

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ УКРАИНЫ

ОП «Украинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский  
институт по обогащению и брикетированию углей»

ГП «НТЦ «Углеинновация»

ОП «УКРНИИУГЛЕОБОГАЩЕНИЕ» ГП «НТЦ «УГЛЕИННОВАЦИЯ»

На правах рукописи

**ЕРЕМЕЕВ ИГОРЬ ВИКТОРОВИЧ**

УДК 622.742:621.928

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ  
ОБЕЗВОЖИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ  
НА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГРОХОТАХ**

Специальность 05.15.08 - «Обогащение полезных ископаемых»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель -  
доктор технических наук, профессор

Полулях Александр Данилович

Днепропетровск – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ .....	5
РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	12
1.1 Анализ состояния технологии обезвоживания угольных шламов .....	12
1.2 Анализ реологических моделей структурированных угольных шламовых суспензий .....	28
1.3 Анализ современной техники и технологии обезвоживания угольных шламовых на вибрирующих ситовых поверхностях .....	33
1.4 Постановка задач исследований .....	36
РАЗДЕЛ 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ ПРИ ОБЕЗВОЖИВАНИИ НА СИТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГРОХОТА .....	39
2.1 Разработка физической модели процесса обезвоживания угольных шламовых суспензий на ситовой поверхности высокочастотного грохота .....	39
2.2 Определение условий перехода вязкой суспензии в вязкопластичный материал на вибрирующей ситовой поверхности .....	47
2.3 Разработка математической модели процесса виброуплотнения слоя материала при обезвоживании на ситовой поверхности высокочастотного грохота .....	56
2.3.1 Исследование изменения структурно-механических свойств угольных шламов в процессе обезвоживания на ситовой поверхности высокочастотного грохота .....	56
2.3.2 Анализ уравнения скорости уплотнения слоя угольного шлама на ситовой поверхности высокочастотного грохота .....	67
Выводы .....	74
РАЗДЕЛ 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ НА ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ГРОХОТЕ С РАЗНОНАКЛОННЫМИ УЧАСТКАМИ СИТ .....	76

	Стр.
3.1 Исследование процесса обезвоживания угольных шламов на лабораторной модели высокочастотного грохота с разнонаклонными участками ситовой поверхности .....	76
3.1.1 Разработка лабораторной модели высокочастотного грохота с разнонаклонными участками ситовой поверхности и методика исследований .....	76
3.1.2 Исследование влияния углов наклона участков на ситовой поверхности высокочастотного грохота .....	80
3.1.3 Определение реологической кривой обезвоживаемого материала .....	88
3.2 Обоснование параметров высокочастотного грохота с разнонаклонными участками сит для обезвоживания угольных шламов .....	91
3.2.1 Модернизация экспериментального устройства для обезвоживания угольных шламов УРШ-2,5 .....	91
3.2.2 Промышленные исследования процесса обезвоживания угольных шламов на экспериментальном устройстве УРШ-2,5 .....	96
3.3 Разработка высокочастотного грохота с разнонаклонными участками сит для обезвоживания угольных шламов ГісМх-2,5х1 .....	110
3.3.1 Конструкция и параметры высокочастотного грохота ГісМх-2,5х1 .....	110
3.3.2 Рекомендации по модернизации высокочастотных грохотов .....	114
Выводы .....	115
<b>РАЗДЕЛ 4 ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ НА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГРОХОТАХ С РАЗНОНАКЛОННЫМИ УЧАСТКАМИ СИТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ .....</b>	<b>117</b>
4.1 Промышленные испытания технологии обезвоживания угольных шламов на грохоте ГісМх-2,5х1 в условиях ЦОФ «Октябрьская» .....	117
4.2 Промышленные испытания технологии обезвоживания угольных шламов на грохоте ГВЧ-41М в условиях ГОФ «Гуковская» .....	121

	Стр.
4.2.1 Существующая технология обогащения рядовых углей на ЦОФ «Гуковская» .....	121
4.2.2 Анализ технологии обезвоживания угольных шламов на ЦОФ «Гуковская» .....	126
4.2.3 Разработка усовершенствованной технологии обезвоживания угольных шламов на грохотах ГВЧ-41М в условиях ЦОФ «Гуковская» ...	128
4.2.4 Экономическая эффективность применения грохотов ГВЧ-41М	134
Выводы .....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	137
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт и протокол приемочных испытаний грохота ГісМх-2,5х1 .....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения результатов диссертационной работы Еремеева И.В. «Технология обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участ- ками рабочей поверхности на ЦОФ «Гуковская» .....	172

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Увеличение количества и улучшение качества товарной угольной продукции, снижение ее себестоимости является важнейшей задачей угольной промышленности Украины в условиях ее работы в рыночных отношениях.

Однако, в связи с резким увеличением в технологических схемах углеобогатительных фабрик шламовых продуктов и выводом из эксплуатации сушильных установок, на многих фабриках выросла влажность товарной угольной продукции, в большинстве случаев превышающая установленные нормы. В этих условиях эффективное обезвоживание шламовых продуктов, содержащих основное количество воды, подлежащей удалению, является одной из важнейших производственных задач, решение которой позволит повысить качество товарной угольной продукции и ее конкурентоспособность за счет интенсификации механического обезвоживания угольных шламов на вибрирующей ситовой поверхности.

Обезвоживание подобных шламов осуществляется путем перевода вязкой суспензии в вязкопластичный материал, дальнейшее удаление воды из которого производится с помощью виброуплотнения. Особенно это актуально при обезвоживании угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности в одну стадию, т.е. в одном аппарате.

В настоящее время для обезвоживания подобных материалов широко применяются виброгрохоты инерционного типа с направленными колебаниями, однако их виброхарактеристики не учитывают переход вязкой суспензии в вязкопластичный и далее в вязкоупругопластичный материал и создание для этого зоны виброуплотнения. Это связано с отсутствием методов расчета участка виброуплотнения грохотов, которые бы учитывали взаимосвязь реологических свойств структурированной угольной шламовой суспензии нефлотационной крупности с интенсивностью внешнего динамического нагружения в условиях виброуплотнения надситного продукта. В связи с этим установление закономер-

ностей виброуплотнения угольных шламов в зависимости от их реологических свойств и параметров вибровозбуждения ситовой поверхности является *актуальной научной задачей*. На основе этих закономерностей разработана усовершенствованная технология механического обезвоживания угольных шламов нефлотационной крупности и создан высокочастотный грохот с разнонаклонными участками рабочей поверхности, внедрение которых в производство позволило снизить влажность товарной угольной продукции за счет частичного удаления капиллярной воды из порового пространства материала.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Базовыми для подготовки диссертационных исследований являются научно-исследовательские работы, выполненные в соответствии с планом ОП «Укрнии-углеобогащение» ГП «НТЦ «Углеинновация»: «Создать высокочастотный грохот для разделения шлама по крупности» (2003 год, номер госрегистрации 0103U007165); «Разработать технологию обезвоживания угольных шламовых суспензий на высокочастотных грохотах» (2012 год, номер госрегистрации 0113U002351).

Автор диссертации непосредственно участвовал в выполнении этих научно-исследовательских работ в качестве исполнителя и ответственного исполнителя.

**Цель работы** – теоретическое обоснование технологических решений по снижению влажности угольных шламов при механическом обезвоживании на высокочастотных грохотах.

**Идея работы** заключается в виброуплотнении частиц на конечной стадии обезвоживания путем применения разнонаклонных участков сит с соответствующими параметрами виброколебаний.

Для достижения поставленной цели и с учетом идеи в работе сформулированы и решены следующие *задачи исследований*:

- 1) анализ известных методов и обоснование перспективных подходов к повышению эффективности обезвоживания угольных шламов на вибрационных грохотах;

2) теоретическое обоснование основных параметров уплотнения при обезвоживании угольных шламов на ситовой поверхности высокочастотного грохота;

3) установление взаимосвязи эффективности процесса обезвоживания угольных шламов с параметрами вибровозбуждения ситовой поверхности в условиях перехода вязкой суспензии в вязкопластичный и вязкоупругопластичный материал;

4) разработка и промышленная апробация технологии обезвоживания угольных шламов нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками ситовой поверхности с целью снижения влажности мелкого концентрата.

**Объект исследований** – технология обезвоживания угольных шламов.

**Предмет исследований** – технология обезвоживания угольных шламов на вибрирующей ситовой поверхности.

**Методы исследований.** При проведении исследований применялись следующие методы: научное обобщение и систематизация – для определения современного состояния и выбора направлений повышения эффективности обезвоживания угольных шламов на вибрирующей ситовой поверхности; аналитический – для определения условий перехода вязкой суспензии в вязкопластичный и вязкоупругопластичный материал на сите виброгрохота; экспериментальный – для установления связи эффективности обезвоживания с технологическими, конструктивными и динамическими параметрами высокочастотного грохота и определения их рациональных значений; математической статистики – для обработки результатов экспериментов; лабораторная и исследовательско-промышленная апробация – для проверки разработанных технологических решений и определение их эффективности.

**Научная новизна полученных результатов.**

1. Разработана новая математическая модель обезвоживания угольных шламов на вибрирующей ситовой поверхности, которая, в отличие от известных,

учитывает реологические свойства исходного материала и содержит в явном виде параметры вибраций, что позволяет осуществить подбор рационального динамического режима работы виброгрохота.

2. Впервые установлено, что наибольшее значение скорости виброуплотнения угольного шлама нефлотационной крупности достигается при амплитуде и частоте колебаний сита соответственно 1,5-2 мм и 1500-2000 мин<sup>-1</sup> в зависимости от толщины слоя исходного материала. На основании этого рассчитываются конструктивные параметры участка виброуплотнения обезвоживающей поверхности грохота.

3. Впервые установлено, что переход угольного шлама из вязкопластичного в вязкоупругопластичный материал осуществляется при содержании твердого не менее 900 кг/м<sup>3</sup>, что позволяет определить длину участка сброса воды обезвоживающей поверхности виброгрохота.

4. Впервые установлено, что для обеспечения максимальной эффективности обезвоживания ситовая поверхность шламового высокочастотного грохота должна состоять из трех разнонаклонных участков, причем начальный и конечный участки имеют соответственно отрицательный (до -20°) и положительный (до +15°) наклон по отношению к среднему участку, что позволило определить конфигурацию обезвоживающей поверхности в виде несимметричной S-образной кривой, обеспечивающей получение на ней трех рациональных режимов обезвоживания для, соответственно, вязкого, вязкопластичного и вязкоупругопластичного материала при одном данном режиме колебаний грохота.

На основании полученных научных результатов сформировали следующие **научные положения:**

1) эффективность обезвоживания угольного шлама на вибрирующей ситовой поверхности повышается при виброуплотнении частиц на конечной стадии процесса, которое достигается при содержании твердого в исходном материале более 900 кг/м<sup>3</sup>, угле наклона участка сита до +15°, частоте и амплитуде колебаний соответственно 1500-2000 мин<sup>-1</sup> и 1,5-2,0 мм, при этом время виброуплотнения должно быть не менее 35 с;

2) для достижения максимального эффекта обезвоживания угольных шламов на высокочастотных грохотах параметры вибровозбуждения подбираются в зависимости от содержания твердого в исходном материале и его гранулометрического состава таким образом, чтобы переход вязкой суспензии в вязкопластичный и вязкоупругопластичный материал осуществлялся путем последовательного сгущения, концентрации и уплотнения частиц на разнонаклонных участках вибрирующей ситовой поверхности при следующих значениях реологического параметра, соответственно,  $\varepsilon Re > 1$ ,  $\varepsilon Re < 1$ ,  $\varepsilon Re \ll 1$ .

**Обоснование и достоверность научных положений, выводов и результатов** подтверждается достаточно полным анализом отечественных и зарубежных литературных источников, представительным объемом статистических данных и удовлетворительной сходимостью результатов теоретических исследований с фактическими параметрами высокочастотного грохота с разнонаклонными участками сит (отклонение не более 10%), высоким значением коэффициента корреляции (более 0,9) установленных математических зависимостей, а также положительными результатами использования полученных данных в научно-практических разработках ОП «Укрнииуглеобогащение» ГП «НТЦ «Углеинновация» и на углеобогатительных фабриках.

**Практическое значение** полученных результатов работы состоит в:

- 1) разработке методики расчета параметров виброуплотнения при обезвоживании угольных шламов на ситовой поверхности грохота;
- 2) создании усовершенствованной технологии обезвоживания угольных шламов нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками ситовой поверхности;
- 3) создании высокочастотного грохота ГісМх-2,5х1 с разнонаклонными участками ситовой поверхности для обезвоживания шламовых продуктов;
- 4) разработки рекомендаций по переводу высокочастотного грохота с одинаково наклоненными участками ситовой поверхности в высокочастотный грохот с разнонаклонными участками ситовой поверхности.

**Внедрение результатов работы.** Технология обезвоживания угольных шламов на высокочастотном грохоте ГісМх-2,5х1 внедрена на ЦОФ «Октябрьская» (снижение влажности товарной угольной продукции на 0,3% с 11,6% до 11,3%), на высокочастотном грохоте ГВЧ-41М – на ЦОФ «Гуковская» (снижение влажности на 0,2% с 7,1% до 6,9%).

Суммарный расчетный экономический эффект от внедрения новых технологий обезвоживания на ЦОФ «Октябрьская» и ЦОФ «Гуковская» составляет 6,8 млн. грн.

**Личный вклад соискателя** диссертационная работа является самостоятельным завершённым исследованием автора, который выполнил анализ и научное обобщение литературы по выбранной тематике, сформулировал цель и задачи исследований, обосновал методы исследований, провел теоретические, лабораторные и натурные исследования, выполнил анализ их результатов и решил поставленную в работе задачу.

**Апробация результатов работы.** Материалы диссертации докладывались и получили одобрение на заседаниях Ученого совета ОП «Укрнииуглеобогащение» ГП «НТЦ «Углеинновация» (г. Луганск, 2011-2015 г.г.), на научных семинарах кафедры обогащения полезных ископаемых ГВУЗ «Национальный горный университет» (г. Днепропетровск, 2013-2015 г.г.), XV международной научно-практической конференции по обогащению полезных ископаемых (г. Бердянск, 21 - 23 мая 2012 г.), Международной научно-практической конференции «Форум горняков-2012» (г.Днепропетровск, 03-06 октября 2012 г.), XVI международной научно-практической конференции по обогащению полезных ископаемых (г. Бердянск, 22-24 мая 2013 г.), XVII международном конгрессе по углеобогащению (г. Стамбул, Турция, 01-06 октября 2013 г.), Международной научно-практической конференции «Форум горняков-2013» (г. Днепропетровск, 02-05 октября 2013 г.), III международной научно-практической конференции «Папушинские чтения» (г. Донецк, 12-14 ноября 2014 г.), Международной научно-практической конференции «Форум горняков-2014» (г. Днепропетровск , 01-04 октября 2014 г.).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 19 научных работ (3 работы без соавторов), в том числе: 3 статьи в научных специализированных изданиях, которые включены в международные научнометрические базы, 4 статьи в научных специализированных изданиях, 5 статей в научных изданиях, 7 тезисов докладов в материалах Международного конгресса углеобогащения и Международных научно-практических конференциях.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х разделов, заключения, списка использованных источников (174 наименований на 16 страницах), 2-х приложений на 27 страницах. Общий объём основного текста диссертации - 139 страниц, в том числе 31 рисунков, 27 таблиц.

## РАЗДЕЛ 1

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 1.1 Анализ состояния технологии обезвоживания угольных шламов

В Украине обогащение рядовых углей осуществляется, в основном, методами, основанными на использовании воды.

В большинстве случаев получаемые продукты обогащения угля имеют значительное содержание влаги и не пригодны для транспортирования и непосредственного использования, поэтому влажность является одним из основных критериев качества товарной угольной продукции [1-4].

Влажность угольных концентратов существенно оказывает влияние на их транспортирование, коксование и сжигание.

При перевозках в зимних условиях избыточная влага способствует смерзаемости твердых полезных ископаемых и вызывает большие трудности при выгрузке их из вагонов. Поэтому, продукты обогащения угля при перевозке их железнодорожным транспортом в соответствии с [5] должны содержать внешней влаги не более 5% в зимнее время и не более 7% – в летнее. Кроме того, перевозка воды, как составной части товарной продукции, приводит к повышению транспортных расходов.

Высокая влажность шихты в значительной степени влияет на тепловой режим коксовых печей, что приводит к увеличению расхода теплоты на коксование, способствует образованию неравномерного по крупности кокса, снижению механической прочности и увеличению пористости [6, 7]. Увеличение влажности в шихте на 1% снижает производительность коксовых печей на 3-5%, уменьшению их срока службы на 6%, увеличению времени коксования на 3% [8]. Следовательно, уменьшение влажности концентратов, кроме указанных факторов, способствует сокращению энергозатрат при получении кокса, а это в условиях дефицита энергоносителей – немаловажный фактор, повышающий эффективность производства.

В табл. 1.1 приведено качество продуктов обогащения коксовых и энергетических углеобогащительных предприятий Украины, а динамика влажности – на рис. 1.1 (данные о качестве продуктов обогащения взяты из [9-19]).

Таблица 1.1

Показатели качества товарной угольной продукции коксовых и энергетических фабрик Украины

Год	Товарная угольная продукция фабрик					
	Коксовых			Энергетических		
	Выход $\gamma$ , %	Зольность $A^d$ , %	Влажность $W^r$ , %	Выход $\gamma$ , %	Зольность $A^d$ , %	Влажность $W^r$ , %
1960	83,4	10,9	9,0	87,6	14,6	7,6
1965	79,6	9,8	10,0	86,7	14,8	8,1
1970	77,6	8,8	9,7	85,1	15,3	8,1
1975	74,6	9,7	9,6	88,1	17,0	7,6
1980	73,0	10,2	9,6	85,9	18,9	8,0
1985	70,2	10,1	9,7	79,0	18,8	8,8
1990	69,0	10,9	9,2	60,7	15,0	8,7
1995	62,3	9,5	9,6	72,5	20,3	8,3
2000	57,4	9,7	10,2	63,8	20,5	8,5
2005	58,4	8,9	9,9	65,9	20,9	9,0
2010	58,5	9,0	9,8	61,6	19,9	9,1

Характер приведенных зависимостей свидетельствует о том, что в течение 50 лет происходит постепенное увеличение влажности товарной продукции как коксовых, так и энергетических обогатительных фабрик. Но если влажность продукции коксовых фабрик за 50 лет увеличилась незначительно в границах 1% (с 9,0% в 1960 г. до 9,8% в 2010 г.), то влажность продукции энергетических фабрик выросла на 1,5% с 7,6% (1960 г.) до 9,1% (2010 г.).

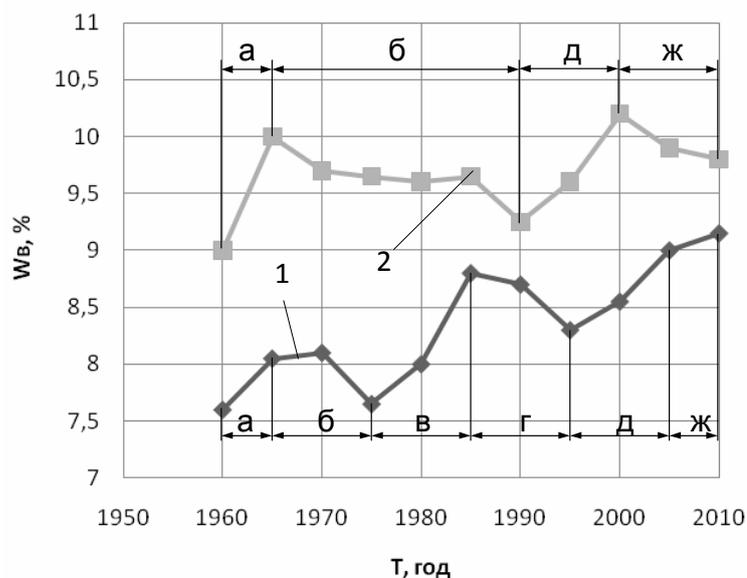


Рис. 1.1. Динамика влажности энергетического (1) и коксового (2) концентратов Украины.

Более низкое значение влажности энергетических концентратов объясняется, в первую очередь, тем, что многие эти фабрики имеют глубину обогащения на уровне 6 (13) мм и поэтому присадка сухого отсева к мокрому концентрату снижает общую влажность товарной угольной продукции.

Рост или снижение влажности энергетического и коксового концентратов Украины на рис. 1.1 объясняется явлениями, происходящими в рассматриваемый период времени с углеобогащением Украины, а именно:

- а) повышение влажности объясняется повсеместным переходом на мокрое обогащение в связи с внедрением на шахтах мокрого пылеподавления;
- б) снижение влажности связано с внедрением сушильных установок;
- в) повышение влажности объясняется увеличением глубины обогащения, связанной с ростом зольности сухого отсева углей;
- г) снижение влажности связано с повсеместным применением на энергетических фабриках ленточных вакуум-фильтров;
- д) повышение влажности связано с выводом из эксплуатации сушильных установок;

ж) снижение влажности связано с применением высокочастотных грохотов, высокоскоростных центрифуг, гипербарфилтров, фильтр-прессов.

Общую тенденцию повышения влажности угольной продукции подтверждают данные табл. 1.2 (по данным [9-19]). За последние 50 лет на 4-х из приведенных 10 фабрик влажность товарной угольной продукции практически не изменилась, а на 6 увеличилась: на ЦОФ «Киевская» - 2,9%; ЦОФ «Чумаковская» - 3,4%; ЦОФ «Узловская» - 1,1%; ЦОФ «Октябрьская» - 3,1%; ЦОФ «Краснолиманская» - 1,1%; ЦОФ «Калининская» - 4,3%.

Таблица 1.2

Влажность продуктов обогащения коксовых фабрик Украины, %

Год	Наименование фабрики									
	Киевская	Чумаковская	Дуванская	Узловская	Октябрьская	Добропольская	Краснолиманская	Калининская	Колосниковская	Пролетарская
1960	8,8	7,0	10,3	9,3	-	10,8	7,4	6,0	10,8	10,9
1965	9,6	8,3	10,2	10,4	8,4	10,8	8,5	7,2	10,2	10,0
1970	9,0	8,4	9,7	9,6	8,6	10,9	7,9	7,3	10,7	9,8
1975	9,2	8,6	9,5	9,5	9,5	11,0	8,7	7,1	9,7	10,5
1980	9,7	8,7	9,8	9,4	9,8	10,8	9,1	7,7	9,5	10,3
1985	10,4	9,0	9,1	10,1	9,1	10,6	8,4	7,5	9,3	9,4
1990	10,0	8,7	9,5	10,9	9,6	10,3	9,0	8,2	9,5	9,8
1995	6,9	10,1	19,5	10,7	9,2	10,3	9,4	8,4	9,8	10,4
2000	10,1	10,1	10,4	10,2	10,2	10,8	10,6	10,4	9,8	10,4
2005	11,5	9,8	10,0	10,6	10,3	10,1	8,6	9,6	9,7	10,0
2010	11,7	10,4	10,4	10,4	11,5	9,1	8,5	10,3	10,4	9,0
2012	11,5	12,6	10,6	9,7	13,0	10,1	8,5	9,4	11,3	9,5

На постоянный рост влажности шихты для коксования указывается в работе [7], причем влажность украинских концентратов 10,5% (2009 г.) – основная причина повышения влажности всей используемой шихты. Влажность импортных концентратов в 2009 г. составила 8%, т.е. ниже украинских на 2,5% [7].

Повышение влажности товарной угольной продукции связано с несколькими причинами.

Одной из них является увеличение содержания мелочи в добываемом угле, в т.ч. класса 0-1 мм. По данным [20], содержание класса 0-1 мм в рядовом угле с 1950 г. по 2007 г. увеличилось на 11,7% с 8,0% до 19,7%. А известно, что обезвоживание материала такой крупности связано со значительными трудностями и его остаточная влажность в 5-7 раз превышает остаточную влажность концентрата крупностью 13-100 мм.

Второй причиной является шламообразование рядового угля при прохождении технологической схемы фабрики, коэффициент шламообразования которых составляет 1,84-13,3% [21-23].

Третья причина – вовлечение в переработку углесодержащих материалов илонакопителей и шламовых отстойников [24-26].

Четвертой причиной повышения влажности товарной угольной продукции является нестабильная работа сушильных установок, в которых в 2008 г. функционировало 39 сушильных агрегатов, при этом из 40 млн. т концентрата сушке было подвергнуто 9,4 млн. т [27].

Из анализа работы сушильных отделений большинства фабрик следует, что эффективность их работы не превышает 50%, что объясняется как высокой степенью износа оборудования и ростом стоимости энергоносителей, так и отсутствием должного внимания к требованиям качества концентрата со стороны потребителей и акционеров или арендаторов фабрики. На ряде фабрик («Селидовская», «Комсомольская», «Киевская», «Краснолиманская», «Дуванская» и «Узловская») сушильные отделения остановлены. Таким образом, при выпуске 15-18 млн. т в год концентрата для коксования и росте содержания влаги на 1,6% (1985-2009 г.г.) вместе с ним перевозится 240-288 тыс. т воды. Это значит, что нерационально задействуется 3400-4100 вагонов и оплачивается соответствующий тариф перевозок [7].

Пятой причиной повышения влажности при неудовлетворительной работе сушильных установок является медленное внедрение современного обезвоживающего оборудования, которое в большинстве случаев позволяет вложиться в нормативные показатели влажности товарной угольной продукции. Однако его применение сдерживается особенностями его эксплуатации, отсутствием техно-

логических разработок по включению их в схему цепи аппаратов углеобогачительных фабрик, а также рекомендаций по оптимизации технологических, конструктивных и вибрационных параметров в зависимости от качества обезвоживаемого материала. Кроме того, важным сдерживающим фактором его применения является высокочувствительность современного обезвоживаемого оборудования.

Из изложенного выше следует, что снижение влажности угольной товарной продукции является актуальной научно-производственной задачей.

Основными процессами обезвоживания, которые применяются на углеобогачительных фабриках, являются – механическое обезвоживание (дренирование, грохочение, центрифугирование, фильтрование) и термическая сушка [28]:

дренирование, т.е. стекание воды под действием силы тяжести. Этот метод обезвоживания осуществляется в бункерах, элеваторах и на неподвижных ситах;

грохочение – обезвоживание на перфорированной поверхности под действием силы тяжести и вибраций, осуществляемое на грохотах;

центрифугирование – обезвоживание под действием центробежной силы, осуществляемое в центрифугах фильтрующего и осадительного типа;

фильтрование – обезвоживание через пористую перегородку под действием перепада давлений, осуществляется на вакуум-фильтрах и фильтр-прессах;

термическая сушка – обезвоживание путем перехода влаги из жидкой фазы в газообразную в результате испарения, осуществляется в трубах сушилках и барабанных сушилках.

Применение конкретного метода обезвоживания связано, в основном, с крупностью материала, требуемой влажностью товарной угольной продукции и видом влаги, подлежащей удалению.

В продуктах обогащения углеобогачительных фабрик различают внутреннюю (конституционную) и внешнюю (гигроскопическую, капиллярную, поверхностную и свободную) влагу [28, 29].

Внутренняя влага связана химически с веществом угля и не может быть удалена средствами, используемыми на фабриках.

Гигроскопическая влага удерживается в угле адсорбционными силами и может быть удалена только термической сушкой. Ее содержание в углях составляет: в бурых до 17%, в длиннопламенных 8-10%, в коксующихся 2-4%.

Капиллярная влага удерживается в капиллярах силами капиллярного давления и может быть удалена интенсивными механическими силами или термической сушкой. Содержание капиллярной влаги находится в пределах 4-7%.

Поверхностная влага удерживается силами поверхностного натяжения и составляет 2-6% в зависимости от площади поверхности частиц. Основная масса этой влаги удаляется механическими силами, но не гравитационной.

Свободная влага, механически захваченная углем, заполняет поры между частицами и может быть удалена механическими силами, в т.ч. гравитационной.

В связи с тем, что обезвоживание продуктов обогащения крупного машинного класса успешно решено с помощью грохотов, мелкого – с помощью центрифугирования, можно сделать вывод о том, что повышенная влажность товарной угольной продукции определяется влажностью шламовых продуктов.

Повсеместный вывод из эксплуатации сушильных установок, предопределяет необходимость эффективного решения задачи обезвоживания угольных шламов и, в первую очередь, нефлотационной крупности.

Обезвоживание угольных шламов флотационной крупности также успешно решается с помощью гипербарфилтров; ленточных, дисковых и барабанных вакуум-филтров; ленточных и камерных фильтр-прессов [30-35].

В табл. 1.3 приведены результаты обезвоживания угольных шламов нефлотационной крупности, содержащиеся в технологических регламентах углеобогажительных фабрик Украины, разработанных в ГП «Укрнииуглеобогащение» [36-68]. Анализ этих результатов систематизирован в таблице 1.4 и приведен в [69].

