

**ТЕХНОЛОГИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ
ГРУНТОВОЙ ПУЛЬПЫ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ЗЕМСНАРЯДА***Маслов В.А.,**Одесский национальный морской университет*

В работе рассмотрены основные аспекты новой гидромеханической технологии по выделению избыточной воды из грунтовой пульпы. Описан экспериментальный стенд и главные результаты экспериментов. Рассмотрены виды ремонтных работ для разработанного судового узла сепарации пульпы.

Ключевые слова: грунтовая пульпа, производительность судовой сепарационной установки, механический отжим.

Введение. Предварительным этапом проведения дноуглубительных работ является измерение всех основных физических свойств грунта на месте его залегания. Важность этих данных хорошо иллюстрируется таким примером, как использование норм времени на проведение дноуглубительных работ. В этом случае при наличии в разрабатываемом грунте дополнительных геологических включений скорость выемки грунта или его транспортировки должны снижаться [1, 2, 3]. В частности, если в миделевом сечении размер дополнительных включений превышает 5 см, для земснарядов должны применяться нормы часовой производительности с понижающими поправочными коэффициентами. В случае, если при проведении дноуглубительных работ используется многочерпаковые земснаряды, такие коэффициенты необходимо вводить при наличии включений, миделевый размер которых превышает 11 см [1].

Целью исследования является модернизация технического процесса регулирования грунтовой пульпы в условиях работы земснаряда.

При анализе характерных физических свойств грунта необходимо особо отметить, что удельный вес частиц грунта в пульпе практически всегда отличается в большую сторону от аналогичного параметра в условиях естественного залегания грунта. Так, например, значения этих величин для песка, относящегося к среднему классу грунтов IIIс соответственно равны $\gamma_r = 2650 \text{ кг/м}^3$ и $\gamma_{\text{ест}} = 1650 \text{ кг/м}^3$.

Эффективность работы всех судов дноуглубительного флота в наибольшей степени определяется техническим совершенством их рабочих узлов и механизмов. По этой причине в ходе выполненных научно-исследовательских работ была решена проблема уменьшения удельной концентрации воды в грунтонасущей пульпе при работе рефулерного земснаряда. Исследования были направлены на создание нового судового сепаратора грунтовой пульпы, действующего на комбинированном способе сепарирования воды и грунта. Этот способ 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 равномерной консистенции при загрузке в шаланду пневмотранспортом.

Результаты исследований. На состав грунтовой пульпы большое значение оказывает качество грунтозабора при проведении дноуглубительных работ. В частности, при некачественной выемке грунта снижается насыщение пульпы грунтом, а, следовательно, падает производительность работы земснаряда. При высокой (превышающей нормативную) консистенции грунта в пульпе наблюдается падение ее массового расхода и скорости транспортировки. Из-за возникновения застойных зон (пробок) внутри грунтопровода имеет место прерывистость подачи и, как следствие, плохая чистота выборки грунта с поверхности разрабатываемого слоя.

При работе земснаряда с механическим разрыхлителем (фреза, бур, черпаки и т.п.) из-за разрушения начальной структуры залегания при отборе грунта его естественная плотность изменяется. В этом случае необходимо учитывать влияние возникающих гидродинамических процессов, приводящих к его объемному расширению уже непосредственно на входном участке грунтоприемника. Вследствие крупномасштабного вихреобразования и наблюдающихся высокочастотных турбулентных пульсаций в потоке объемный расход земснаряда $Q_{зр}$ может отличаться от расхода на механическом разрыхлителе $Q_{м.р.}$ в пределах от 8 до 50 % и должен рассчитываться так

$$Q_{зр} = \frac{Q_{м.р.}}{\lambda_{зр}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{зр}$ – коэффициент, зависящий от вида грунта и плотности его залегания. Значения величины $\lambda_{зр}$ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициента изменения плотности грунта

Род грунта	$\lambda_{зр}$	Род грунта	$\lambda_{зр}$
Песок мелкий	1,08-1,17	Супесь	1,08-1,17
Песок средний и крупный	1,14-1,28	Глина	1,3-1,45
Мелкий камень	1,24-1,3	Скальные породы	1,3-1,45

С гидромеханической точки зрения, одной из главных характеристик движения пульпы внутри грунтопровода может являться поле скорости потока. На рисунке 1 показаны экспериментальные данные [4] по распределению скорости в поперечном сечении цилиндрической трубы для таких видов грунта, как ил, пылевидный песок и глина. Эпюры I и II соответствуют невысоким значениям скорости транспортировки илистого грунта, и их анализ указывает на симметрию эпюры скорости относительно оси трубопровода. Движущийся многофазный поток может быть

охарактеризован как однородный. Вид эпюры скорости соответствует ламинарному течению с характерным максимумом на оси и минимальными значениями скорости вблизи жестких стенок трубы.

