

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗЕМСНАРЯДОВ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ПУЛЬПЫ

Маслов В.А.,

Одесский национальный морской университет

В работе рассмотрена новая технология сепарации грунтовой пульпы в условиях работы земснаряда. Описаны результаты теоретических и натурных экспериментов. Приведены основные судовые технологические схемы монтажа сепаратора грунта.

Ключевые слова: пульпа, земснаряд.

Введение. В условиях эксплуатации судов дноуглубительного флота особое значение приобретает вопрос о том, какая технология обработки грунта используется при проведении дноуглубительных работ. В этом случае определяющими вопросами являются используемая конструкция судна, технология выемки и обработки грунта, а также способы транспортирования пульпы к месту ее складирования. Качество их решения напрямую оказывает влияние на макроэкономические показатели регионов, расположенных вдоль водного бассейна, где проводятся работы по увеличению фарватера и на показатели рентабельности дноуглубительных компаний или судов, участвующих в выемке грунта [2].

Постановка проблемы исследования. В ходе выполненных научно-исследовательских работ была решена проблема оптимизации процесса обезвоживания грунтонесущей пульпы при работе земснаряда фрезерного типа. Основная задача заключалась в получении оптимальной концентрации воды в пульпе путем модернизации технологической линии земснаряда от места выемки грунта (отвальной фрезы) до места его вывалки (выпускная труба земснаряда или начало рефулерного грунтопровода). Целью подобных работ являлась модернизация земснаряда без проведения дорогостоящих операций по изменению конструкции судна или его составных узлов на линии транспортирования пульпы.

Результаты исследований. Проведенный анализ свойств грунтов, разрабатываемых на территории водного бассейна Украины показал, что целесообразно использовать их стандартную классификацию, базирующуюся на гранулометрическом составе, прилипаемости и прочности. Эти технологические параметры напрямую определяются плотностью и консистенцией грунта в условиях его естественного залегания.

В практике эксплуатации земснарядов основными способами добычи и подъема грунта является использование гидравлических грунтозаборных устройств, фрезерной или черпаковой техники и различных узлов, работающих на принципах механико-силового разрушения грунта (взрыв, удары свай и т.п.) с его последующей эжекцией. Первые два способа используются наиболее часто, и по этой причине фрезерный способ

разработки грунта был принят базовым при проведении научно-исследовательских работ.

Анализ фрезерных земснарядов позволил сделать однозначный вывод - повышение КПД работы земснаряда может быть достигнуто только путем изменения технологии разработки и транспортирования пульпы. Уменьшение удельной концентрации воды в пульпе при прочих равных условиях приводит к росту самого главного рабочего показателя – производительности земснаряда. Концентрация воды в транспортируемой пульпе напрямую определяет стоимость проведения дноуглубительных работ и сложность используемой технологической схемы транспортировки.

При проведении исследований рассматривались два вида грунта – илы и мелкозернистые заиленные пески. Они характеризуются малыми значениями объемного веса. При попадании в трюм частицы обоих видов грунта осаждаются очень медленно, что напрямую указывает на влияние концентрации воды в трюме на консистенцию транспортируемого грунта и ослабление процессов его уплотнения. Одним из способов устранения этого недостатка может быть разработанная в ходе исследований новая технология по отбору из пульпы избыточной воды. Она базируется на использовании комбинированного способа сепарирования воды и грунта и объединяет в себе наиболее просто реализуемые технические решения, а именно:

- использование гидромеханических характеристик движущейся смеси грунта с водой для первичного отбора несвязанной с грунтом воды;
- механический отжим пульпы для получения нужного остаточного содержания воды в грунте;
- аэрирование грунта с получением его равномерной консистенции на выходе из сепаратора.