Таблица 1.3

## Результаты обезвоживания угольных шламов нефлотационной крупности на ОФ Украины

№ п/п	Наименование фабрики [ ] – источник информации	П р о д у к т ы															
		Исходный (сгущенный сгустителя)				Сгущенный гидроциклона				Надситный грохота				Осадок центрифуги			
		Тип сгустителя	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	Тип гид- роцикло- на	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	Тип гро- хота или фильтра	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %	Тип цен- трифуги	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %
1	Антрацит [36]	Пирамидаль- ный сгуститель	100,0	19,7	300	ГЦ-630	58,9	17,7	570	ГИСЛ-42	26,9	15,3	15,2	-	-	-	-
2	Антрацит [36]	Зумпф пере- ливов	100,0	21,8	290	ГЦ-350	55,6	12,0	730	ЛУ-10	54,5	11,8	22,6	-	-	-	-
3	Вахрушевская [37]	Сборник	100,0	34,7	207	ГЦ-1000 + пира- мидаль- ный сгу- ститель	39,1	27,0	655	ГИСЛ-42	18,4	24,7	36,0	ФВН-1001	15,9	23,8	10,5
4	Вахрушевская [37]	Сборник	100,0	34,4	188	ГЦМ-630	49,5	28,8	505	ЛОП-15	45,4	27,2	18,0	-	-	-	-
5	Дзержинская [38]	Слив пирами- дальных сгу- стителей	100,0	28,1	110	ГЦ-1000	34,5	23,1	540	Каскад-ш	23,6	17,5	62,3	ФВВ- 1001У	16,5	16,2	13,6
6	Добропольская [39]	Сборник	100,0	30,0	330	ГЦ-250	52,0	28,2	770	ГВЧ-30	39,5	26,2	27,2	ЦфШнВ- 1,00	29,7	20,5	17,7
7	Дуванская [40]	Гидросайзер	100,0	11,5	227	-	-	-	-	ГВЧ-31	80,0	10,6	28,0	Наэль-3А	74,4	10,0	9,5
8	им. Известий [41]	Зумпф	100,0	38,4	200	ГЦ-900, ГЦ-1000	24,6	35,1	680	ГВЧ-62-1	11,2	31,8	25,7	ФВИ-1000	10,8	31,2	17,8
9	им. Известий [41]	Пирамидаль- ный сгуститель	100,0	30,1	488	-	-	-	-	ГВЧ-62-1	40,4	24,2	24,8	ФВИ-1000	38,3	23,3	18,7
10	Киевская [42]	СК-2,3	100,0	10,4	422	-	-	-	-	-	-	-	-	ЦфШнГ- 1,00	68,6	9,6	10,8
11	Киевская [42]	СК-2,3	100,0	68,9	554	-	-	-	-	-	-	-	-	ЦфШнГ- 1,00	79,4	72,5	16,5
12	Киевская [42]	ГЦ-1000, ГЦ-350	100,0	12,9	493	-	-	-	-	-	-	-	-	ЦфШнГ- 1,00	90,7	11,8	11,8

Продолжение табл. 1.3

№ п/п	Наименование фабрики [ ] – источник информации	П р о д у к т ы															
		Исходный (сгущенный сгустителя)				Сгущенный гидроциклона				Надситный грохота				Осадок центрифуги			
		Тип сгустителя	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	Тип гид- роцикло- на	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	Тип гро- хота или фильтра	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %	Тип цен- трифуги	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %
13	Колосниковская [43]	Сборник	100,0	17,5	296	-	-	-	-	ГИСЛ-42	70,0	16,4	29,3	ЦфШнВ-1,00	64,1	15,2	13,1
14	Колосниковская [43]	Зумпф	100,0	25,6	105	ГЦ-1000	25,0	16,1	357	Гіс-5,5x1	19,6	12,1	30,0	ЦфШнВ-1,00	18,1	10,4	15,9
15	Комендантская [44]	Пирамидаль- ный сгуститель	100,0	34,7	344	ГЦ-710К	35,2	34,0	592	ГИСЛ-62	24,5	29,1	25,3	ФВИ-1001	18,5	26,7	12,3
16	Комендантская [44]	Пирамидаль- ный сгуститель	100,0	35,0	305	ГЦ-710С	39,5	31,5	513	ЛОП-15	34,3	29,2	24,6	-	-	-	-
17	Комендантская [44]	П-30	100,0	38,8	315	ГЦ-710 + ГЦ-630	13,1	31,6	397	-	-	-	-	НОГШ-1320, ОГШ-759	62,1	27,2	23,8
18	Краснопартизан- ская [45]	Пирамидаль- ный сгуститель	100,0	55,0	167	ГЦ-1000, ГЦ-630	11,1	35,2	648	ВП-2, ГіС-9,0x1	7,4	29,7	18,5	-	-	-	-
19	Моспинская [46]	Сборник	100,0	27,6	150	ГЦ-1000	25,4	24,2	590	ГИСЛ-62	17,0	21,5	25,0	В мелкий концен- трат на ц/ф	16,1	20,5	23,8
20	Нагольчанская [47]	П-30	100,0	31,9	176	ГЦ-350	40,0	27,3	755	ЛСХ-15	39,0	27,1	23,5	-	-	-	-
21	Октябрьская [48]	Пирамидаль- ный сгуститель	100,0	46,5	153	ГЦ-1000	46,9	39,9	309	ГВЧ-42	28,2	28,2	27,8	ЦфШнГ-1,00	20,8	18,6	16,8
22	Октябрьская [48]	Сборник	100,0	50,5	106	ГЦ-250	70,0	45,1	200	ГВЧ-61	10,3	15,8	56,1	ОГШ-461	9,7	14,3	31,4
23	Павлоградская [49]	Гидроклас- сификатор	100,0	54,6	138	ГЦ-630	43,2	43,2	365	ВП-2, ГИСЛ-42	12,7	32,0	36,7	-	-	-	-
24	Павлоградская [49]	Радиальный сгуститель	100,0	41,1	155	ГЦ-630	42,5	22,3	350	КЛ-10	29,2	13,1	28,8	-	-	-	-

Продолжение табл. 1.3

№ п/п	Наименование фабрики [ ] – источник информации	П р о д у к т ы															
		Исходный (сгущенный сгустителя)				Сгущенный гидроциклона				Надситный грохота				Осадок центрифуги			
		Тип сгустителя	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	Тип гидроциклона	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	Тип грохота или фильтра	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %	Тип центрифуги	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %
25	Павлоградская [49]	Радиальный сгуститель	100,0	41,1	155	ГЦ-630	47,3	24,8	380	ГИСЛ-42	26,9	12,9	21,1	-	-	-	-
26	Павлоградская [49]	Радиальный сгуститель	100,0	38,0	165	ГЦ-500	48,1	31,6	361	Вибросито	35,4	25,5	48,7	ЕВW-36	30,1	23,5	25,2
27	Павлоградская [50]	Гидроклассификатор	100,0	60,5	257	ГЦ-630	35,0	54,5	600	ГИСЛ-42	28,4	33,0	31,5	-	-	-	-
28	Павлоградская [50]	П-30 шламов	100,0	52,4	166	ГЦ-630	40,6	44,1	455	ГИСЛ-42	30,1	36,1	28,3	-	-	-	-
29	Павлоградская [50]	П-30 шламов	100,0	52,4	166	ГЦ-630	40,6	44,1	455	КЛ-10	29,0	35,8	30,6	-	-	-	-
30	Павлоградская [50]	П-30 илов	100,0	55,6	193	ГЦ-350	45,8	44,4	382	Вибросито	32,8	35,4	560*	ЦфШнВ-1000	29,6	33,2	16,8
31	Павлоградская [51]	П-30 отходов	100,0	57,0	189	ГЦ-350	47,3	45,2	371	Вибросито	35,8	37,2	510*	ЦфШнВ-1000	34,4	35,9	18,7
32	Павлоградская [51]	П-30 шламов	100,0	52,3	186	ГЦ-350	47,2	40,2	420	ГИСЛ-42	34,7	36,1	28,3	-	-	-	-
33	Павлоградская [51]	Сборник	100,0	43,3	347	ГЦ-250	63,3	33,3	442	Дуговое сито	61,2	32,0	540*	ЦфШнГ-1,00	56,1	30,5	16,1
34	Павлоградская [51]	Сборник	100,0	61,2	184	ГЦ-240	51,1	54,4	335	Вибросито	14,8	39,2	440*	ЛВФ	13,9	37,8	22,3
35	Пролетарская [52]	Пирамидальный сгуститель	100,0	17,8	152	ГЦ-1000, ГЦ-630	29,3	16,3	464	Каскад	14,9	15,2	654*	ЦфШнГ-1,00, ФВШ-950	12,3	14,2	13,0
36	Пролетарская [52]	Слив ГЦ-630	100,0	18,0	127	ГЦ-250	10,5	9,6	400	Вибросито	10,2	9,4	432*	Цф-ШнГ-1,00	8,6	9,0	13,0
37	Пролетарская [52]	Сборник	100,0	16,1	298	ГЦ-630	28,0	14,5	600	Каскад	14,0	14,0	654*	ЦфШнГ-1,00, ФВШ-950	11,4	13,1	13,0

Продолжение табл. 1.3

№ п/п	Наименование фабрики [ ] – источник информации	П р о д у к т ы															
		Исходный (сгущенный сгустителя)				Сгущенный гидроциклона				Надситный грохота				Осадок центрифуги			
		Тип сгустителя	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , г/л	Тип гидроциклона	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , г/л	Тип грохота или фильтра	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %	Тип центрифуги	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %
38	Сав-Пласт [53]	Сборник	100,0	57,7	100	ГЦ-250	39,8	46,8	181	СД-1,5 + ГисМ-3,9х1	23,7	35,5	16,4	-	-	-	-
39	Сав-Пласт [53]	Сборник	100,0	57,3	148	ГЦ-250	53,9	77,5	159	СД-1,5 + ГисМ-3,9х1	35,1	81,4	24,0	-	-	-	-
40	Самсоновская [54]	Пирамидальный сгуститель	100,0	23,9	290	ГЦ-1000	42,1	18,6	640	Сито + ГВЧ-71	26,3	17,4	44,4	ФВШ-950, ЦфШНВ-1,00	18,4	12,2	10,4
41	Свердловская [55]	П-30	100,0	28,2	302	БГЦ-250	86,7	24,3	610	СтВГд-2,0 + ГисМх-5,5	75,9	19,8	17,6	ЦфШНВ-1,00	74,3	19,0	9,5
42	Свято-Варваринская [56]	Сборник	100,0	16,0	260	-	-	-	-	Дуговые сита	94,0	13,9	401*	Декантер	81,3	11,9	14,8
43	Свято-Варваринская [56]	Сборник	100,0	71,3	361	-	-	-	-	ГВЧ	83,5	72,9	20,5	-	-	-	-
44	Селидовская [57]	Пирамидальный сгуститель	100,0	46,7	261	ГЦ-630, ГЦ-1000, ГЦ-350	49,5	40,5	430	ГИСЛ-42	35,5	39,5	43,6	ФВШ-950	29,9	37,9	17,8
45	ОФ № 105 [58]	Сборник шлама	100,0	49,0	84	ГЦ-350	75,2	49,8	142	ГИСЛ-62У	34,5	37,2	36,8	НВВ-1000	28,8	30,1	24,2
46	ОФ № 105 [58]	Сборник	100,0	57,3	85	ГЦ-500	22,3	31,3	452	ГИСЛ-62У	10,3	28,4	38,1	НВВ-1000	7,2	22,4	22,1
47	Узловская [59]	Зумпф 1.2	100,0	18,2	89	ГЦ-1000В	41,2	17,5	310	ВП-2	34,1	13,7	24,5	НВВ-1000	31,8	13,5	12,0
48	Узловская [59]	Пирамидальный сгуститель	100,0	16,2	130	ГЦ-630	40,0	15,1	470	ВП-2	34,1	13,7	24,5	НВВ-1000	31,8	13,5	12,0

Продолжение табл. 1.3

№ п/п	Наименование фабрики [ ] – источник информации	П р о д у к т ы															
		Исходный (сгущенный сгустителя)				Сгущенный гидроциклона				Надситный грохота				Осадок центрифуги			
		Тип сгустителя	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	Тип гидроциклона	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	Тип грохота или фильтра	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %	Тип центрифуги	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %
49	Червоноградская [60]	Сборник	100,0	38,6	304	ГЦ-630	59,7	30,8	588	ЛСХ-30	29,7	23,5	25,0	-	-	-	-
50	Чумаковская [61]	Сборник	100,0	21,3	159	ГЦ-630	53,7	21,5	450	Вибросито	34,2	13,8	640*	ЕВW-36	30,2	11,8	15,7
51	Чумаковская [61]	Конусный	100,0	20,3	175	ГЦ-630	36,2	14,0	480	ГК-1,5	26,9	11,5	40,0	Наэль-3А	21,5	11,0	22,0
52	Центросоюз [62]	Сборник	100,0	51,3	281	ГЦ-1000	17,7	45,5	500	ВП-2	4,5	42,3	15,8	-	-	-	-
53	Яновская [63]	Сборник	100,0	44,9	165	ГЦ-710	65,5	40,2	307	ЛСХ-15	53,4	37,5	15,7	-	-	-	-
54	Яновская [63]	Сборник	100,0	27,1	214	ГЦ-710	35,0	23,0	416	ГИСЛ-62У	28,0	19,7	17,0	-	-	-	-
55	Яновская [63]	Сборник	100,0	35,0	125	ГЦ-240	64,1	34,1	488	-	-	-	-	ОГШ-461	59,4	33,0	21,5
56	ОФ «ДУТ» [64]	Сборник	100,0	30,4	100	ГЦ-630 + ГЦ-350	71,4	28,8	364	ГВЧ	68,3	27,3	20,7	-	-	-	-
57	ОФ «ДУТ» [64]	Сборник	100,0	36,8	264	ГЦ-350	65,0	39,7	663	ГИЛ-32	60,1	38,2	28,4	ФВШ-950	58,2	37,5	9,6
58	ДП «Дзержинск Экоэнергоресурс» [65]	Концентрат ШВС I ст.	100,0	44,8	120	«Кребс»	94,2	43,5	475	СД	88,3	41,4	530	ЦфШнГ-1.00	72,5	35,2	12,3
59	ДП «Дзержинск Экоэнергоресурс» [65]	Концентрат ШВС II ст.	100,0	69,6	115	«Кребс»	75,0	68,9	450	СД + UG1,2-4,0/WSCD	50,0	40,1	35,2	-	-	-	-
60	ДП «Дзержинск Экоэнергоресурс» [65]	Отходы ШВС	100,0	78,1	426	-	-	-	-	UG1,2-4,0/WSCD	99,4	78,1	37,5	-	-	-	-
61	УПЦ1-АКХЗ [66]	Зумпф	100,0	21,0	350	ГЦ-710	16,4	15,6	610	-	-	-	-	NAEL	74,0	11,1	10,3
62	УПЦ1-АКХЗ [66]	Концентрат ГС	100,0	11,8	285	-	-	-	-	Сито + ВИОГ	28,2	9,6	480*	NAEL	20,6	8,2	8,6
63	УПЦ1-АКХЗ [66]	Отходы ГС	100,0	78,1	1100	-	-	-	-	ВОГ	82,5	80,2	14,8	-	-	-	-
64	Стахановская [67]	Р/с	100,0	30,0	160	ГЦ-350	59,8	32,0	440	Сито + вибросито	27,4	19,0	610	ЦфШнГ-1.00 ФВШ-950	16,0	12,2	13,8

Продолжение табл. 1.3

№ п/п	Наименование фабрики [ ] – источник информации	П р о д у к т ы															
		Исходный (сгущенный сгустителя)				Сгущенный гидроциклона				Надситный грохота				Осадок центрифуги			
		Тип сгустителя	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	Тип гид- роцикло- на	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	Тип грохота или фильтра	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %	Тип цен- трифуги	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %
65	Пролетарская [68]	Пир.сгуст. Сборник	100,0	20,0	182	ГЦ-1000 ГЦ-630	26,7	18,2	643	ГВЧ-30	15,8	15,1	26,4	ФВШ-950 ЦфШнГ- 1.00	13,8	14,2	12,1
66	Пролетарская [68]	Пир.сгуст. Сборник	100,0	20,0	182	ГЦ-1000 ГЦ-630	26,7	18,2	643	«Каскад»	13,3	23,7	452*	ФВШ-950 ЦфШнГ- 1.00	11,3	20,4	18,4
67	Пролетарская [68]	Слив ГЦ-630	100,0	19,8	123	ГЦ-250	10,1	10,9	420	Вибро- сито	9,7	10,7	471*	ЦфШнГ- 1.00	8,9	9,3	9,7
68	Пролетарская [68]	Пир.сгуст. Сборник	100,0	18,3	247	ГЦ-1000 ГЦ-630	15,9	14,7	526	ГВЧ-41	9,6	12,4	840*	ЦфШнГ- 1.00	8,2	8,9	8,6
69	Пролетарская [68]	Пир.сгуст. Сборник	100,0	18,3	247	ГЦ-1000 ГЦ-630	12,8	14,7	526	«Каскад»	6,3	13,8	647*	ЦфШнГ- 1.00	11,6	21,2	10,2

\* - содержание твердого в надситном продукте, г/л.

ГС – гидросайзер.

ШВС – шлюзовой винтовой сепаратор.

Таблица 1.4

## Результаты систематизации данных таблицы 1.3

№ п/п	Технологическая цепочка оборудования	Кол-во цепочек	% от общего числа цепочек	Средняя влажность шлама, %	Место
<b>1</b>	<b>Первая группа</b>	<b>17</b>	<b>24,6</b>	<b>14,7</b>	<b>I</b>
1.1	ГЦ+ГВ+Ц/Ф	11	15,9	15,4	
1.2	ГЦ+ГВЧ+Ц/Ф	6	8,7	13,5	
<b>2</b>	<b>Вторая группа</b>	<b>15</b>	<b>21,7</b>	<b>16,4</b>	<b>III</b>
2.1	ГЦ-ВС+ЛВФ	1	1,5	22,3	
2.2	ГЦ+С+Ц/Ф	9	13,0	16,6	
2.3	ГЦ+ВС+Ц/Ф	5	7,2	15,0	
<b>3</b>	<b>Третья группа</b>	<b>27</b>	<b>39,1</b>	<b>21,4</b>	<b>IV</b>
3.1	ГЦ+ЛВФ	8	11,7	24,4	
3.2	ГЦ+ГВ	9	13,0	22,5	
3.3	ГЦ+ГВЧ	5	7,2	20,4	
3.4	ГЦ+Ц/Ф	5	7,2	15,4	
<b>4</b>	<b>Четвертая группа</b>	<b>7</b>	<b>10,2</b>	<b>15,1</b>	<b>II</b>
4.1	ГВ+Ц/Ф	2	2,9	18,5	
4.2	ГВЧ+Ц/Ф	2	2,9	14,1	
4.3	СД+Ц/Ф (Декантер)	1	1,5	14,8	
4.4	СД+ГВ+Ц/Ф	2	2,9	13,0	
<b>5</b>	<b>Пятая группа</b>	<b>3</b>	<b>4,4</b>	<b>24,6</b>	<b>V</b>
5.1	ГВЧ	3	4,4	24,6	
	<b>Итого</b>	<b>69</b>	<b>100,0</b>		

Рассмотрены 69 цепочек технологического оборудования (табл. 1.4), применяемого для обезвоживания угольных шламов на 32 углеобогащательных предприятиях Украины, где ГЦ- гидроциклон, ГВ – грохот вибрационный, ГВЧ – грохот вибрационный высокочастотный, Ц/Ф – центрифуга, ЛВФ – ленточный вакуум-фильтр, С – сито, ВС – вибросито, СД – дуговое сито.

Все цепочки оборудования скомпонованы в пять групп: по количеству типов оборудования в цепочке и с учетом особенностей самого оборудования.

Из табл. 1.4 следует, что наилучшие показатели обезвоживания дают цепочки первой группы оборудования ( $W^r = 14,7\%$ ), на втором месте четвертая

группа ( $W^r = 15,1\%$ ), на третьем - вторая группа ( $W^r = 16,4\%$ ), на четвертом - третья группа ( $W^r = 21,4\%$ ), на пятом - пятая группа ( $W^r = 24,6\%$ ).

Следует обратить внимание, что в сформированных группах обезвоживающего оборудования наименьшие показатели влажности находятся в тех цепочках, где присутствуют высокочастотные грохоты: в первой группе  $W_{1,2}^r = 13,5\% < W_{1,1}^r = 15,4\%$ ; во второй - высокочастотные грохоты отсутствуют; в третьей  $W_{3,3}^r = 20,4\% < W_{3,1}^r = 24,4\%$ ,  $W_{3,2}^r = 22,5\%$ , но  $> W_{3,4}^r = 15,4\%$ ; в четвертой -  $W_{4,2}^r = 14,1\% < W_{4,1}^r = 18,5\%$ ,  $W_{4,3}^r = 14,8\%$ ;  $W_{4,4}^r = 13,0\%$ ; пятая группа  $W_{5,1}^r = 24,6\%$  представлена только высокочастотным грохотом.

Из изложенного, можно сделать вывод, что применение высокочастотных вибрационных грохотов вместо вибрационных грохотов на операциях обезвоживания в любой цепочке оборудования является более эффективным, вплоть до самостоятельного применения для крупнозернистого шлама.

Однако применение высокочастотных грохотов показывает необходимость создания технологии подготовки материала к обезвоживанию, подбора углов наклона обезвоживающей поверхности в зависимости от содержания твердого в исходном материале и параметров вибровозбуждения грохота, которые при имеющейся структуре надситного продукта обеспечат его виброуплотнение на конечном участке сита.

Опыт обезвоживания угольных шламов на грохотах показывает, что применение классификационных грохотов на операциях обезвоживания не соответствует техническим и технологическим требованиям этого процесса. Поэтому необходима разработка специальных высокочастотных грохотов для обезвоживания угольных шламов [28], в которых амплитуда, частота и углы наклонов сита и напряжения колебаний будут иными, чем у классификационных грохотов, т.е

$$\frac{a_{ao}\omega_o^2 \sin(\alpha_o + \beta_o)}{g \cos \beta_o} \neq \frac{a_{ak}\omega_k^2 \sin(\alpha_k + \beta_k)}{g \cos \beta_k}, \quad (1.1)$$

где  $a_{ao}$ ,  $a_{ak}$  - амплитуда колебаний, соответственно, обезвоживающего и классификационного грохота, м;  
 $\omega_o$ ,  $\omega_k$  - угловая скорость колебаний, соответственно, обезвоживающего и классификационного грохота,  $c^{-1}$ ;  
 $\alpha_o$ ,  $\alpha_k$  - угол подброса частиц материала на, соответственно, обезвоживающем и классификационном грохоте, град.;  
 $\beta_o$ ,  $\beta_k$  - угол наклона сита, соответственно, обезвоживающего и классификационного грохота, град;  
 $g$  - ускорение силы тяжести,  $m/c^2$ .

В случаях выполнения этих условий, влажность надситного продукта будет соответствовать своему предельному минимальному значению механического обезвоживания угольных шламов на вибрирующей поверхности.

Таким образом, анализ показателей работы цепочек оборудования, применяемого для обезвоживания угольных шламов, показал преимущество применения высокочастотных грохотов вместо вибрационных, особенно в тех случаях, когда угольный шлам подается на обезвоживание в виде вязких суспензий.

Важным элементом высокочастотных грохотов является конфигурация вибрирующей ситовой поверхности, рельеф участков которой определяет не только величину реологической константы движения потока обезвоживаемого материала, но и направление изменения действующих на него сил.

Для операций обезвоживания угольных шламов необходимо создание специальных высокочастотных грохотов, технология удаления влаги на которых должна основываться на результатах анализа реологических моделей структурированных угольных шламовых суспензий на вибрирующей ситовой поверхности, а также теории и практики этого процесса.

## 1.2 Анализ реологических моделей структурированных угольных шламовых суспензий

В соответствии с современными представлениями [70-77] влияние дисперсной фазы на свойства суспензии сказывается следующим образом. При невысокой концентрации дисперсной фазы вязкость системы, в соответствии с законом Эйнштейна, линейно зависит от объемной концентрации твердых частиц. С повышением концентрации дисперсной фазы наблюдаются отклонения от закона Эйнштейна, вызванные гидродинамическими и механическими (столкновения частиц) взаимодействиями. Кроме того, с повышением концентрации твердых частиц возникает явление сольватации, при которой проявляется зависимость вязкости суспензии от дисперсности частиц при одинаковой их объемной концентрации. Явление сольватации проявляется в прилипании слоя тонкодисперсной среды к поверхности более крупных частиц, что приводит к искажению результатов вычисления вязкости по формуле Эйнштейна.

В тонкодисперсных суспензиях наблюдается также явление взаимодействия (притяжения) между коллоидными частицами [70], что приводит к образованию рыхлых агрегатов и снижению подвижности среды. При этом вязкость суспензии значительно превышает значение, вычисленное по формуле Эйнштейна. Такое явление называется иммобилизацией и характеризуется простейшими структурными свойствами.

Структурообразованием называется фиксация пространственного положения частиц дисперсной среды [70]. Структурированные жидкие среды уже не подчиняются законам Ньютона и Пуазейля и называются аномальными или неньютоновскими жидкостями. Структура коагуляционной среды может разрушаться при внешнем механическом воздействии. Если же наблюдается обратимое восстановление структуры после ее разрушения, то такое явление называется тиксотропией.

Известно, что свойства неньютоновских жидкостей обусловлены либо наличием несвязанных между собой элементов структуры, либо сплошной струк-

турной сеткой, которая может разрушаться при действии внешних сил [71]. В первом случае поведение системы аналогично поведению жидкости со взвешенными частицами, способными деформироваться и ориентироваться. В результате различия скоростей слоев потока элементы структурной сетки разрушаются, а элементы вытянутой формы ориентируются в направлении течения.

Во втором случае структура жидкости ограничивает ее подвижность. Течение такой жидкости начинается лишь тогда, когда напряжение сдвига при внешнем воздействии превысит некоторое критическое напряжение, называемое пределом текучести материала. Впервые такое течение исследовано Ф.Н.Шведовым, а затем Бингамом [71] и называется пластическим. Для большинства структурированных систем зависимость градиента скорости от приложенного напряжения нелинейна. Это связано с тем, что при достижении предела текучести структурная сетка материала разрушается постепенно по мере возрастания градиента скорости течения жидкости. Поэтому при анализе критических напряжений сдвига различают [70]: минимальный предел текучести, соответствующий началу течения; переходной участок и максимальный предел текучести, при котором структура жидкости полностью разрушается и наблюдается пластическое течение, характеризуемое линейной зависимостью приложенного напряжения от градиента скорости.

При течении структурированных жидкостей, как правило, наблюдаются противоположные процессы - разрушение и тиксотропное восстановление структуры. Если возникает равновесное состояние между этими процессами, то стационарное течение жидкости характеризуется эффективной вязкостью.

Образование устойчивых пространственных структур в высококонцентрированных угольных шламовых суспензиях является одной из основных причин «залипания» щелей сит и постоянства структуры пор надситного продукта. Для устранения этого явления в структуре дисперсной среды необходимо создать с помощью механического воздействия такое динамическое состояние, при котором все обратимые по прочности связи между элементами структуры среды раз-

рушаются и реализуется наибольшая текучесть при минимальной эффективной вязкости, т.е. при наименьшей вязкости предельно разрушенной структуры [71].

Закономерности образования, условий устойчивости и, напротив, разрушения структур в концентрированных дисперсных системах определяются зависимостями между реологическими характеристиками материала и интенсивностью внешних механических воздействий [71]. Наиболее достоверная информация о такой зависимости дается при построении полной реологической кривой течения материала, выражающей взаимосвязь равновесной степени разрушения структуры от деформации или скорости деформации, либо от напряжения сдвига. Полная реологическая кривая устанавливает зависимость эффективной вязкости, характеризующей степень равновесного разрушения структуры, от интенсивности механического воздействия во всем диапазоне изменения эффективной вязкости, - от максимальной вязкости практически неразрушенной структуры до минимальной ньютоновской вязкости предельно разрушенной структуры [71]. Полная реологическая кривая позволяет определить основные константы концентрированного материала для описания его структурно-механических свойств.

Реологическое описание свойств концентрированных дисперсных систем основано на применении методов математического моделирования, основанных на анализе простейших моделей упругого, вязкого и пластического реологических тел и их различных комбинаций [71-77]. Наиболее простые модели для описания структурных свойств высококонцентрированных дисперсных смесей основаны на представлении о вязкопластичном течении материала [71, 72]. Например, модель Бингама содержит параллельно соединенные вязкий элемент Ньютона и пластический элемент Сен-Венана. Реологическая модель Ф.Н. Шведова несколько более сложна, поскольку учитывает также и упругие свойства среды. Указанные реологические модели просты в применении, однако позволяют описывать только линейный участок пластического течения среды.

Понятие пластичности, как способности тела сохранять первоначальную форму при снятии напряжений, меньших предела текучести, позволило опреде-

лить различные более сложные сочетания упругих, вязких и пластических свойств тел [71]. Например, модель Максвелла-Шведова-Кельвина учитывает различные виды деформации: быструю эластическую, медленную эластическую и пластическую.

Наиболее сложным в реологическом смысле телом является тело Шоффилда-Скотт-Блэра [71], из которого методом исключения отдельных элементов могут быть получены практически все типы реологических тел.

Математическое моделирование реологических свойств концентрированных дисперсий широко используется в различных отраслях промышленности: горной, строительной, химической, пищевой и др. Например, в промышленности строительных материалов для описания реологических свойств цементно-водной суспензии и бетонной смеси при различных способах динамического нагружения использовались реологические модели Бингама, Кельвина-Фойгта, Бингама-Шведова, Шоффилда-Скотт-Блэра [78-80].

Реологический подход к описанию свойств высококонцентрированных суспензий применяется также и в углеобогатительной практике. В монографии Т.Г. Фоменко и А.Ф. Кондратенко [81] с использованием методов реологии исследованы структурно-механические свойства отходов флотации различной степени сгущения. На основе многочисленных экспериментальных данных определены константы структурно-механических характеристик для отходов флотации ряда углеобогатительных фабрик: эластичность материала, его деформируемость, текучесть, пластичность и время релаксации.

Для анализа поведения структурированных дисперсий во времени под действием внешней нагрузки применялась реологическая модель Максвелла-Шведова-Кельвина.

Однако приведенные результаты не включают в себя материалы, касающиеся угольных шламовых суспензий, обладающих, как было отмечено выше, особыми реологическими свойствами.

Реологические модели являются эффективным средством исследования деформационных свойств аномальных суспензий. По имеющимся экспери-

ментальным результатам, полученным при одном из способов нагружения образца материала, определяются параметры модели, позволяющие прогнозировать поведение этого же материала при других способах его нагружения.

Наиболее простые реологические модели, включающие небольшое количество элементов, удобны для практического использования, но не позволяют учитывать все многообразие свойств реологического тела. Сложные же модели, напротив, наиболее полно описывают структурно-механические свойства материала, но значительно более сложны для анализа его свойств при различных способах нагружения или деформирования. Так, наиболее сложные модели Максвелла-Шведова-Кельвина и Шоффилда-Скотт-Блэра удобны для анализа поведения исследуемого материала только при постоянном напряжении [71, 79, 81]. Поэтому обычно строятся компромиссные конструкции реологических моделей, позволяющие качественно описывать интересующие процессы нагружения или деформирования. Для расширения возможностей моделирования пластических свойств тел И.Ф. Гончаревичем предложены конструкции пластических элементов [76, 77], напряжение в которых возрастает, плавно или ступенчато, по мере увеличения деформации.

Такие модели использованы, например, в работах В.Г. Сансиева и В.К. Гаруса для разработки технологий, соответственно, тонкого грохочения угольного и илосодержащего шлама [82, 83], однако для обезвоживания они не применялись.

### 1.3 Анализ современной техники и технологии обезвоживания угольных шламов на вибрирующих ситовых поверхностях

Для обезвоживания угольных шламовых суспензий применяются неподвижные плоские и дуговые сита, грохоты с коническими ситами, вибросита и виброгрохоты [27, 28, 84-86]. Каждый тип формы обезвоживающей поверхности имеет свои преимущества и предпочтительную область применения. Неподвижные сита плоской формы, дуговые сита неподвижные и вибрационные, непод-

вижные конусные грохоты применяются для предварительного обезвоживания угольных суспензий. Они отличаются простотой конструкции, неприхотливы к эксплуатации, не требуют специальной технологии для подготовки исходного питания как по крупности, так и по содержанию твердого и скорости подачи. Однако все эти аппараты не дают требуемой влажности надситного продукта.

Основное обезвоживание шламовых продуктов нефлотационной крупности осуществляется на вибрационных грохотах типа ГСЛ, ГИСЛ, ГВИ с частотой колебаний до 1000 мм и амплитудой от 0 до 6 мм [85]. Однако эти грохоты работают удовлетворительно только на крупнозернистом шламе, небольших удельных нагрузках и размерах отверстий сит 0,5(1) мм.

Увеличение в рядовом угле количества класса 0-1 мм, необходимость обогащения высокозольного сухого отсева рядовых углей, вовлечение в переработку забалансовых шламов илонакопителей и увеличение доли углей Западного Донбасса с легкоразмокаемой породой предопределило необходимость более полного улавливания и обезвоживания шламовых продуктов путем уменьшения отверстий обезвоживающих поверхности с 0,5(1) мм до 0,1(0,2) мм. Подобное необходимое решение уменьшило живое сечение применяемых сит практически в 6 раз (например, для шпальтовых сит с 33,4% до 5,5%) и привело, как следствие, к повышению влажности шламовых продуктов с обезвоживающих грохотов с 22-25% до 30-35% [87, 88].

Для решения задачи обезвоживания в сложившихся производственных условиях необходимо либо увеличить фронт обезвоживающих грохотов в 6 раз, либо создать специальные грохоты для обезвоживания шламовых продуктов.

При решении поставленной задачи необходимо учитывать эффект «залипания» отверстий сит гидратной составляющей, который резко усиливается с уменьшением отверстий сит [83].

Изложенная проблема частично решается созданием грохотов с повышенной частотой колебаний рабочего органа [88, 89]. Так в США фирмой «Деррик Меньюэффектчеринг» создан грохот «Деррик» с частотой колебаний короба 3600 мин.<sup>-1</sup> для обезвоживания шлама крупностью 0,04-0,083 мм, фирмой «Tabor» -

грохот с дуговой загрузкой, фирмой «Dekanter» - грохот с обратным уклонном обезвоживающей поверхности [90]. В отечественной практике также наблюдается тенденция создания высокочастотных грохотов для обезвоживания угольных шламов. Например, ГП «Гипромашуглеобогащение» созданы грохоты серии ГЭТ с повышенной частотой колебаний короба ( $1500 \text{ мин.}^{-1}$ ) и неоднородным полем вибраций по длине сита [91], в ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины поличастотные грохоты для обезвоживания на ситах с отверстиями 20 мкм с частотой колебаний  $1500 \text{ мин.}^{-1}$  и амплитудой колебаний короба не более 1 мм [89], на Луганском машиностроительном заводе им. А.Я. Пархоменко – высокочастотные грохоты ГВЧ с частотой колебаний  $1470 \text{ мин.}^{-1}$  и регулируемой амплитудой колебаний от 3,6 до 6,5 мм [92]. Результаты работы перечисленных грохотов показывают улучшение показателей обезвоживания, однако содержание твердого в исходном материале должно быть не менее  $400 \text{ кг/м}^3$ .

Производственные испытания грохота с непосредственным вибровозбуждением сита, имеющего частоту колебаний рабочей поверхности  $3000 \text{ мин.}^{-1}$ , при обезвоживании угольного шлама на отверстиях 0,08 мм показали положительные результаты [93]. Однако эти грохоты создавались для классификации угольных материалов по граничной крупности от 0,04 мм до 0,1 мм и поэтому соотношение амплитуд и частот колебаний не отвечает требованиям обезвоживания. Это соотношение амплитуд и частот по длине грохота приводит к уплотнению надситного материала на последнем участке сита. Лишь в этих условиях влажность надситного достигает своего минимального значения при обезвоживании угольных шламовых суспензий на вибрационных грохотах [94, 95]. Кроме того, созданные высокочастотные грохоты определяют необходимость применения специальной технологии подготовки исходной суспензии к обезвоживанию, включая операции сгущения и предварительного обезвоживания, что удорожает процесс удаления воды с продукта, или применение дополнительного обезвоживающего оборудования в виде центрифуг или термической сушки, что также удорожает процесс удаления воды с продукта, но гораздо значительно.

