

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ ГИДРОМЕХАНИЗИРОВАННОЙ ВЫЕМКИ ОБВОДНЕННЫХ САПРОПЕЛЕЙ

В.А. Дементьев

EHT Engineering Ltd., Рига, Латвия, e-mail: vladementjev@mail.ru

**Аннотация:** Приведены результаты исследований способов устойчивой выемки сапропелей в обводненных месторождениях с минимальным негативным воздействием на окружающую среду. Предложена математическая модель расчета безопасных объемов и определения оптимального способа выемки сапропелей естественной влажности из-под покрывающего слоя и без смешивания с водой. Установлена зависимость оптимально безопасного объема выемки от глубины проседания покрывающего слоя и структурного сопротивления сапропеля сдвигу в залежи для трех различных способов выемки сапропеля без смешивания его с водой: 1 — депрессионной воронки, 2 — депрессионной траншеи, 3 — скреперной траншеи. Предложено погружное грунтозаборное устройство камерного типа со встроенным эксцентриковым винтовым насосом и скреперным ковшом, способное к горизонтальному перемещению в толще сапропеля на заданной глубине и обеспечивающее устойчивую выемку сапропелей естественной влажности в широком диапазоне сопротивлений сдвигу для сапропелей различных классов, обладающих различными реологическими характеристиками. Сделаны выводы по оптимизации режимов выемки сапропеля естественной влажности, исключающих смешивание его с водой, и тем самым обеспечивающих минимальное негативное воздействие на окружающую среду как самого водоема, так и прилегающей береговой территории.

**Ключевые слова:** сапропель, органическое земледелие, органические удобрения, естественная влажность, земснаряд, грунтозаборное устройство, сопротивление сдвигу, депрессионная воронка, депрессионная траншея, экология, безопасная скорость перемещения.

**Для цитирования:** Дементьев В. А. Совершенствование способов гидромеханизированной выемки обводненных сапропелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 7. – С. 42–52. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_7\_0\_42.

### Improvement of hydraulic extraction methods for moist sapropel

V.A. Dementjev

EHT Engineering Ltd., Riga, Latvia, e-mail: vladementjev@mail.ru

**Abstract:** The analysis of stable extraction methods for moist sapropel at minimized environmental impact is presented. The mathematical model to determine safe volume and optimal method for extraction of sapropel with natural moisture content from under an overburden layer and without mixing with water is proposed. The dependence of the optimized safe volume of extraction on the subsidence depth of the overburden layer and structural shear resistance of sapropel is found for three different methods of sapropel extraction without its mixing with

water: 1 — cone of depression; 2 — trench of depression; 3 — scraper trench. The proposed submersible cell-type suction head with integral eccentric-driven screw pump and scraper bucket is capable to travel in sapropel beds at the preset depth, and to ensure stable extraction of sapropel with natural moisture content within a wide range of shear strengths for sapropel of various grades and various rheology. It is concluded that it is required to optimize extraction techniques for sapropel with natural moisture content to eliminate mixing of sapropel with water and to ensure thereby the minimized environmental impact on a water body and adjacent territory.

**Key words:** sapropel, organic farming, organic fertilizer, natural moisture content, suction-tube dredge, suction head, shear resistance, cone of depression, trench of depression, ecology, safe advance velocity.

**For citation:** Dementjev V. A. Improvement of hydraulic extraction methods for moist sapropel. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(7):42-52. [In Russ]. DOI:10.25018/0236\_1493\_2021\_7\_0\_42.

---

## Введение

Результаты исследований, проведенные в 2017 — 2019 гг. ведущими научно-исследовательскими институтами Сенегала, Мали, Буркина Фасо, Ганы и Берега Слоновой Кости по программе CORAF-FERTORAO при финансировании Всемирного банка, показали высокую эффективность использования удобрений на основе сапропеля [1 — 3]. При этом международные нормы, регулирующие использование сапропеля в качестве одного из природных продуктов органического земледелия, подчеркивают необходимость соблюдения жестких требований по охране окружающей среды [4], хотя сам процесс перемещения сапропеля из анаэробного состояния (под водой) в аэробное (на воздух) способствует уменьшению выбросов метана в атмосферу [5 — 6]. При этом основным экологическим требованием при разработке озерных месторождений сапропеля является сохранность и недопустимость нарушения сплошной верхней зоны сапропелевой залежи, а также распространения в воде облака взвеси, что приводит к массовой гибели гидробионтов (планктона и бентоса) [7]. Во избежание негативного воздействия процесса выемки на экосистему водоема, надо исключить перемешивание сапро-

пеля с водой, всасывание как свободной воды, так и смешанного с водой сапропеля, и вести выемку только сапропеля естественной влажности (СЕВ).