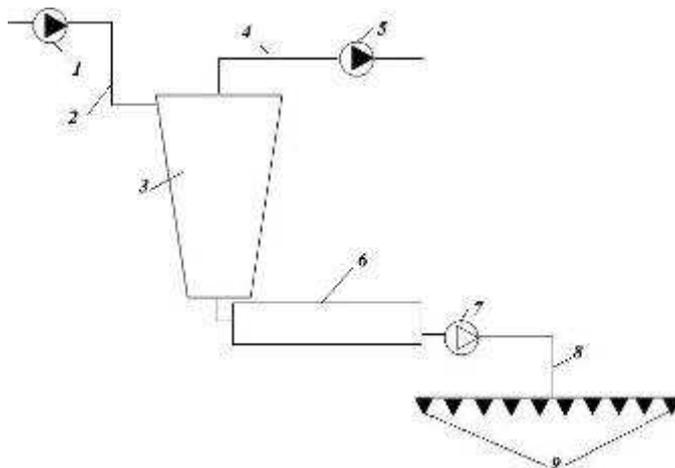


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки сепарации пульпы:

1 – судовой грунтовой насос; 2 – подводящий грунтопровод; 3 – циклонная камера; 4 – трубопровод отвода сепарированной воды; 5 – вспомогательный насос; 6 – узел механического отжима; 7 – компрессор высокого давления; 8 – пневмолиния; 9 – распылительные сопла.

Разработанная технологическая схема сепарации грунтовой пульпы показана на рисунке 1. Основная энергия, необходимая для работы

сепарационной установки, передается грунтовой пульпе при ее подъеме на борт судна грунтовым насосом 1. По подводящему грунтопроводу 2 пульпа поступает в циклонную камеру установки, где за счет вращения потока происходит первичное разделение воды и грунта. В верхней центральной части циклона по трубопроводу отвода сепарированной воды 4 за счет работы вспомогательного насоса 5 происходит отбор осветленной пульпы. Из нижней части циклона грунт с остаточной водой попадает в узел механического отжима 6. Его основными элементами являются вращающийся на малых оборотах винт и жесткие стенки корпуса. За счет регулирования проходного рабочего сечения узла 6 и числа оборотов отжимного винта возможно управлять главными характеристиками установки – ее производительностью и концентрацией остаточной воды в сепарируемом грунте.

В ходе теоретических исследований с использованием известной в теории подобия π -теоремы [1, 3] были сформулированы основные условия моделирования процесса гидродинамического разделения пульпы на составляющие. Главным неизвестным параметром в такой задаче является объемный расход отбираемой воды Q .

Процесс движения пульпы с закруткой в циклоне определяется набором следующих физических величин: угловой скоростью потока в циклоне V , плотностью пульпы ρ , ее вязкостью μ , углом конусности циклона α , высотой циклона h , выходным диаметром циклона d . Путем сопоставления размерности указанных величин их комбинация была записана в общем виде:

$$Q = f(V, \rho, \mu, \alpha, h, d). \quad (1)$$

При рассмотрении функциональной зависимости (1) было установлено, что для моделирования процесса гидродинамической сепарации грунта необходимо всегда удовлетворять равенства:

- угла раствора циклона рабочей камеры сепарационной установки;
- отношения высоты циклона рабочей камеры сепарационной установки к ее выходному диаметру;
- степенного отношения кинематической вязкости пульпы к скорости ее подачи.

Эти условия моделирования в виде критериев подобия имеют вид:

$$\frac{h}{d} = idem; \quad \alpha = idem; \quad \frac{\sqrt[3]{V^4}}{V^7} = idem. \quad (2)$$

При составлении математической модели закрутки потока в циклоне сепарационной установки движение частиц грунта рассматривалось как сумма переносного движения в составе выделенного элементарного объема пульпы и относительного движения внутри этого объема. Относительное движение вызывается проявлением силы тяжести в потоке, а его скорость принималась равной скорости осаждения частицы грунта под действием только одной силы тяжести W .

В ходе исследований была принята гипотеза о том, что взвешенная частица грунта принимает скорость элементарного объема за время, намного меньшее, чем время, за которое она этим объемом переносится. На основании этой гипотезы было определено время релаксации t – время, при котором частица грунта приобретала скорость переносящего ее жидкого объема.