Указанных недостатков по нашему мнению лишены грохоты, технология обезвоживания на которых состоит из нескольких стадий, отличающихся друг от друга процессом удаления воды. Согласно этой технологии обезвоживание на виброситах должно иметь три этапа:

- перевод угольной суспензии в высококонцентрированную суспензию за счет сброса свободной воды;
- перевод высококонцентрированной угольной суспензии в вязкопластичный материал за счет удаления внешней влаги;
- перевод вязкопластичного материала в вязко-упруго-пластичный материал за счет удаления капиллярной влаги.

На первой стадии вибрации нужны для очистки отверстий обезвоживающей поверхности от частиц, а удаление воды осуществляется на основе законов гидравлики [96, 97].

На второй стадии удаление воды осуществляется за счет стряхивания свободной влаги с поверхности частиц [98, 99].

На третьей стадии удаление воды осуществляется путем выдавливания капиллярной влаги из порового пространства материала путем его виброуплотнения [100-102].

Разработкой высокочастотных (обязательное условие виброуплотнения) обезвоживающих грохотов с различными стадиями обезвоживания занимаются в нашей стране и за рубежом. Так, широкое распространение для обезвоживания обводненных продуктов обогащения, в том числе шламовых, получили грохоты типа Tabor фирмы «Tabor» США с дуговой загрузкой исходной пульпы и грохоты типа Deslime Screen фирмы «Dekanter» США с обратным уклоном обезвоживающей поверхности [103-106].

В первых грохотах применяются элементы первых двух стадий обезвоживания, во-вторых – только элементы третьей стадии обезвоживания. Отсутствие полного набора стадий обезвоживания приводит к не полному удалению влаги, хотя значения влаги у этих грохотов ниже, чем в традиционных. В Украине также созданы грохоты подобные Tabor (грохот ГіС-10 фирмы ООО НПЦ «Промэ-

нергоуголь») и подобные Deslime Screen (грохот ГВЛ-61 фирмы «Пальмира»), которые имеют аналогичные недостатки [107-110].

Следовательно, разработка высокочастотного грохота с тремя стадиями обезвоживания является актуальной научно-производственной задачей, решение которой позволит минимизировать влажность надситных продуктов грохотов при обезвоживании угольных шламов.

#### 1.4 Постановка задач исследований

Как показал анализ техники и технологии обезвоживания продуктов обогащения, обезвоживание угольных шламов является важной научно-производственной задачей, решение которой обеспечит улучшение качества товарной продукции углеобогатительных фабрик за счет снижения влажности мелкого концентрата в условиях исключения термической сушки из технологии обогащения.

Наибольшую трудность в процессах обогащения угля представляет обезвоживание угольных шламов на ситовых вибрирующих поверхностях в условиях уменьшения их отверстий с 0,5(1) мм до 0,1(0,2) мм и менее, что снижает живое сечение сит с 33,4% до 5,5% и предопределяет увеличение фронта обезвоживания в 6 раз.

Сложность обезвоживания угольных шламов заключается прежде всего в их обводненности, требующей или предварительного сгущения и обезвоживания, или применения дорогостоящих процессов обезвоживания (центрифугирования, термической сушки и т.п.). Кроме того, на процесс обезвоживания на ситах существенно влияет «залипание» отверстий сит гидратной составляющей, которое приводит к постепенному уменьшению живого сечения сит и прекращению процесса обезвоживания.

Для решения проблемы обезвоживания угольных шламов необходимо изучение процессов удаления воды на вибрирующей поверхности. Исследование этих процессов осуществляется методами гидравлики и механики, основанными на ана-

лизе влияния вибраций на истечение жидкости из отверстий сита и пор зернистого материала, а также реологии, основанными на анализе и синтезе простейших моделей упругого, вязкого и пластичного реологических тел.

Для устранения указанных трудностей обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности необходимо создать с помощью высокочастотного вибровозбуждения сита и его конструктивных параметров три участка удаления влаги, на первом из которых осуществляется перевод угольной шламовой суспензии в высококонцентрированную суспензию за счет сброса свободной воды; на втором – перевод высококонцентрированной суспензии в вязкопластичный материал за счет удаления поверхностной влаги; на третьем – перевод вязкопластичного материала в вязкоупругопластичный материал за счет удаления капиллярной влаги, что обеспечивает минимизацию влажности надситного продукта и ликвидацию операции его предварительного обезвоживания.

Для обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности применяют неподвижные плоские и дуговые сита, вибросита, конусные грохоты и виброгрохоты. Однако увеличение количества мелочи в водно-шламовых схемах углеобогатительных фабрик и необходимость полного улавливания шламовых продуктов нефлотационной крупности, предопределило необходимость применения высокочастотных грохотов, что особенно существенно при уменьшении отверстий обезвоживающих сит с 0,5(1) мм до 0,1(0,2) мм.

Существующие представления о механическом обезвоживании обводненных угольных продуктов, отсутствие методов расчета технологии обезвоживания на вибрирующей рабочей поверхности не позволяют производить оценку обезвоживания на подобных грохотах и сдерживают их применение.

Указанные выше недостатки состояния теории, технологии и средств для механического обезвоживания угольных шламовых суспензий обусловили постановку следующих задач исследований:

- 1) анализ известных методов и обоснование перспективных подходов к повышению эффективности обезвоживания угольных шламов на вибрационных грохотах;

2) теоретическое обоснование основных параметров уплотнения при обезвоживании угольных шламов на ситовой поверхности высокочастотного грохота;

3) установление взаимосвязи эффективности процесса обезвоживания угольных шламов с параметрами вибровозбуждения ситовой поверхности в условиях перехода вязкой суспензии в вязкопластичный и вязкоупругопластичный материал;

4) разработка и промышленная апробация технологии обезвоживания угольных шламов нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками ситовой поверхности с целью снижения влажности мелкого концентрата.

## РАЗДЕЛ 2

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ ПРИ ОБЕЗВОЖИВАНИИ НА СИТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГРОХОТА

2.1 Разработка физической модели процесса обезвоживания угольных шламов на ситовой поверхности высокочастотного грохота

Как уже отмечалось (разд. 1), в технологии углеобогащения широко применяются процессы обезвоживания шламов на виброгрохотах. Качество продуктов обезвоживания в значительной мере определяется параметрами вибрации рабочей поверхности грохота. Однако существующие физические модели процесса обезвоживания обводненных угольных шламов на вибрирующей ситовой поверхности не отражают имеющее место в этом процессе виброуплотнение частиц, что затрудняет получение достоверных математических зависимостей, позволяющих производить выбор оптимальных режимных параметров. По нашему мнению, физическая модель рассматриваемого процесса заключается в следующем [111].

Процесс обезвоживания обводненных угольных шламов на виброгрохоте можно условно разделить на три этапа.

На первом этапе, характеризуемом значительным содержанием жидкой фазы, происходит предварительное обезвоживание, обусловленное главным образом гидростатическим давлением слоя суспензии; на втором этапе процесс обезвоживания обусловлен инерционной составляющей виброколебаний, обеспечивающий отрыв свободной влаги из межпорового пространства слоя материала; на третьем этапе процесс обезвоживания происходит за счет виброуплотнения слоя материала сопровождающемся выделением свободной влаги из порового пространства слоя.

На первом этапе исходная суспензия, подаваемая на грохот, имеет довольно низкую концентрацию твердой фазы и может рассматриваться как однородная жидкость с эффективной вязкостью, превышающей вязкость жидкой фазы.

Для малой концентрации взвешенных частиц правильной формы эффективная вязкость суспензии вычисляется по простым формулам [112]. Вибрационное воздействие повышает вязкость суспензии, т.к. амплитуды колебаний твердых частиц меньше амплитуды колебаний частиц жидкости. Поэтому для случая малой концентрации твердых частиц выделение жидкой фазы через отверстия сита эффективнее для неподвижной просеивающей поверхности. Если скорость течения суспензии по ситам не очень высока, то истечение жидкости через отверстия сита будет определяться глубиной потока суспензии. На первом этапе происходит перевод вязкой угольной суспензии в высококонцентрированную структурированную за счет сброса свободной воды.

На втором этапе осуществляется перевод высококонцентрированной суспензии в вязкопластичный материал за счет удаления поверхностной влаги.

Начало третьего этапа соответствует состоянию водонасыщенной системы твердых частиц, при котором частицы имеют регулярные контакты друг с другом. На этой стадии процесс обезвоживания уже определяется процессом виброуплотнения частиц твердой фазы и удалением освободившейся из межчастичного пространства капиллярной влаги через отверстия сита.

Известно, что при вибрации структурированной суспензии изменяются ее реологические свойства. Экспериментально установлено [113], что деформация смеси (или ее скорость) при неизменном по сравнению со статическим средним напряжением увеличивается в  $\left[1 + \frac{a_g}{\eta} (a_a \omega^2 / g)\right] \psi(Ti)$  раз, где  $a_g$  - показатель эффективной вязкости, характеризующий ее изменение при увеличении критерия интенсивности вибраций  $(a_a \omega / g)$  на 1 единицу, Н·с/м<sup>2</sup>;  $\eta$  - коэффициент эффективной вязкости, Н·с/м<sup>2</sup>;  $a_a$  и  $\omega$  - соответственно, амплитуда и частота колебаний;  $\psi(Ti)$  - функция удельной тиксотропии, зависящая от грансостава и обращающаяся в единицу при отсутствии вибрации;  $g$  - ускорение силы тяжести.

Решением проблемы установления связи между режимами вибрации и эффективной вязкостью высококонцентрированных суспензий занимались многие авторы [113]. В результате получены полуэмпирические формулы, включающие различные критерии интенсивности вибрации. Наиболее достоверными считаются критерий интенсивности  $u = a\omega^2 / g$  и зависимость эффективной вязкости от режима вибрации  $\eta = \eta_0 + a_g / u$ , где  $\eta_0$  - эффективная вязкость полностью разрушенной структуры, Н·с/м<sup>2</sup>. Таким образом, качество обезвоживания на этой стадии существенно зависит от параметров вибрации обезвоживающей поверхности [82].

Установлено [114], что уплотнение дисперсной среды определяется ускорением прикладываемых к ней колебаний. Причем, оптимальное значение ускорения зависит от физико-механических свойств среды. Уплотнение среды происходит вследствие снижения сил трения между частицами за счет действия сил инерции и сил тяжести.

Экспериментально установлено, что при воздействии вибрации с оптимальным для уплотнения ускорением частицы среды с большой плотностью и больших размеров могут подниматься на поверхность слоя. Это явление объясняется разницей значений оптимальных ускорений для частиц разной крупности и плотности в процессе виброуплотнения.

Известно также, что при более высоких частотах максимальное уплотнение достигается при меньших амплитудах. Однако с увеличением частоты степень максимального уплотнения снижается. Возрастание амплитуды колебаний только до известного предела способствует повышению плотности. Каждому значению амплитуды соответствует определенная наиболее выгодная частота колебаний, способствующая достижению максимального уплотнения.

Результаты исследований влияния продолжительности процесса виброуплотнения на степень уплотнения показали, что процесс уплотнения протекает неравномерно с убывающей скоростью: более интенсивно в начальный момент, а затем скорость уплотнения уменьшается. Такая неравномерность объясняется тем, что по мере уплотнения среды площадь поверхностей контакта между час-

тицами увеличивается, вследствие чего эффективность воздействия вибрации снижается.

На третьем этапе обезвоживание суспензии осуществляется в две стадии [115]: переукладка частиц твердой фазы и их сближение.

На стадии переукладки под действием вибрации происходит разрушение и перестройка неустойчивой случайной структуры частиц, которые под действием силы тяжести стремятся занять наиболее выгодное энергетическое положение.

Причиной разрушения структурированной системы дисперсных частиц является относительное инерционное смещение частиц твердой фазы различной плотности и размера. Смещение тем больше, чем больше масса частицы, выше ускорение колебаний, больше разность плотностей частицы и среды, чем меньше эффективная вязкость системы. В конце стадии переукладки система приобретает устойчивую структуру.

На стадии сближения существенного изменения структуры частиц не происходит. Уплотнение смеси осуществляется в результате сближения частиц, их раздвижки и относительных сдвигов, что обусловлено не только вибровоздействием, но и перераспределением по объему жидкой фазы. Время второй стадии значительно больше продолжительности первой. На этой стадии при относительном смещении частиц происходит «отжатие» жидкой фазы из пор смеси.

На конечной стадии обезвоживания возможно образование тиксотропной структурированной системы, образованной в результате коагуляционных взаимодействий. В результате действия эффекта вибрационного упрочнения структуры возможно образование новых упрочненных контактов, что приводит к образованию твердообразной дисперсной структуры.

На основании изложенных представлений о процессе обезвоживания упрощенная динамическая модель слоя суспензии на рабочей поверхности виброгрохота может быть интерпретирована вязкопластическим реологическим телом с присоединенной массой, равной массе стержня единичного сечения, высота которого равна высоте слоя обводненного материала, а плотность равна плотности суспензии. В результате действия вибрации, а напряжение в пластическом эле-

менте  $\tau_n$  (Н/м<sup>2</sup>) пропорционально деформации:  $\tau_n = k_{\pi} \varepsilon$ , где  $k_{\pi}$  - коэффициент пластичности (Н/м<sup>2</sup>), а  $\varepsilon$  - деформация пластического элемента. Кроме того, полагаем, что высота слоя обезвоженного материала равна  $h_m$  (м), и тогда напряжение в пластическом элементе на этапе уплотнения слоя пропорционально величине  $(h_1 - h)/(h_1 - h_m)$ , т.е. сопротивление пластической деформации изменяется от нуля до  $k_{\pi}$ , где  $h_1$  - величина слоя исходного материала (м);  $h$  - текущее значение величины слоя материала (м).

Полагаем, что высота слоя обезвоживаемого материала  $h = h(t)$  является медленно изменяющимся параметром, остающимся неизменным в течение одного периода колебаний рабочей поверхности. Тогда уравнение движения слоя обезвоживаемого материала на сите грохота под действием пульсирующей нагрузки  $a_a \sin \omega t$  будет:

$$\rho h(t) \ddot{y} + K \dot{y} + \frac{h(t)}{h(t) - h_m} k_{\pi} y = k_{\pi} \cdot a_a \sin \omega t. \quad (2.1)$$

где  $\rho = \rho_{уст.} \cdot \frac{V_c}{S_c} \cdot \frac{l_c}{L_m}$  - плотность обезвоживаемого материала в площади сечения его слоя, кг/м<sup>2</sup>,

$\rho_{уст.}$  - плотность обезвоживаемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$V_c$  - секундный объем материала на сите, м<sup>3</sup>/с;

$S_c$  - площадь сита, по которой проходит материал за 1 с., м<sup>2</sup>/с;

$l_c$  - длина пути материала в 1 с., м;

$L_m = 1$  м;

$y$  - длина пути материала по ситам грохота, м;

$K$  - коэффициент вязкостного сопротивления, Н·с/м<sup>2</sup>;

$a_a$  и  $\omega$  - соответственно, амплитуда (м) возмущающей силы и частота (с<sup>-1</sup>) вынужденных колебаний рабочей поверхности грохота.

Вследствие того, что пластические деформации слоя необратимы и развиваются только в направлении снижения  $h(t)$ , то в течение полупериода колеба-

ний слой движется как твердое тело массой  $\rho h_i$ , а в течение второго полупериода как инерционное вязкопластическое бингамово тело в соответствии с уравнением (2.1).

Решение уравнения (2.1) ищется в виде, представлена в [82]:

$$y = A_i \sin \omega t + B_i \cos \omega t. \quad (2.2)$$

После подстановки выражения (2.2) в уравнение (2.1) и приравнивания нулю суммы коэффициентов при функциях  $\sin \omega t$  и  $\cos \omega t$  определим значения постоянных  $A_i$  и  $B_i$ .

Выражение (2.2) можно представить в виде:

$$A_i = a_a \frac{\frac{h_1 - h_i}{h_1 - h_m} k_{\Pi} - \rho h_i \omega^2}{\left( \frac{h_1 - h_i}{h_1 - h_m} k_{\Pi} - \rho h_i \omega^2 \right)^2 + K^2 \omega^2}, \quad (2.3)$$

$$B_i = \frac{a_a K \omega}{\left( \frac{h_1 - h_i}{h_1 - h_m} k_{\Pi} - \rho h_i \omega^2 \right)^2 + K^2 \omega^2}.$$

$$y = a_{a i} \sin(\omega t + \varphi_i), \quad (2.4)$$

где  $a_{a i} = \sqrt{A_i^2 + B_i^2} = a_a \left[ \left( \frac{h_1 - h_i}{h_1 - h_m} k_{\Pi} - \rho h_i \omega^2 \right)^2 + K^2 \omega^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ , м;

$$\varphi_i = \arctg(B/A) = \arctg \frac{K \omega}{\frac{h_1 - h_i}{h_1 - h_m} k_{\Pi} - \rho h_i \omega^2}, \text{ град.}$$

Таким образом, колебания поверхности слоя обезвоживаемого материала происходят с частотой вынужденных колебаний, а сдвиг фазы в  $i$ -м периоде колебаний равен  $\varphi_i$  и зависит от высоты слоя.

В начальный момент уплотнения высота слоя обезвоживаемого материала  $h = h_1$ . При этом пластическая деформация равна нулю и движение материала

характеризуется инерционными и вязкостными сопротивлениями. По мере уменьшения высоты слоя возникают и далее возрастают пластические сопротивления. Алгоритм вычисления изменяющейся высоты слоя состоит в следующем.

Полагаем  $h = h_1$  и по формулам (2.3) вычисляем коэффициенты  $A_i$  и  $B_i$ . Затем по формуле (2.4) определяем  $a_{a1}$  - амплитуду колебаний в направлении уменьшения  $h$  для первого периода колебаний процесса уплотнения.

Тогда, за первый период колебаний изменение высоты слоя материала составит  $\Delta h_1 = a_a / (\rho h_1 \omega^2) - a_{a1}$ . В начале второго периода ( $i = 2$ ) колебаний  $h_2 = h_1 - \Delta h_1$ . Повторяя вычисления по формулам (2.3) и (2.4) определим  $\Delta h_2 = a_{a1} - a_{a2}$ ,  $h_3 = h_2 - \Delta h_2$  и т.д. Вычисление продолжают до достижения времени  $t = i / 2\pi\omega$ , равного времени разгрузки обезвоженного материала с участка сита грохота. Например, при частоте вращения дебалансного вала грохота  $33,3 \text{ с}^{-1}$ , средней скорости транспортирования материала при обезвоживании  $0,020 \text{ м/с}$  и длине участка сброса воды  $0,83 \text{ м}$  число вычислений составит  $8679$ , а время обезвоживания материала на этом участке составит  $41,5 \text{ с}$ .

Расчеты показывают, что при нагрузке на грохот по пульпе  $60 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $V = 0,017 \text{ м/с}$ ) и ширине сита  $1 \text{ м}$  уменьшение высоты слоя материала при переходе с содержанием твердого  $300 \text{ кг/м}^3$  до  $600 \text{ кг/м}^3$ , с  $600 \text{ кг/м}^3$  до  $900 \text{ кг/м}^3$  и с  $900 \text{ кг/м}^3$  до влажности  $25\%$  составляет, соответственно,  $0,057 \text{ м}$  (с  $0,114 \text{ м}$  до  $0,057 \text{ м}$ );  $0,019 \text{ м}$  (с  $0,057 \text{ м}$  до  $0,038 \text{ м}$ );  $0,009 \text{ м}$  (с  $0,038 \text{ м}$  до  $0,029 \text{ м}$ ).

При указанных параметрах и принимая  $K = 0,0024 \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$  (при  $C = 600 \text{ г/л}$ ),  $\omega = 33,3 \text{ с}^{-1}$ ,  $a_a = 1 \text{ мм}$ ,  $\rho_n = 1200 \text{ кг/м}^3$  (при  $C = 600 \text{ г/л}$  и  $\rho_T = 1500 \text{ кг/м}^3$ ),  $k_{\pi} = 1921,874 \text{ Н/м}^2$  (при  $C = 600 \text{ г/л}$ ), по уравнениям (2.4) определяем в начале  $a_{a1} = 1,067 \text{ м}$  и  $\varphi_1 = 45 \text{ град.}$ , а затем длину участка сброса воды

$$y = 1,067 \sin(33,3 \cdot 41,5 \cdot 360 + 45) = 1,067 \cdot 0,74 = 0,79 \text{ м.}$$

Таким образом, процесс обезвоживания угольных шламовых суспензий на вибрирующей ситовой поверхности состоит из трех этапов: на первом этапе

происходит перевод вязкой суспензии в высококонцентрированную за счет сброса свободной воды под действием гидростатического давления слоя; на втором – перевод высококонцентрированной суспензии в вязкопластичный материал за счет удаления поверхностной влаги под действием инерционной составляющей виброколебаний; на третьем – перевод вязкопластичного материала в вязкоупругопластичный материал за счет удаления капиллярной влаги из порового пространства между частицами путем их виброуплотнения.

На основании представления процесса обезвоживания суспензии на виброгрохоте, как процесса пульсирующего деформирования инерционного вязкопластичного тела, предложена модель движения слоя материала на сите грохота, отвечающая уравнению (2.1), в котором коэффициент вязкого сопротивления  $K$  является функцией интенсивности вибрационного воздействия  $a_a \omega^2 / g$ , где  $a_a$  и  $\omega$  - соответственно, амплитуда и частота колебаний сита грохота.

Полученные результаты позволяют перейти к определению условий перехода вязкой суспензии в вязкопластичный материал на вибрирующей ситовой поверхности и определить длину первого участка обезвоживания угольного шлама.

## 2.2 Определение условий перехода вязкой суспензии в вязкопластичный материал на вибрирующей ситовой поверхности

Обезвоживание угольных шламовых суспензий на виброгрохотах по своему физическому представлению значительно отличается от обезвоживания влажного материала.

По существующим представлениям [116-120] процесс обезвоживания угольных шламовых суспензий на грохоте можно разделить на три этапа:

- на первом этапе (сгущение) происходит предварительное обезвоживание, когда твердая фаза в процессе движения суспензии по наклонному сити осажда-ется на него, а основная масса воды удаляется через слой материала и отверстия перфорированной поверхности;

- на втором этапе (концентрация) – удаление воды происходит за счет ее отрыва от частиц под действием инерционной силы;

- на третьем этапе (уплотнение) – осадок разрыхляется и уплотняется с разрушением капилляров и удалением капиллярной влаги через отверстия перфорированной поверхности.

На первом этапе обезвоживания извлечение жидкой фазы из слоя суспензии определяется гидродинамическими параметрами потока и ситовой поверхности и подчиняется законам гидравлики переменной массы [121, 122], во втором – параметрами вибровозбуждения, свойствами твердой фазы потока и осуществляется по законам фильтрации [123-125], на третьем - параметрами виброуплотнения.

Важнейшей задачей теории обезвоживания угольных шламов на ситовых поверхностях является определение момента (или условий) перехода вязкопластичной суспензии в вязкоупругопластичный материал. Решение этой задачи позволяет осуществить выбор рациональных параметров обезвоживающей поверхности с учетом особенностей первого, второго и третьего этапа обезвоживания суспензий на виброситах и определить необходимую величину вибровозбуждения на ней.

Важным моментом в решении этой задачи является аналитическое определение изменения продольной компоненты скорости и глубины по длине потока на обезвоживающей поверхности и установление зоны постоянной толщины материала на сите.

Для выполнения поставленной задачи рассмотрим течение вязкой жидкости по ситовой поверхности.

В задачах течения жидкости по ситовой поверхности основной интерес представляет определение глубины потока или расхода через проницаемую перегородку вдоль направления движения. Подобные задачи исследованы достаточно полно только для заданных зависимостей отвода жидкости (в основном, равномерного) сквозь проницаемую перегородку в направлении потока [126, 127].

Существуют также классические решения, полученные для слоистых течений вязкой жидкости по сплошной поверхности под действием силы тяжести. В этом случае вектор скорости имеет постоянное направление, что позволяет линеаризовать уравнения движения [128, 129].

В работе [130] рассмотрена задача течения вязкой жидкости в наклонном канале прямоугольного сечения со сплошным или проницаемым дном при условии, что глубина потока  $\tilde{h}_0$  в начальном сечении значительно меньше длины  $L$  рассматриваемого участка потока:

$$\frac{\tilde{h}_0}{L} = f \ll 1. \quad (2.5)$$

Здесь под  $L$  понимается некоторая характерная длина потока, не превышающая длину, на которой происходит полное просачивание жидкости, но большая той, для которой условие (2.5) не выполняется. Поэтому, вообще говоря, величина  $L$  не нуждается в конкретизации, но может быть привязана к определенным геометрическим или физическим параметрам потока. Порядок величины  $\varepsilon$  можно оценить на примере: если длина ситовой поверхности составляет 5 м, а глубина потока в загрузочной части равна 0,1 м, то  $\varepsilon = 0,1/5 = 0,02$ .

Для решения поставленной задачи рассмотрим установившееся течение вязкой несжимаемой жидкости, стекающей по наклонной ситовой поверхности, которое описывается уравнениями Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = 0, \quad (2.6)$$

$$\tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} - g \sin \alpha = \nu \nabla^2 \tilde{u}, \quad (2.7)$$

$$\tilde{u} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}} + g \cos \alpha = \nu \nabla^2 \tilde{v}, \quad (2.8)$$

где  $\tilde{u}$  и  $\tilde{v}$  - компоненты скорости в направлениях  $\tilde{x}$  и  $\tilde{y}$ , м/с;

$\tilde{p}$  - давление жидкости, Па;

$\rho$  и  $\nu$  - плотность (кг/м<sup>3</sup>) и кинематическая вязкость (м<sup>2</sup>/с) жидкости соответственно;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\alpha$  - угол наклона плоскости к горизонту, град.;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2}{\partial \tilde{y}^2} \text{ - оператор Лапласа.}$$

На поверхности сита продольная компонента скорости равна нулю, а нормальная будет зависеть от условий истечения жидкости через отверстия сита. Для случая истечения через малое отверстие в тонкой стенке скорость на выходе из отверстия определяется по известной формуле  $\tilde{v} = \eta_c \sqrt{2g\tilde{h}_o}$ , где  $\eta_c$  - коэффициент скорости. Для колосникового сита тонкого грохочения с размером щели 0,1-0,2 мм, т.е. для малых чисел Рейнольдса, скорость входа в отверстие сита также определяется гидростатическим давлением и может быть вычислена по формуле  $\tilde{v} = B\tilde{h}_o / \nu$  [131], где  $B = d_{щ} \sin \alpha_p / h_k$  - геометрический параметр сита, составленный из констант, характеризующих ширину щели  $d_{щ}$  (м), высоту колосников  $h_k$  (м) и угол расширения щели  $\alpha_p$  (град.). Если живое сечение сита равно  $\delta$ , то усредненное значение нормальной составляющей скорости у сита составит  $\tilde{v} = \delta B \tilde{h}_o / \nu$ . Живое сечение колосниковых сит с шириной щели 0,1-0,2 мм находится в пределах 0,045-0,105 [87]. Таким образом,  $\delta$  имеет порядок  $f$ , а их отношение  $\gamma = \delta / f$  является величиной малого порядка.

Тогда граничное условие для поверхности раздела жидкость - проницаемая поверхность:

$$\tilde{u} = 0, \quad \tilde{v} = -\frac{B\delta\tilde{h}_o}{\nu} \text{ при } \tilde{y} = 0. \quad (2.9)$$

Для равномерного слоистого течения вязкой жидкости слоем постоянной глубины, когда действующие на поток силы тяжести и вязкости уравновешены, существует следующее решение [128]:

$$\begin{aligned} \tilde{U} &= \frac{g}{2\nu} \sin \alpha (2\tilde{h}_o \tilde{y} - \tilde{y}^2), \quad \tilde{V} = 0, \\ \tilde{P} &= P_o - \rho g \cos \alpha (\tilde{y} - \tilde{h}_o), \end{aligned} \quad (2.10)$$

где  $P_o$  - давление на поверхности потока, Па.

В решении (2.10) использовано граничное условие  $\partial\tilde{u}/\partial\tilde{y}=0$  при  $\tilde{y}=\tilde{h}_o$ , показывающее, что на поверхности потока напряжение сдвига обращается в нуль.

Для рассмотрения возмущений в установившемся слоистом течении (2.10) введем безразмерные величины следующими соотношениями [132]:

$$h = \tilde{h}/\tilde{h}_o, \quad x = \tilde{x}/L, \quad y = \tilde{y}/\tilde{h}_o, \quad U = \tilde{U}/U_o,$$

$$u + U = \tilde{u}/U_o, \quad v = \tilde{v}/\varepsilon U_o, \quad P = \tilde{P}/\rho g \tilde{h}_o \sin \alpha, \quad (2.11)$$

$$p + P = \tilde{p}/\rho g \tilde{h}_o \sin \alpha, \quad U_o = g \tilde{h}_o^2 \cdot \sin \alpha / 2\nu.$$

После подстановки (2.11) в уравнения (2.6) - (2.8) имеем следующие уравнения для безразмерных возмущений:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (2.12)$$

$$(u + U) \frac{\partial u}{\partial x} + v \left( \frac{\partial u}{\partial y} + U' \right) = - \frac{2}{Re} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\varepsilon \cdot Re} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \varepsilon^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right), \quad (2.13)$$

$$(u + U) \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{2}{\varepsilon^2 Re} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\varepsilon \cdot Re} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \varepsilon^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right), \quad (2.14)$$

где  $U = 2y - y^2$ ;  $Re = U_o \tilde{h}_o / \nu$  - число Рейнольдса, а штрихом обозначено дифференцирование по  $y$ .

Следуя [132], введем функцию тока  $\psi(x, y)$ , такую, что

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u, \quad - \frac{\partial \psi}{\partial x} = v. \quad (2.15)$$

При подстановке (2.15) в уравнение (2.12) последнее обращается в тождество, а при подстановке в (2.13) и (2.14), с последующим дифференцированием (2.13) по  $y$ , а (2.14) по  $x$  и вычитанием уравнения (2.14) из (2.13), их можно объединить в одно уравнение относительно  $\psi$ :

$$\begin{aligned} \psi_{yyyy} = \varepsilon \cdot \operatorname{Re} \left[ (U + \psi_y) \psi_{xyy} - (U'' + \psi_{yyy}) \psi_x \right] - 2\varepsilon^2 \psi_{xxyy} + \\ + \varepsilon^3 \cdot \operatorname{Re} \left[ (U + \psi_y) \psi_{xxx} - \psi_x \psi_{xxy} \right] - \varepsilon^4 \psi_{xxxx}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Здесь и далее индексами  $x$  и  $y$  обозначены частные производные по соответствующим переменным.

Как видно, уравнение (2.16) представляет собой естественное разложение функции тока  $\psi$  по малому параметру  $\varepsilon$ .

Уравнение (2.16) необходимо дополнить следующими граничными условиями.

Условие на поверхности раздела жидкость - проницаемая поверхность:

$$\psi_y = 0, \quad \psi_x = a_0 \operatorname{Re} h \quad \text{при } y=0. \quad (2.17)$$

Здесь обозначено  $a_0 = \gamma B / U_o^2$ .

На свободной поверхности потока нормальная составляющая скорости жидкости равна скорости поверхности раздела:

$$h_x (U + \psi_y) + \psi_x = 0 \quad \text{при } y=h. \quad (2.18)$$

Кроме того, на свободной поверхности касательное напряжение обращается в нуль:

$$(U' + \psi_{yy} - \varepsilon^2 \psi_{xx}) (1 - \varepsilon^2 h_x^2) - 4\varepsilon^2 \psi_{xy} h_x = 0 \quad \text{при } y=h, \quad (2.19)$$

а градиент давления в направлении оси  $x$ , согласно уравнению (2.13),

$$p_x = \frac{1}{2} \varepsilon^{-1} \psi_{yyy} - \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ \psi_{xy} (\psi_y + U) - \psi_x (\psi_{yy} + U') \right] + \frac{1}{2} \varepsilon \psi_{xxy}. \quad (2.20)$$

Для описания безразмерного изменения возмущенной поверхности потока определим разложение по степеням малого параметра  $\varepsilon$  зависимостей (2.16), (2.17), (2.19) и (2.20) для использования их в уравнении (2.18) поверхности потока. Разложение по степеням  $\varepsilon$  для возмущенного решения задачи [132]:

$$\begin{aligned} \psi = \psi_0 + \varepsilon \psi_1 + \varepsilon^2 \psi_2 + \dots \\ p = \varepsilon^{-1} p_{-1} + p_0 + \varepsilon p_1 + \dots \end{aligned} \quad (2.21)$$

Подставим разложение (2.21) в предыдущие уравнения и приравняем коэффициенты при одинаковых степенях  $\varepsilon$ .