Увеличение скорости транспортировки ила качественно картину течения не изменяет, что хорошо видно на II эпюре. Единственное отличие заключается в седиментации грунтовой фазы с началом смещения максимума скорости в сторону верхней границы трубопровода. Установлено, что рост величины концентрации грунта в пульпе приводит к падению средней скорости потока, но эпюра скорости при этом качественно не видоизменяется.

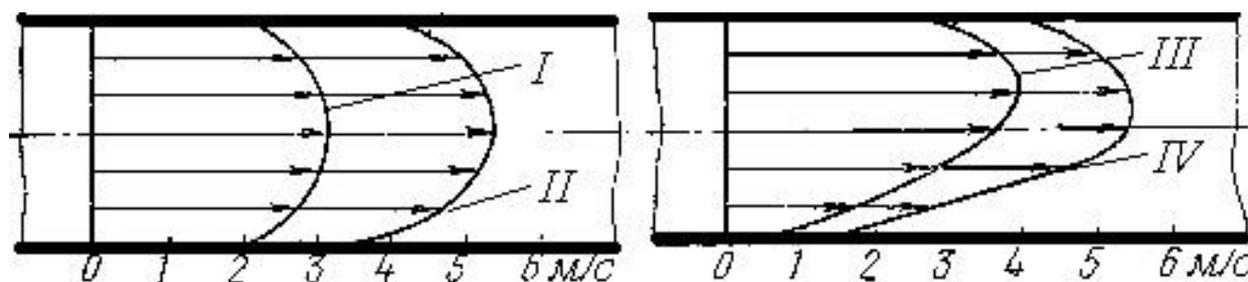


Рисунок 1 – Характерные эпюры скорости пульпы в грунтопроводе

Эпюры скорости III и IV соответствуют перемещению с водой среднезернистого и крупнозернистого песка. На графиках хорошо видна асимметрия в получаемой картине движения. Эпюра III характеризует малые, а эпюра IV – средние значения скорости многофазного потока. Смещение максимума скорости в верхнюю часть трубы можно объяснить процессами седиментации грунта в движущемся потоке. Так, более тяжелые и крупные частицы песка, оседая, переходят в движение соответствующее не взвешенному состоянию, а вязкому ползущему потоку. Толщина его вязкого слоя определяется концентрацией песка в воде и средней скоростью движения. Чем больше концентрация и ниже скорость, тем толще становится вязкий слой.

Эпюра скорости IV позволяет сделать однозначный вывод о зависимости гидравлической характеристики рефулерного грунтопровода от предельной концентрации несущей фазы. Именно толщина неподвижного слоя оказывает влияние на изменение таких величин как: рост потерь напора на трение; рост касательных напряжений на границе раздела между движущимся потоком и вязко-пластичной фазами; уменьшение площади живого сечения рефулерного грунтопровода. Анализ эпюр I-IV указывает на неоднородность плотностного распределения потока по вертикальному сечению грунтопровода. В верхней части трубы превалирует взвесенесущая водная фаза, а в нижней части, ниже оси симметрии трубы, наблюдается резкое увеличение плотности потока.

В ходе исследований был сделан вывод о том, что толщина «вредного» вязко-пластичного слоя всегда зависит от диаметра трубопровода. При правильно выбранном сечении трубы за счет действия динамической

нагрузки со стороны легких фракций песка более крупные частицы будут продолжать свое движение, увлекаясь основным потоком. В этом случае, за счет усиления эффекта конвективного переноса, максимум эпюры скорости потока будет смещаться в сторону оси симметрии трубы, а расходные характеристики канала будут достигать своих максимальных значений. Избыточный диаметр трубопровода всегда приведет к росту градиента плотностной стратификации потока по длине трубопровода и, как следствие, к падению его пропускной способности с ростом энергетических затрат на транспортирование пульпы. Установлено, что степень перекрытия цилиндрической трубы, т.е. отношение максимального значения высоты вязко-пластичного слоя к ее диаметру, не должно превышать значений, соответствующих диапазону 0,25 – 0,3.