При рассмотрении падения частицы грунта в неподвижной воде (ось z направлена вниз) уравнение ее движения (седиментации) имеет вид

$$ma = mg - F_z, \quad (3)$$

где m – масса частицы грунта, кг; g – ускорение свободного падения, m^2/c ; F_z – сила сопротивления, действующая со стороны жидкости на частицу, H .

Если учитывать падение в жидкости частиц крупного фракционного состава, для которых выполняется закон квадратичного сопротивления

$$F_z = k_2 ma, \quad (4)$$

то скорость падения частицы в соответствии с решением уравнения (3) с использованием граничных условий [5] может рассчитываться как

$$V = W \cdot th \frac{g}{W} t. \quad (5)$$

Из уравнения (5) легко находится время релаксации, в течение которого крупная частица, начав двигаться из состояния покоя под действием силы тяжести, приобретет скорость $0,95W$. Оно имеет вид

$$t = 1,8 \frac{W}{g}. \quad (6)$$

Количество частиц грунта, сепарируемых внутри рабочей камеры циклона, определялось с учетом величины радиального (перпендикулярного к оси вращения пульпы) смещения одиночной твердой частицы при движении по кольцевому каналу. При составлении математической модели было принято допущение о равенстве полной скорости потока пульпы тангенциальной составляющей скорости частиц грунта V_r . Радиальное смещение частиц грунта со скоростью V_r встречает противодействие от силы сопротивления вращающейся пульпы. Эта сила, согласно формуле Стокса рассчитывается как

$$F_x = 3\pi\mu V_r d, \quad (7)$$

где d – диаметр частицы грунта, m .

Из-за силы сопротивления частицы грунта начинают двигаться по криволинейной траектории степень кривизны которой определяется массой частицы и вязкостью пульпы. В этом случае частица грунта, выходя на криволинейную траекторию, приобретает центростремительное ускорение, соответствующее силе

$$F_r = \frac{\pi}{6R_c} V_\tau^2 \rho_{\text{ад}} d^3, \quad (8)$$

где R_c – радиус кривизны траектории движения частицы, м.

Из равенства сил сопротивления и центростремительного ускорения можно найти скорость движения частицы в радиальном направлении

$$V_r = \frac{V_\tau^2}{18R_c} \rho_{\text{ад}} \frac{d^2}{\mu}, \quad (9)$$

Считая, что радиус кривизны траектории частицы R_c соответствует радиусу окружности, у которой центр совпадает с осью симметрии циклона, можно найти время прохождения частицей грунта пути $L = \pi R_c$

$$\dot{O} = \frac{L}{V_r}. \quad (10)$$

Значения T фактически соответствуют времени, при котором частица грунта в циклоне смещается от оси его симметрии к стенкам, а величину радиального смещения частицы грунта за это время можно найти как

$$\Delta S = V_r T = \frac{V_\tau^2}{18R_c} \rho_{\text{ад}} \frac{d^2}{\mu} \frac{\pi R_c}{V_\tau} = \frac{\pi \rho_{\text{ад}}}{18\mu} V_\tau d^2. \quad (11)$$

В ходе расчетов для различных значений входной скорости потока в циклон было найдено изменение радиальной скорости движения грунта в различных сечениях циклона. Полученные результаты показаны на рисунке 2.

Характер изменения времени, за которое частицы грунта смещаются к стенкам циклона при различных значениях скорости подвода пульпы можно увидеть на рисунке 3. Из графиков следует, что рост скорости подвода пульпы в циклон значительно сокращает процесс ее сепарирования. На графиках видно, что рабочие значения скорости подвода должны превышать величину 5 м/с, а оптимальное значение скорости входа пульпы в сепаратор равно 7 м/с. В этом случае максимальное время отделения грунта от воды в наибольшем поперечном сечении рабочей камеры циклона составляет всего 2 секунды.