Для порядка  $\varepsilon^0$  имеем:

$$\psi_{0yyyy} = 0, \quad (2.22)$$

$$\psi_{0y} = 0 \quad \text{при } y = 0, \quad (2.23)$$

$$\psi_{0x} = a_0 \operatorname{Re} h \quad \text{при } y = 0, \quad (2.24)$$

$$\psi_{0yy} = 2(y-1) \quad \text{при } y = h, \quad (2.25)$$

$$\psi_{0yyy} = 0 \quad \text{при } y = h. \quad (2.26)$$

Последнее условие вытекает из (2.20).

Для порядка  $\varepsilon^1$ :

$$\psi_{1yyyy} = \operatorname{Re}[(U + \psi_{0y})\psi_{0xyy} - (U'' + \psi_{0yyy})\psi_{0x}], \quad (2.27)$$

$$\psi_{1y} = 0 \quad \text{при } y = 0, \quad (2.28)$$

$$\psi_{1yy} = 0 \quad \text{при } y = h, \quad (2.29)$$

$$\psi_{1yyy} = 2 \operatorname{Re} y^3 h_x \quad \text{при } y = h. \quad (2.30)$$

Интегрируя последовательно уравнение (2.22) с использованием граничных условий (2.23)-(2.26), получим решение задачи нулевого порядка:

$$\psi_0 = (h-1)y^2 + \operatorname{Re} a_0 \int_0^x h(x) dx. \quad (2.31)$$

Решение (2.31) дает:

$$\psi_{0y} = 2y(h-1), \quad (2.32)$$

$$\psi_{0x} = h_x y^2 + \operatorname{Re} a_0 h, \quad (2.33)$$

$$\psi_{0xyy} = 2h_x, \quad (2.34)$$

$$\psi_{0yyy} = 0. \quad (2.35)$$

Тогда, после подстановки полученных решений в уравнение (2.27), оно принимает вид:

$$\psi_{1yyyy} = 2 \operatorname{Re}(2yh h_x + \operatorname{Re} a_0 h). \quad (2.36)$$

Интегрируя последовательно это уравнение с учетом условий (2.28)-(2.30),  
имеем:

$$\psi_{1yyy} = 2 \operatorname{Re} \left[ h h_x y^2 + \operatorname{Re} a_0 h (y - h) \right], \quad (2.37)$$

$$\psi_{1yy} = \operatorname{Re} \left[ \frac{2}{3} h h_x (y^3 - h^3) + \operatorname{Re} a_0 h (y - h)^2 \right], \quad (2.38)$$

$$\psi_{1y} = \operatorname{Re} \left[ \frac{2}{3} h h_x y \left( \frac{y^3}{4} - h^3 \right) + \operatorname{Re} a_0 h y \left( \frac{y^2}{3} - y h + h^2 \right) \right], \quad (2.39)$$

$$\psi_1 = \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{3} h h_x y^2 \left( \frac{y^3}{10} - h^3 \right) + \operatorname{Re} a_0 h y^2 \left( \frac{y^2}{12} - \frac{h y}{3} + \frac{h^2}{2} \right) \right] + C, \quad (2.40)$$

где  $C$  - постоянная интегрирования.

Тогда

$$\begin{aligned} \psi_{1x} = \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{30} y^5 (h_x^2 + h_{xx} h) - \frac{1}{3} y^2 (4 h_x^2 h^3 + h_{xx} h^4) + \right. \\ \left. + a_0 \operatorname{Re} \left( \frac{1}{12} y^4 h_x - \frac{2}{3} y^3 h_x h + \frac{3}{2} y^2 h_x h^2 \right) \right], \end{aligned} \quad (2.41)$$

а для поверхности потока ( $y = h$ )

$$\psi_{1x} = \operatorname{Re} h^4 \left( -\frac{13}{10} h h_x^2 - \frac{3}{10} h^2 h_{xx} + \frac{11}{12} a_0 \operatorname{Re} h_x \right). \quad (2.42)$$

Подставив полученные решения для  $\psi_{0y}$ ,  $\psi_{1y}$ ,  $\psi_{0x}$  и  $\psi_{1x}$  в уравнение (2.18) и, положив  $\psi = \psi_0 + \varepsilon \psi_1 + O(\varepsilon^2)$ , имеем уравнение свободной поверхности потока:

$$2h^2 h_x + a_0 \operatorname{Re} h + \varepsilon \operatorname{Re} \left( -\frac{9}{5} h^5 h_x^2 - \frac{3}{10} h^6 h_{xx} + \frac{5}{4} \operatorname{Re} a_0 h^4 h_x \right) = O(\varepsilon^2). \quad (2.43)$$

Для решения этого уравнения положим  $h = h_0 + \varepsilon h_1 + O(\varepsilon^2)$ . После подстановки этого разложения в уравнение (2.43) и приравнивания коэффициенты при одинаковых степенях  $\varepsilon$ , имеем:

для  $\varepsilon^0$ :

$$2h_0 h_{0x} + a_0 \operatorname{Re} = 0, \quad (2.44)$$

для  $\varepsilon^1$ :

$$2h_0h_{1x} + 2h_{0x}h_1 - \frac{9}{5}\text{Re}h_0^4h_{0x}^2 - \frac{3}{10}\text{Re}h_0^5h_{0xx} + \frac{5}{4}a_0\text{Re}^2h_0^3h_{0x} = 0. \quad (2.45)$$

Решая уравнение (2.44) при начальном условии

$$h_0 = 1 \text{ при } x = 0, \quad (2.46)$$

получим:

$$h_0 = \left(1 - a_0 \text{Re } x\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.47)$$

После подстановки этого решения в уравнение (2.45), имеем:

$$h_{1x} - \frac{1}{2}a_0\text{Re}\varphi^{-1}h_1 - \frac{1}{2}a_0^2\text{Re}^3\varphi^{\frac{1}{2}} = 0, \quad (2.48)$$

где обозначено  $\varphi \equiv \varphi(x) = 1 - a_0 \text{Re } x$ .

Начальное условие для уравнения (2.48):

$$h_1 = 0 \text{ при } x = 0. \quad (2.49)$$

Тогда уравнение (2.48) будет иметь своим решением функцию

$$h_1 = \frac{1}{4}a_0\text{Re}^{-2}\left(\varphi^{-\frac{1}{2}} - \varphi^{\frac{3}{2}}\right), \quad (2.50)$$

а общее решение для глубины потока по длине ситовой поверхности

$$h = \varphi^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{4}\varepsilon a_0\text{Re}^{-2}\left(\varphi^{-\frac{1}{2}} - \varphi^{\frac{3}{2}}\right). \quad (2.51)$$

Подстановка решения (2.50) в выражения (2.32), (2.33), (2.37) и (2.41) позволяет получить зависимости для нормальной составляющей скорости и возмущения параболического профиля вдоль направления потока:

$$\begin{aligned} \psi_x = & a_0\text{Re}\left(\varphi^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2}y^2\varphi^{-\frac{1}{2}}\right) + \varepsilon a_0^2\text{Re}^3 \times \\ & \times \left[ \frac{1}{4}\left(\varphi^{-\frac{1}{2}} - \varphi^{\frac{2}{3}}\right) + \frac{1}{8}y^2\left(\varphi^{-\frac{3}{2}} - 5\varphi^{\frac{1}{2}}\right) + \frac{1}{3}y^3 - \frac{1}{24}y^4\varphi^{-\frac{1}{2}} \right], \end{aligned} \quad (2.52)$$

$$\psi_y = 2y \left( \varphi^{\frac{1}{2}} - 1 \right) + \varepsilon a_0 \text{Re}^2 y \times \left( \frac{1}{2} \varphi^{-\frac{1}{2}} + \frac{5}{6} \varphi^{\frac{3}{2}} - y\varphi + \frac{1}{3} y^2 \varphi^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{12} y^3 \right). \quad (2.53)$$

Таким образом, на основании принятого условия (2.5) уравнения движения жидкости (2.6)-(2.8) приведены к виду (2.16), содержащему малый параметр. Так как каждая последующая производная функции  $\psi$  пропорциональна числу  $Re$ , то решение (2.16) будет сходящимся при  $\varepsilon Re \ll 1$ . Это условие соответствует «медленным» течениям, например, течению высококонцентрированной суспензии, что и свидетельствует о переходе вязкой суспензии в вязкопластичный материал. Получено также уравнение изменения глубины потока по ситовой поверхности (2.51), а также зависимости для нормальной составляющей скорости и возмущения параболического профиля вдоль направления потока (2.52, 2.53), что позволяет определить параметры вибровозбуждения.

Применение метода малого параметра позволяет получить решения для свободной поверхности, составляющих скоростей и давлений с любой степенью точности. В настоящей работе точность решений ограничена величинами первого порядка малости. В случае если условие (2.5) не удовлетворяется, то следует воспользоваться более полными разложениями (2.21). Основные результаты этих исследований опубликованы в [133].

Таким образом, определено условие перехода вязкой суспензии в вязкопластичный материал. Это условие соответствует «медленным» течениям при  $\varepsilon Re \ll 1$  и позволяет определить длину второго участка обезвоживания угольного шлама на вибрирующей ситовой поверхности.

Для этого используем уравнение (2.51) и зная, что при  $C = 900$  г/л высота сит материала в конце участка сита составляет 0,038 м,  $a_0 = 0,00036$ ,  $Re = 7,58$ ,  $\varepsilon = 0,209$ , находит параметр  $\varphi$  как

$$0,038 = \frac{1}{\varphi^2} + \frac{1}{4} 0,209 \cdot 0,157 \cdot 7,58^{-2} \left( \frac{1}{\varphi^2} - \varphi^{\frac{3}{2}} \right).$$

Из решения уравнения следует, что  $\varphi = 0,001156$ .

Зная величины  $\varphi$ ,  $a_0$  и  $Re$  по уравнению (2.48) находим минимальную длину второго участка  $x$

$$x = (1 - y) : (a_0 \cdot Re) = (1 - 0,001156) : (0,157 \cdot 7,58) = 0,839 \text{ м.}$$

2.3 Разработка математической модели процесса виброуплотнения слоя материала при обезвоживании на ситовой поверхности высокочастотного грохота

2.3.1 Исследование изменения структурно-механических свойств угольных шламов в процессе обезвоживания на ситовой поверхности высокочастотного грохота

В процессе обезвоживания угольного шлама происходит увеличение объемной концентрации твердой фазы за счет выделения воды через сито грохота. При этом структурно-механические свойства угольной суспензии претерпевают существенные изменения. Наиболее существенно изменяется эффективная вязкость суспензии, имеющая нелинейную зависимость от объемной концентрации твердых частиц.

Основные реологические свойства концентрированной суспензии - это эффективная вязкость, пластичность и упругость.

Упругие свойства обуславливаются наличием воздушных пузырьков, растворенных в суспензии. Однако в процессе обезвоживания на сите грохота, сопровождающемся виброуплотнением слоя, воздушные пузырьки интенсивно выделяются через свободную поверхность слоя и через нижнюю его границу, т.е. через сито. Таким образом, слой шлама на сите можно рассматривать как вязкопластическое реологическое тело.

Для высококонцентрированной суспензии характерно наличие пространственной структуры, способной сопротивляться напряжению, которое не превосходит некоторой величины  $\tau_c$ , называемой напряжением сдвига или пределом текучести [134]. Если же напряжение в материале превышает предел текучести, то структура его разрушается и происходит медленное сдвиговое течение со скоростью, пропорциональной избыточной скорости сдвига [135], т.е. материал ведет себя как ньютоновская жидкость при сдвиговом напряжении  $\tau - \tau_c$ .

Материал, отвечающий указанным свойствам, носит название реологического тела Бингама-Шведова [136]. Структурная реологическая модель материала Бингама-Шведова приведена на рис. 2.1. Модель составлена из параллельно соединенных вязкого ньютоновского элемента и пластического элемента Сен-Венана.

Напряжение  $\tau_b$ , реализуемое в вязком ньютоновском элементе, пропорционально скорости  $\dot{\epsilon}$  деформации и равно нулю при нулевой скорости:

$$\tau_b = \eta \dot{\epsilon}, \text{ Н/м}, \quad (2.54)$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости;

$\dot{\epsilon}$  - скорость деформации.

Напряжение в пластическом элементе равно пределу текучести

$$\tau_{II} = \tau_c. \quad (2.55)$$

При малой величине напряжения, когда  $\tau_{II} < \tau_c$  материал не деформируется и ведет себя как абсолютно твердое тело; напряжение  $\tau_{II} > \tau_c$  вызывает движение материала, причем усилие, создающее это напряжение, равно силе сухого трения и не зависит от скорости деформации [137].

Учитывая, что общее напряжение в вязкопластическом теле  $\tau = \tau_b + \tau_{II}$ , запишем уравнение, связывающее напряжение и деформацию для реологической модели Бингама-Шведова [138], и, используя (2.54) и (2.55), получим:

$$\tau = \eta \dot{\epsilon} + \tau_c. \quad (2.56)$$

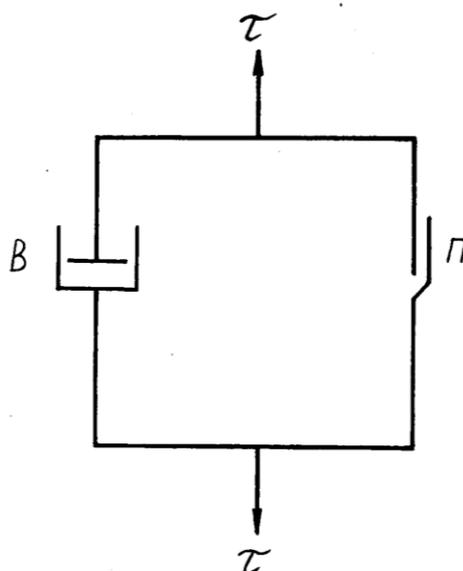


Рис. 2.1. Реологическая модель Бингама-Шведова:

в – вязкий элемент; п – пластический элемент.

Реологическая зависимость для бингамовой жидкости, отвечающая уравнению (2.56), приведена на рис. 2.2.

Рассмотрим поведение вязкопластичного материала на гармонически колеблющейся горизонтальной ситовой поверхности в безотрывном режиме.

Выделим в слое материала стержень единичного поперечного сечения, ось которого совпадает с нормальной составляющей усилия сжатия со стороны сита. Высота стержня равна толщине слоя  $h$  материала, а масса стержня  $m = \rho h$ , где  $\rho$  - плотность материала в площади сечения его слоя,  $\text{кг/м}^2$ . Так как плотность материала угольной суспензии в процессе обезвоживания изменяется незначительно [139], то полагаем  $\rho = \text{const}$ .

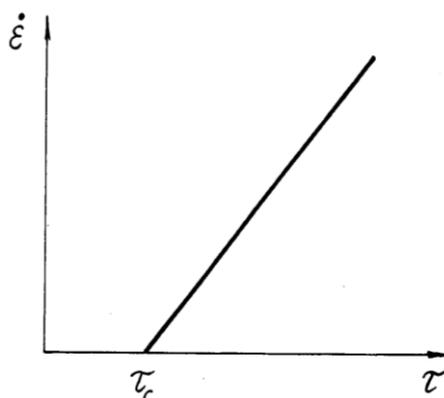


Рис. 2.2. Реологическая зависимость для бингамовой жидкости.

На слое материала действует гармоническая возмущающая сила  $a_a \cos \omega t$ , где  $a_a$  и  $\omega$  – амплитуда и частота возмущающей силы,  $t$  – время.

Возмущающая сила создается инерционным вибровозбудителем грохота, представляющим собой неуравновешенный ротор, вращающийся с частотой (угловой скоростью)  $\omega$ , имеющий неуравновешенную массу  $m_o$ , эксцентриситет которой равен  $e$ . При этом величина центробежной силы постоянна и равна  $m_o e \omega^2$  [140]. Вынуждающая сила привода приводит в колебательное движение короб грохота с находящимся на сите материалом. Кроме того, в процессе колебаний на слой действуют силы инерции, обусловленные плотностью материала  $\rho$ , силы вязкого и сухого трения, определяющие пластическую деформацию материала.

Нормальная составляющая колебаний ситовой поверхности приводит к деформированию слоя и способствует его обезвоживанию, а касательная составляющая обеспечивает вибротранспортирование слоя. Поэтому, учитывая только нормальную составляющую колебаний, полагаем, что сила инерции слоя  $m\ddot{y} = \rho h \ddot{y}$ , где  $y$  – вертикальное перемещение слоя,  $y = \epsilon h$ .

В соответствии с реологической моделью, приведенной на рис. 2.1 и законом деформирования вязкого элемента (2.54) сила вязкого трения в слое материала равна  $\eta \dot{y}$  ( $\dot{y} = h \dot{\epsilon}$  – скорость вертикального перемещения слоя).

Сила сухого трения  $\vec{R}$  постоянна по величине и направлена в сторону, противоположную скорости перемещения [141]  $\vec{R} = -R\dot{y}|\dot{y}|$ , где  $R$  - постоянная, зависящая от коэффициента трения и сил сцепления. Если сила  $\vec{R}$  обусловлена напряжением, действующим на боковой поверхности стержня, квадратного в сечении, то  $R = 4h\tau_c$ . Полагая, что пластическая деформация в процессе виброуплотнения слоя является необратимой, представим силу сухого трения как  $R(\text{sgn } \dot{y} + 1)/2$  [142], где

$$\text{sgn } \dot{y} = \begin{cases} 1 & \text{при } \dot{y} > 0 \\ -1 & \text{при } \dot{y} \leq 0. \end{cases} \quad (2.57)$$

Таким образом, когда скорость перемещения сита направлена вверх, а напряжение в слое превышает предел сдвига  $\tau_c$ , происходит пластическая деформация слоя. Если скорость сита направлена вниз, то сила сухого трения равна нулю и слой движется как инерционное тело.

В результате анализа сил, действующих на материал, разработана динамическая расчетная схема вязкопластичного материала, находящегося под действием гармонической возмущающей силы (рис. 2.3).

В соответствии с принятой динамической схемой уравнение движения слоя на вибрирующей поверхности будет иметь вид

$$m\ddot{y} + \eta\dot{y} + 2h\tau_c (\text{sgn } \dot{y} + 1) = k_{\Pi} a_a \cos \varpi t. \quad (2.58)$$

На конечной стадии процесса обезвоживания высота слоя изменяется медленно, так, что  $dh/dt \ll 1$ .

Уравнение (2.58) содержит нелинейность, обусловленную функцией  $\text{sgn } \dot{y}$ . Для решения уравнений такого типа используют методы поэтапного интегрирования [143], либо методы, основанные на линеаризации уравнения движения.

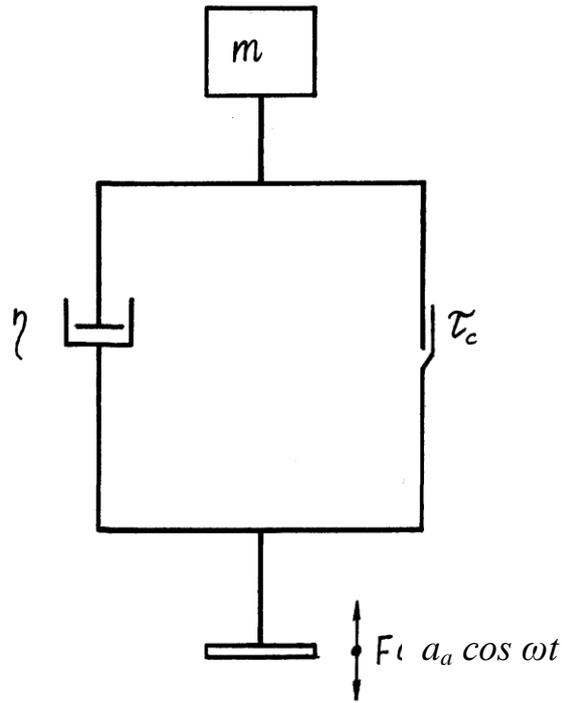


Рис.2.3. Расчетная динамическая схема инерционного вязкопластичного материала на вибрирующей поверхности.

Для приведения уравнения (2.58) к линейному виду воспользуемся методом энергетического баланса [144], в соответствие с которым нелинейная сила сухого трения может быть заменена эквивалентной в энергетическом отношении линейной силой  $b_o \dot{y}$ , для которой коэффициент  $b_o$  определяется, исходя из условия равенства работ, совершаемых обеими силами за период колебаний, т.е.

$$\int_0^T \tau_c \operatorname{sgn} \dot{y} \cdot \dot{y} \cdot dt = \int_0^T b_o \dot{y}^2 dt. \quad (2.59)$$

В первом приближении можно принять, что в стационарном режиме колебательный процесс является гармоническим.

Из уравнения (2.58) видно, что нелинейная сила трения проявляется только для положительных значений скорости, а функция  $\operatorname{sgn} \dot{y}$  принимает значения 0 и 1. Тогда ожидаемый закон колебаний для скорости перемещения слоя следующий

$$\dot{y} = -a_a \omega \sin \omega t, \quad (2.60)$$

где  $a_a$  и  $\omega$  - амплитуда и частота колебаний слоя, соответственно.

Подставим выражение (2.60) в (2.59) и получим

$$\int_0^T b_o \dot{y}^2 dt = b_o a_a^2 \omega \int_0^{2\pi} \sin^2 \psi d\psi = b_o \pi a_a^2 \omega, \quad (2.61)$$

где  $\psi = \omega t$ .

Вычислим интеграл в левой части (2.59) для нелинейной силы сопротивления

$$\int_0^T \tau_c \dot{y} \operatorname{sgn} \dot{y} \cdot dt = -\tau_c a_a \int_0^{2\pi} \sin \psi \operatorname{sgn} \dot{y} \cdot d\psi = 4\tau_c a_a. \quad (2.62)$$

Приравняв результаты вычислений (2.61) и (2.62) определим эквивалентный коэффициент трения

$$b_o = \frac{4}{\pi a_a \omega} \tau_c.$$

После определения коэффициента  $b_o$  задача сводится к исследованию эквивалентной линейной динамической системы, для которой сила сухого трения

$$2h\tau_c (\operatorname{sgn} \dot{y} + 1) \approx 2h\tau_c (by + 1), \quad (2.63)$$

где  $b = 4/\pi a_a \omega$ .

Движение линеаризованной динамической системы будет описываться уравнением

$$m\ddot{y} + (\eta + 2bh\tau_c) \dot{y} + 2h\tau_c = k_{\Pi} a_a \cos \omega t. \quad (2.64)$$

Для системы с неупругим сопротивлением колебания отстают от возмущающей силы. Поэтому, если в первом приближении колебания происходят по закону  $y = k_{\Pi} a_a \cos \omega t$ , то закон изменения возмущающей силы может быть записан как  $a_a \cos(\omega t + \varphi)$ , где  $\varphi$  - фазовый угол. Тогда уравнение (2.64) линеаризованной динамической системы будет описываться уравнением

$$m\ddot{y} + (\eta + 2bh\tau_c) \dot{y} + 2h\tau_c = k_{\Pi} a_a \cos(\omega t + \varphi). \quad (2.65)$$

Для определения фазы колебаний  $\varphi$  рассмотрим состояние системы в момент наибольшего отклонения системы от положения равновесия, т.е. когда  $\cos \omega t = 1$ . При этом  $y = a_a$ ,  $\dot{y} = 0$ ,  $\ddot{y} = -a_a \omega^2$ . При постановке этих значений в уравнение (2.65) имеем

$$k_{\Pi} a_a \cos \varphi = 2h\tau_c - m a_a \omega^2. \quad (2.66)$$

Когда же система проходит через положение равновесия  $\cos \omega t = 0$ . При этом  $y = 0$ ,  $\dot{y} = -a_a \omega$ ,  $\ddot{y} = 0$ . Подставив эти значения в уравнение (2.65), получим

$$k_{\Pi} a_a \sin \varphi = (\eta + 2bh\tau_c) a_a \omega - 2h\tau_c. \quad (2.67)$$

Возведя два последних равенства в квадрат и сложив их, получим выражение, связывающее величину возмущающей силы и амплитуду колебаний системы:

$$k_{\Pi} a_a^2 = \left(2h\tau_c - m a_a \omega^2\right)^2 + \left(B a_a \omega - 2h\tau_c\right)^2, \quad (2.68)$$

где  $B = \eta + 2bh\tau_c$ .

Фаза колебаний при этом

$$\varphi = \arcs \cos \frac{2h\tau_c - m a_a \omega^2}{k_{\Pi} a_a}.$$

Уравнение (2.65) представляет собой линейное уравнение вынужденных колебаний инерционного вязкопластичного тела, для которого сила сухого трения представлена в виде постоянной составляющей  $2h\tau_c$ . В этом уравнении в функции вязкого сопротивления присутствуют амплитуда  $a_a$  и частота  $\omega$  колебаний слоя материала. Кроме того, известно, что коэффициент эффективной вязкости  $\eta$  также является функцией  $a_a$  и  $\omega$  [145].

Разделим левую и правую части уравнения (2.65) на  $m = \rho h$ , тогда, используя обозначение, сделанное в (2.68),

$$\ddot{y} + \frac{B}{m} \dot{y} + \frac{2\tau_c}{\rho} - \frac{k_{\Pi} a_a}{m} \cos(\omega t + \varphi) = 0. \quad (2.69)$$

Введем новую переменную  $u = \dot{y}$ ,  $\dot{u} = \ddot{y}$ , после чего уравнение (2.69) будет иметь вид

$$\dot{u} + \frac{B}{m}u + \frac{2\tau_c}{\rho} - \frac{k_{\Pi}a_a}{m}\cos(\omega t + \varphi) = 0. \quad (2.70)$$

Уравнение (2.70) является линейным дифференциальным уравнением первого порядка [146], решение которого известно

$$\dot{y} = u = e^{-\frac{B}{m}t} \left\{ \int \left[ \frac{k_{\Pi}a_a}{m}\cos(\omega t + \varphi) - \frac{2h\tau_c}{m} \right] e^{\frac{B}{m}t} dt + C_o \right\}, \quad (2.71)$$

где  $C_o$  - начальное значение.

Интеграл, входящий в (2.71) является табличным [146]:

$$\int e^{\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) dt = \frac{e^{\alpha t}}{\alpha^2 + \omega^2} [\alpha \cos(\omega t + \varphi) + \omega \sin(\omega t + \varphi)],$$

где обозначено  $\alpha = B/m$ .

Тогда, решая уравнение (2.71), получим

$$\dot{y} = u = \frac{k_{\Pi}a_a m}{B^2 + m^2\omega^2} \left[ \frac{B}{m}\cos(\omega t + \varphi) + \omega \sin(\omega t + \varphi) \right] - \frac{2h\tau_c}{B} + C_o e^{-\frac{B}{m}t}. \quad (2.72)$$

Если положить, что в начальный момент времени скорость перемещения слоя  $u = \dot{y} = 0$ , то из (2.72) находим:

$$C_o = \frac{2h\tau_c}{B} - \frac{k_{\Pi}a_a m}{B^2 + m^2\omega^2} \left( \frac{B}{m}\cos\varphi + \omega \sin\varphi \right).$$

Тогда для скорости перемещения слоя получаем выражение

$$\dot{y} = \frac{2h\tau_c}{B} \left( e^{-\frac{B}{m}t} - 1 \right) + \frac{k_{\Pi}a_a m}{B^2 + m^2\omega^2} \times \left[ \frac{B}{m}\cos(\omega t + \varphi) + \omega \sin(\omega t + \varphi) \right] - \left( \frac{B}{m}\cos\varphi + \omega \sin\varphi \right) e^{-\frac{B}{m}t}. \quad (2.73)$$

Выражение (2.73) описывает изменение скорости слоя с учетом переходного процесса в начальный промежуток времени. Для стационарного процесса  $t \rightarrow \infty$  и выражение (2.73) можно записать как

$$\dot{y} = \frac{k_{\Pi} a_a m}{B^2 + m^2 \omega^2} \left[ \frac{B}{m} \cos(\omega t + \varphi) + \omega \sin(\omega t + \varphi) \right] - \frac{2h\tau_c}{B}. \quad (2.74)$$

Интегрируя уравнение (2.74) определим перемещение вибрирующего слоя:

$$y = \frac{k_{\Pi} a_a m}{B^2 + m^2 \omega^2} \left[ \frac{B}{m\omega} \sin(\omega t + \varphi) - \cos(\omega t + \varphi) + \left( \cos \varphi + \frac{m\omega}{B} \sin \varphi \right) e^{-\frac{B}{m}t} \right] - \frac{2h\tau_c}{B} \left( e^{-\frac{B}{m}t} + t \right) + C. \quad (2.75)$$

Для определения произвольной постоянной  $C$  положим, что в начальный момент времени  $t = 0$  координата высоты слоя равнялась  $h_o$ . Тогда, подставив эти значения в (2.75), получим

$$C = h_o + \frac{2h\tau_c m}{B^2} - \frac{k_{\Pi} a_a}{B\omega} \sin \varphi. \quad (2.76)$$

Тогда перемещение вибрирующего слоя

$$y = h_o - \frac{2h\tau_c}{B} \left[ t - \frac{m}{B} \left( 1 - e^{-\frac{B}{m}t} \right) \right] + \frac{k_{\Pi} a_a m}{B^2 + m^2 \omega^2} \times \left[ \frac{B}{m\omega} \sin(\omega t + \varphi) - \cos(\omega t + \varphi) + \left( \cos \varphi + \frac{m\omega}{B} \sin \varphi \right) e^{-\frac{B}{m}t} - \frac{B^2 + m^2 \omega^2}{m\omega B} \sin \varphi \right]. \quad (2.77)$$

В стационарном процессе ( $t \rightarrow \infty$ )

$$y = h_o - \frac{2h\tau_c}{B} t + \frac{k_{\Pi} a_a m}{B^2 + m^2 \omega^2} \times \left[ \frac{B}{m\omega} \sin(\omega t + \varphi) - \cos(\omega t + \varphi) - \frac{B^2 + m^2 \omega^2}{m\omega B} \sin \varphi \right]. \quad (2.78)$$

Уравнение (2.78) описывает перемещение поверхности слоя материала при колебательном сдвиговом течении и содержит эволюционную

$$y_1 = h_o - \frac{2h\tau_c}{B}t + \frac{k_{\Pi}a_a}{\omega B} \sin \varphi$$

и осциллирующую

$$y_2 = \frac{k_{\Pi}a_a m}{B^2 + m^2 \omega^2} \left[ \frac{B}{m\omega} \sin(\omega t + \varphi) - \cos(\omega t + \varphi) \right]$$

составляющие. Виброуплотнение слоя происходит без изменения его массы при постоянном сопротивлении. Естественно, что уплотнение слоя возможно только тогда, когда напряжение в материале превысит напряжение сдвига  $\tau_c$ .

Эволюционная составляющая скорости уплотнения в стационарном режиме  $dy_1/dt = -2h\tau_c/B$ . Здесь высота слоя  $h$  является параметром.

Коэффициент эффективной вязкости концентрированной суспензии зависит от параметров вибрации как [140]

$$\eta = \eta_o + \frac{k}{a_a \omega^3},$$

где  $k$  - коэффициент, Н/м·с<sup>2</sup>;

$\eta_o$  - коэффициент эффективной вязкости, обусловленной вибрационным тиксотропным разрушением дисперсионной среды, Н·с/м<sup>2</sup>;

$a_a$  и  $\omega$  - соответственно, амплитуда и частота колебаний сита.

Тогда скорость уплотнения слоя материала на вибрирующем сите

$$\frac{dy}{dt} \approx - \frac{2h\tau_c}{\eta_o + \frac{k}{a_a \omega^3} + \frac{8h\tau_c}{\pi a_a \omega}}. \quad (2.79)$$

Входящие в эту формулу параметры  $\tau_c$ ,  $\eta_o$  и  $k$  подлежат экспериментальному определению по методике, изложенной в [147].

2.3.2 Анализ уравнения скорости уплотнения слоя материала на ситовой поверхности высокочастотного грохота

Как видно из выражения (2.79) скорость уплотнения слоя зависит от текущей высоты слоя  $h$ , напряжение сдвига материала слоя  $\tau_c$ , эффективной вязкости  $\eta_э$ , а также от частоты  $\omega$  и амплитуды  $a_a$  колебаний рабочей поверхности.

Эффективная вязкость и напряжение сдвига материала слоя изменяются в процессе уплотнения за счет увеличения концентрации твердой фазы. Так, для отходов флотации ЦОФ «Суходольская» и ЦОФ «Криворожская» зависимости эффективной вязкости от содержания твердого, представленные на рис. 2.4, имеют нелинейный характер [148].

Аналогичный характер имеют зависимости напряжения сдвига от содержания твердой компоненты [148, 149].