Существующие технологии гидромеханизированной отработки сапропелевых месторождений используют, как правило, грунтозаборные устройства, которые при всасывании смешивают сапропель с водой в соотношении 1:4 ÷ ÷1:25 [8], поскольку грунтовые насосы не способны преодолеть барьер вязкости перекачиваемой среды в 200 мПа·с [9], при этом сапропель в залежи может иметь вязкость (структурную) до 20 000 мПа·с. После всасывания сапропелевая гидросмесь транспортируется на берег по напорному трубопроводу в береговые чеки-отстойники, в которых она находится до 10 — 12 месяцев, проходя процессы отстаивания с осветлением возвратной воды, промораживания и последующей сушки до 60% влажности, после чего производится экскаваторная выемка сапропеля из чеков-отстойников с погрузкой в автотранспорт и вывозкой для расфасовки или прямой доставки потребителю. То же самое происходит при закачке сапропелевой гидросмеси в геотубы. Такой уровень технологии, применяемой для добычи сапропеля, не соответствует современным требованиям

эффективности производства и, в первую очередь, требованию снижения негативного воздействия на окружающую среду при выемке сапропеля [4].

### Основная часть

Практические наблюдения [10] показали, что время выемки СЕВ любым погружным грунтозаборным устройством (далее ГЗУ) с одной стоянки из-под покрывающего длится не более 5–15 мин, после чего в ГЗУ начинает поступать сильно разбавленный водой сапропель, или сапропелевая гидросмесь (далее СГС). При этом было замечено, что процесс выемки сопровождается формированием депрессионной воронки в толще покрывающего слоя, как показано на рис. 1.

Процесс формирования депрессионной воронки начинается с проседания кровли залежи (стадия а). По мере втягивания СЕВ в ГЗУ глубина воронки и ее площадь продолжают увеличиваться до тех пор, пока вершина воронки не опустится до уровня входа в ГЗУ (стадия б), а воронка принимает форму гиперболического конуса. При этом объем воронки становится равным объему СЕВ, втянутого в ГЗУ, но сама воронка в этой стадии оказывается заполненной не СЕВ, а сапропелевой гидросмесью (СГС). Поскольку текучесть воды может до 120 000 раз превышать текучесть СЕВ, вода поступает в воронку гораздо быстрее, чем сползает сапропель. В результате такой большой разности в текучести воды и СЕВ депрессионная

воронка оказывается полностью заполнена не СЕВ, а СГС, и дальнейшее втягивание СЕВ становится невозможным. Работа ГЗУ должна быть остановлена. В случае продолжения работы ГЗУ начнется всасывание СГС со все возрастающим количеством воды в гидросмеси, что ведет к дальнейшему росту площади воронки в кровле за счет размыва стенок конуса (стадии в-е).

С целью более объективного понимания процесса выемки СЕВ и начала всасывания свободной воды предлагается математическая модель формирования идеальной депрессионной воронки (ИДВ). Расчеты показали, что наиболее реально процесс формирования ИДВ при выемке СЕВ описывается следующей гиперболической функцией:

$$x = \frac{y^3}{n} \quad (1)$$

где  $x$  — радиус депрессионной воронки,  $y$  — толщина покрывающего слоя,  $n$  — безразмерный структурный коэффициент.

В физическом смысле коэффициент  $n$  является предельным напряжением динамического сопротивления сдвигу, выраженного в Па (паскалях), определенный для СЕВ в условиях залежи, и его будем обозначать как  $k_{\text{СЕВ}}^{\text{CCC}}$ .

Согласно проведенным исследованиям коэффициент  $k_{\text{СЕВ}}^{\text{CCC}}$  для различных сапропелей может принимать значения в интервале от 18 до 420. Чем больше значение коэффициента  $k_{\text{СЕВ}}^{\text{CCC}}$ , тем выше структурное сопротивление сдвигу, круче кривая, описывающая стенку конуса, и меньше радиус раскрытия и объем

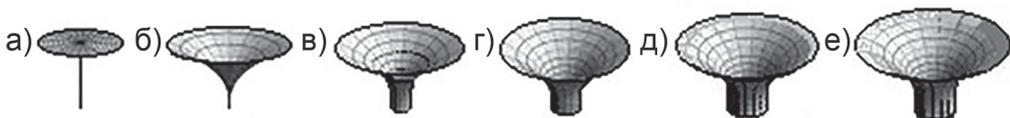


Рис. 1. 3D модель процесса образования депрессионной воронки в залежи: стадии выемки СЕВ (а, б); стадии выемки СГС (в, г, д, е)

Fig. 1. 3D model for formation of cone of depression: extraction stages for sapropel with natural moisture content SNM (a, b); extraction stages for sapropel mixed with water SMW (c, d, e, f)

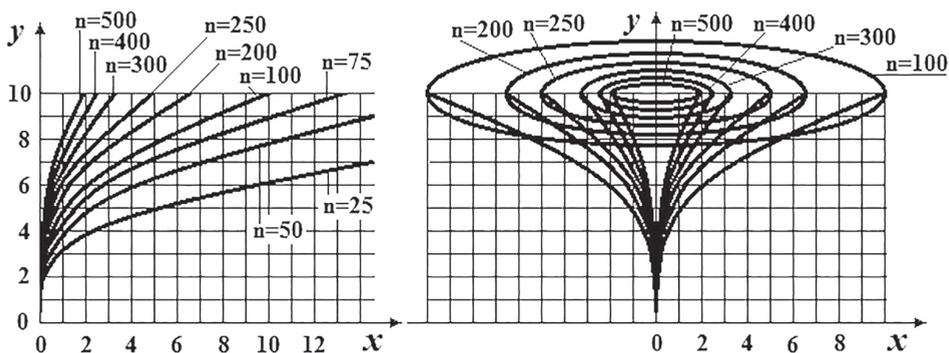


Рис. 2. Графики построения гиперболических кривых идеальной депрессионной воронки  $Q_{\text{сев}}^{\text{ИДВ}}$  для различных значений  $n$