Для разработанной конструкции судового узла сепарации грунта были выполнены натурные эксперименты, в ходе которых получен ряд новых результатов и сделаны выводы, позволившие сформулировать основные положения методики его проектирования. Весь процесс измерений был автоматизирован и при определении величины расхода величина суммарной среднеквадратичной погрешности составляла $\delta Q = 0,102\%$, а при измерении эпюры давления по высоте рабочей камеры циклона $\delta \Delta P = 0,5\%$.

При работе сепарационной установки очень важной является зависимость скорости вращения пульпы в циклоне от входного

динамического напора. Динамический напор может быть изменен двумя способами:

1. Конструктивным – установкой сопловых аппаратов в месте соединения грунтопровода с рабочей камерой циклона.
2. Технологическим – путем регулирования напорной характеристики грунтового насоса.

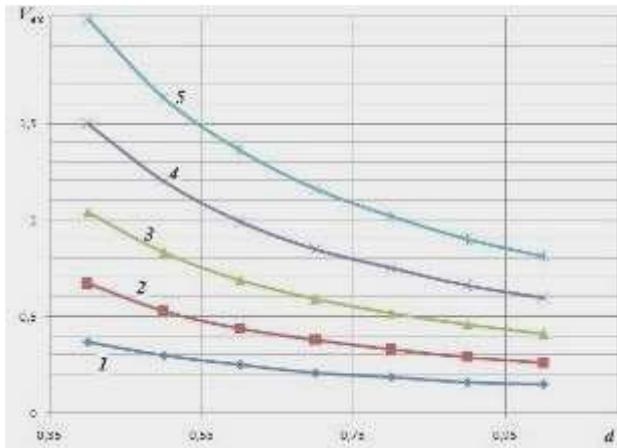


Рисунок 2 – Изменение радиальной скорости частиц грунта по высоте рабочей камеры циклона.
 1 – $V_{\text{вх}} = 3$ м/с; 2 – $V_{\text{вх}} = 4$ м/с;
 3 – $V_{\text{вх}} = 5$ м/с; 4 – $V_{\text{вх}} = 6$ м/с;
 5 – $V_{\text{вх}} = 7$ м/с.

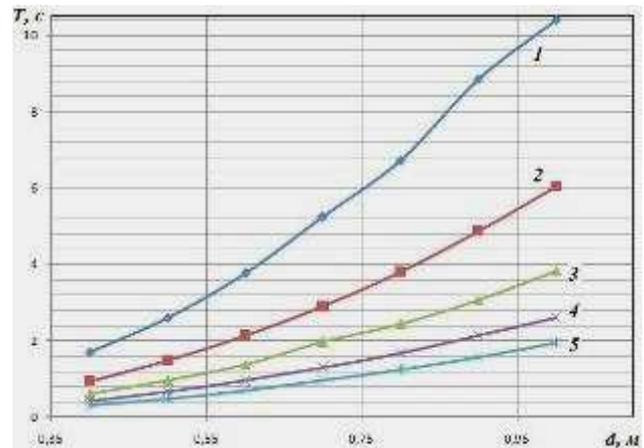


Рисунок 3 – Зависимость времени сепарации грунта от скорости подвода. 1 – $V_{\text{вх}} = 3$ м/с; 2 – $V_{\text{вх}} = 4$ м/с; 3 – $V_{\text{вх}} = 5$ м/с; 4 – $V_{\text{вх}} = 6$ м/с; 5 – $V_{\text{вх}} = 7$ м/с.

Оба способа были исследованы, и полученные результаты можно увидеть на рисунках 4-5. На рис. 4 показана зависимость угловой скорости вращения от угла конусности α соплового направляющего аппарата. При экспериментах угол α изменялся с шагом 1° в диапазоне от 20° до 30° . Все сопловые насадки имели одинаковые длину $l=200$ мм и входной диаметр $d_{\text{вх}}=50$ мм. Внутренняя поверхность насадок за счет механической обработки была выполнена абсолютно гладкой. Эксперимент проводился при неизменном значении напора грунтового насоса $H=38$ м.в.ст.