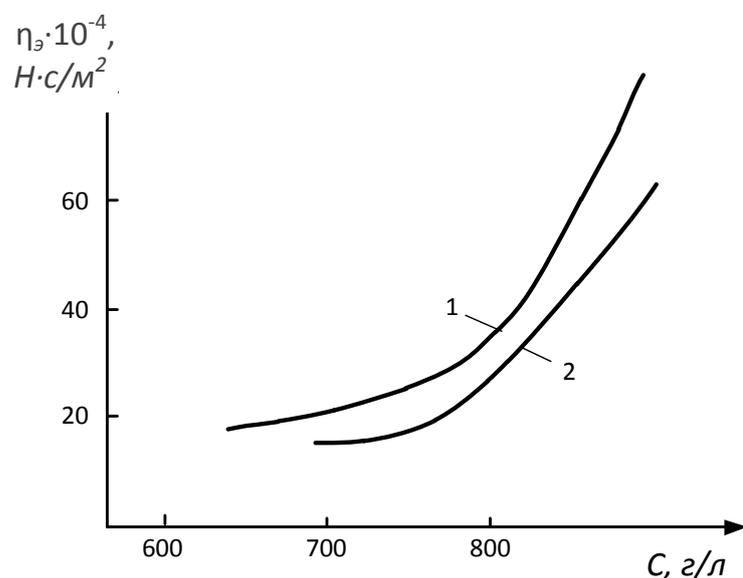


Рис. 2.4. Зависимость эффективной вязкости  $\eta_э$  от содержания твердого в угольной суспензии  $C$ : 1 – отходы флотации ЦОФ «Суходольская»; 2 – отходы флотации ЦОФ «Криворожская».

Подобные зависимости могут быть хорошо аппроксимированы выражениями [141]:

$$\eta = \eta_o \cdot \frac{h_1 - h_o^*}{h - h_o^*}, \quad (2.80)$$

$$\tau_c = \tau_o \cdot \frac{h_2 - h_o^*}{h - h_o^*}, \quad (2.81)$$

где  $\eta_o$  и  $\tau_o$  - эффективная вязкость ( $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ ) и напряжение сдвига ( $\text{Н}/\text{м}^2$ ) при некотором начальном содержании твердого;

$h_1$ ,  $h_2$  и  $h$  - начальная, конечная и текущая высоты слоя, м;

$h_o^*$  - высота слоя при плотно упакованной смеси материала, м.

Разность  $h - h_o^*$ , стоящая в знаменателях выражений (2.80) и (2.81), положительна и всегда больше 0.

Параметрами аппроксимации при описании экспериментально полученных зависимостей служат  $\eta_o$ ,  $\tau_o$ ,  $h_1$  и  $h_2$ .

Известно также [141, 145], что эффективная вязкость дисперсной среды существенно зависит от динамических параметров рабочей поверхности, т.е.  $\eta = \eta(a_a, \omega)$ . Предлагаемые зависимости вибровязкости от частоты и амплитуды колебаний следующие:  $\eta = \eta_o + k / \omega^3 a_a$  [141];  $\eta = \eta_o + \alpha_T / u$ ,  $\eta = \eta_o \exp(\alpha_T / u)$  [145];  $\eta = \eta_o + (\tau - \tau_c) / (1 + \alpha_T u) \dot{\epsilon}$  [145] и т.д., где  $\eta_o$  - вязкость предельно разрушенной дисперсной структуры;  $\alpha_T, k$  - коэффициенты тиксотропии;  $u = a_a \omega^2 / g$  - интенсивность вибрации;  $\dot{\epsilon}$  - градиент скорости деформирования материала.

Многообразие предлагаемых зависимостей  $\eta(a_a, \omega)$  объясняется различием испытываемых материалов и способов приложения вибрации. Поэтому для построения адекватной зависимости  $\eta(a_a, \omega)$  необходимо проведение представительного эксперимента с приложением вибрационного воздействия к образцу испытываемого материала в необходимом диапазоне изменения амплитуды и частоты.

Используя зависимости (2.80) и (2.81) для эффективной вязкости и напряжения сдвига, а также одну из зависимостей  $\eta(a_a, \omega)$ , например,  $\eta = \eta_o + k / \omega^3$ , перепишем уравнение (2.79)

$$\frac{dh}{dt} \approx - \frac{2\pi \tilde{h}_2 \tau_o a_a \omega^3 h}{\pi \tilde{h}_1 (\eta_o a_a \omega^3 + k) + 8\tilde{h}_2 \tau_o \omega^2 h}, \quad (2.82)$$

где обозначено:  $\tilde{h}_1 = h_1 - h_o^*$ ,  $\tilde{h}_2 = h_2 - h_o^*$ .

Интегрируя уравнение (2.82)

$$\frac{\tilde{h}_1 (\eta_o a_a \omega^3 + k)}{2\tilde{h}_2 \tau_o \omega^3 a_a} \int \frac{dh}{h} + \frac{4}{\pi a_a \omega} \int dh = - \int dt + C \quad (2.83)$$

при начальном условии

$$h = h_o \text{ при } t = 0, \quad (2.84)$$

получим

$$t = \frac{4}{\pi a_a \omega} (h_o - h) - \frac{\tilde{h}_1 (\eta_o a_a \omega^3 + k)}{2\tilde{h}_2 \tau_o \omega^3 a_a} \ln \frac{h}{h_o}. \quad (2.85)$$

Выражение (2.85) является уравнением, определяющим время уплотнения слоя материала на вибрирующей рабочей поверхности в процессе обезвоживания.

Для построения зависимостей влияния динамических параметров рабочей поверхности на показатели уплотнения слоя обезвоживаемого материала был проведен вычислительный эксперимент, в котором коэффициенты уравнений (2.82) и (2.85) предварительно выбраны в соответствие с результатами испытаний материалов, приведенными в работах [141, 145, 146, 148, 149]:  $\tau_o = 10 \text{ Н/м}^2$ ,  $k = 10^6 \text{ Н/м}^2 \cdot \text{с}^2$ ,  $\eta_o = 10^3 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$ ,  $\tilde{h}_1 = \tilde{h}_2 = 0,05 \text{ м}$ . По результатам вычислений построены графики влияния амплитуды и частоты колебаний рабочей поверхности на скорость процесса уплотнения материала в диапазоне изменения амплитуды от 0,25 до 4 мм и частоты от 500 до 3000 мин<sup>-1</sup> (рис. 2.5). Как видно из графиков, в традиционном диапазоне частот и амплитуд колебаний существующих грохотов повышение частоты значительно эффективнее сказывается на повышении скорости уплотнения слоя, чем увеличение амплитуды колебаний. Например, для принятых констант материала повышение частоты колебаний рабочей поверхности от 500 до 1500 мин<sup>-1</sup> сопровождается интенсивным ростом скорости уплотнения для слоя 0,1 м, а при дальнейшем повышении частоты колеба-

ной скорость уплотнения резко снижается. С уменьшением слоя материала скорость уплотнения также снижается.

На рис. 2.6 приведены графики зависимости скорости уплотнения слоя от амплитуды и частоты колебаний рабочей поверхности. В качестве примерных параметров материала для слоя  $h = 0,1$  м принято [140, 141]:

$$\tau_o = 10 \text{ Н/м}^2, \eta_o = 10^3 \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2, k = 10^6 \text{ Н/м}^2\cdot\text{с}^2.$$

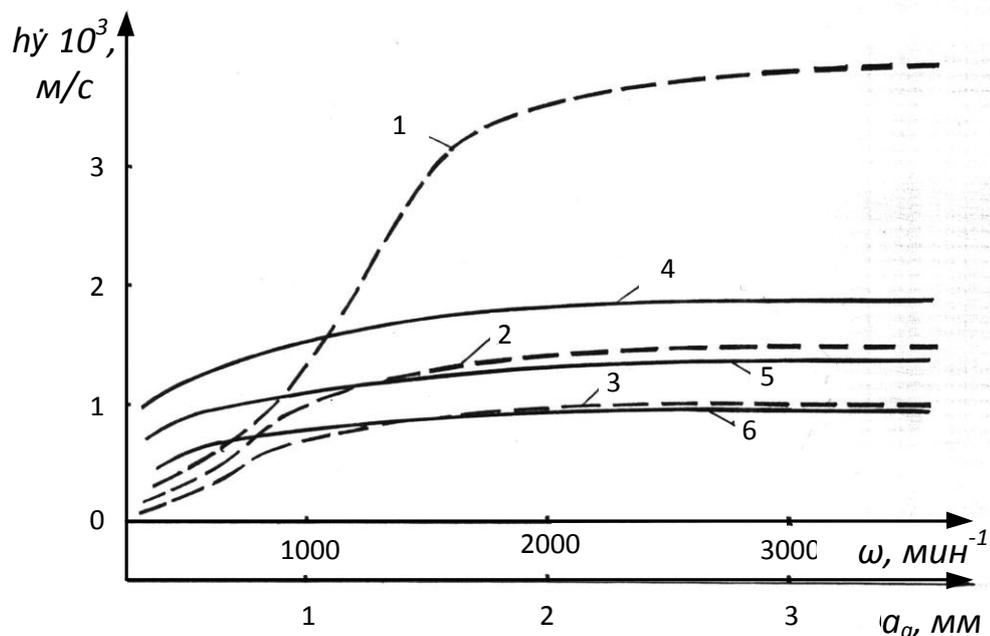


Рис. 2.5. Графики влияния амплитуды  $a_a$  и частоты колебаний  $\omega$  рабочей поверхности на скорость процесса уплотнения материала  $\dot{y}$ :  
 1, 2, 3 -  $\dot{y}(\omega)$  при  $a_a = 1$  мм; 4, 5, 6 -  $\dot{y}(a_a)$  при  $\omega = 750$  мин<sup>-1</sup>.  
 Высота слоя: 1, 4 -  $h = 0,1$ ; 2, 5 -  $h = 0,05$ ; 3, 6 -  $h = 0,025$  мм.

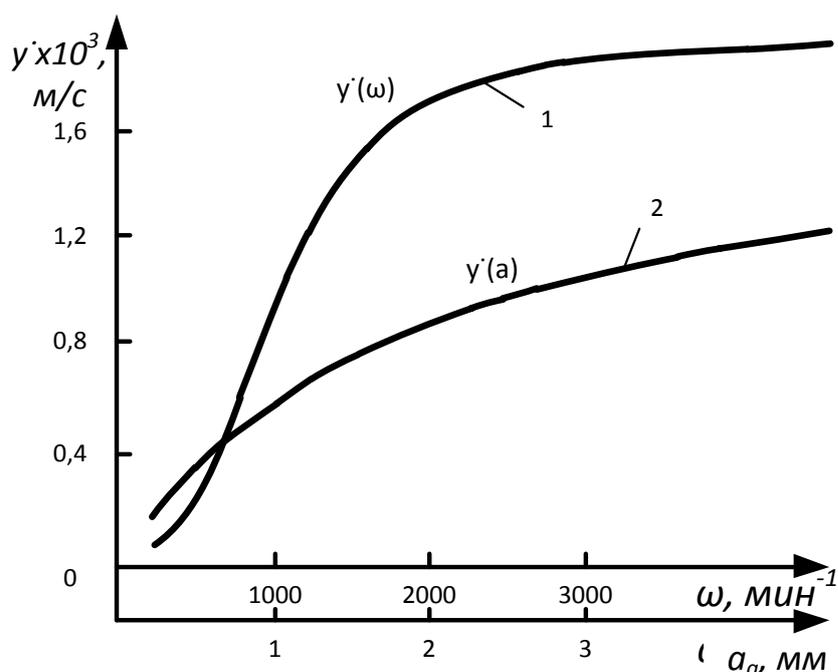


Рис. 2.6. Зависимости скорости виброуплотнения вязкопластичного материала  $\dot{y}$  от амплитуды  $a_a$  и частоты колебаний  $\omega$  рабочей поверхности:  $\dot{y}(\omega)$  при  $a_a = 1,5$  мм;  $\dot{y}(a_a)$  при  $\omega = 1500 \text{ мин}^{-1}$ .

Из рис. 2.6 следует, что увеличение скоростей виброуплотнения практически прекращается при частоте колебаний около  $2000 \text{ мин}^{-1}$ , а увеличение амплитуды колебаний для модельного материала является эффективным до величины 2 мм, при дальнейшем повышении амплитуды рост скорости уплотнения незначителен.

Используя уравнение 2,85, рассчитаны и на рис. 2.7 приведены кривые кинетики уплотнения слоя модельного материала при амплитуде колебаний рабочей поверхности 2 мм и частотах от 500 до  $3000 \text{ мин}^{-1}$ , а на рис. 2.8 при  $\omega = 1500 \text{ мин}^{-1}$  и амплитудах от 0,5 до 4 мм.

Из рис. 2.7 и 2.8 следует, что время уплотнения материала на сите виброгрохота должно быть не менее 35 с. При необходимости, для соблюдения этого условия необходимо на этом участке сита торможение материала, которое может быть достигнуто преданием участку положительного угла относительно основной части обезвоживающей поверхности.

Исходя из ориентированной скорости движения материала по рабочей поверхности грохота в период виброуплотнения  $0,025$  м/с и времени уплотнения  $35$  с. находим минимально необходимую длину участка виброуплотнения, как  $L_3 = 0,025 \cdot 35 = 0,875$  м.

Полученные результаты позволили сформулировать первое научное положение: начало виброуплотнения в слое угольного шлама нефлотационной крупности на ситовой поверхности виброгрохота определяется переходом его из вязкопластичного в вязкоупругопластичное состояние, которое достигается при содержании твердого более  $900$  кг/м<sup>3</sup> и частоте и амплитуде колебаний сита, соответственно,  $1500-2000$  мин.<sup>-1</sup> и  $1,5-2,0$  мм, при этом время виброуплотнения – не менее  $35$  с.

Таким образом, на основании анализа внутрислоевых напряжений материала, находящегося под действием гармонической силы, составлено уравнение движения, содержащее нелинейность, обусловленную силой сухого трения. В результате гармонической линеаризации функции  $\text{sgn}$  уравнение движения

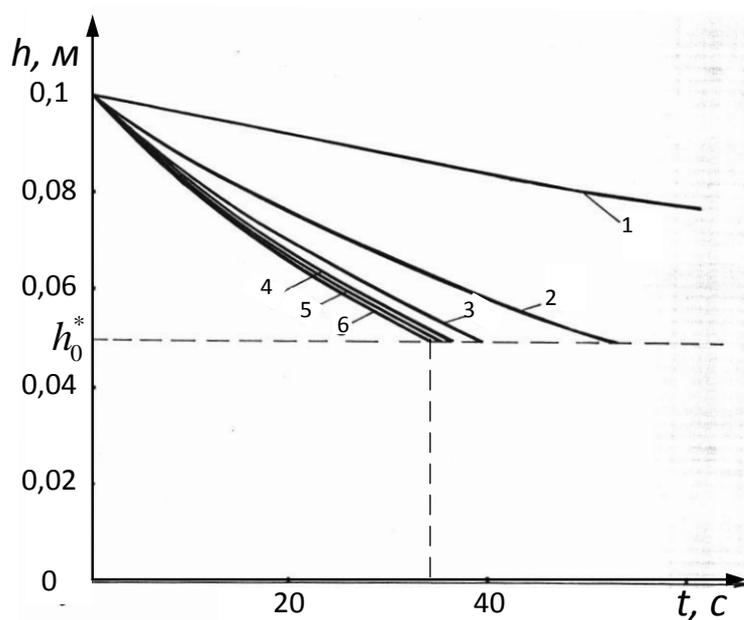


Рис. 2.7. Кинетика уплотнения слоя модельного материала при амплитуде колебаний рабочей поверхности  $2$  мм и частотах:  $1 - 500$  мин.<sup>-1</sup>;  $2 - 1000$  мин.<sup>-1</sup>;  $3 - 1500$  мин.<sup>-1</sup>;  $4 - 2000$  мин.<sup>-1</sup>;  $5 - 2500$  мин.<sup>-1</sup>;  $6 - 3000$  мин.<sup>-1</sup>.

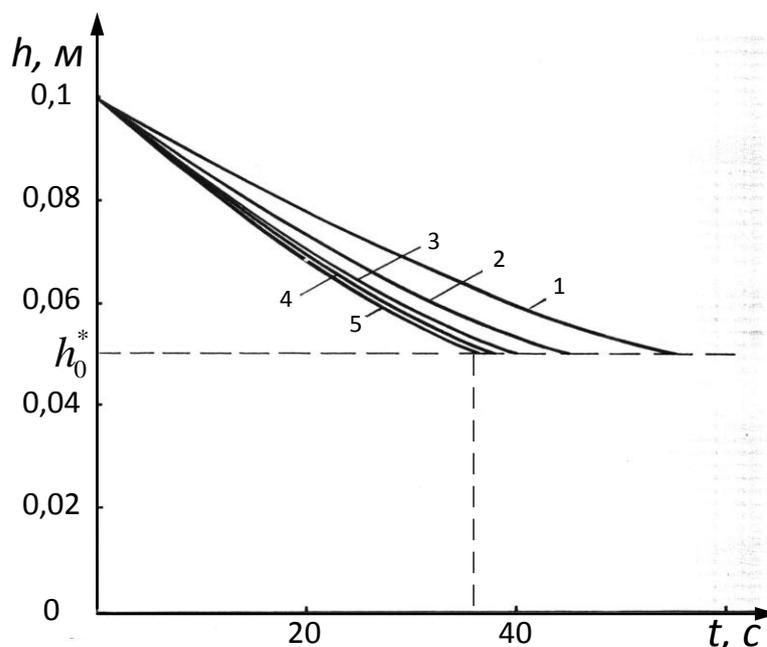


Рис. 2.8. Кинетика уплотнения слоя модельного материала при частоте колебаний рабочей поверхности  $1500 \text{ мин}^{-1}$  и амплитудах: 1 – 0,5 мм; 2 – 1,5 мм; 3 – 2,5 мм; 4 – 3,5 мм; 5 – 4,0 мм.

приведено к линейному виду. Решение модельного уравнения позволило выделить эволюционную и осциллирующую составляющие процесса виброуплотнения материала (без изменения его массы и постоянном сопротивлении). Полученная зависимость скорости уплотнения слоя содержит в явном виде параметры вибраций рабочей поверхности. Зависимость величины напряжения сдвига  $\tau_0$  от реологических параметров потока обезвоживаемого материала на сите грохота определяется экспериментальным путем.

Установлено, что на конечных двух этапах обезвоживания материал характеризуется вязкопластичными свойствами и может быть описан реологической моделью Бингама-Шведова, на основании которой разработана новая математическая модель обезвоживания угольных шламов на вибрирующей ситовой поверхности, которая в отличие от известных, учитывает реологические свойства исходного материала и содержит в явном виде параметры вибраций, что позволяет осуществить подбор рационального динамического режима работы виброгрохота.

Впервые установлено, что наибольшее значение скорости виброуплотнения угольного шлама нефлотационной крупности достигается при амплитуде и частоте колебаний сита соответственно 1,5-2 мм и 1500-2000 мин.<sup>-1</sup> в зависимости от толщины слоя, на основании этого рассчитывается длина третьего участка обезвоживания угольного шлама на вибрирующей ситовой поверхности.

## В ы в о д ы

1. Процесс обезвоживания угольных шламовых суспензий на вибрирующей ситовой поверхности состоит из трех этапов: на первом этапе происходит перевод вязкой суспензии в высококонцентрированную за счет сброса свободной воды под действием гидростатического давления слоя; на втором – перевод высококонцентрированной суспензии в вязкопластичный материал за счет удаления поверхностной влаги под действием инерционной составляющей виброколебаний; на третьем – перевод вязкопластичного материала в вязкоупругопластичный материал за счет частичного удаления капиллярной влаги из порового пространства между частицами путем их виброуплотнения.

2. На конечных двух этапах обезвоживания материал характеризуется вязкопластичными свойствами и может быть описан реологической моделью Бингама-Шведова, что позволяет установить взаимосвязь между напряжением сдвига материала и его деформацией.

3. Новая математическая модель обезвоживания угольных шламов на вибрирующей ситовой поверхности учитывает реологические свойства исходного материала и содержит в явном виде параметры вибраций, что позволяет осуществить подбор рационального динамического режима работы высокочастотного грохота.

4. Наибольшее значение скорости виброуплотнения угольного шлама достигается при амплитуде и частоте колебаний сита соответственно 1,5-2 мм и 1500-2000 мин.<sup>-1</sup> в зависимости от толщины слоя, на основании этого рассчитываются

конструктивные параметры участка виброуплотнения обезвоживающей поверхности высокочастотного грохота.

5. Начало виброуплотнения в слое угольного шлама на вибрирующей ситовой поверхности определяется переходом его из вязкопластичного в вязкоупругопластичное состояние, которое достигается при содержании твердого более  $900 \text{ кг/м}^3$  и частоте и амплитуде колебаний сита соответственно  $1500\text{-}2000 \text{ мин}^{-1}$  и  $1,5\text{-}2,0 \text{ мм}$ , при этом время уплотнения должно быть не менее 35 с.

6. Суммарная минимально необходимая длина рабочей поверхности высокочастотного грохота при обезвоживании угольных шламов нефлотационной крупности должна быть не менее 2,55 м.

### РАЗДЕЛ 3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ НА ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ГРОХОТЕ С РАЗНОНАКЛОННЫМИ УЧАСТКАМИ СИТ

3.1 Исследование процесса обезвоживания угольных шламов на лабораторной модели высокочастотного грохота с разнонаклонными участками ситовой поверхности

3.1.1 Разработка лабораторной модели высокочастотного грохота с разнонаклонными участками ситовой поверхности и методика исследований

Исследование процесса обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности осуществлялось на лабораторной установке модели высокочастотного грохота с разнонаклонными участками сит, схема которой приведена на рис. 3.1.

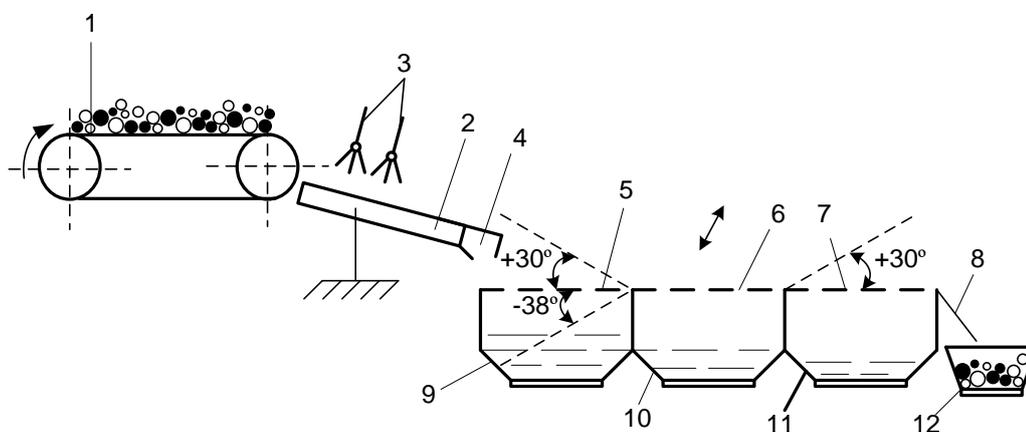


Рис. 3.1. Принципиальная схема лабораторной установки модели высокочастотного грохота с разнонаклонными участками сит обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности:

1 – ленточный питатель; 2 – загрузочный желоб; 3 – система водоснабжения; 4 - распределитель; 5, 6, 7 – соответственно первый, второй и третий участки вибрационной ситовой поверхности; 8 – разгрузочный лоток; 9-12 – сборники продуктов обезвоживания.

Основным моделируемым параметром являлась необходимая длина обезвоживающей поверхности должна составлять 2,545 м. Масштаб моделирования принят 1,5, следовательно длина обезвоживающей поверхности  $2,545 : 1,5 = 1,7$  м. Длина каждого участка обезвоживания лабораторной установки (исходя из стандартизации) составляет  $1,7 \text{ м} : 3 = 0,567$  м. Принято 0,56 м. При этом скорость движения материала по ситам грохота тоже должна быть уменьшена в 1,5 раза по сравнению с натурным грохотом.

Установка состоит из ленточного питателя 1, загрузочного желоба 2, в котором происходит пульпообразование материала, первого, второго и третьего участков обезвоживающей поверхности, соответственно, 5, 6, 7; системы водоснабжения 3; распределителя 4; разгрузочного лотка 8; сборников продуктов 9-12; контрольно-измерительной и запорной арматуры. Первый и третий участки обезвоживающей поверхности установлены с возможностью изменения угла наклона. Скорость ленточного питателя – регулируемая, что дает возможность изменять нагрузку и, соответственно, содержание твердого в суспензии.

Общий вид установки для обезвоживания приведен на рис. 3.2.

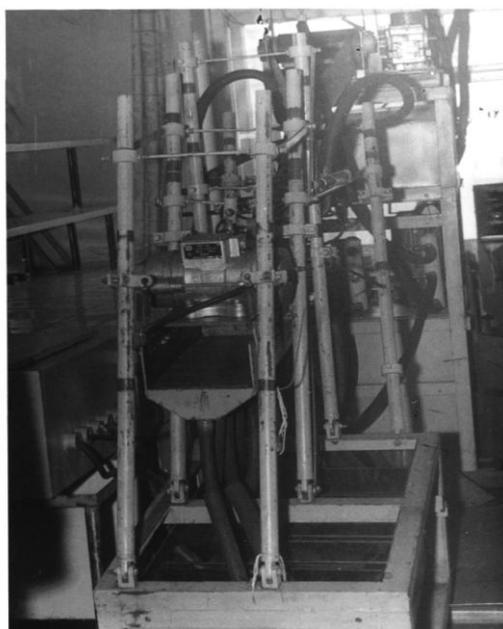


Рис. 3.2. Общий вид лабораторной установки модели высокочастотного грохота с разнонаклонными участками сит для обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности.

### **Техническая характеристика установки для обезвоживания**

### шламовых продуктов на вибрационной поверхности

Производительность, т/ч	3,6
Площадь участков обезвоживающей поверхности, м <sup>2</sup> :	
№ 1	0,042
№ 2	0,042
№ 3	0,042
Длина участков обезвоживающей поверхности, м:	
№ 1	0,56
№ 2	0,56
№ 3	0,56
Ширина участков обезвоживающей поверхности, м:	
№ 1	0,075
№ 2	0,075
№ 3	0,075
Размер отверстий шпальтового сита, мм	0,2-0,5
Живое сечение шпальтового сита, %	10,5
Удельный расход воды, м <sup>3</sup> /т	0-2,0
Мощность электродвигателя, кВт	1,5
Амплитуда колебаний, мм	0,5
Частота колебаний, мин. <sup>-1</sup>	2800

При исследовании процесса обезвоживания весовое количество твердого материала определялось на рычажных весах, расход воды – объемным способом с использованием мерных баков. Влажность надситного продукта определялась стандартным методом по ГОСТ 27314-91.

Для планирования лабораторных исследований применены методы поиска экстремума, позволяющие установить зависимость максимального значения функции отклика от исследуемых параметров [155-157].

Нормирование характерных значений независимых переменных факторов произведен по методике разработанной ГП «Укрнииуглеобогащение» [155]. Проверка на воспроизводимость осуществлялась путем постановки серии идентичных опытов, а оценка надежности результатов – по методике, изложенной в работе [156]. Для изучения зависимости функции отклика от влияющих факторов производилась математическая обработка результатов с использованием известных методов и программ [157].

Исследования проводились на шламовом продукте марки Г (сгущенный продукт пирамидальных сгустителей ЦОФ «Октябрьская») и на искусственной смеси, гранулометрический состав которой приведен в табл. 3.1.

Исследования проводились при постоянном:

- гранулометрическом составе  $d_{cp} = 0,72$  мм;
- размере отверстий обезвоживающей поверхности  $d_{щ} = 0,5$  мм;
- объемной нагрузке  $Q_n = 2,0$  м<sup>3</sup>/ч;
- амплитуде колебаний  $a = 0,5$  мм;
- частоте колебаний  $\omega = 2800$  мин.<sup>-1</sup>.

Исследования проводились в два этапа.

На первом этапе угол участков № 2 и № 3 были постоянными и равными нулю. Угол наклона участка № 1 изменялся от  $-30^\circ$  до  $+30^\circ$  с интервалом  $10^\circ$ . при этом изменялось содержание твердого в обезвоживающем материале от 50 г/л ( $W^T = 95\%$ ) до 500 г/л ( $W^T = 58,2\%$ ).

На втором этапе, после выбора угла наклона участка № 1 с наименьшей влажностью надситного продукта, при постоянном угле наклона участков обезвоживающей поверхности № 1 и № 2, изменялся угол наклона участка № 3 от  $0^\circ$  до  $+30^\circ$  с диапазоном  $5^\circ$ .

Таблица 3.1

Гранулометрический состав исходного материала лабораторной установки

Класс, мм	Сгущенный продукт пирамидального сгустителя		Искусственная смесь	
	Выход, %	Зольность, %	Выход, %	Зольность, %
+3,0	1,2	35,6	5,0	35,6
1,0-3,0	3,6	36,8	10,0	36,8
0,5-1,0	25,0	37,2	20,0	37,2
0,25-0,5	33,1	40,9	25,0	40,9
0,16-0,25	12,0	65,9	15,0	65,9
0,08-0,16	10,2	75,8	10,0	75,8
-0,08	14,9	70,4	15,0	70,4
<b>Итого</b>	<b>100,0</b>	<b>50,7</b>	<b>100,0</b>	<b>50,7</b>

### 3.1.2 Исследование влияния углов наклона участков ситовой поверхности высокочастотного грохота

Результаты исследований первого этапа приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

#### Исследование участка № 1

№	№ опытов	Исходные данные по питанию					Показатели по участкам					
		Q, т/ч	V, м <sup>3</sup> /ч	P, м <sup>3</sup> /ч	C, кг/м <sup>3</sup>	W <sup>r</sup> , %	№ 1		№ 2		№ 3	
							α <sub>1</sub> , град.	W <sup>r</sup> <sub>1</sub> , %	α <sub>2</sub> , град.	W <sup>r</sup> <sub>2</sub> , %	α <sub>3</sub> , град.	W <sup>r</sup> <sub>3</sub> , %
1	1.1	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	-30	52,1	0	42,2	0	38,2
	1.2	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	-20	53,4	0	43,1	0	38,6
	1.3	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	-10	54,2	0	44,3	0	39,4
	1.4	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	0	57,7	0	47,9	0	40,3
	1.5	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	+10	60,4	0	49,3	0	42,4
	1.6	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	+20	62,6	0	52,1	0	44,6
	1.7	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	+30	64,4	0	55,0	0	50,4
2	2.1	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	-30	47,9	0	39,2	0	34,4
	2.2	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	-20	48,4	0	41,6	0	34,7
	2.3	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	-10	51,6	0	42,9	0	35,3
	2.4	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	0	54,2	0	44,5	0	37,8
	2.5	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	+10	56,4	0	45,9	0	39,1
	2.6	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	+20	58,0	0	47,8	0	42,3
	2.7	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	+30	60,1	0	50,0	0	45,4
3	3.1	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	-30	44,1	0	36,5	0	34,0
	3.2	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	-20	45,6	0	37,2	0	34,3
	3.3	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	-10	47,4	0	38,6	0	34,9
	3.4	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	0	49,1	0	40,0	0	36,2
	3.5	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	+10	52,1	0	42,7	0	38,3
	3.6	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	+20	53,4	0	45,1	0	40,1
	3.7	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	+30	54,2	0	47,3	0	43,8
4	4.1	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	-30	40,2	0	34,6	0	31,5
	4.2	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	-20	41,1	0	35,0	0	31,8
	4.3	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	-10	42,3	0	35,4	0	32,6
	4.4	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	0	44,4	0	36,5	0	34,8
	4.5	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	+10	46,3	0	37,6	0	36,2
	4.6	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	+20	47,9	0	39,4	0	37,1
	4.7	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	+30	48,6	0	41,8	0	38,4

Продолжение табл. 3.2

№	№ опытов	Исходные данные по питанию					Показатели по участкам					
		Q, т/ч	V, м <sup>3</sup> /ч	P, м <sup>3</sup> /ч	C, кг/м <sup>3</sup>	W <sup>r</sup> , %	№ 1		№ 2		№ 3	
							$\alpha_1$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>1</sub> , %	$\alpha_2$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>2</sub> , %	$\alpha_3$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>3</sub> , %
5	5.1	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	-30	39,5	0	33,0	0	29,2
	5.2	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	-20	40,0	0	34,0	0	30,3
	5.3	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	-10	41,5	0	35,2	0	31,2
	5.4	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	0	43,7	0	36,0	0	32,1
	5.5	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	+10	44,8	0	37,2	0	33,2
	5.6	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	+20	45,2	0	38,4	0	35,4
	5.7	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	+30	46,6	0	40,0	0	36,7
6	6.1	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	-30	38,6	0	32,4	0	27,4
	6.2	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	-20	38,8	0	33,3	0	27,6
	6.3	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	-10	39,2	0	34,5	0	28,1
	6.4	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	0	41,6	0	35,3	0	29,8
	6.5	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	+10	42,4	0	36,5	0	31,8
	6.6	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	+20	43,0	0	37,8	0	35,4
	6.7	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	+30	47,2	0	41,1	0	37,0
7	7.1	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	-30	40,7	0	31,2	0	27,9
	7.2	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	-20	40,9	0	32,0	0	28,1
	7.3	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	-10	41,2	0	33,1	0	28,6
	7.4	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	0	42,4	0	35,8	0	31,8
	7.5	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	+10	43,0	0	37,2	0	34,2
	7.6	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	+20	44,0	0	39,0	0	37,1
	7.7	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	+30	48,7	0	43,4	0	41,8
8	8.1	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	-30	40,0	0	32,5	0	30,0
	8.2	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	-20	41,2	0	33,4	0	30,7
	8.3	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	-10	42,2	0	34,2	0	31,2
	8.4	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	0	43,2	0	36,9	0	32,0
	8.5	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	+10	44,8	0	38,2	0	36,2
	8.6	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	+20	46,9	0	41,6	0	39,8
	8.7	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	+30	49,3	0	45,1	0	43,4
9	9.1	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	-30	44,4	0	36,4	0	31,2
	9.2	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	-20	44,5	0	36,8	0	31,7
	9.3	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	-10	44,8	0	37,4	0	32,4
	9.4	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	0	45,6	0	38,2	0	33,2
	9.5	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	+10	47,7	0	40,0	0	36,4
	9.6	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	+20	48,9	0	43,2	0	40,2
	9.7	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	+30	50,8	0	46,1	0	44,4

Продолжение табл. 3.2

№	№ опытов	Исходные данные по питанию					Показатели по участкам					
		Q, т/ч	V, м <sup>3</sup> /ч	P, м <sup>3</sup> /ч	C, кг/м <sup>3</sup>	W <sup>r</sup> , %	№ 1		№ 2		№ 3	
							$\alpha_1$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>1</sub> , %	$\alpha_2$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>2</sub> , %	$\alpha_3$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>3</sub> , %
10	10.1	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	-30	44,8	0	36,6	0	32,4
	10.2	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	-20	45,2	0	37,2	0	32,9
	10.3	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	-10	45,6	0	38,4	0	33,3
	10.4	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	0	46,2	0	39,6	0	34,0
	10.5	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	+10	48,6	0	42,2	0	37,3
	10.6	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	+20	50,9	0	44,1	0	40,4
	10.7	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	+30	51,2	0	46,4	0	45,0

Анализ результатов исследований процесса обезвоживания на участке № 1 (рис. 3.3) показал, что с уменьшением угла наклона сита влажность надситного продукта также уменьшается, при этом после угла наклона  $-20^\circ$  зависимости, не зависимо от содержания твердого в исходной суспензии, выполаживаются. Следовательно, данный угол отрицательного наклона ( $\alpha_1 = -20^\circ$ ) можно принять за наиболее рациональный.