Fig. 2. Plotting hyperbolic curves of ideal cone of depression ICD  $Q_{\text{SNM}}^{\text{ICD}}$  at different  $n$

ИДВ, и наоборот, чем меньше коэффициент  $k_{\text{сев}}^{\text{ccc}}$ , тем меньше структурное сопротивление сдвигу, тем выше кривая, описывающая стенку конуса, и больше радиус раскрытия и объем ИДВ. Толщина покрывающего слоя СЕВ может также принимать значения в довольно большом интервале, но для выявления закономерностей формирования ИДВ ограничимся толщиной покрывающего слоя в 10 м. Значения радиусов ИДВ ( $X$ ) для различных значений толщины покрывающего слоя ( $y$ ) и коэффициента  $k_{\text{сев}}^{\text{ccc}}$ , а также объемы ИДВ рассчитаны на основании графика, изображенного на рис. 2.

На рис. 3 показана расчетная схема определения оптимально безопасного объема депрессионной воронки, гарантирующая выемку СЕВ без всасывания разбавленного водой сапропеля.

Объем идеальной депрессионной воронки СЕВ можно рассчитать по следующей формуле:

$$Q_{\text{сев}}^{\text{ИДВ}} = \int_a^b \pi x^2 dy \quad (2)$$

Если радиус горизонтального сечения депрессионной воронки  $r$  соответствует значению  $X$ , которое изменяется по кривой  $x = y^3/k_{\text{сев}}^{\text{ccc}}$  в зависимости от  $y$ , где  $y$  является толщиной  $h_{\text{покp}}$  покp-

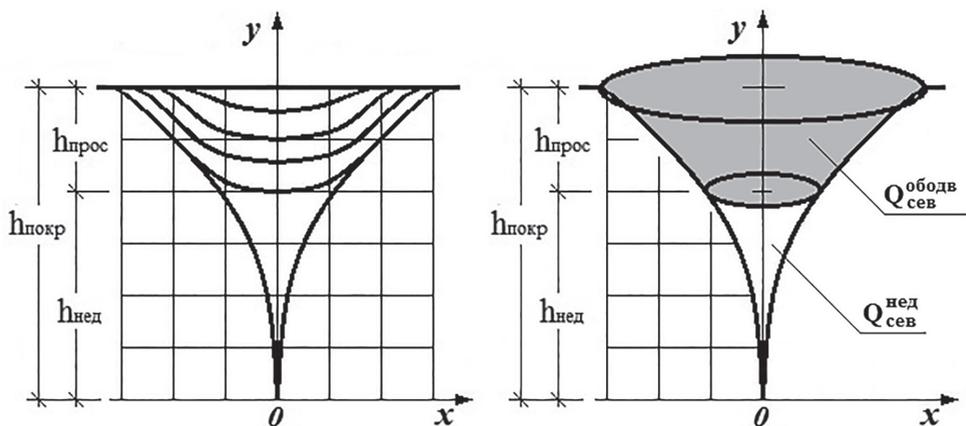


Рис. 3. Расчетная схема оптимально безопасного объема депрессионной воронки ( $Q_{\text{сев}}^{\text{обав}}$ ) с глубиной проседания  $h_{\text{прос}}$

Fig. 3. Analytical model of optimized safe volume of cone of depression  $Q_{\text{SNM}}^{\text{moist}}$  at the subsidence depth  $h_{\text{sub}}$

вающего слоя СЕВ над входом в ГЗУ, а образующая кривая вращается вокруг оси  $y$ , тогда формулу (2) можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{сев}}^{\text{ИДВ}} = \int_0^h \pi x^2 dy = \int_0^h \pi \left( \frac{y^3}{k_{\text{сев}}^{\text{СС}}} \right)^2 dy =$$

$$= \left[ \frac{\pi y^7}{7 \cdot (k_{\text{сев}}^{\text{СС}})^2} \right]_0^{h_{\text{покp}}} = \frac{\pi h_{\text{покp}}^7}{7 \cdot (k_{\text{сев}}^{\text{СС}})^2} \quad (3)$$

Подставляя значения  $h_{\text{покp}}$  и значения  $k_{\text{сев}}^{\text{СС}}$  в формулу (3) в указанных выше пределах, находим значения объемов ИДВ (идеальной депрессионной воронки) СЕВ для различной высоты покрывающего слоя и структурного сопротивления сдвигу и сводим эти данные в таблицу. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что основной объем депрессионной воронки СЕВ расположен в верхней части раструба воронки ближе к кровле залежи, где воронка имеет наибольший радиус раскрытия. Ввиду сужения конуса книзу скорость проседания кровли происходит по нарастающей при постоянной производительности ГЗУ согласно уравнению количества движения, и фактически определить прекращение поступления СЕВ можно, лишь когда в насос уже поступила СГС: падает нагрузка на приводе втягивающего насоса.