Приведенная графическая зависимость однозначно указывает на оптимальные значения угла конусности сопловой насадки. На графике видно, что в диапазоне от 20° до 26° в идентичных условиях скорость вращения грунтовой пульпы равномерно увеличилась на 33 %, а, начиная с угла конусности 26° ее значения изменялись мало в пределах, от 6,4 до 6,83 м/с.

В случае подачи пульпы в циклон без использования сопловых насадок скорость вращения определяется только напором грунтового насоса и, как видно на рис. 5, характер ее изменения становится иным. На графике можно выделить три характерных участка каждый из которых характеризуется разным изменением скорости вращения.

Первая зона соответствует области начала вращения пульпы в рабочей камере циклона. Рост скорости в зависимости от напора может

рассматриваться как линейный, а вращение пульпы происходит, как в случае однородной жидкости – без разделения фазовых компонент. В первой области процесс сепарации грунта практически не происходит.

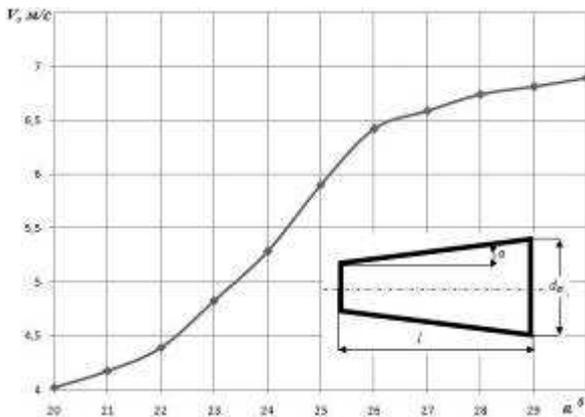


Рисунок 4 – Влияние угла конусности на скорость вращения

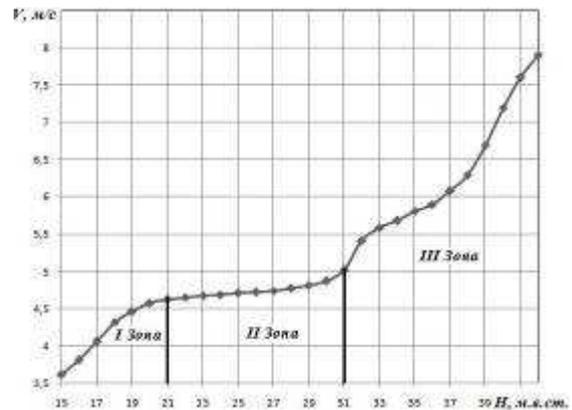


Рисунок 5 – Влияние напора на скорость вращения

Вторая область соответствует вращательному движению с проявлением в потоке сил вязкостного трения. Силы инерции частиц грунта преобладают над центробежными силами, и по этой причине, рост напора не приводит к значительному росту скорости вращения. На графике подобное постоянство скорости соответствует характерному плоскому участку. На рисунке видно, что изменение напора с 21 до 31 м.в.ст., т.е. на 47 %, приводит к изменению скорости вращения пульпы всего на 8 % от 4,62 до 5 м/с.

Третья зона может рассматриваться, как основная зона сепарации грунта. Увеличение напора на 35 % приводит практически к двойному росту скорости вращения от 5 до 7,9 м/с.

Качество работы судовой установки сепарации грунтоносущей пульпы и в частности ее производительность по отделяемой воде, напрямую определяется напором потока пульпы на входе в нее. При проведении измерений была получена зависимость отношения расхода осветленной пульпы Q_e к общему расходу Q_n при изменении входного напора в установку. Она показана на рисунке 6, где также приведена графическая зависимость, описывающая качество получаемой осветленной пульпы. Как видно, в начале графика концентрация грунта в отобранной воде ε с ростом напора грунтового насоса падает. Свое минимальное значение она принимает при $H = 25$ м.в.ст., а затем начинает увеличиваться. Причиной роста является дополнительная турбулизация потока, приводящая к образованию крупномасштабного вихревого течения, в результате которого возникают процессы вторичного выбрасывания грунта от стенок циклона к его центральной части.