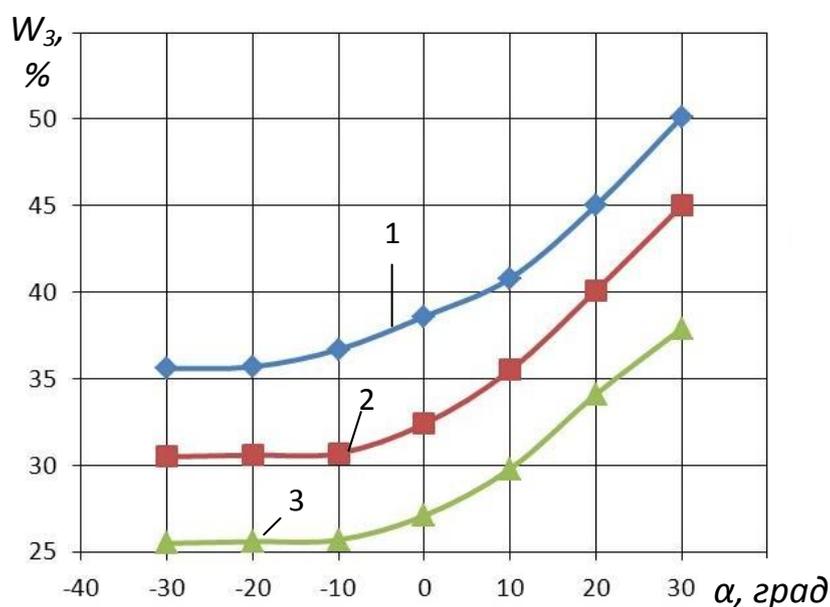


Рис. 3.3. Зависимость влажности надрешетного продукта  $W_3$  от угла наклона участка № 1  $\alpha_1$  при различном содержании твердого в исходной суспензии: 1 – 50 кг/м<sup>3</sup>; 2 – 500 кг/м<sup>3</sup>; 3 – 300 кг/м<sup>3</sup>.

Из данных, приведенных на рис. 3.4-3.6 следует, что максимальное снижение влажности наблюдается при содержании твердого  $50 \text{ кг/м}^3$  ( $56,9\%$  при  $\alpha_1 = -30^\circ$  и  $44,7\%$  при  $\alpha_1 = +30^\circ$ ).

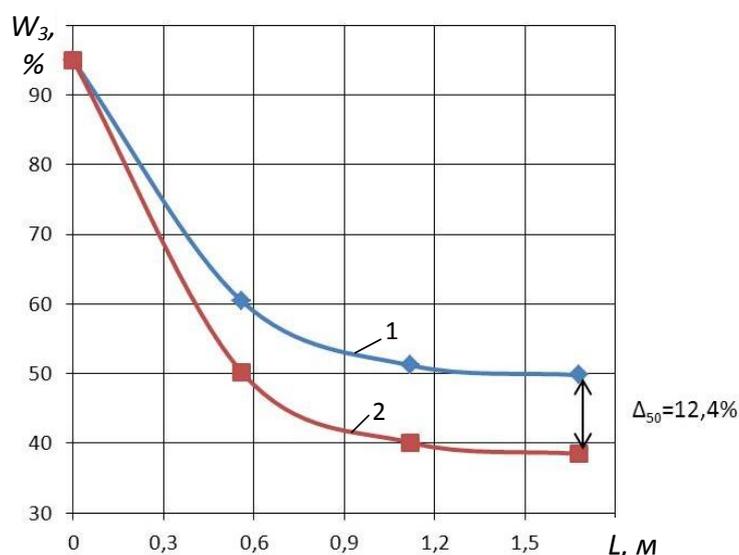


Рис. 3.4. Зависимость влажности надситного продукта  $W_3$  от длины обезвоживающей поверхности  $L$  при содержании твердого в исходной суспензии  $50 \text{ кг/м}^3$ : 1 –  $\alpha_1 = +30^\circ$ ; 2 –  $\alpha_1 = -30^\circ$ .

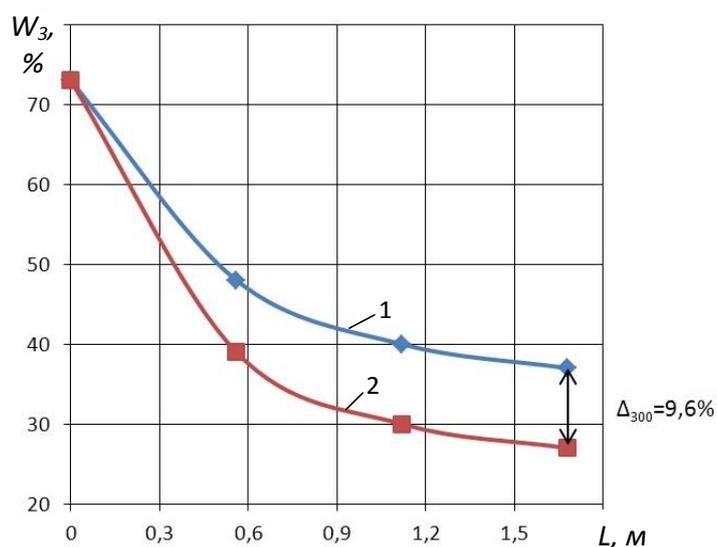


Рис. 3.5. Зависимость влажности надрешетного продукта  $W_3$  от длины участка обезвоживающей поверхности  $L$  при содержании твердого в исходной суспензии  $300 \text{ кг/м}^3$ : 1 –  $\alpha_1 = +30^\circ$ ; 2 –  $\alpha_1 = -30^\circ$ .

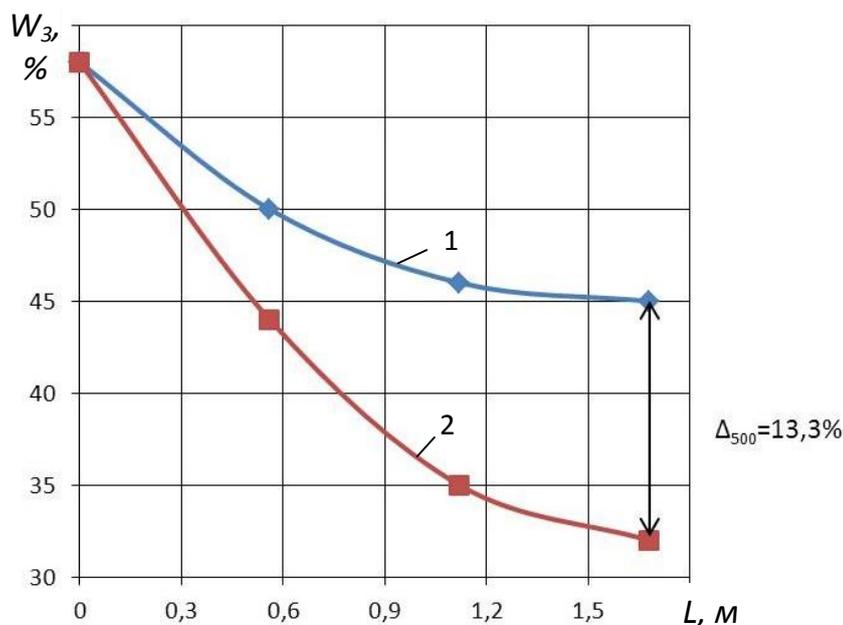


Рис. 3.6. Зависимость влажности надрешетного продукта  $W_3$  от длины участка обезвоживающей поверхности  $L$  при содержании твердого в исходной суспензии  $500 \text{ кг/м}^3$ : 1 –  $\alpha_1 = +30^\circ$ ; 2 –  $\alpha_1 = -30^\circ$ .

Минимальное значение влажности надситного продукта достигается при содержании твердого  $300 \text{ кг/м}^3$  ( $27,4\%$  при  $\alpha_1 = -30^\circ$  и  $37,0\%$  при  $\alpha_1 = +30^\circ$ ).

При этом, несмотря на наибольшее содержание твердого в исходной суспензии  $500 \text{ кг/м}^3$ , влажность надситного продукта составляет  $32,4\%$  при  $\alpha_1 = -30^\circ$  и  $45,0\%$  при  $\alpha_1 = +30^\circ$ , что объясняется минимальным удалением воды  $25,8\%$  и  $13,2\%$ , соответственно.

На рациональное значение содержания твердого в исходном материале на уровне  $300 \text{ кг/м}^3$  указывает наименьшее ( $\Delta_{300} = 9,6\%$ ) значение разницы во влажности надситного продукта при крайних значениях углов наклона участка № 1 (рис. 3.5).

На основании результатов первого этапа исследований определены следующие рациональные параметры: угол наклона участка № 1  $\alpha_1 = -20^\circ$ , участка № 2  $\alpha_2 = 0^\circ$ . Результаты второго этапа исследований приведены в табл. 3.3, а их анализ иллюстрирован на рис. 3.7.

Таблица 3.3

## Исследование участка № 3

№	№ опытов	Исходные данные по питанию					Показатели по участкам					
		Q, т/ч	V, м <sup>3</sup> /ч	P, м <sup>3</sup> /ч	C, кг/м <sup>3</sup>	W <sup>r</sup> , %	№ 1		№ 2		№ 3	
							$\alpha_1$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>1</sub> , %	$\alpha_2$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>2</sub> , %	$\alpha_3$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>3</sub> , %
1	1.1	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	-20	53,4	0	43,1	0	38,6
	1.2	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	-20	53,4	0	43,1	5	35,4
	1.3	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	-20	53,4	0	43,1	10	33,6
	1.4	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	-20	53,4	0	43,1	15	31,9
	1.5	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	-20	53,4	0	43,1	20	30,7
	1.6	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	-20	53,4	0	43,1	25	32,4
	1.7	0,1	1,9394	2,0	50	95,1	-20	53,4	0	43,1	30	36,7
2	2.1	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	-20	48,4	0	41,6	0	34,7
	2.2	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	-20	48,4	0	41,6	5	33,1
	2.3	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	-20	48,4	0	41,6	10	30,5
	2.4	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	-20	48,4	0	41,6	15	28,6
	2.5	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	-20	48,4	0	41,6	20	29,4
	2.6	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	-20	48,4	0	41,6	25	31,7
	2.7	0,2	1,8788	2,0	100	90,4	-20	48,4	0	41,6	30	32,3
3	3.1	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	-20	45,6	0	37,2	0	34,3
	3.2	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	-20	45,6	0	37,2	5	32,4
	3.3	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	-20	45,6	0	37,2	10	31,0
	3.4	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	-20	45,6	0	37,2	15	29,2
	3.5	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	-20	45,6	0	37,2	20	30,7
	3.6	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	-20	45,6	0	37,2	25	31,8
	3.7	0,3	1,8182	2,0	150	85,8	-20	45,6	0	37,2	30	32,6
4	4.1	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	-20	41,1	0	35,0	0	31,8
	4.2	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	-20	41,1	0	35,0	5	30,2
	4.3	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	-20	41,1	0	35,0	10	27,7
	4.4	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	-20	41,1	0	35,0	15	25,6
	4.5	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	-20	41,1	0	35,0	20	27,9
	4.6	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	-20	41,1	0	35,0	25	29,4
	4.7	0,4	1,7576	2,0	200	81,5	-20	41,1	0	35,0	30	31,7
5	5.1	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	-20	40,0	0	34,1	0	30,3
	5.2	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	-20	40,0	0	34,1	5	28,4
	5.3	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	-20	40,0	0	34,1	10	26,7
	5.4	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	-20	40,0	0	34,1	15	24,1
	5.5	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	-20	40,0	0	34,1	20	25,5
	5.6	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	-20	40,0	0	34,1	25	27,2
	5.7	0,5	1,6970	2,0	250	77,2	-20	40,0	0	34,1	30	30,6

Продолжение табл. 3.3

№	№ опытов	Исходные данные по питанию					Показатели по участкам					
		Q, т/ч	V, м <sup>3</sup> /ч	P, м <sup>3</sup> /ч	C, кг/м <sup>3</sup>	W <sup>r</sup> , %	№ 1		№ 2		№ 3	
							$\alpha_1$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>1</sub> , %	$\alpha_2$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>2</sub> , %	$\alpha_3$ , град.	W <sup>r</sup> <sub>3</sub> , %
6	6.1	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	-20	38,8	0	33,3	0	27,6
	6.2	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	-20	38,8	0	33,3	5	24,8
	6.3	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	-20	38,8	0	33,3	10	22,6
	6.4	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	-20	38,8	0	33,3	15	22,1
	6.5	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	-20	38,8	0	33,3	20	24,9
	6.6	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	-20	38,8	0	33,3	25	27,4
	6.7	0,6	1,6364	2,0	300	73,2	-20	38,8	0	33,3	30	29,6
7	7.1	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	-20	40,9	0	32,0	0	28,1
	7.2	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	-20	40,9	0	32,0	5	26,4
	7.3	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	-20	40,9	0	32,0	10	24,3
	7.4	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	-20	40,9	0	32,0	15	23,8
	7.5	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	-20	40,9	0	32,0	20	25,2
	7.6	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	-20	40,9	0	32,0	25	28,6
	7.7	0,7	1,5758	2,0	350	69,2	-20	40,9	0	32,0	30	30,8
8	8.1	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	-20	41,2	0	33,4	0	30,7
	8.2	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	-20	41,2	0	33,4	5	28,9
	8.3	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	-20	41,2	0	33,4	10	26,3
	8.4	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	-20	41,2	0	33,4	15	24,2
	8.5	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	-20	41,2	0	33,4	20	26,3
	8.6	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	-20	41,2	0	33,4	25	29,1
	8.7	0,8	1,5152	2,0	400	65,4	-20	41,2	0	33,4	30	32,6
9	9.1	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	-20	44,5	0	36,8	0	31,7
	9.2	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	-20	44,5	0	36,8	5	29,0
	9.3	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	-20	44,5	0	36,8	10	27,1
	9.4	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	-20	44,5	0	36,8	15	28,8
	9.5	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	-20	44,5	0	36,8	20	30,7
	9.6	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	-20	44,5	0	36,8	25	31,1
	9.7	0,9	1,4546	2,0	450	61,8	-20	44,5	0	36,8	30	34,3
10	10.1	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	-20	45,2	0	37,2	0	32,9
	10.2	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	-20	45,2	0	37,2	5	30,3
	10.3	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	-20	45,2	0	37,2	10	28,4
	10.4	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	-20	45,2	0	37,2	15	29,9
	10.5	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	-20	45,2	0	37,2	20	31,2
	10.6	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	-20	45,2	0	37,2	25	33,4
	10.7	1,0	1,3940	2,0	500	58,2	-20	45,2	0	37,2	30	35,6

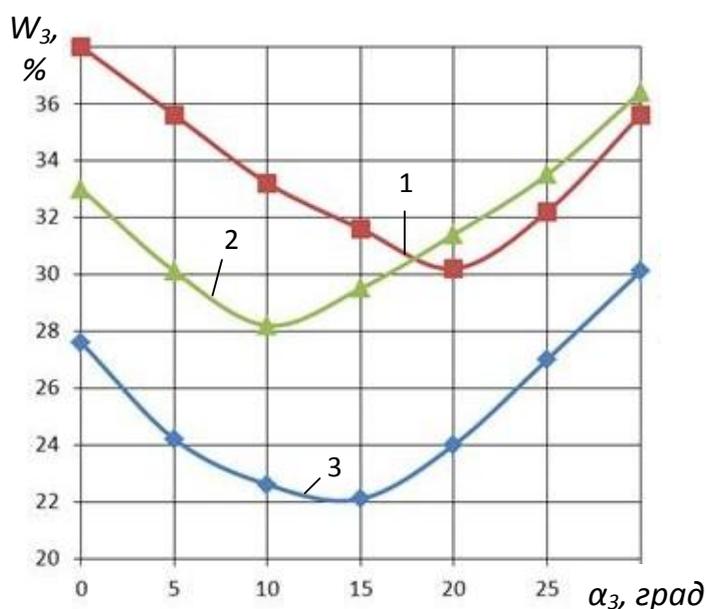


Рис. 3.7. Зависимость влажности надситного продукта  $W_3$  от угла наклона участка № 3  $\alpha_3$  при различном содержании твердого в исходном: 1 – 50 кг/м<sup>3</sup>; 2 – 500 кг/м<sup>3</sup>; 3 – 300 кг/м<sup>3</sup>.

Из рис. 3.7 следует, что зависимость влажности надситного продукта от угла наклона участка № 3 носит экстремальный характер, причем с увеличением содержания твердого значения экстремума смещается в сторону меньших углов наклона.

Из данных рис. 3.7 также следует, что наименьшую влажность надситный продукт имеет порядка 22,1% при содержании твердого в исходной суспензии 300 кг/м<sup>3</sup> и угле наклона участка № 3 равного +15°. При содержании твердого в исходной суспензии 500 кг/м<sup>3</sup> минимальная влажность надситного продукта 28,4% при  $\alpha_3 = +10^\circ$ , при 50 г/л – 30,7% при  $\alpha_3 = +20^\circ$ .

Следовательно, наиболее рациональными параметрами обеспечивающими минимальную влажность обезвоживаемого материала является  $\alpha_1 = -20^\circ$ ;  $\alpha_2 = 0^\circ$ ;  $\alpha_3 = +10^\circ - +15^\circ$  при содержании твердого в исходной суспензии 200-300 кг/м<sup>3</sup>. Данные параметры необходимо закладывать в конструкции высокочастотных грохотов, предназначенных для обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности.

### 3.1.3 Определение реологической кривой обезвоживаемого материала

В разделе 2 установлено, что важнейшими показателями обезвоживания угольных шламовых продуктов нефлотационной крупности на сите вибрационного грохота являются реологические параметры надситного продукта, определение и характер которых позволяет оценить эффективность стадий обезвоживания и осуществить соответствующий подбор параметров вибровозбуждения.

В соответствии с физической моделью процесс обезвоживания угольных суспензий нефлотационной крупности состоит в последовательном их переводе в высококонцентрированное состояние путем сгущения, затем в вязкопластичный материал путем концентрации и далее в вязкоупругопластичный материал за счет уплотнения [111, 133].

Подобный процесс может быть осуществлен на обезвоживающей поверхности высокочастотного грохота, состоящей из трех разнонаклонных участков. На первом участке на исходный материал действуют в основном гидравлические силы, на втором – инерционные, на третьем – силы механики зернистых сред [150, 170].

В соответствии с общепринятыми положениями, процесс обезвоживания угольных суспензий на этих участках характеризуется реологическими параметрами [72-78].

Для определения реологического параметра были выполнены специальные исследования на лабораторной установке высокочастотного грохота с разнонаклонными участками обезвоживающей поверхности, описание которой приведено в [158]. Напряжение сдвига определялось по методике, изложенной в работе [83].

В качестве реологического параметра принято известное выражение  $\varepsilon Re$  (где  $\varepsilon$  - скорость деформации материала;  $Re$  - число Рейнольдса), которое характеризует величину деформации в динамическом потоке [127, 130].

Исследования выполнялись при следующих параметрах лабораторной установки высокочастотного грохота.

Нагрузка по твердому, т/ч		3,6
Нагрузка по пульпе, м <sup>3</sup> /ч (максимум)		12,0
Средний диаметр частиц угольного шлама, мм		0,72
Размер отверстий обезвоживающей поверхности, мм		0,2
Ширина участков сит, м		0,075
Длина участков сит, м		0,56
Количество участков сит, шт.		3
Угол наклона участков сит, град.		
	№ 1	-20
	№ 2	0
	№ 3	+15
Амплитуда колебаний, мм		0,5
Частота колебаний, с <sup>-1</sup>		46,67

Результаты определения реологических параметров и напряжений сдвига приведены в табл. 3.4, а зависимость  $\tau_c = f(\varepsilon Re)$  на рис. 3.8.

Из рис. 3.8 следует, что имеются три характерных области обезвоживания, на которых зависимости  $\tau_{\bar{n}} = f(\varepsilon Re)$  имеют прямолинейный характер, но различные углы наклона. Эти области можно характеризовать значениями  $\varepsilon Re > 1$ ,  $\varepsilon Re < 1$  и  $\varepsilon Re \ll 1$ , при этом содержание твердого в надситном продукте повышается соответственно с 200 до 600, с 600 до 900, с 900 до 1100 кг/м<sup>3</sup> и более. При этом на начальной стадии обезвоживания напряжение сдвига не превышает 35 Н/м<sup>2</sup>, потом при переходе на уровень  $\varepsilon Re < 1$  происходит его скачек в 2 раза с 35 до 70 Н/м<sup>2</sup> и плавный рост до 95 Н/м<sup>2</sup>, далее напряжение сдвига делает второй скачек с 95 до 110 Н/м<sup>2</sup> и далее медленно, но прямолинейно увеличивается до 120 Н/м<sup>2</sup> и более.

На основании полученных результатов сформулировано второе научное положение: для достижения максимального эффекта обезвоживания угольных шламов на высокочастотных грохотах параметры вибровозбуждения подбираются в зависимости от физико-механических свойств исходного материала таким образом, чтобы переход вязкой суспензии в вязкопластичное и вязкоупру-

гопластичное состояние осуществлялся путем последовательного сгущения, концентрации и уплотнения частиц на разнонаклонных участках вибрирующей ситовой поверхности при следующих значениях реологического параметра соответственно  $\varepsilon Re > 1$ ,  $\varepsilon Re < 1$ ,  $\varepsilon Re \ll 1$ .

Таблица 3.4

Результаты определения реологических параметров и  
напряжения сдвига

Показатели	Участок рабочей поверхности		
	№ 1	№ 2	№ 3
Содержание твердого, кг/м <sup>3</sup> (влага W, %)			
начальное, C <sub>н</sub> (начальная W <sub>н</sub> )	300(73,0)	600(51,0)	900(32,6)
конечное, C <sub>к</sub> (конечная W <sub>к</sub> )	600(51,0)	900(32,6)	1100(22,0)
Толщина слоя, м			
начальная, h <sub>н</sub>	0,049	0,025	0,012
конечная, h <sub>к</sub>	0,025	0,012	0,010
Гидравлический радиус, м			
начальный, R <sub>н</sub>	0,021	0,015	0,009
конечный, R <sub>к</sub>	0,015	0,009	0,008
Скорость движения материала, м/с	0,4	0,3	0,2
Число Рейнольдса			
начальное, Re <sub>н</sub>	7,179	3,333	1,286
конечное, Re <sub>к</sub>	4,444	3,889,	1,119
переходное, Re <sub>п</sub>	3,889	1,608	1,608
Скорость вертикальной деформации слоя, $\varepsilon$	0,656	0,267	0,273
Напряжение сдвига, $\tau_c$ , Н/м <sup>2</sup>			
начальное, $\tau_{сн}$	20	75	110
конечное, $\tau_{ск}$	25	82	115
переходное, $\tau_{сп}$	37	94	120
Реологический параметр, $\varepsilon Re$			
начальная, $\varepsilon Re_n$	4,709	0,890	0,044
конечная, $\varepsilon Re_k$	2,915	0,515	0,035
переходная, $\varepsilon Re_p$	1,046	0,114	0,031

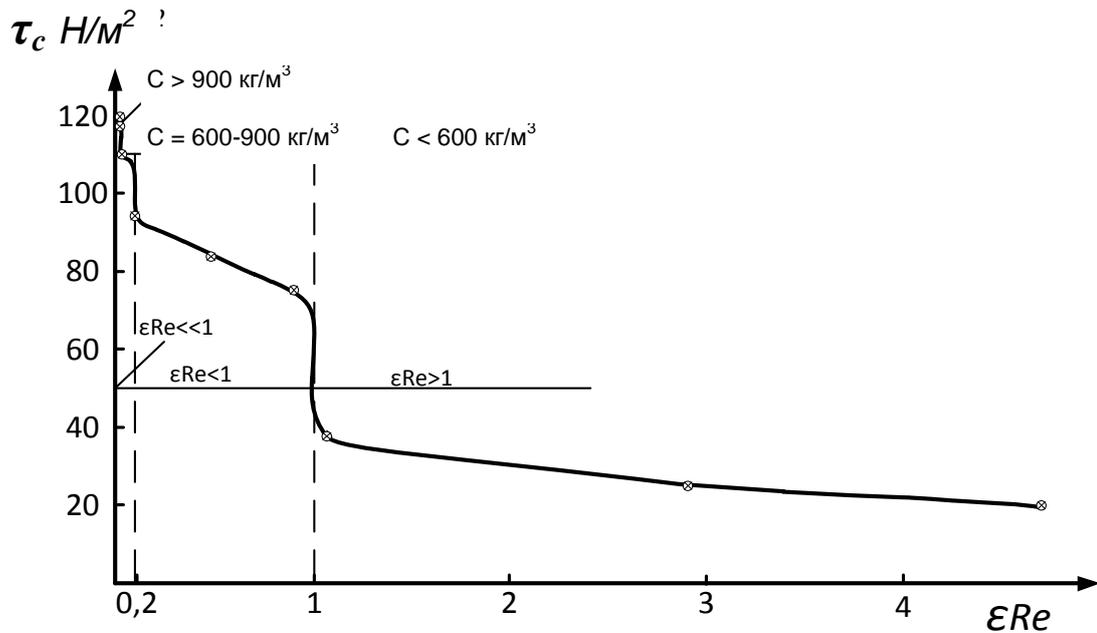


Рис. 3.8. Влияние реологического параметра  $\epsilon Re$  на напряжение сдвига  $\tau_c$  при обезвоживании угольного шлама нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности.

### 3.2 Обоснование параметров высокочастотного грохота с разнонаклонными участками сит для обезвоживания угольных шламов

#### 3.2.1 Модернизация экспериментального устройства для обезвоживания угольных шламов УРШ-2,5

Для подтверждения результатов лабораторных исследований и проведения исследований обезвоживания угольных шламов в производственных условиях осуществлена модернизация экспериментального устройства УРШ-2,5.

Основным направлением интенсификации и повышения точности разделения в процессах мокрого грохочения, обезвоживания, обесшламливания, отмывки суспензии от продуктов обогащения при создании грохотов является повышение их вибродинамических характеристик в целях получения оптимального коэффициента динамичности. Эксплуатирующиеся на большинстве обогатительных фабрик Украины на этих операциях грохоты с направленными колебаниями типа ГИСЛ и ГИСТ имеют частоту виброперемещений дек (сит)  $735 \text{ мин}^{-1}$  при перегрузке до  $4g$ .

Однако они не обеспечивают требуемых технологических показателей, в частности при граничной крупности разделения на деке менее 1 мм.

Результаты работ, выполненных Гипромашуглеобогащением [159], а также опыт эксплуатации грохотов с частотой виброперемещений деки  $970 \text{ мин}^{-1}$  и выше, в том числе ведущих зарубежных фирм (например, «Siebtechnik», «Humboldt Wedag», «Kem-Tron»), свидетельствуют, что для эффективного сухого и мокрого грохочения (особенно материалов мелких фракций), обезвоживания, обесшламливания и отмывки суспензий от продуктов обогащения необходимо создание на рабочей поверхности перегрузки не менее 5g. Это потребовало принципиально нового подхода к проектированию грохотов.

Таким образом, стало возможным создание отечественных высокочастотных грохотов с частотой виброперемещений дек от  $970$  до  $3000 \text{ мин}^{-1}$  при перегрузках на них до 12g. Грохоты оснащаются специально разработанными вибровозбудителями, обеспечивающими для конкретного обезвоживаемого или грохотимого материала требуемую (регулируемую) амплитудно-частотную характеристику.

Так, ГП «УкрНИИУглеобогащение» разработано устройство УРШ-2,5, предназначенное для исследований процессов классификации шламовых продуктов обогащения углей по граничной крупности разделения в пределах 0,2-0,5 мм [160, 161].

Автором настоящей работы осуществлена модернизация этого устройства и выполнены на нем экспериментальные исследования процесса обезвоживания в соответствии с разработанной теоретической моделью (раздел 2) и исходных данных, изложенных в разделе 3.1. При этом длина обезвоживающей поверхности принята по выводам раздела 2-2,5 м. Скорость движения материала регулируемая от 0,015 м/с до 0,035 м/с.

Общий вид этого устройства приведен на рис. 3.9, а его схема изображена на рис. 3.10.



Рис. 3.9. Общий вид экспериментального устройства УРШ-2,5.

Конструкция устройства включает короб (1), в котором на специальных подси́тниках (2) смонтировано сито (3), вибратор (4), упругие опоры (5) (виброизоляторы), электродвигатели (6), переходники (7) и защитное ограждение (8).

Колебательный режим устройству обеспечивает вибратор, состоящий из двух кинетически не связанных между собой вибровозбудителей, работающих в условиях самосинхронизации.

Для обеспечения возможности регулирования величины амплитуды колебаний короба устройства УРШ-2,5 дебалансы вибратора выполнены из двух составных дисков в форме сектора круга. Один диск с помощью шпонки жестко посажен на валу вибровозбудителя, а второй - поворотный диск (имея возможность разворота вокруг оси вала после установки под требуемым углом болтом крепится к первому диску).

Поворотный диск можно ступенчато разворачивать относительно первого диска от  $0$  до  $180^{\circ}$  с шагом  $30^{\circ}$ , причем все поворотные диски (8 шт.) вибратора необходимо разворачивать на один угол. Максимальная амплитуда колебаний при совмещенных дисках дебалансов, когда суммарная неуравновешенная масса дебалансов имеет максимальную величину, а минимальная амплитуда колебаний будет при разведении дисков на  $180^{\circ}$ .