При исследовании возможных способов оптимизации процесса плотностной стратификации пульпы по высоте трюма было установлено, что наиболее перспективной в этом случае является воздушная флотация. Если рассматривать процесс подъема воздушных пузырьков в пульпе, то главной задачей, применительно к седиментации практически неподвижной пульпы, является определение скорости их подъема [4, 5]. Эта величина в зависимости от режима движения определяется так

- ламинарный режим (закон Стокса)

$$V = \frac{d_b^2 (\rho_n - \rho_a) g}{18 \mu_n}, \quad (2)$$

- турбулентный режим

$$V = 0,7 \sqrt{\frac{d_b^2 (\rho_n - \rho_a) g}{\mu_n}}, \quad (3)$$

где d_b – диаметр пузырька, м; ρ_n , ρ_a – плотность пульпы и воздуха, кг/м³; μ_n – динамическая вязкость пульпы, Па·с.

Согласно экспериментальным данным работы [1] при условии $Re > 15000$ и $d_b = 2-15$ мм скорость всплывания воздушного пузырька нужно выбирать из диапазона от 25 до 30 см/с.

Для разработанного судового узла сепарации грунта была реализована серия натурных исследований. Их главной целью являлась оценка технологических особенностей процесса сепарации и тестирование на безотказность и воспроизводимость получаемых результатов. На основе проведенного статистического анализа полученного набора данных были сделаны выводы, позволившие сформулировать основные требования к дальнейшему использованию разработанного прототипа сепаратора грунта.

Принципиальная схема исследовательского стенда показана на рисунке 2. Он представлял собой замкнутую гидравлическую систему с муфтовыми и фланцевыми соединениями основных элементов. Все рабочие

трубопроводы стенда были собраны из пластиковых труб, относящихся к области гидравлически гладких труб.

Стенд работал следующим образом: начальный объем (1 м³) пульпы загружался в расходный бак 1, откуда по линии подачи 2, за счет использования грунтового насоса 3, смесь грунта и воды поступала в рабочую камеру 4. Диаметр условного прохода линии 2 составлял 100 мм, а всех остальных рабочих линий стенда, соответственно, 50 мм. Расходомерный бак 1 был выполнен в виде стеклянного куба с объемом $V = 1,216 \text{ м}^3$. Для смеси ила и воды с удельными значениями концентрации 30 % и 70 % соответственно, при рабочей температуре равной $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, диапазон моделируемых чисел Рейнольдса, просчитанных по внутреннему диаметру 50 мм, составлял $Re = 1540 \div 300000$.

В начале экспериментов, после автоматизированного определения величины расхода (с погрешностью $\delta_Q = 0,102 \%$), весь объем прокачиваемой пульпы подавался обратно в бак 1. Транспортирование, при помощи вспомогательного грунтового насоса 6, производилось по линии обратного отвода пульпы 5. После выхода потока пульпы на стационарный режим течения в линии 2 осуществлялся переход к изучаемому процессу сепарирования. В этом случае, после закрутки потока в камере 4 по линии отвода светлой пульпы 7 при помощи центробежного насоса 8, отделяемая вода перекачивалась в накопительный бак 9. Получаемая после центробежного разделения более вязкая пульпа по линии отвода 10 поступала в узел механического отжима 11. После дополнительного отделения воды, грунт по линии сброса отжатой пульпы 12, подавался в накопительный грунтовой резервуар 13. По окончании процесса отделения вода из бака 9 и пульпа из накопительной емкости 13 измерялись объемно-весовым способом и, с учетом малого объема отжатой воды в узле 11, формулировался вывод о качестве процесса сепарации.

Основная энергия, которую поток пульпы получает при прохождении грунтового насоса, расходуется на гидравлические потери внутри циклона и сепарацию грунта от воды. По этой причине при проведении опытов эта величина была измерена при различных значениях объемного расхода. На рисунке 3, где приведены результаты этих измерений, можно увидеть, что зависимость величины потерь от расхода подчиняется параболическому закону. При пересчете потерь давления на значение коэффициента гидравлического трения были получены данные, указывающие на автомодельность величины сопротивления циклона по числу Рейнольдса. Величина сопротивления циклона ζ с ростом числа Re оставалась практически неизменной: $\zeta = 19,5$. Эти данные показаны на рисунке 4, а сам пересчет производился по выражению