С технологической точки зрения особое внимание нужно уделять местам установки разработанного узла сепарации грунта на судне. В зависимости от требований к выходной концентрации воды в грунте

возможно использовать два технологических решения. Они оба показаны на рисунке 7.

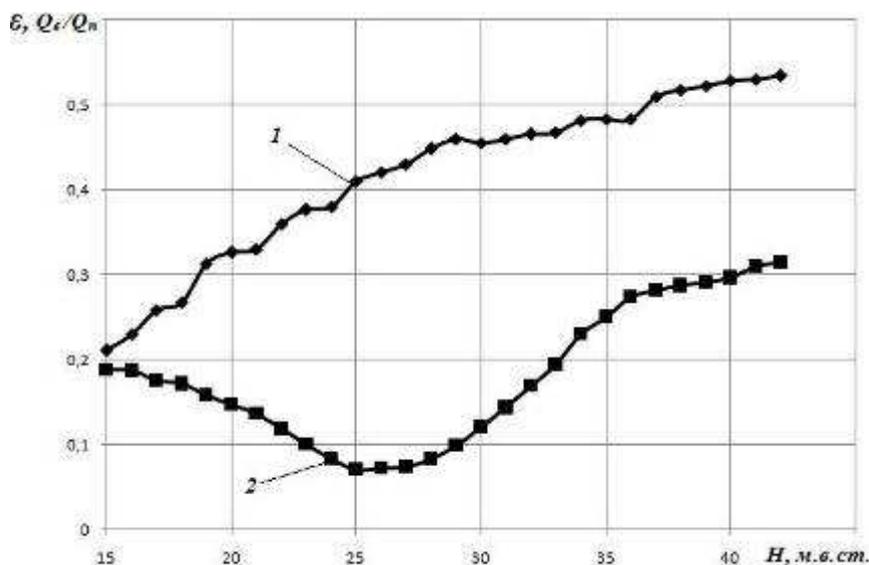


Рисунок 6 – Влияние напора судового насоса на производительность и качество очистки воды:

1 – отношение расхода осветленной пульпы Q_e к общему расходу Q_n ; 2 – относительная концентрация грунта в отделенной воде

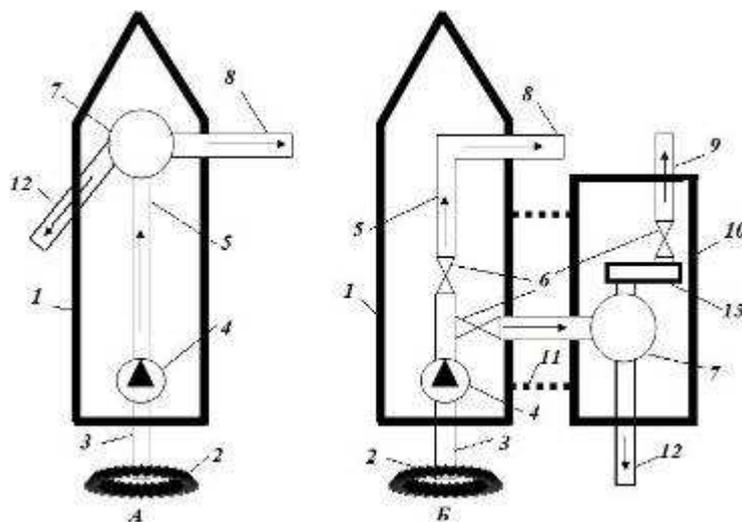


Рисунок 7 – Схемы установки узла сепарации

(А – установка на судне; Б – установка на отдельном понтоне):

1 – земснаряд, 2 – фреза, 3 – всасывающий трубопровод, 4 – грунтовой насос, 5 – судовой трубопровод, 6 – запорно-регулирующая арматура, 7 – узел сепарации пульпы, 8 – рефулерный трубопровод, 9 – лонгкулар или механический транспортер, 10 – понтон, 11 – механизмы швартовки, 12 – линия сброса отделенной воды, 13 – узел механического отжима.

