B65D 88/54. Гибкий бункер: № 2004100711/12: заявл. 14.01.2004: опубл. 27.10.2008 / В. А. Дементьев – с. 15.
10. 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.
11. Патент № 2295611 Российская Федерация, МПК E02F 3/88. Плавающая установка для глубоководного извлечения грунта: № 2004132925/03: заявл. 12.11.2004: опубл. 20.03.2007 / В. А. Дементьев, О. Е. Казаков, Н. Н. Кожевников, И. М. Ялтанец; патентообладатель В. А. Дементьев – с. 5.