С целью исключения всасывания СГС и гарантированной подачи СЕВ по напорному трубопроводу на берег, следует прекратить втягивание СЕВ путем остановки насоса (или уменьшения его производительности) и начать горизонтальное перемещение ГЗУ в залежи.

Во избежание всасывания СГС установлена граница оптимальной глубины  $h_{\text{прос}}$  проседания кровли в воронке (рис. 3) при выемке СЕВ, определяющая оптимально безопасный объем депрессионной воронки  $Q_{\text{сев}}^{\text{ободв}}$ , который может быть извлечен с места одной сто-

янки ГЗУ со сведением риска всасывания СГС к минимуму.

Интегрируя формулу (2) по  $dy$  от  $h_{\text{нед}}$  до  $h_{\text{покp}}$ , получаем формулу объема оптимально безопасного объема депрессионной воронки СЕВ:

$$Q_{\text{сев}}^{\text{ободв}} = \int_{h_{\text{нед}}}^{h_{\text{покp}}} \pi x^2 dy =$$

$$= \frac{\pi}{7 \cdot (k_{\text{сев}}^{\text{СС}})^2} (h_{\text{покp}}^7 - h_{\text{нед}}^7) \quad (4)$$

Расчеты  $Q_{\text{сев}}^{\text{ободв}}$ , произведенные по формуле (4), показывают соотношения оптимальных глубин проседания кровли воронки  $h_{\text{прос}}$  к высоте покрывающего слоя  $h_{\text{покp}}$ , и соответствующие им значения  $Q_{\text{сев}}^{\text{ободв}}$ , вычисленные как разницы объемов между  $Q_{\text{сев}}^{\text{ИДВ}}$  и недобором  $Q_{\text{сев}}^{\text{нед}}$ . Анализ полученных значений  $Q_{\text{сев}}^{\text{ободв}}$  позволил выделить 2 зоны ведения работ: 1 — зона повышенного риска всасывания СГС, ограниченная высотой недобора  $h_{\text{нед}}$ , в которой надо остановить работу ГЗУ по втягиванию СЕВ и переставить ГЗУ на новое место выемки, или начать перемещение ГЗУ по горизонтали; 2 — зона устойчивой работы ГЗУ по выемке СЕВ, ограниченная высотой проседания  $h_{\text{прос}}$ , в которой с одной стоянки можно производить втягивание СЕВ на протяжении нескольких часов, не делая при этом никаких перемещений. Единственным условием устойчивой выемки при таком способе является правильный выбор насоса ГЗУ, втягивающего СЕВ. Насос должен обладать возможностью быстро менять производительность в широких пределах без остановки работы ГЗУ, адаптируя таким образом скорость выемки СЕВ к скорости его оползания в депрессионной воронке. Однако при значении  $k_{\text{сев}}^{\text{СС}} > 175$  выемку следует вести способом депрессионной траншеи из-под покрывающего слоя.

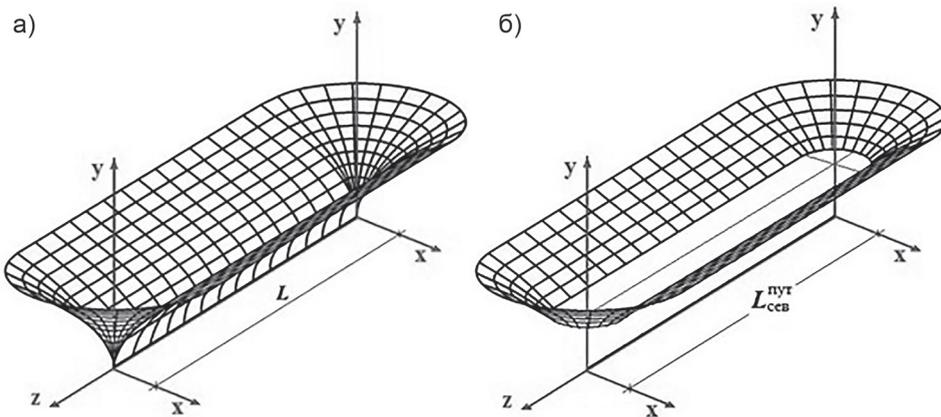


Рис. 4. 3D модели: идеальная депрессионная траншея (ИДТ) (а); оптимально безопасный объем депрессионной траншеи (ОБОДТ) (б)

Fig. 4. 3D models: ideal trench of depression ITD (a), optimized safe volume of trench of depression OSVTD (b)

Во избежание всасывания СГС нет необходимости производить 100% выемку объема как идеальной депрессионной воронки  $Q_{сев}^{ИДВ}$ , так и идеальной депрессионной траншеи  $Q_{сев}^{ИДТ}$ , объем которой больше объема  $Q_{сев}^{ИДВ}$  на величину горизонтального участка длиной  $L$ . Для гарантированной выемки СЕВ нужно ограничиться оптимально безопасными объемами выемки как для ворон-

ки  $Q_{сев}^{ОБОДВ}$ , так и для депрессионной траншеи  $Q_{сев}^{ОБОДТ}$  (рис. 4).