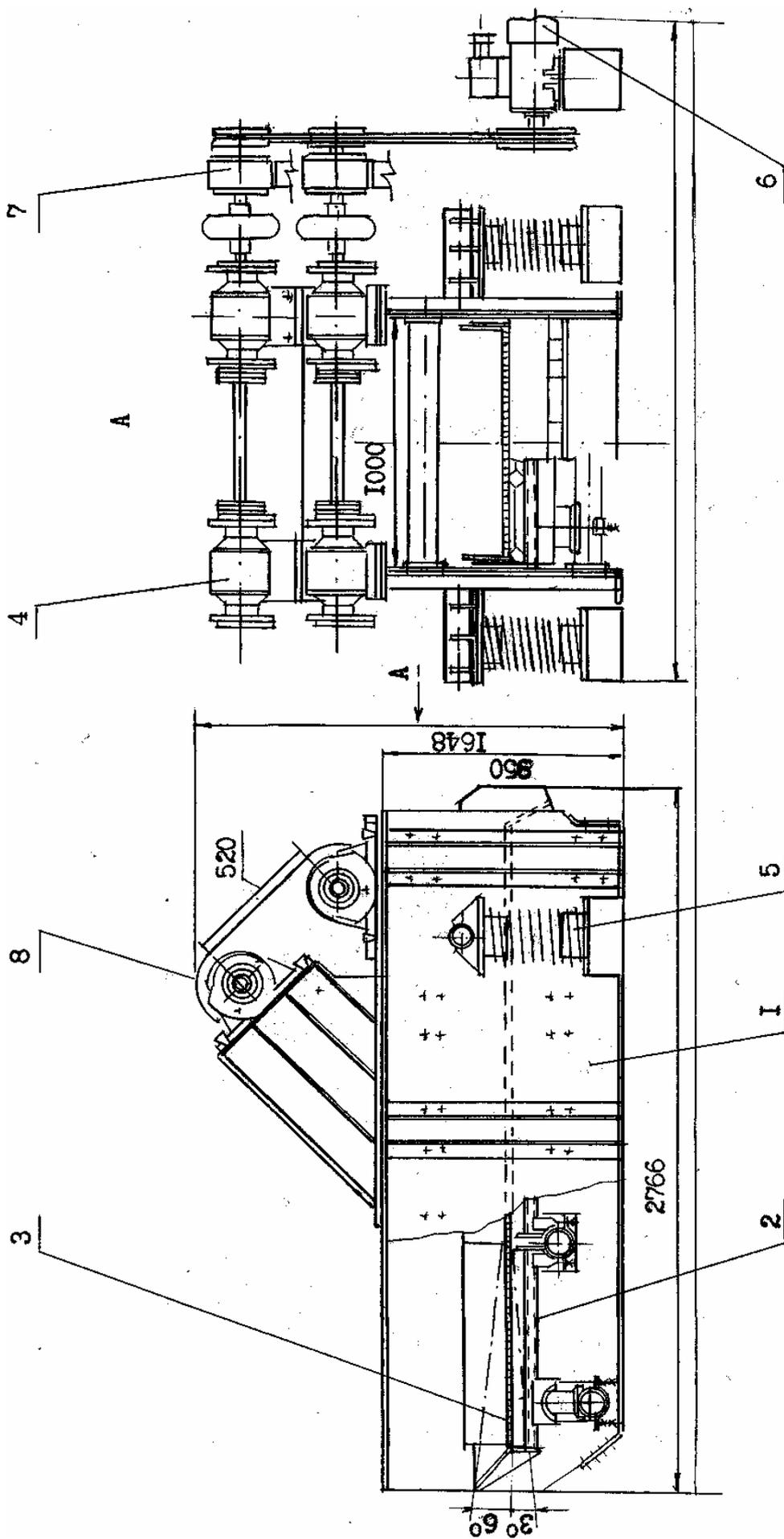


Рис. 3.10. Схема устройства УРП-2,5: 1 – короб; 2 – подситник; 3 – сито ; 4 – вибратор; 5 – упругие опоры; 6 – электродвигатели; 7 – переходники; 8 – защитное ограждение.

Изменение частоты колебаний короба устройства осуществляется с помощью набора шкивов различного диаметра, передающих вращение валам вибратора от электродвигателей.

Установка загрузочной и разгрузочной секций сита под различными углами наклона производится с использованием комплекта деревянных подставок разной высоты. Секции сита жестко крепятся к связью-балкам короба устройства. Для изменения угла наклона секций сита под ними на крайние связью-балки устанавливаются подставки соответствующей высоты.

Техническая характеристика УРШ-2,5 приведена в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Техническая характеристика экспериментального образца  
устройства УРШ-2,5

№ п/п	Наименование показателей и единица измерения	Величина
1	Производительность: по пульпе, м <sup>3</sup> /ч, в пределах по твердому, т/ч, в пределах	40-60 10-20
2	Граничная крупность разделения, мм, в пределах	0,2-0,5
3	Крупность исходного питания, мм, в пределах	0-3
4	Площадь обезвоживающей поверхности, м <sup>2</sup>	2,5
5	Размеры обезвоживающей поверхности, мм: ширина длина	1000 2500
6	Количество секций обезвоживающей поверхности (по длине), шт.	3
7	Угол наклона поворотных секций, градус: загрузочной, в пределах промежуточной разгрузочной	-20; 0; +15 0 -20; 0; +15
8	Угол наклона короба к горизонту, градус	0
9	Частота колебаний короба, мин. <sup>-1</sup> , в пределах	1000, 1500, 1750
10	Амплитуда колебаний короба, мм, в пределах	0,5-2,5
11	Угол вибраций (к горизонту), градус	40, 45, 50
12	Номинальная мощность электродвигателя, кВт, не более	3x2 двигателя
13	Масса (колеблющихся частей), кг, не более	2100
14	Влажность надситного продукта, %, не более	30
15	Габаритные размеры, мм, не более: длина ширина высота	2850 2100 1650

Принцип действия устройства УРШ-2,5 заключается в следующем.

Исходный материал в виде пульпы подается в загрузочную секцию сита устройства, где под воздействием вибраций происходит интенсивное обезвоживание материала с одновременным перемещением его к разгрузке. При необходимости над средней секцией сита устанавливаются напорные сопла для промывания водяной струей надситного продукта.

На разгрузочной секции сита происходит обезвоживание надситного продукта путем его уплотнения.

Конструкция устройства позволяет изменять углы наклона загрузочной и разгрузочной секций сита в зависимости от гранулометрического состава и плотности исходной пульпы, и требуемых технологических показателей.

Отличительная особенность устройства УРШ-2,5 - интенсивный динамический режим: величина ускорения короба до 5g (у серийных вибрационных машин 3,5-4g). При этом в отличие от зарубежных аналогов ситовая поверхность устройства по длине состоит из трех зон с отдельно регулирующимися углами наклона, что позволяет оптимизировать режимы классификации и обезвоживания в различных производственных условиях.

### 3.2.2 Промышленные исследования процесса обезвоживания угольных шламов на экспериментальном устройстве УРШ-2,5

Промышленные исследования процесса обезвоживания угольных шламов на устройстве УРШ-2,5 были выполнены в условиях ЦОФ «Октябрьская».

Исходя из производственной необходимости устройство предназначалось для обезвоживания сгущенного продукта пирамидальных сгустителей.

Экспериментальный образец смонтирован на раме, жестко закрепленной посредством анкерных болтов на бетонном перекрытии отм.+29,4 м.

В качестве исходного продукта на УРШ-2,5 использовался сгущенный продукт пирамидальных сгустителей, качественная характеристика которого приведена ниже:

Класс, мм	Выход, %	Зольность, %
+1,0	4,8	46,7
0,5-1,0	29,0	43,0
0,25-0,5	34,2	58,9
0,16-0,25	12,8	69,7
0,08-0,16	13,2	76,8
-0,08	6,0	68,0
<b>Итого</b>	<b>100,0</b>	<b>57,8</b>

Надситный обезвоженный продукт направляется на ленточный конвейер в присадку к мелкому концентрату или в разгрузку концентрата отсадочных машин. Подситный продукт возвращается в пирамидальные сгустители.

В период технологических испытаний устройство УРШ-2,5 было экипировано резиновыми ситами ЗАО «АНА-ТЕМС» типа ЭПП 0,5x10-300 с размерами отверстий 0,5x10 мм и живым сечением 11,9%. Исследования выполнялись при следующих постоянных значениях динамических параметров устройства:

- амплитуда колебаний - 1,5 мм;
- частота колебаний - 1750 мин.<sup>-1</sup>;
- угол вибраций - 45°.

Результаты работы устройства УРШ-2,5 на операции обезвоживания сгущенного продукта пирамидальных сгустителей ЦОФ «Октябрьская» приведены в табл. 3.6, из анализа данных которой следует, что производительность УРШ-2,5 по исходному питанию, составляет от 8,6 т/ч до 21,8 т/ч по твердому и от 30,0 м<sup>3</sup>/ч до 44,0 м<sup>3</sup>/ч по пульпе, при этом удельная нагрузка находится в пределах 3,4-8,7 т/(ч·м<sup>3</sup>). Производительность устройства по твердому в первую очередь зависит от содержания твердого в исходной пульпе. Требуемые значения производительности устройства (более 15 т/ч) по исходному питанию достигаются при содержании твердого в нем более 490 г/л.

Таблица 3.6

Показатели обезвоживания сгущенного продукта пирамидальных сгустителей на УРШ-2,5 на ЦОФ «Октябрьская»

№ п/п	Нагрузка по исходному			Содер- жание твердого в исход- ном, г/л	Угол наклона участков сит, град.			Характеристика надситного продукта		
	м <sup>3</sup> /ч	т/ч	т/(ч·м <sup>2</sup> )		1	2	3	количе- ство, т/ч	золь- ность, %	влаж- ность, %
1	31,6	15,5	6,2	490	0	0	0	9,3	45,8	31,3
2	30,6	15,3	6,1	500	-20	0	0	9,2	44,4	28,8
3	30,0	14,5	5,8	480	-15	0	+10	9,0	56,8	24,3
4	32,0	16,3	6,5	510	-20	0	+15	10,3	55,6	22,3
5	44,0	11,1	4,4	250	-20	0	+5	6,2	48,7	26,5
6	33,4	9,7	3,9	290	-10	0	0	6,5	51,8	32,4
7	34,3	9,6	3,8	280	-10	0	0	6,7	49,3	30,1
8	33,8	10,1	4,0	300	-10	0	+5	7,1	46,3	27,3
9	33,1	8,6	3,4	260	-15	0	+10	4,0	36,6	25,4
10	41,7	20,8	8,3	507	-15	0	+10	12,5	45,8	25,0
11	43,6	21,8	8,7	507	-15	0	+10	10,9	44,4	26,0
12	31,0	16,1	6,4	520	-15	0	+10	11,3	64,6	26,5

Содержание твердого в исходной пульпе также влияет на влажность надситного продукта: чем больше грамм на литр в исходной пульпе, тем меньше влажность надситного продукта. Кроме того, наилучшие показатели влажности надситного продукта (менее 25%) достигаются при углах наклона первого и третьего участков сит соответственно -20 и +15 градусов. При этом следует иметь в виду, что зольность надситного продукта составляет в среднем 45-50%.

Таким образом, выполненные технологические испытания экспериментального образца показали, что в режиме обезвоживания угольных шламов на устройстве УРШ-2,5 могут быть достигнуты удовлетворительные качественно-количественные показатели обезвоживания, не уступающие мировым аналогам.

Для определения влияния параметров вибровозбуждения на процесс обезвоживания и классификации разработана специальная программа технологических вибрационных испытаний высокочастотного устройства, которая предусматривает оценку его работы при различных динамических условиях виброколебаний, углах установки сит рабочей поверхности, нагрузках по исходному питанию, содержанию твердого в исходном питании и т.д.

Промышленные испытания устройства УРШ-2,5 проводились в режиме обезвоживания.

В режиме обезвоживания критерием эффективности является влажность надситного продукта, определяется по формуле

$$W^r = \frac{Q_B}{Q_T + Q_B} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

где  $Q_B$ ,  $Q_T$  - масса, соответственно, испаренной влаги и твердого остатка, кг.

Выполнение исследований осуществляется на рабочих поверхностях, оснащенных резиновыми ситами ЭПП ЗАО «АНА-ТЕМС».

В качестве переменных параметров были приняты: загрузка по твердому  $Q_T$ , т/ч; содержание твердого в исходной суспензии  $C$ , кг/м<sup>3</sup>; выход класса крупностью -0,25 мм в исходном материале  $\gamma$ , %; угол наклона первого участка вибрационной ситовой поверхности  $\alpha_1$ , град; угол наклона третьего участка вибра-

ционной ситовой поверхности  $\alpha_3$ , град; частота колебаний  $\omega$ , мин<sup>-1</sup>; амплитуда колебаний  $a_a$ , мм; размер отверстий ситовой поверхности  $d_{\text{ш}}$ , мм.

В качестве функции отклика принята влажность надситного продукта  $W^*$ , %.

Диапазон изменения значений переменных параметров принят исходя из возможностей устройства УРШ-2,5 и технологических показателей этой операции на ЦОФ «Октябрьская».

Матрица планирования восьмифакторного эксперимента приведена в табл. 3.7.

Диапазон изменения наклона участков сит рабочей поверхности  $\alpha_1 = -25; -15; -5; \alpha_3 = +5; +10; +15$  градусов.

Диапазон изменения частоты колебаний грохота:  $\omega = 1250; 1500; 1750$  мин<sup>-1</sup>.

Диапазон изменения амплитуды колебаний грохота:  $a_a = 0,5; 1,5; 2,5$  мм.

Диапазон изменения нагрузки по исходному:  $Q_T = 10; 15; 20$  т/ч.

Диапазон изменения содержания твердого в исходном продукте:  $C = 300; 500; 700$  кг/м<sup>3</sup>.

Диапазон изменения размера отверстий:  $d_{\text{ш}} = 0,5; 0,75; 1,0$  мм.

Диапазон изменения содержания класса -0,25 мм в исходном:  $\gamma = 15; 30; 45\%$ .

Условия и результаты опытов приведены в табл. 3.8,

В качестве исходного продукта на грохот используется сгущенный продукт пирамидальных сгустителей. Надситный продукт грохота направляется на ленточный конвейер в присадку к мелкому концентрату или в разгрузку концентрата отсадочных машин. Подситный продукт грохота возвращается в пирамидальные сгустители.

Исходя из постоянства питания выход класса -0,25 мм в нем при проведении исследований не изменялся и был на уровне 30%. Содержание твердого в исходном продукте регулировалось с помощью добавочной воды. Количество сгущенного продукта пирамидальных сгустителей регулировалось с помощью задвижки.



Таблица 3.8

## Условия и результаты опытов

№ п/п	Наклон участков сит			Содержание твердого в исход- ном $C$ , кг/м <sup>3</sup>	Амплитуда колебаний $a$ , мм	Частота ко- лебаний $\omega$ , мин <sup>-1</sup>	Нагрузка по питанию		Удельная грузка по танию		на- пи- нагрузка по надситному % Блажность над- ситного про- цента %	
	1 $\alpha_1$ , град.	2 $\alpha_2$ , град.	3 $\alpha_3$ , град.				по твердо- му $Q_T$ , т/ч	по пуль- пе, м <sup>3</sup> /ч	по твердому, т/ч·м <sup>2</sup>	по пульпе, м <sup>3</sup> /ч·м <sup>2</sup>		
1	-25	0	+15	490	2,5	1750	20,5	41,8	6,2	16,7	12,7	31,3
2	-25	0	+15	500	2,5	1250	10,3	20,6	4,1	8,2	4,9	28,8
3	-25	0	+15	480	0,5	1750	18,5	38,5	7,4	15,4	11,1	24,8
4	-25	0	+15	510	0,5	1250	11,1	21,8	4,5	8,7	6,7	22,3
5	-5	0	+15	250	2,5	1750	19,7	78,8	7,9	31,5	13,4	26,5
6	-5	0	+15	290	2,5	1750	9,7	33,4	3,9	13,4	4,3	32,4
7	-5	0	+15	280	0,5	1250	19,6	70,0	7,8	28,0	12,0	30,1
8	-5	0	+15	300	0,5	1250	10,1	33,8	4,0	13,5	4,5	27,3
9	-5	0	+15	260	0,5	1250	18,6	71,5	7,4	28,6	11,7	25,4
10	-5	0	+15	650	0,5	1750	10,8	16,6	4,3	6,6	5,6	26,8
11	-25	0	+5	260	2,5	1250	18,6	71,5	7,4	28,6	12,3	25,8
12	-25	0	+5	725	2,5	1750	12,3	17,0	4,9	6,8	7,1	24,6
13	-25	0	+5	680	0,5	1250	22,6	33,2	9,1	13,3	15,8	26,8
14	-25	0	+5	507	0,5	1750	10,8	2,3	4,3	8,5	6,1	25,0
15	-5	0	+5	507	2,5	1250	21,8	43,0	8,7	17,2	10,9	26,0

Продолжение табл. 3.8

№ п/п	Наклон участков сит			Содержание твёрдого в исходном С, кг/м <sup>3</sup>	Амплитуда колебаний а, мм	Частота колебаний ω, мин <sup>-1</sup>	Нагрузка по питанию		Удельная нагрузка по питанию		Нагрузка по насытному продукту, %	Влажность над- ситного про- дукта, %
	1 α <sub>1</sub> , град.	2 α <sub>2</sub> , град	3 α <sub>3</sub> , град				по твёр- дому Q <sub>т</sub> , т/ч	по пульпе, м <sup>3</sup> /ч	по твёр- дому, т/ч·м <sup>2</sup>	по пульпе, м <sup>3</sup> /ч·м <sup>2</sup>		
16	-5	0	+5	290	2,5	1750	9,6	33,1	3,8	13,2	5,0	25,6
17	-5	0	+10	520	1,5	1500	16,1	31,0	6,4	12,4	11,3	23,5
18	-5	0	+10	500	1,5	1500	9,8	19,6	3,9	7,8	5,9	22,0
19	-5	0	+10	700	1,5	1500	14,8	21,1	5,9	8,4	9,0	22,8
20	-5	0	+10	300	1,5	1500	15,1	50,3	6,0	20,1	9,4	23,6
21	-15	0	+10	490	1,5	1500	15,5	31,6	6,2	12,6	9,3	21,3
22	-15	0	+10	500	1,5	1500	15,3	30,6	6,1	12,2	9,2	22,8
23	25	0	+10	480	1,5	1500	14,5	30,0	5,8	12,0	9,0	24,6
24	-5	0	+10	510	1,5	1500	16,3	32,0	6,5	12,8	10,3	22,8
25	-15	0	+15	490	1,5	1500	14,1	28,8	5,6	11,5	8,5	21,5
26	-15	0	5	480	1,5	1500	14,7	30,6	5,9	12,2	9,0	32,4
27	-15	0	+10	510	1,5	1750	15,6	30,6	6,2	12,2	9,8	26,1
28	-15	0	+10	500	1,5	1250	15,1	30,2	6,0	12,1	8,9	24,4
29	-15	0	+10	460	2,5	1500	14,6	31,7	5,8	12,7	9,5	25,4
30	-15	0	+10	470	0,5	1500	15,0	31,9	6,0	12,8	9,3	34,6
31	-15	0	+10	490	1,5	1500	15,7	32,0	6,3	12,8	7,5	23,8
32	-15	0	+10	510	1,5	1500	14,8	29,0	5,9	11,6	8,9	26,6

Из анализа табл. 3.8 следует, что наилучшие показатели влажности надситного продукта получены при следующих параметрах:

а) технологические

удельная нагрузка по твердому, т/ч·м <sup>2</sup> , не более	- 6,0;
содержание твердого, кг/м <sup>3</sup>	- 400-500;

б) конструктивные

количество участков, шт.	- 3;
угол наклона первого участка, град.	- -20;
угол наклона второго участка, град.	- 0;
угол наклона третьего участка, град.	- +15;
размер отверстий обезвоживающей поверхности, мм	- 0,5;

в) вибрационные

угол наклона направления колебаний сита к горизонту, град.	- 50;
амплитуда колебаний, мм	- 1,5;
частота колебаний, мин <sup>-1</sup>	- 1500.

Полученные результаты подтверждают теоретические выводы раздела 2 о необходимости иметь три участка вибрационной ситовой поверхности при обезвоживании угольных шламов.

Для установления влияния технологических и конструктивных параметров процесса обезвоживания на влажность надситного продукта высокочастотного грохота были спланированы и выполнены специальные экспериментальные исследования, результаты которых приведены в табл. 3.9.

На основании данных табл. 3.9, получено уравнение регрессии зависимости влажности обезвоженного материала от технологических и конструктивных параметров исходного угольного шлама и высокочастотного грохота при коэффициенте корреляции 0,904

$$W^r = 25,2 \left( \frac{Q}{\mu\omega t} \right)^{0,5} \times \left( \frac{a_a}{d_{ш}} \right)^{0,1} \times \left( \frac{0,5\alpha_6 - \alpha_1}{\alpha_3} \right)^{0,15} \times \left( \frac{\gamma_{-0,25}}{C} \right)^{0,42}, \% \quad (3.2)$$

Таблица 3.9

## Матрица и результаты исследований

Обозначения и номера опытов	$Q_T$ , кг/с·м	$C$ , %	$\gamma_{025}$ , %	$\alpha_1$ , град	$\alpha_3$ , град	$\omega$ , с <sup>-1</sup>	$a_a$ , мм	$d_{ш}$ , мм	Функции отклика
Основной уровень (0)	4,17	40,5	30	15	10	25,0	1,5	0,75	Влажность $W^r$
Интервал варьирования	1,39	13,8	15	10	5	4,17	1,0	0,25	
Верхний уровень(+1)	5,56	54,3	45	25	15	29,17	2,5	1,0	
Нижний уровень (-1)	2,78	26,7	15	5	5	20,83	0,5	0,5	
Кодовые обозначения переменных	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	
Опыт 1	5,56	54,3	45	5	15	29,17	2,5	1,0	31,3
Опыт 2	2,78	54,3	15	5	15	20,83	2,5	0,5	28,8
Опыт 3	5,56	26,7	15	5	15	29,17	0,5	0,5	24,8
Опыт 4	2,78	26,7	45	5	15	20,83	0,5	1,0	22,3
Опыт 5	5,56	54,3	15	25	15	29,17	2,5	0,5	26,5
Опыт 6	2,78	54,3	15	25	15	29,17	2,5	1,0	32,4
Опыт 7	5,56	26,7	45	25	15	29,17	0,5	1,0	30,1
Опыт 8	2,78	26,7	15	25	15	20,83	0,5	0,5	27,3
Опыт 9	5,56	54,3	45	25	15	20,83	0,5	0,5	25,4
Опыт 10	2,78	54,3	15	25	15	29,17	0,5	1,0	26,8
Опыт 11	5,56	26,7	45	5	5	20,83	2,5	0,5	25,8
Опыт 12	2,78	26,7	15	5	5	29,17	2,5	1,0	24,6
Опыт 13	5,56	54,3	15	5	5	20,83	0,5	1,0	26,8
Опыт 14	2,78	54,3	45	5	5	29,17	0,5	0,5	25,0
Опыт 15	5,56	26,7	15	25	5	20,83	2,5	1,0	26,0
Опыт 16	2,78	26,7	45	25	5	29,17	2,5	0,5	25,6
Опыт 17	5,56	40,5	30	15	10	25,0	1,5	0,75	23,5
Опыт 18	2,78	40,5	30	15	10	25,0	1,5	0,75	22,0
Опыт 19	4,17	54,3	30	15	10	25,0	1,5	0,75	22,8
Опыт 20	4,17	26,7	30	15	10	25,0	1,5	0,75	23,6
Опыт 21	4,17	40,5	45	15	10	25,0	1,5	0,75	21,3
Опыт 22	4,17	40,5	15	15	10	25,0	1,5	0,75	22,8
Опыт 23	4,17	40,5	30	5	10	25,0	1,5	0,75	24,6
Опыт 24	4,17	40,5	30	25	10	25,0	1,5	0,75	22,8
Опыт 25	4,17	40,5	30	15	15	25,0	1,5	0,75	21,5
Опыт 26	4,17	40,5	30	15	5	25,0	1,5	0,75	32,4
Опыт 27	4,17	40,5	30	15	10	29,17	1,5	0,75	26,1
Опыт 28	4,17	40,5	30	15	10	20,83	1,5	0,75	24,4
Опыт 29	4,17	40,5	30	15	10	25,0	2,5	0,75	25,4
Опыт 30	4,17	40,5	30	15	10	25,0	0,5	0,75	34,6
Опыт 31	4,17	40,5	30	15	10	25,0	1,5	1,0	23,8
Опыт 32	4,17	40,5	30	15	10	25,0	1,5	0,5	26,6

где  $\left(\frac{Q}{\mu\omega t}\right)$  - комплекс, характеризующий соотношение гравитационной силы и силы вибровозбуждения;

$\left(\frac{a_a}{d_{щ}}\right)$  - симплекс, характеризующий вибровозбуждение рабочей поверхности;

$\left(\frac{0,5\alpha_g - \alpha_1}{\alpha_3}\right)$  - симплекс, характеризующий геометрию рабочей поверхности;

$\left(\frac{\gamma_{-0,25}}{C}\right)$  - симплекс, характеризующий исходный материал;

$Q$  - удельная нагрузка по твердому, кг/с·м;

$t$  - время обезвоживания, с;

$\omega$  - скорость вибраций, с<sup>-1</sup>;

$\mu$  - динамическая вязкость, Н·с/м<sup>2</sup>;

$d_{щ}$  - размер отверстий обезвоживающей поверхности, мм;

$a_a$  - амплитуда колебаний, мм;

$\alpha_3$  - угол наклона участка № 3 рабочей поверхности, град;

$\alpha_1$  - угол наклона участка № 1 рабочей поверхности, град;

$\alpha_g$  - угол наклона направления колебаний сита к горизонтам, град.;

$C$  - содержание твердого в исходном материале, %;

$\gamma_{-0,25}$  - выход класса менее 0,25 мм в исходном материале, %.

Уравнение (3.2) верно при следующих ограничениях:

$$2,78(10 \text{ т/ч}) \leq Q \leq 5,56(20 \text{ т/ч} \cdot \text{м}) \text{ кг/с} \cdot \text{м}; \quad 0,5 \leq a_a \leq 2,5 \text{ мм};$$

$$54 \leq t \leq 90 \text{ с}; \quad 5 \leq \alpha_3 \leq 15 \text{ град.};$$

$$0,001321 \leq \mu \leq 0,002264 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2; \quad 5 \leq \alpha_1 \leq 25 \text{ град.};$$

$$20 \leq \omega \leq 30 \text{ с}^{-1}; \quad 26,7 \leq C \leq 54,3\% ;$$

$$0,25 \leq d_{щ} \leq 0,75 \text{ мм}; \quad 15,0 \leq \gamma_{-0,25} \leq 45,0\% .$$

$$\alpha_g = 50 \text{ град.} = \text{const};$$

Из уравнения (3.2) и зависимостей, приведенных на рис. 3.11-3.18, следует, что с увеличением частоты вибраций, размера отверстий рабочей поверхности, углов наклона участков № 1 и № 3 рабочей поверхности и содержания твердого в исходном материале влажность обезвоженного продукта снижается. При увеличении удельной нагрузки, амплитуда колебаний и содержания класса менее 0,25 мм в исходном материале влажность надситного продукта увеличивается.

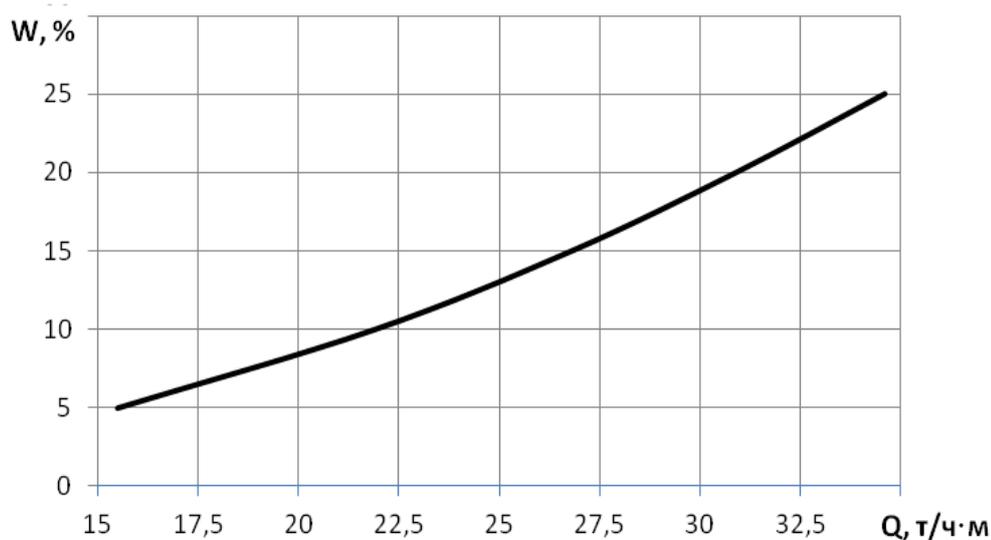


Рис. 3.11. Зависимость  $W = f(Q)$  при постоянных средних значениях остальных параметров.

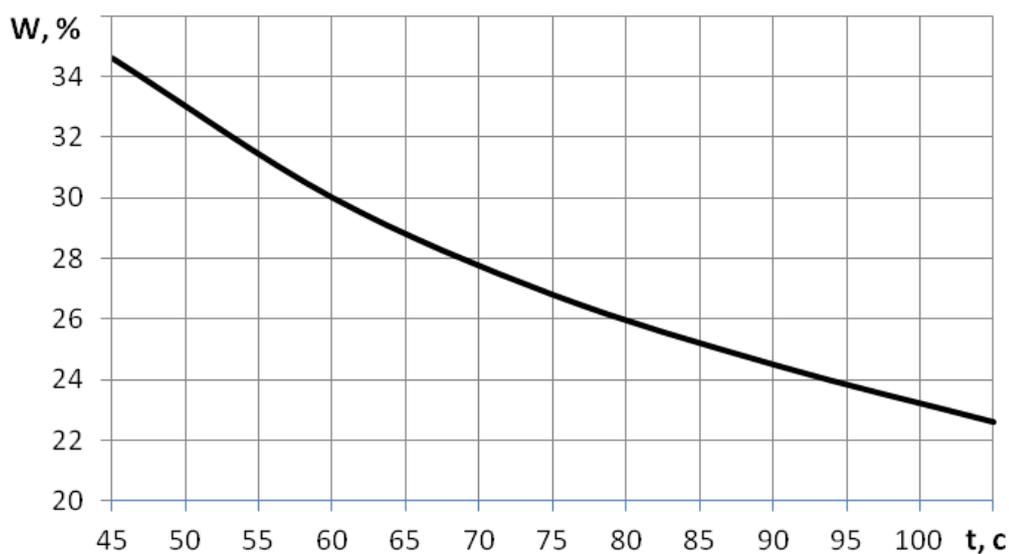


Рис. 3.12. Зависимость  $W = f(t)$  при постоянных средних значениях остальных параметров.

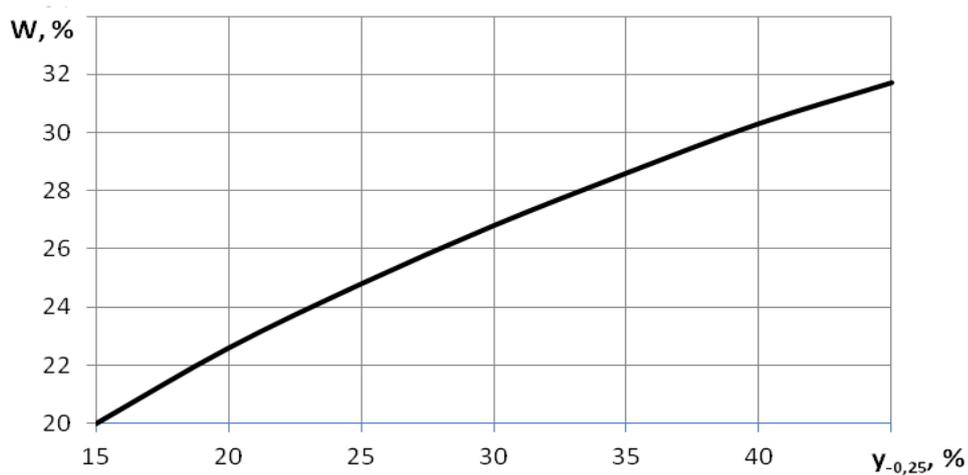


Рис. 3.13. Зависимость  $W = f(\gamma_{-0,25})$  при постоянных средних значениях остальных параметров.