$$\zeta = \frac{\Delta P}{\rho V^2 / 2}, \quad (4)$$

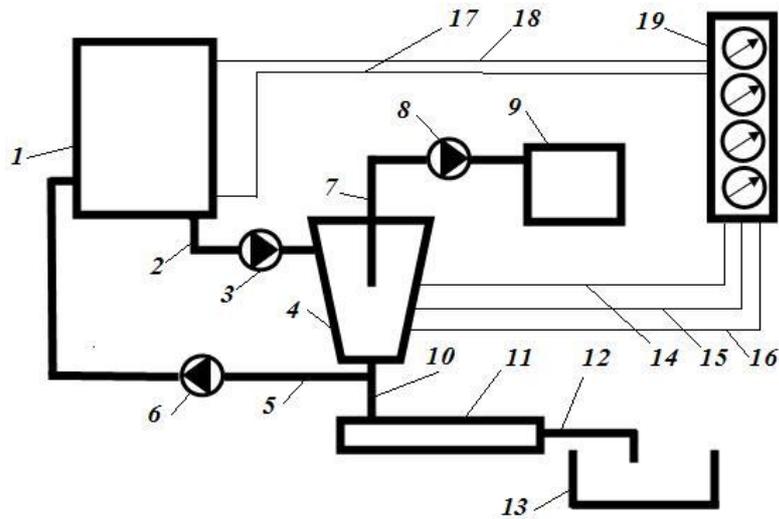


Рисунок 2 – Схема измерительного стенда

1 – расходный бак; 2 – линия подачи пульпы; 3 – грунтовой насос; 4 – рабочая камера; 5 – линия обратного отвода пульпы; 6 – вспомогательный насос; 7 – линия отвода светлой пульпы; 8 – насос; 9 – бак; 10 – линия отвода пульпы; 11 – узел механического отжима; 12 – линия сброса пульпы; 13 – накопительный грунтовой резервуар; 14 – измерительная линия давления; 15 – измерительная линия температуры; 16 – измерительная линия вязкости; 17, 18 – измерительная линия уровня; 19 – электронный узел обработки и индикации показаний.