Первый вариант (рис. 7-А) установки – палуба земснаряда. В этом случае остаточная концентрация воды должна быть не менее 30 % и грунт в последующем должен транспортироваться как обычная пульпа.

Второй вариант (рис. 7-Б) установки – палуба отдельного понтона, пришвартованного к земснаряду жесткой связью. В этом случае остаточная

концентрация воды является минимальной (не более 20 %) и грунт должен складироваться в трюм баржи непосредственно на месте проведения дноуглубительных работ.

При эксплуатации разработанного судового сепаратора грунта предполагается полное автоматическое управление и контроль за основными параметрами сепарируемой пульпы и получаемых продуктов разделения - воды и грунта. Общая схема включения сепаратора в судовой напорный грунтопровод показана на схематическом рисунке 7-А. Ее основным предназначением является повышение производительности рефулерной системы грунтопровода 8. При такой технологии подключения узел сепарации грунтовой пульпы не должен содержать узел механического отжима 13.

При использовании второй схемы установки – на отдельном понтоне выходная концентрация воды в грунте после узла механического отжима 13 будет очень низкая и одним из вариантов транспортирования грунта от судового сепаратора до трюма может являться лонгкулуар (грунтоотводной лоток) 9. В своей работе это устройство использует принцип движения вязкопластичного потока за счет действия силы тяжести. Оптимальное значение угла наклона лотка соответствует диапазону 25 – 33 0. Длину кулуара можно регулировать установкой модульных секций имеющих в поперечном сечении стандартные геометрические формы – круглую, прямоугольную или полукруглую. Суммарная сила трения потока о стенки кулуара равна

$$F = \Pi l \tau, \quad (12)$$

где Π – смоченный периметр, м; l – длина стенки, м; τ – касательное напряжение, Па.

Анализ выражения (12) показывает, что предпочтительными для стенок лонгкулуара являются круглая и полукруглая формы. При заданной площади они обладают меньшей величиной смоченного периметра по сравнению с прямоугольным каналом и, следовательно, оказывают меньшее сопротивление транспортируемому грунту.

Выводы:

1. Повышение КПД работы земснаряда можно достигнуть путем модернизации технологии обработки пульпы. Уменьшение удельной концентрации воды в пульпе при прочих равных условиях приводит к росту самого главного рабочего показателя – производительности земснаряда.

2. Основными параметрами, влияющими на качество предложенного метода сепарации, являются входной динамический напор, консистенция грунта в пульпе и вязкость самой пульпы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башта Т. М., Руднев С. С. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М. : Изд-во Машиностроение, 1982. – 423 с.

2. Бородулин Я. Ф. Дноуглубительный флот и дноуглубительные работы / Я. Ф. Бородулин, Б. Н. Сущенко. – М. : Транспорт, 1973. – 432 с.

2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1973. – 847 с.

3. Яхно О. М. Кавитация в переработке нефти / [О. М. Яхно, А. Д. Коваль, Л. И. Пищенко, В. П. Паскалов, Н. Н. Яске]. – Київ : Світ, 1999. – 263 с.

5. Гиргидов А. Д. Турбулентная диффузия с конечной скоростью / А. Д. Гиргидов. – СПб. : СПбГТУ, 1996. – 260 с.

Маслов В.О. УДОСКОНАЛЕННЯ ЗЕМСНАРЯДІВ ШЛЯХОМ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ПУЛЬПИ

В роботі розглянута нова технологія сепарації ґрунтової пульпи в умовах роботи земснаряду. Описані результати теоретичних і натурних експериментів. Приведені основні суднові технологічні схеми монтажу сепаратора ґрунту.

Ключові слова: пульпа, земснаряд.

Maslov V.A. IMPROVING DREDGERS BY MODERNIZING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF PULP PROCESSING

A new technology for soil pulp separation when using a dredger is considered. The results of theoretical and physical experiments are described. Primary technological schemes for soil separator assembly are given.

Key words: pulp, dredger.