Тогда формулу оптимально безопасного объема депрессионной траншеи  $Q_{сев}^{ОБОДТ}$  можно записать следующим образом:

$$Q_{сев}^{ОБОДТ} = Q_{сев}^{ОБОДВ} + Q_{сев}^{ОБОДУТ} = Q_{сев}^{ОБОДВ} + S_{сев}^{пут} \cdot L_{сев}^{пут} \quad (5)$$

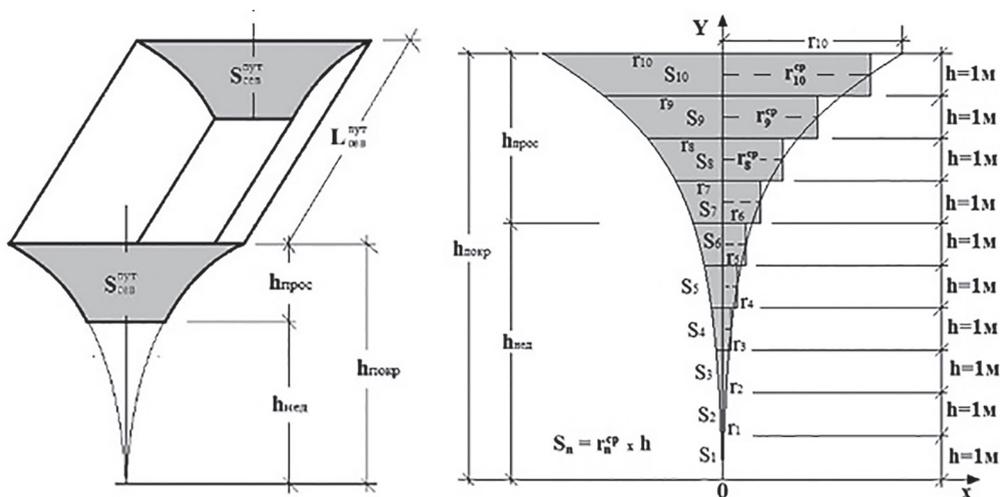


Рис. 5. Схема для подсчета оптимально безопасного объема прямолинейного участка депрессионной траншеи  $Q_{сев}^{ОБОДУТ}$  и расчета площадей ее поперечных сечений

Fig. 5. Calculation diagram for optimized safe volume of straight trench of depression  $Q_{SNM}^{OSVSTD}$  and its cross-section areas

В данной формуле нужно найти только одно неизвестное — площадь поперечного сечения траншеи  $S_{\text{сев}}^{\text{пут}}$ , поскольку объем  $Q_{\text{сев}}^{\text{ободв}}$  был определен ранее по формуле (4), а значение  $L_{\text{сев}}^{\text{пут}}$  задается длиной заходки земснаряда, которая определяется длиной тросов рабочей и возвратной лебедок и может быть принята в пределах 100–200 м (рис. 5).

Площадь поперечного сечения прямолинейного участка траншеи  $S_{\text{сев}}^{\text{пут}}$  равна площади вертикального сечения вынужденного объема  $Q_{\text{сев}}^{\text{ободв}}$  и может быть выражена через сумму площадей  $S_n$  прямоугольников с соответствующими сторонами, как показано на рис. 5. При этом площадь прямоугольников от  $S_1$  до  $S_{10}$  с одной стороны оси  $Y$  можно найти по следующей формуле (6):

$$S_n = r_n^{\text{cp}} \cdot h = x_n^{\text{cp}} \cdot h = \frac{r_n + r_{n-1}}{2} \cdot h \quad (6)$$

Поскольку радиусы  $r_n$  соответствуют значениям  $x$ , которые могут быть выражены через формулу (1), а значения шага  $h$  по вертикальной оси  $y$  принято 1 м, формулу (6) можно записать следующим образом:

$$S_n = \frac{x_n + x_{n-1}}{2} = \left( \frac{y_n + y_{n-1}}{2} \right)^3 / k_{\text{сев}}^{\text{ccc}} \quad (7)$$

Подставляя значения  $y$  от 2 до 10 для различных значений, найдем значения площадей  $S_n$  соответствующих прямоугольников по одну сторону оси  $y$ , а сложив полученные значения площадей на глубину проседания СЕВ и умножив на 2, получим площади  $S_{\text{сев}}^{\text{пут}}$  для соответствующих значений проседания кровли  $h_{\text{прос}}$ . Умножив значения площадей  $S_{\text{сев}}^{\text{пут}}$  на длину  $L_{\text{сев}}^{\text{пут}}$  прямолинейного участка траншеи, равную длине заходки земснаряда (принимая 100 м), получим значения  $Q_{\text{сев}}^{\text{ободпт}}$ , к которым добавляем соответствующие значения  $Q_{\text{сев}}^{\text{ободв}}$  и получаем значения  $Q_{\text{сев}}^{\text{ободт}}$  по формуле (5). Анализ полученных значений объемов траншей  $Q_{\text{сев}}^{\text{ободт}}$  позволил установить, что выемка СЕВ способом депрессионной траншеи гарантирует устойчивую выемку СЕВ с достаточно высокой производительностью.