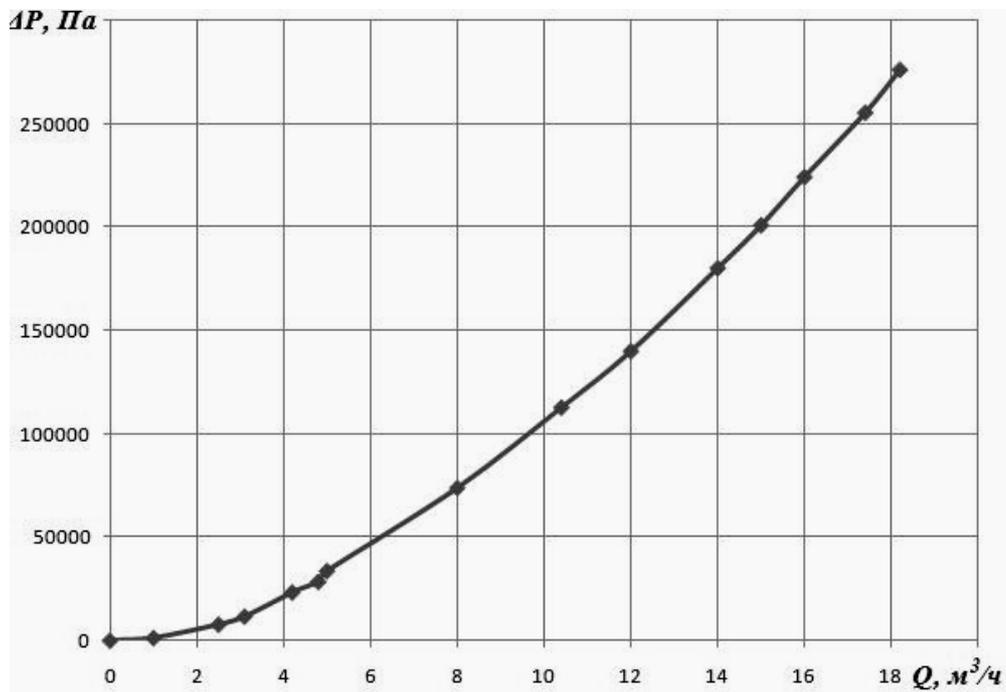


Рисунок 3 – Зависимость потерь давления от объемного расхода

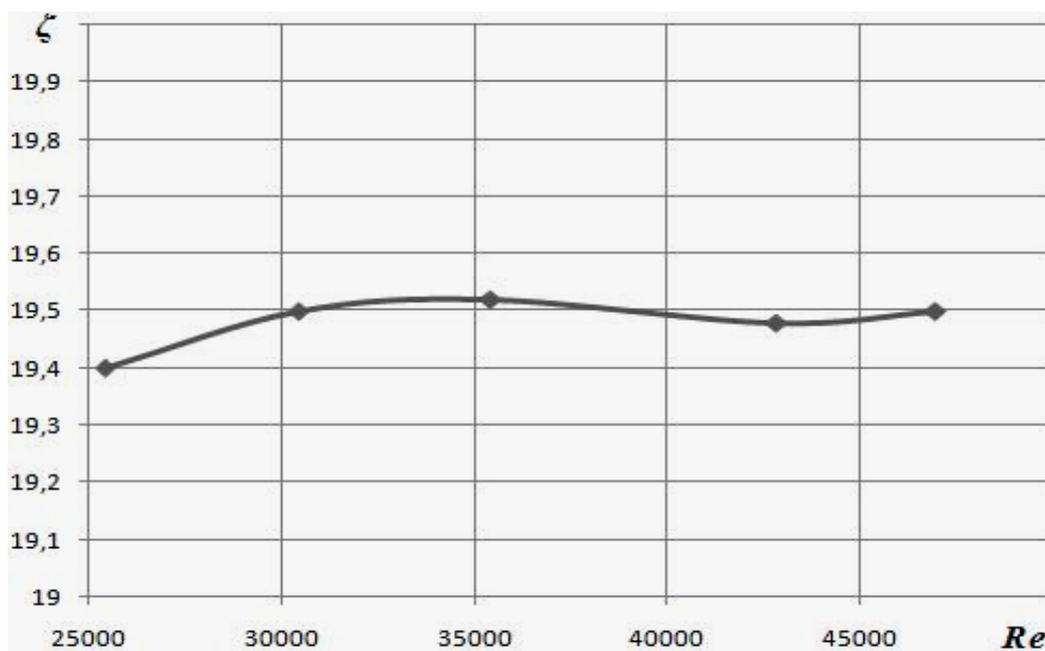


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта опору ζ циклона від числа Re

В ході експериментів була вивчена ступінь впливу швидкості обертання віджимного вантажу на ефективність відділення залишкової води при другій стадії сепарації ґрунту. Схематична діаграма механічного віджиму показана на рисунку 5. Було встановлено, що найбільша ступінь віджиму досягається при малих обертах обертання віджимного вантажу. Отримані результати наведені в зведеній таблиці 2, де видно, що при 30 об/хв в вихідному ґрунті при трьох положеннях упорної заслінки (див. рис. 5) спостерігалася найменша концентрація води. Починаючи з числа обертань більше 50 об/хв спостерігалася поява ґрунтових пробок всередині робочої камери. Через різке підвищення віджимного тиску в області зазору між вантажем і стінками робочої камери відбувалося проскальзування ґрунту, і в кроковому вантажному просторі ґрунт переміщався з різними значеннями масового витрату. Було зроблено висновок про те, що при незмінному положенні упорної заслінки на виході з вузла механічного віджиму збільшення швидкості обертання вантажу негативно впливає на процес сепарації.

Таблиця 2 – Залишкова концентрація води при механічному віджимі ґрунту

Залишкова концентрація води в ґрунті ϵ при	Положення упорної заслінки		
	Мінімальне	Робоче	Максимальне
30 об/хв	0,058	0,096	0,121
50 об/хв	0,127	0,153	0,171
100 об/хв	0,132	0,167	0,195

В ході досліджень було розроблено перелік операцій по виробництву, монтажу і обслуговуванню розробленого суднового

сепаратора пульпы. Они должны всегда осуществляться в соответствии с основными принципами организации и планирования ремонта судов в системе морского и речного флота и регламентируются «Положением о ремонте судов», которое устанавливает две категории ремонта – текущий и капитальный.