Результаты расчетов, отображенные графически на рис. 6, показывают, что в зависимости от значений  $h_{\text{покp}}$  и  $k_{\text{сев}}^{\text{ccc}}$

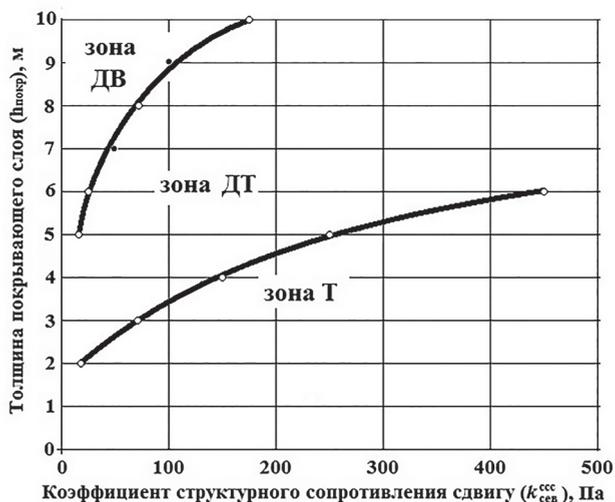


Рис. 6. График зонирования выемки СЕВ: зона ДВ – способом депрессионной воронки, зона ДТ – способом депрессионной траншеи, зона ТС – траншейно-скреперным способом

Fig. 6. Zoning of extraction of sapropel with natural moisture content: CD zone – method of cone of depression; TD zone – method of trench of depression; TS zone – method of trenching and scraping

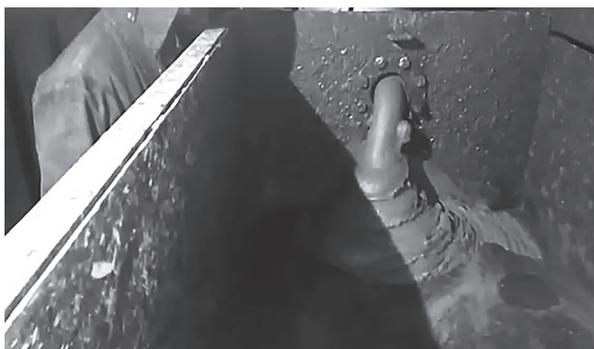


Рис. 7. Подача СЕВ в трюмный бункер земснаряда камерным погружным устройством со встроенным ЭВН

Fig. 7. Feed of sapropel with natural moisture content to bilge bunker of dredge ship by submersible dredge head with integral eccentric-driven screw pump

выемку СЕВ можно эффективно вести тремя способами: в зоне ДВ — способом депрессионной воронки, в зоне ДТ — способом депрессионной траншеи, в зоне ТС — траншейно скреперным способом. При этом различие выемки в зонах ДТ и ТС состоит в том, что в зоне ДТ основной объем выемки равен объему депрессионной траншеи, а в зоне ТС — объему траншеи, срезанному скреперным ковшом ГЗУ.

На основании выводов, изложенных выше, было разработано и внедрено в практику [11] погружное устройство камерного типа на гибкой подвеске [12], способное осуществлять горизонтальное перемещение в толще сапропеля и вести устойчивую выемку СЕВ из-под покрывающего слоя, поскольку вариант жесткой полупогружной камеры [12] испытывал большое сопротивление горизонтальному перемещению в толще СЕВ.

Проведенные исследования показали, что максимально допустимая экологически безопасная скорость горизонтального перемещения ГЗУ в зоне ТС не должна превышать 0,05 м/с, или 180 м/ч. Это позволяет установить оптимальное соотношение между площадью поперечного сечения ковша  $S_{ГЗУ}$  и мак-

симально допустимой производительностью встроенного насоса  $Q_{ЭВН}$  при траншейно скреперном способе выемки и записать его как

$$Q_{ЭВН} = S_{ГЗУ} \cdot v_{ГЗУ}$$

Подставляя в это выражение формулу производительности для насоса ЭВН, устанавливаемого в погружную камеру ГЗУ, получаем следующую зависимость:

$$v_{ГЗУ} = \frac{Q_{ЭВН}}{S_{ГЗУ}} = \frac{4ed_p - 8ew - \pi(d_p w - w^2)B_{ст}n_p 60}{S_{ГЗУ} \cdot 10^9} \leq 180 \text{ м/ч} \quad (8)$$

Тогда производительность насоса, например, при ширине ковша ГЗУ 1 м и высоте 0,5 м, не должна превышать 90 м<sup>3</sup>/ч по СЕВ, а при размере ковша 0,8·0,4 = 0,32 м<sup>2</sup> производительность насоса не должна превышать 57,6 м<sup>3</sup>/ч. В случае работы способом депрессионной воронки в зоне ДВ производительность насоса может быть увеличена в соответствии с показателями  $h_{покр}$  и  $k_{сев}^{ccc}$ . Поскольку условия выемки как по  $h_{покр}$ , так и  $k_{сев}^{ccc}$  могут сильно меняться даже на одном месторождении, производительность насоса и площадь попе-

речного сечения ковша камеры должны регулироваться. Это достигается за счет оснащения камерного насоса гидравлическим мотором, а сама камера комплектуется двумя съемными ковшами для соответствующей работы в зонах ДТ и ТС.