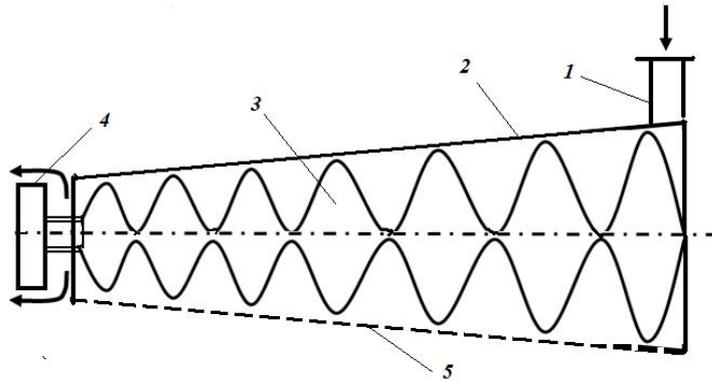


Рисунок 5 – Общая схема узла механического отжима: 1 – входной патрубок; 2 – корпус; 3 – винт; 4 – упорная заслонка; 5 – перфорированная крышка

Текущий ремонт разработанного судового сепаратора пульпы должен выполняться не реже, чем раз в год. При его проведении необходимо вскрывать, осматривать и очищать все вкладыши, упорные подшипники, подшипники вращения, шейки валов, валы, рабочие колеса насосов, детали крепежа и т.д.

Целью проведения капитального ремонта судового сепаратора пульпы является: восстановление всех номинальных технико-эксплуатационных характеристик установки; восстановление судовых узлов и механизмов, обеспечивающих работу судового сепаратора пульпы.

Срок проведения капитального ремонта устанавливается в зависимости от типа судна, условий его эксплуатации и продолжительности выполнения дноуглубительных работ. Применительно к разработанной сепарационной установке выполнение капитального ремонта предполагает замену изношенных в процессе эксплуатации деталей корпуса, подшипников, вала, отжимного винта, регулирующей заслонки и т.д.

Монтаж при сборке или демонтаж при консервации судового узла сепарации грунта должен осуществляться при проведении капитального ремонта судна.

Выводы:

1. При рефулировании грунтовой пульпы толщина «вредного» вязко-пластичного слоя всегда зависит от диаметра трубопровода. Избыточный диаметр трубопровода всегда приводит к росту градиента плотностной стратификации потока по длине трубопровода и, как следствие, к падению его пропускной способности.

2. Степень перекрытия цилиндрической трубы, т.е. отношение максимального значения высоты вязко-пластичного слоя к ее диаметру, не должна превышать значений, соответствующих диапазону 0,25 – 0,3.

3. Экспериментально установлено, что наибольшая степень механического отжима грунтовой пульпы достигается при малых оборотах вращения отжимного винта. Начиная с числа оборотов более 50 об/мин наблюдается возникновение грунтовых пробок внутри рабочей камеры и при неизменном положении упорной заслонки на выходе из узла механического отжима рост скорости вращения винта оказывает негативное влияние на процесс сепарации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородулин Я. Ф. Дноуглубительный флот и дноуглубительные работы / Я. Ф. Бородулин, Б. Н. Сущенко – М. : Транспорт, 1973. – 432 с.
2. Малахов А. В. Узел сепарации пульпы для судовых земснарядов / А. В. Малахов, С. А. Карьянский, В. А. Маслов // Проблемы техники : науч.-вироб. журнал. – 2009. – Вып. № 3. – Одесса : ОНМУ, ХНУ – С. 59-65.
3. Малахов А. В. Основные технологические аспекты гидродинамического разделения многофазных потоков / А. В. Малахов, И. В. Ткаченко, В. А. Маслов, О. Е. Гугуев, М. А. Колегаев, С. А. Карьянский // Вестн. нац. технич. унив. Украины «Киевский политехнический институт» : Машиностроение. – К. : НТУУ «КПИ». – 2010. – Вып. № 59 – С. 117-120.
4. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т. М. Башта, С. С. Руднев и др. – М. : Изд-во Машиностроение, 1982. – 423 с.
5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1973. – 847 с.

Маслов В.О. ТЕХНОЛОГІЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ГРУНТОВОЇ ПУЛЬПИ В УМОВАХ РОБОТИ ЗЕМСНАРЯДУ

В роботі розглянуто основні аспекти нової гідромеханічної технології по виділенню надлишкової води із грунтової пульпи. Описано експериментальний стенд і головні результати експериментів. Розглянуто види ремонтних робіт для розробленого суднового вузла сепарації пульпи.

Ключові слова: грунтова пульпа, продуктивність суднової сепараційної установки, механічний отжим.

Maslov V.A. TECHNOLOGY OF HYDRODYNAMIC DEHYDRATION OF THE GROUND PULP IN THE CONDITIONS OF WORK OF HYDRAULIC DREDGER

Main aspects of new fluid dynamics technology for separating excessive water from the soil pulp are considered. An experimental stand and the major results of experiments are described. Types of maintenance for developed ship soil separation unit are described.

Keywords: the ground pulp, productivity of the ship separating setting, mechanical wringing.