### Выводы

1. Устойчивую выемку СЕВ в широком спектре структурно-реологических параметров эффективно вести из-под покрывающего слоя СЕВ с учетом оценки формирования объема гиперболической депрессионной воронки, объем которой ограничивается оптимально безопасной глубиной проседания СЕВ и коэффициентом  $k_{\text{СЕВ}}^{\text{ССС}}$  структурного сопротивления сдвига СЕВ в залежи.

2. Устойчивую выемку СЕВ из-под покрывающего слоя эффективно вести тремя способами: 1 — способом депрессионной воронки при коэффициенте структурного сопротивления сдвигу  $k_{\text{СЕВ}}^{\text{ССС}} \leq 175$  и при расчетном значении оптимально безопасного объема депрессионной воронки  $Q_{\text{СЕВ}}^{\text{ОБодВ}}$  не менее  $100 \text{ м}^3$ ;

2 — траншейным способом с образованием депрессионной траншеи при расчетном значении оптимально безопасного объема депрессионной траншеи  $Q_{\text{СЕВ}}^{\text{ОБодТ}}$  не менее  $50 \text{ м}^3$ , 3 — траншейно скреперным при расчетном значении оптимально безопасного объема депрессионной траншеи  $Q_{\text{СЕВ}}^{\text{ОБодТ}}$  менее  $50 \text{ м}^3$ .

3. Проведенные эксперименты показали, что устойчивая выемка СЕВ из-под покрывающего слоя в режиме оптимально безопасных объемов выемки во всем спектре значений коэффициента  $k_{\text{СЕВ}}^{\text{ССС}} = 18 \div 425$  и толщины покрывающего слоя  $h_{\text{покр}} \leq 40$  м осуществима за счет применения погружного камерного устройства, способного горизонтально перемещаться в толще залежи и оснащенного съемными скреперными ковшами и встроенным эксцентриковым винтовым насосом, обеспечивающим устойчивое втягивание СЕВ с вязкостью до  $20\,000 \text{ мПа}\cdot\text{с}$  с подачей на поверхность по напорному трубопроводу без всасывания свободной воды. Это гарантирует минимальное негативное воздействие на экосистему водоема.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Annual Report 2018. CORAF.P.18. available at: <https://www.coraf.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2020/03/ANNUAL-REPORT-18.pdf>. Дата обращения: 03.2020.

2. Development Challenges, South-South Solutions. E-newsletter of the United Nations Office for South-South Cooperation in UNDP. March 2014. 4) "Pocket-Friendly" Solution to Help Farmers Go Organic. available at: <https://fr.slideshare.net/DavidSouth1/development-challenges-march-2014-published-44135069>. Дата обращения 03.2014.

3. Nitiema L. W., Traore F., Nebie K., Soalla R. W., Ouedraogo T. Y., Sanon B. S., Ouattara K. 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. available at: <https://m.elewa.org/Journals/wp-content/uploads/2019/11/4.Nitiema-Abstract-Vol.143.pdf>. Дата обращения 04.11.2019.

4. Commission Regulation (EC) No 889/2008. 2008R0889-EN-07.05.2016-011.001-001-1. P.88. available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008R0889-20160507&from=BG>. Дата обращения 07.05.2016.

5. Дементьев В. А. Сапропель как источник альтернативной энергии и натуральных органических удобрений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 6. — С. 67–70.

6. Снакин В. В., Доронин А. В., Фрейбергс Г., Щербитскис И., Власова И. В., Чудовская И. В. Метан в атмосфере: динамика и источники // Жизнь Земли. — 2017. — Т. 39. — № 4. — С. 365–380.

7. Гапоненко Г. Е., Шулькин Л. Л., Крига А. С. Экология освоения озерных сапропелей / Сапропель и продукты его переработки. Материалы международной научно-практической конференции. — Омск: ОМГАУ, 2008. — С. 59–60.

8. Арефьев Н. Н. Метод инженерного расчета гидротранспорта сапропелей естественной влажности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2006. — СВ 4. — С. 201–204.

9. Антониади Д. Г., Гапоненко А. М., Вартумян Г. Т., Стрельцова Ю. Г. Современные технологии интенсификации добычи высоковязкой нефти и оценка эффективности их применения: учебное пособие. — М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. — 80 с.

10. Ялтанец И. М., Дементьев В. А. Перспективность сапропелевой индустрии России и ее технологическая основа // Гидротехническое строительство. — 2020. — № 10. — С. 39–45.

11. Гаевский К. К., Штин С. М. Дноуглубление пресноводных водоемов и их место в национальном проекте «Экология» // Гидротехника. — 2019. — № 3(56). — С. 32–34.

12. Дементьев В. А. Патент РФ № RU2745146С1, 22.03.2021. Устройство для очистки водоемов от илистых отложений и добычи сапропеля естественной влажности. 2021. Бюл. № 9. **ПАТ**

## REFERENCES

1. *Annual Report 2018*. CORAF.P.18. available at: <https://www.coraf.org/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2020/03/ANNUAL-REPORT-18.pdf> (accessed 03.2020).

2. *Development Challenges, South-South Solutions*. E-newsletter of the United Nations Office for South-South Cooperation in UNDP. March 2014. 4) "Pocket-Friendly" Solution to Help Farmers Go Organic. available at: <https://fr.slideshare.net/DavidSouth1/development-challenges-march-2014-published-44135069> (accessed 03.2014).

3. Nitiema L. W., Traore F., Nebie K., Soalla R. W., Ouedraogo T. Y., Sanon B. S., Ouattara K. *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*. available at: <https://m.elewa.org/Journals/wp-content/uploads/2019/11/4.Nitiema-Abstract-Vol.143.pdf>. (accessed 04.11.2019).

4. *Commission Regulation (EC) No 889/2008*. 2008R0889-EN-07.05.2016-011.001-001-1. P.88. available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008R0889-20160507&from=BG> (accessed 07.05.2016).

5. Dementjev V. A. Sapropel as a source of alternative energy and natural organic fertilizers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 6, pp. 67–70.

6. Snakin V. V., Doronin A. V., Freybergs G., Shcherbitskis I., Vlasova I. V., Chudovskaya I. V. Atmospheric methane: Dynamics and sources. *Zhizn' Zemli*. 2017, vol. 39, no. 4, pp. 365–380.

7. Gaponenko G. E., Shul'kin L. L., Kriga A. S. Lake sapropel extraction ecology. Sapropel and conversion products. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of international scientific and practical conference], Omsk, OMGU, 2008, pp. 59–60.

8. Aref'ev N. N. Method of engineering design of hydraulic transport for sapropel with natural moisture content. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2006. Special edition 4, pp. 201–204.

9. Antoniadis D. G., Gaponenko A. M., Vartumyan G. T., Strel'tsova Yu. G. *Sovremennye tekhnologii intensivatsii dobychi vysokov'yazkoj nefti i otsenka effektivnosti ikh primeneniya: uchebnoe posobie* [Modern stimulation technologies in high-viscosity oil recovery and application efficiencies: Educational aid], Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya, 2019, 80 p.

10. Yaltanets I. M., Dementjev V. A. Sapropel industry in Russia: Prospects and technologies. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2020, no. 10, pp. 39–45.

11. Gaevskiy K. K., Shtin S. M. Freshwater bodies: Dredging and position in national project Ecology. *Hydrotechnika*. 2019, no. 3(56), pp. 32–34.

12. Dementjev V. A. *Patent RU2745146S1*, 22.03.2021. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Дементьев Владимир Александрович* – канд. техн. наук, член правления EHT Engineering Ltd., Рига, Латвия, e-mail: vladementjev@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*V.A. Dementjev*, Cand. Sci. (Eng.), Member of the Board, EHT Engineering Ltd., LV-2101, Riga, Latvia, e-mail: vladementjev@mail.ru.

Получена редакцией 05.04.2021; получена после рецензии 23.04.2021; принята к печати 10.06.2021.

Received by the editors 05.04.2021; received after the review 23.04.2021; accepted for printing 10.06.2021.



---

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

---

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

(№ 1242/07-21 от 12.05.2021; 11 с.)

*Карпенко Сергей Михайлович*<sup>1</sup> – канд. техн. наук, доцент, e-mail: karpenko.sm@misis.ru, *Безгинов Глеб Юзович*<sup>1</sup> – аспирант,

<sup>1</sup> ГИ НИТУ «МИСиС».

Дан обзор методов математического моделирования для анализа и прогнозирования электропотребления с учетом влияния различных факторов. Для отбора значимых факторов в модель и оценки степени их влияния на объем потребления электроэнергии предложено использовать методы эконометрического моделирования, в частности корреляционно-регрессионного анализа. Предложены методики проверки структурной однородности данных с помощью теста Чоу и построения многофакторной модели с использованием теоремы Гаусса-Маркова. Приведен пример построения прогнозной модели объема продаж электроэнергии энергосбытовой компанией.

Ключевые слова: электропотребление, производственные факторы, эконометрическое моделирование, структурная однородность данных, корреляционно-регрессионный анализ, многофакторная модель.

## JUSTIFICATION OF THE USE OF ECONOMETRIC METHODS AND MODELS FOR THE ANALYSIS AND FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION

*S.M. Karpenko*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: karpenko.sm@misis.ru, *G.Yu. Bezginov*<sup>1</sup>, Graduate Student,

<sup>1</sup> Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

An overview of mathematical modeling methods for analyzing and predicting power consumption, taking into account the influence of various factors, is given. To select significant factors in the model and assess the degree of their influence on the volume of electricity consumption, it is proposed to use methods of econometric modeling, in particular, correlation and regression analysis. Methods for checking the structural homogeneity of data using the Chow test and constructing a multivariate model using the Gauss-Markov theorem are proposed. An example of constructing a forecast model of the volume of electricity sales by an energy sales company is given.

Key words: power consumption, production factors, econometric modeling, structural homogeneity of data, correlation and regression analysis, multivariate model.