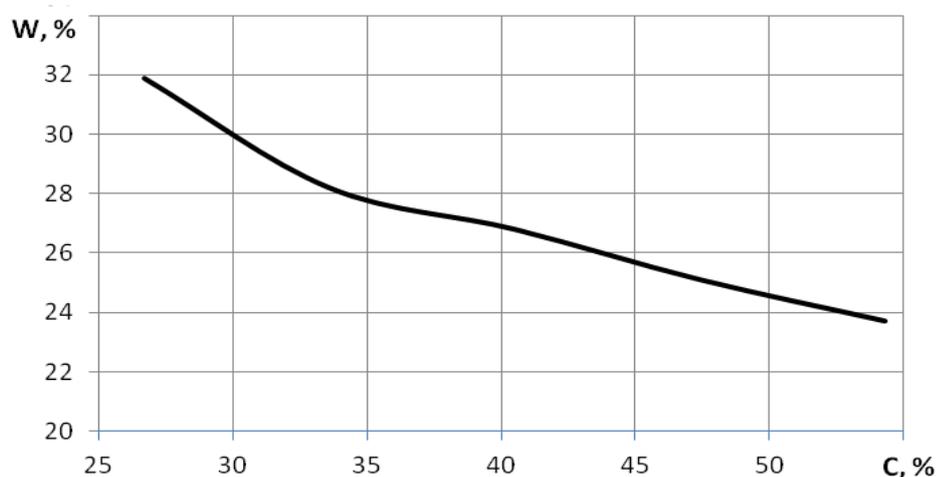


Рис. 3.14. Зависимость  $W = f(C)$  при постоянных средних значениях остальных параметров.

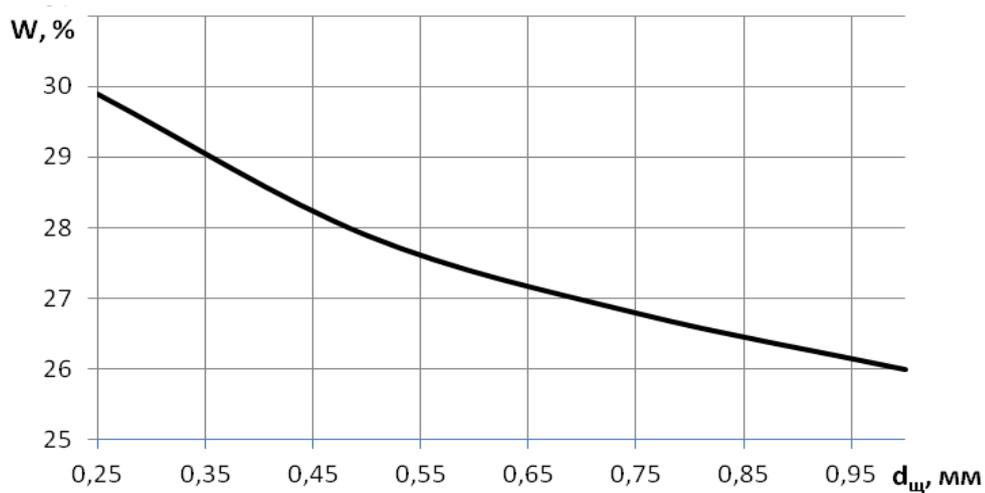


Рис. 3.15. Зависимость  $W = f(d_{щ})$  при постоянных средних значениях остальных параметров.

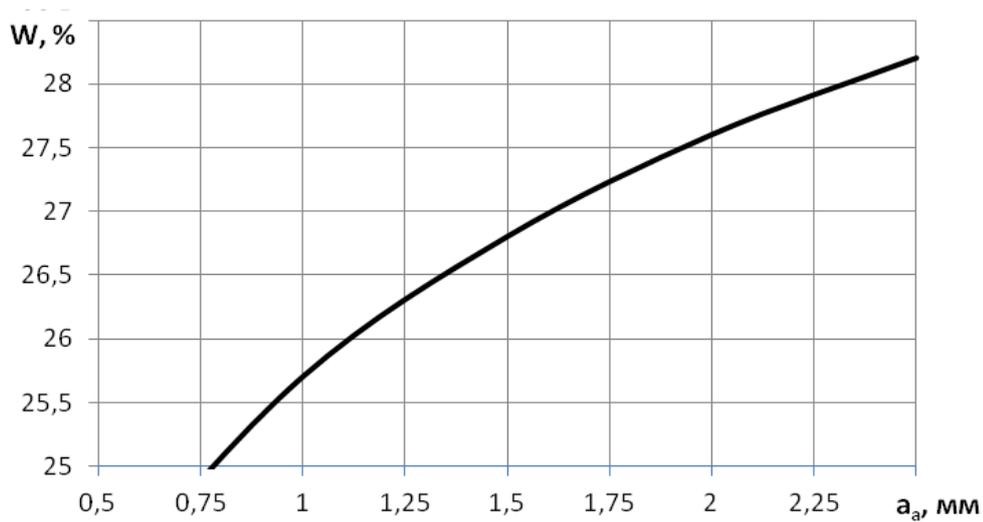


Рис. 3.16. Зависимость  $W = f(a_a)$  при постоянных средних значениях остальных параметров.

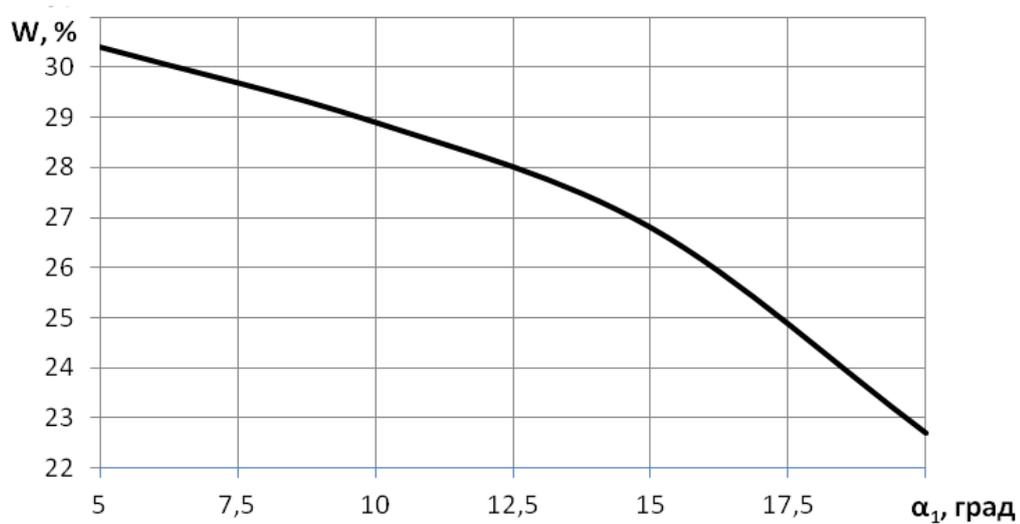


Рис. 3.17. Зависимость  $W = f(\alpha_1)$  при постоянных средних значениях остальных параметров.

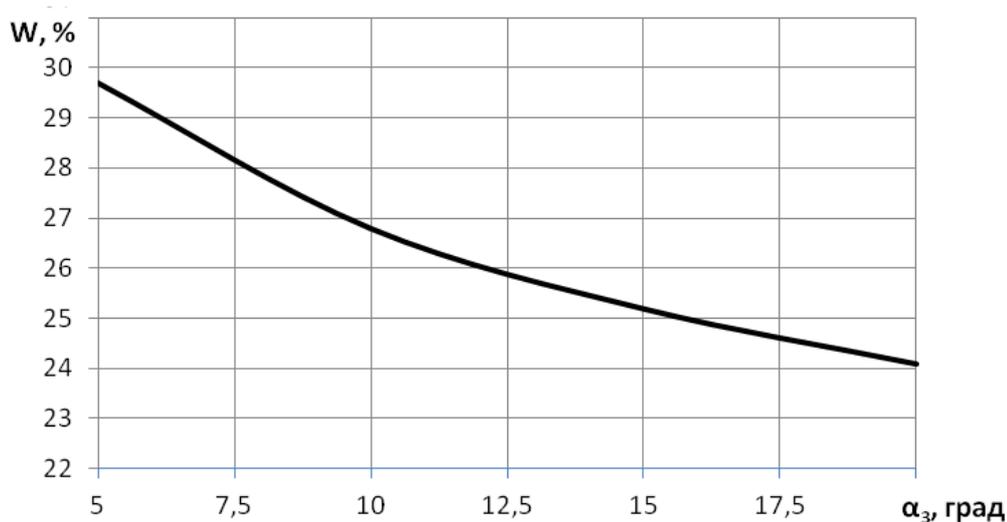


Рис. 3.18. Зависимость  $W = f(\alpha_3)$  при постоянных средних значениях остальных параметров.

При разработке промышленного грохота с целью расширения диапазона регулирования геометрий обезвоживающей поверхности возможность изменения углов наклона первого участка сит должна быть увеличена до  $-20^\circ$ , третьего участка до  $+15^\circ$ .

### 3.3 Разработка высокочастотного грохота с разнонаклонными участками сит для обезвоживания угольных шламов ГИсМх-2,5х1

#### 3.3.1 Конструкция и параметры высокочастотного грохота ГИсМх-2,5х1

На основании результатов исследований, изложенных в разделе 3.2, разработана конструкция высокочастотного грохота ГИсМх-2,5х1 (грохот инерционный самобалансный с механическим приводом), предназначенного для обезвоживания шламовых продуктов. Конструктивная схема грохота ГИсМх-2,5х1 аналогична УРШ-2,5, приведенной на рис. 3.10. Общий вид грохота ГИсМх-2,5х1 приведен на рис. 3.19.



Рис. 3.19. Общий вид грохота ГІсМх-2,5х1.

Колебательный режим обеспечивается грохоту вибратором, состоящим из двух кинематически не связанных между собой вибровозбудителей, работающих в условиях самосинхронизации. Такая конструкция грохота отличается простотой изготовления, надежностью и удобством эксплуатации.

Техническая характеристика опытного образца грохота ГІсМх-2,5х1 и возможные диапазоны изменения величин его динамических и конструктивных параметров приведены в табл. 3.10.

Установка загрузочной и разгрузочной секций сита под различными углами наклона производится с использованием комплекта деревянных подставок разной высоты. Секции сита жестко крепятся к связь-балкам корпуса устройства. Для изменения угла наклона секций сита под ними на крайние связь-балки устанавливаются подставки соответствующей высоты.

### **Принцип действия грохота ГІсМх-2,5х1**

Исходный материал в виде пульпы подается на загрузочную секцию сита грохота, где под воздействием вибраций происходит интенсивное обезвоживание материала с одновременным его перемещением к месту разгрузки.

Таблица 3.10

## Техническая характеристика грохота ГСМх-2,5х1

Наименование показателей и единица измерения	Величина
Производительность: по пульпе, м <sup>3</sup> /ч, не более по твердому, т/ч, не более	60 20
Размер отверстий сита, мм	0,1-0,5
Крупность исходного питания, мм	0-3
Площадь обезвоживающей поверхности, м <sup>2</sup>	2,5
Размеры обезвоживающей поверхности, мм: ширина длина	1000 2500
Количество секций обезвоживающей поверхности (по длине), шт.	3
Угол наклона поворотных секций, град: загрузочной промежуточной разгрузочной	-20...0 0 0...+15
Угол наклона короба к горизонту, град	0
Частота колебаний короба, мин. <sup>-1</sup>	1500
Амплитуда колебаний короба, мм	0,5-2,0
Угол вибраций (к горизонту), град	50
Номинальная мощность электродвигателя, кВт, не более	3×2 двигателя
Влажность надситного продукта, %, не более	26
Габаритные размеры, мм: длина ширина высота	2850 2100 1650
Масса, кг	2100

На разгрузочной секции сита надситный продукт обезвоживается за счет виброуплотнения.

Конструкция грохота позволяет изменять углы наклона загрузочной и разгрузочной секций сита в зависимости от гранулометрического состава, плотности исходной пульпы, а также требуемых технологических показателей.

Отличительная особенность грохота ГІсМх-2,5х1 – в интенсивном динамическом режиме: величина ускорения короба до 6g (у серийных вибрационных машин 3,5-4g), при этом, в отличие от зарубежных аналогов, ситовая поверхность грохота по длине состоит из трех зон с отдельно регулирующимися углами наклона, что позволяет оптимизировать режимы обезвоживания в различных производственных условиях.

Приемочные испытания опытного образца грохота ГІсМх-2,5х1 проведены на ЦОФ «Октябрьская» (Акт и протокол приемочных испытаний грохота ГІсМх-2,5х1 приведены в Приложении А).

Опытный образец грохота ГІсМх-2,5х1 смонтирован на отметке +29,4 м главного корпуса указанной ранее фабрики. Исходное питание грохота – крупнозернистый шлам (сгущенный продукт гидроциклонов ГЦ-1000).

В период с июля 2002 по март 2003 г. было проведено опробование грохота и определены его технологические показатели.

В качестве рабочей поверхности применялись резиновые сита ЗАО «АНАТЕМС» со щелью 0,5 мм.

Частота колебаний сита составила 1500 мин.<sup>-1</sup>, амплитуда колебаний изменялась в диапазоне от 0,5 до 2 мм.

В процессе выполнения пусконаладочных работ установлено, что лучшие технологические показатели работы грохота достигнуты при амплитуде 0,6 мм.

В табл. 3.11 приведены результаты обезвоживания угольного шлама на грохоте ГІсМх-2,5х1 в условиях ЦОФ «Октябрьская».

Из анализа данных табл. 3.11 следует, что производительность грохота составила 13-17,6 т/ч по твердому и около 40 м<sup>3</sup>/ч по пульпе с содержанием твердого 400-480 г/л. Влажность надситного продукта составляла 23,6-25,8%.

Испытания подтверждали технологические показатели работы грохота ГІсМх-2,5х1 и его технико-экономические параметры, заложенные в техническом задании и конструкторской документации.

Опытный образец грохота ГІсМх-2,5х1 выдержал приемочные испытания и после корректировки технической документации рекомендован к промышлен-

ному производству с 2004 г. для применения на операции обезвоживания и классификации шламовых продуктов. Результаты этих исследований изложены в [160-162].

Таблица 3.11

Результаты обезвоживания угольного шлама на грохоте ГСМх-2,5х1  
в условиях ЦОФ «Октябрьская»

№ п/п	Шахта поставщик рядового угля	Гранулометрический состав исходного про- дукта (%) по классам крупности (мм)							Содержание твердо- го, кг/м <sup>3</sup>	Удельная произво- дительность, т/(ч·м <sup>2</sup> )	Влажность надсит- ного продукта, %
		1-3	0,5-1	0,25-0,5	0,16-0,25	0,08-0,16	-0,08	Итого			
1	Новодонецкая	6,4	25,2	37,4	10,6	12,6	7,8	100,0	450	5,2	23,6
2	Белозерская	-	11,8	44,2	11,8	20,4	11,8	100,0	460	7,0	24,3
3	Самарская	5,1	36,4	40,0	6,6	6,8	5,1	100,0	480	6,7	24,9
4	Юбилейная	13,1	23,5	30,9	9,3	10,8	12,4	100,0	400	6,0	25,8
5	им. Сташкова	4,4	36,7	27,4	8,1	12,2	11,2	100,0	400	5,3	25,4

### 3.3.2 Рекомендации по модернизации высокочастотных грохотов

В настоящее время в Украине и за рубежом на операции обезвоживания угольных шламов широко применяются высокочастотные грохоты. Однако их использование не всегда соответствует качественно-количественным характеристикам исходного материала, что приводит к обводненности надситных продуктов. Указанное оборудование подлежит модернизации с целью снижения влажности обезвоженных угольных шламов.

Для снижения влажности надситных продуктов при обезвоживании угольных шламовых суспензий на высокочастотных грохотах в соответствии с выводами и рекомендациями, изложенными в разделах 2, 3.1, 3.2, модернизация указанного оборудования должна производиться по трем направлениям.

Технологическое направление модернизации основывается на необходимости соблюдения удельных нагрузок по твердому на уровне до  $6 \text{ т/ч}\cdot\text{м}^2$  и содержании твердого в питании в диапазоне 250-350 г/л.

Конструктивное направление модернизации предопределяет перевод плоской обезвоживающей поверхности в несимметрическую S-образную геометрическую форму с тремя участками рабочей поверхности, причем первый участок должен быть наклоненным по отношению ко второму до  $-20$  град., а третий до  $+15$  град.

Вибрационное направление модернизации обосновано необходимостью при технической возможности грохота обеспечить амплитуду его колебаний на уровне 1,5-2,0 мм, а частоту колебаний на уровне 1500-2000  $\text{мин}^{-1}$ .

## В ы в о д ы

1. Реологические свойства угольных шламов влияют на условия перехода вязкой суспензии в вязкопластичный и вязкоупругопластичный материал. Для их оптимизации необходимо осуществлять формирование гранулометрического состава исходного материала определенной крупности.

2. Обезвоживающая поверхность шламовых высокочастотных грохотов должна состоять из трех разнонаклонных участков, причем начальный и конечный участки должны иметь соответственно отрицательный (до  $-20$  град) и положительный (до  $+15$  град) наклон по отношению к среднему участку, что позволило определить конфигурацию обезвоживающей поверхности в виде несимметричной S-образной кривой.

3. Для достижения максимального эффекта обезвоживания угольных шламов на высокочастотных грохотах параметры вибровозбуждения должны подбираться в зависимости от физико-механических свойств исходного материала таким образом, чтобы переход вязкой суспензии в вязкопластичный и вязкоупругопластичный материал осуществлялся путем последовательного сгущения, концентрации и уплотнения частиц на разнонаклонных участках вибрирующей

ситовой поверхности при следующих значениях реологического параметра соответственно  $\varepsilon Re > 1$ ,  $\varepsilon Re < 1$ ,  $\varepsilon Re \ll 1$ .

4. Высокочастотный грохот ГСМх-2,5х1 для обезвоживания угольных шламов выдержал приемочные испытания и рекомендован к серийному производству.

5. Модернизация высокочастотных грохотов должна осуществляться путем изменения плоской обезвоживающей поверхности в несимметричную S-образную, что позволяет создать условия для возникновения уплотнения частиц.

6. Переход вязкой угольной шламовой суспензии в высококонцентрированную и далее в вязкопластичный и вязкоупругопластичный материал на сите высокочастотного грохота наступает при содержании твердого, соответственно, 200-300, 600 и 900 кг/м<sup>3</sup>, при этом частота вибраций должна быть 1500-2000 мин<sup>-1</sup>, а амплитуда колебаний 1,5-2,0 мм в зависимости от гранулометрического состава исходного продукта.

7. Зависимость влажности надситного материала от технологических и конструктивных параметров процесса обезвоживания угольных шламов на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности включает в себя комплекс, характеризующий соотношение гравитационной силы и силы вибровозбуждения, и симплекс, характеризующие вибровозбуждение рабочей поверхности, ее геометрию и исходный, подаваемый на обезвоживание, материал.

**РАЗДЕЛ 4**  
**ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ**  
**ОБЕЗВОЖИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ**  
**НА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГРОХОТАХ С РАЗНОАКЛОННЫМИ**  
**УЧАСТКАМИ СИТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

4.1. Промышленные испытания технологии обезвоживания угольных шламов на грохоте ГісМх-2,5х1 в условиях ЦОФ «Октябрьская»

Технологическая схема обработки шламовых продуктов ЦОФ «Октябрьская» в соответствии с [163] приведена на рис. 4.1, из которой следует, что все первичные и вторичные шламы фабрики аккумулируются в пирамидальных отстойниках. Сгущенный продукт пирамидальных отстойников направляется на обогащение в загрузку отсадочных машин БОММ-16, а сливной разделяется на три потока. Основной поток (80%) поступает на сгущение в гидроциклоны ГЦ-1000. Часть слива пирамидальных сгустителей (10-15%) направляется в оборотную воду, оставшаяся часть (5-10%) – поступает для разбавления сгущенного продукта гидроциклонов ГЦ-1000.

Слив гидроциклонов ГЦ-1000 поступает на флотацию, а сгущенный продукт вместе с частью слива пирамидальных сгустителей направляется на следующие операции:  $\approx 60\%$  - на мокрое подготовительное грохочение;  $\approx 40\%$  - на обезвоживание на грохоты.

До применения высокочастотных грохотов ГісМх-2,5х1 для обезвоживания этого шламового продукта применялись неподвижные конусные грохоты ГК-3, надситный продукт которых с содержанием твердого 500-550 г/л не мог отгружаться потребителю, поэтому подавался в разгрузку концентрата отсадочной машины БОММ-16 и обезвоживался с ее мелким концентратом.

Техническая характеристика грохота ГісМх-2,5х1 приведена в табл. 3.8, а общий вид на рис. 3.10.

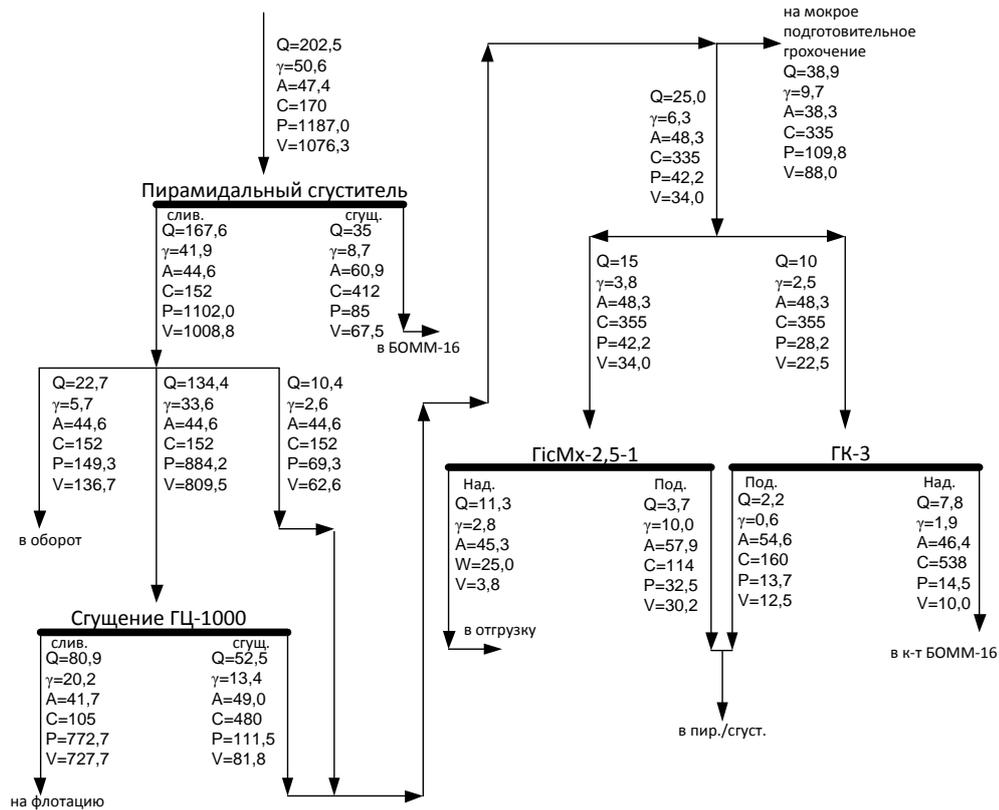


Рис. 4.1. Технология обезвоживания угольного шлама на грохоте ГисМх-2,5х1 в условиях ЦОФ «Октябрьская»: Q – нагрузка по твердому на сухую массу, т/ч;  $\gamma$  – выход продукта, %;  $A^d$  – зольность продукта, %; C – содержание твердого в продукте, кг/м<sup>3</sup>; P – объем пульпы, м<sup>3</sup>/ч; V – объем воды в пульпе, м<sup>3</sup>/ч.

Применение грохота ГисМх-2,5х1 позволило получить шламовый продукт с влажностью менее 25% и отгрузить его совместно с мелким концентратом.

Подситные продукты грохотов ГК-3 и ГисМх-2,5х1 возвращались в пирамидальные сгустители.

Усредненные результаты работы технологии обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на грохотах ГК-3 и ГисМх-2,5х1 приведены в табл. 4.1, из данных которой следует, что применение грохота ГисМх-2,5х1 вместо грохота ГК-3 на операции обезвоживания сгущенного продукта гидроциклонов ГЦ-1000 позволяет получить его влажность на уровне 25% (вместо 50% на ГК-3), что позволяет уменьшить циркуляцию шламовых продуктов и направить надситный продукт в отгрузку вместе с мелким концентратом.

Таблица 4.1

Усредненные результаты промышленных испытаний технологии обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на грохоте ГісМх-2,5х1 в условиях ЦОФ «Октябрьская»

№ п/п	Класс, мм						Грохот ГК-3					Грохот ГісМх-2,5х1				
	+0,5	0,25-0,5	0,16-0,25	-0,16	Итого		Q, м <sup>3</sup> /ч	С, кг/м <sup>3</sup>	Q, т/ч	q, т/ч·м <sup>2</sup>	W <sup>r</sup> , %	Q, м <sup>3</sup> /ч	С, кг/м <sup>3</sup>	Q, т/ч	q, т/ч·м <sup>2</sup>	W <sup>r</sup> , %
					Выход γ, %	Зольность A <sup>d</sup> , %										
1	12,3	18,5	11,0	58,2	100,0	48,3	28,4	355	10,1	3,37	56,2	42,2	355	15,0	6,00	25,0
2	13,8	24,7	13,2	48,3	100,0	45,2	27,6	340	9,4	3,13	52,5	40,0	340	13,6	5,44	23,8
3	14,6	26,0	14,0	45,4	100,0	46,9	25,3	37,2	9,4	3,13	50,6	40,5	372	15,1	5,04	24,2
4	12,9	21,8	12,7	52,6	100,0	47,3	30,6	364	11,1	3,70	55,1	50,4	364	18,3	7,32	24,0
5	13,1	20,5	12,0	54,4	100,0	48,0	35,4	348	12,3	4,10	53,8	54,9	348	19,1	7,64	24,8
6	15,2	21,9	12,6	50,3	100,0	46,4	29,7	381	11,3	3,77	55,2	41,6	381	15,8	6,32	24,1
Среднее											53,9					24,3

В табл. 4.2 приведены данные по влажности товарной угольной продукции ЦОФ «Октябрьская» с применением грохота ГК-3 и грохота ГісМх-2,5х1 на операции обезвоживания шламовых продуктов нефлотационной крупности.

Таблица 4.2

## Показатели работы ЦОФ «Октябрьская»

Продукты и их показатели	С применением грохота	
	ГК-3	ГісМх-2,5х1
Концентрат:		
Q, т/ч	210,4	210,48
γ, %	52,6	52,62
A <sup>d</sup> , %	8,5	8,4
W <sup>r</sup> , %	11,6	11,3
V, м <sup>3</sup> /ч	30,4	26,0
Промпродукт:		
Q, т/ч	6,8	6,8
γ, %	1,7	1,7
A <sup>d</sup> , %	43,6	43,6
W <sup>r</sup> , %	6,6	6,6
V, м <sup>3</sup> /ч	0,5	0,5
Отходы:		
Q, т/ч	182,8	182,72
γ, %	45,7	45,68
A <sup>d</sup> , %	78,8	78,9
W <sup>r</sup> , %	18,2	18,1
V, м <sup>3</sup> /ч	40,7	40,4

Из табл. 4.2 следует, что применение высокочастотных грохотов ГісМх-2,5х1 вместо грохотов ГК-3 на рассматриваемой операции позволило снизить влажность отгружаемого концентрата на 0,3% с 11,6% до 11,3%.

При цене коксового концентрата 923,86 грн./т без НДС [164] при нормативном качестве (по влаге 10,4%) [165] снижение влажности на 0,3% дает повышение стоимости продукции на 5,54 грн./т.

При выпуске фабрикой в 2004 г. 1126,1 тыс. т коксового концентрата [166] увеличение реализационной стоимости товарной угольной продукции составило  $P = 1126,1 \cdot 5,54 = 6,2$  млн. грн.

## 4.2 Промышленные испытания технологии обезвоживания угольных шламов на грохоте ГВЧ-41М в условиях ЦОФ «Гуковская»

### 4.2.1 Существующая технология обогащения рядовых углей на ЦОФ «Гуковская»

Технологическая схема фабрики состоит из двух секций, каждая секция – из двух цепочек основного технологического оборудования [167].

Рядовой антрацит крупностью -100 мм из аккумулирующих бункеров ленточными конвейерами поз. 86 подается на струнные грохоты ГСС-41 поз.87, где происходит его рассев на два класса +3 мм и -3 мм. Класс -3 мм с зольностью равной зольности рядового угля и в количестве до 12% от рядового угля, направляется системой ленточных конвейеров поз. 88, 89, 90 в отгрузку сорта АШ. Класс +3 мм конвейерами поз. 141 и 149 подается на дешламаторы ДШ-2 поз. 157, где осуществляется водонасыщение угля, после которого он поступает для классификации мокрым способом по крупности 3 мм на два машинных класса -3 мм и +3 мм на грохотах ГИСЛ-42 поз.154. Машинный класс -3 мм с грохотов ГИСЛ-42 поз. 154 поступает на контрольную классификацию по крупности 3 мм на грохот ГИСЛ-42 поз. 190-5, подситный продукт которого передается на грохот ГВЧ-41. Надситный продукт грохотов ГИСЛ-42 поз. 154 поступает в ванну тяжелосредних сепараторов СКВП-20 поз. 158, где происходит его обогащение. Концентрат тяжелосредний сепараторов поступает на отмывку магнетита и обезвоживания на двухситные грохоты ГИСЛ-42 поз. 168а, экипированные ситами 6 мм и 1,5 мм. Надситный продукт крупностью +6 мм с помощью ленточного конвейера поз. 303 передается для рассортировки на последовательную установку грохотов ГИСЛ-62 поз. 168-1 и 168-2, где выделяются сорта АМ, АК, АС и АО. Межситный продукт с грохотов ГИСЛ-42 поз. 168а с помощью скребкового конвейера поз.302 распределяется по центрифугам ЦфШнВ-1.00 поз. 190-3, обезвоженный продукт которых передается в сорт АШ. Фугат центрифуг поступает в бак подситного продукта грохота ГВЧ-41 поз. 264 емкостью 50 м<sup>3</sup>.

Подситный продукт грохотов ГИСЛ-42 поз. 168а представляет собой некондиционную суспензию и самотеком передается в сборники НКС-30 поз. 250.

Порода с тяжелосредних сепараторов поступает грохот ГИСЛ-42 поз.190-1, где происходит основной сброс некондиционной суспензии и далее на двухситный грохот ГИСЛ-42 поз. 190-2, на котором выделяются три продукта: надситный продукт (порода крупностью +18 мм), межситный продукт (порода крупностью 1,5-18 мм) и подситный продукт (некондиционная суспензия). Подситные продукты породных грохотов самотеком поступают в сборники НКС-30 поз.250, межситный продукт грохота ГИСЛ-42 поз. 190-2 с помощью ленточных конвейеров поз. 107 и поз. 108 передается в породные бункера, а надситный продукт грохота ГИСЛ-42 поз. 190-2 поступает в дробилку ДДЗ-6 поз. 300, где осуществляется его дробление до крупности -18 мм. Дробленая порода ленточным конвейером поз. 301 передается на переобогащение в тяжелосредний сепаратор СКВП-20 поз. 306. Подобное решение позволяет снизить потери угля с отходами тяжелосреднего обогащения [168].

Всплывшая фракция с тяжелосреднего сепаратора поступает на отмывку магнетита и обезвоживание на грохоте ГИСЛ-62 поз. 307, надситный продукт которого крупностью 1-20 мм ленточным конвейером поз. 316 передается на скребковый конвейер поз. 318 и распределяется по бункерам поз. 319, из под которых ленточными конвейерами поз. 320, 322, 324 грузится в вагоны как сорт АШк.

Потонувшая фракция тяжелосреднего сепаратора СКВП-20 поз. 306 разгружается на грохот ГИСЛ-42 поз. 308, надситный продукт которого передается на ленточный конвейер поз. 107 и 108 и далее в породные бункеры.

Подситные продукты грохотов поз. 307 и поз. 308 являются некондиционной суспензией и поступают в сборник НКС-30 поз. 250.

Из сборников НКС-30 поз. 250 некондиционная суспензия насосами ШН-270 поз. 250 перекачивается на электромагнитные сепараторы ПБР80/170 поз. 158, где происходит ее регенерация в 2 стадии. Магнетит направляется в сбор-

ники КС-30 поз. 239, а хвосты на грохот ГИСЛ-42 поз. 190-5 и далее в бак шламовых вод поз. 200.

Водно-шламовая схема фабрики предусматривает аккумуляцию всех шламовых вод в баке шламовых вод поз. 200. Для контроля крупности перед сборным баком шламовых вод находится грохот ГВЧ-41 поз. 264, надситный продукт которого крупностью +3 мм поступает на обезвоживание в центрифуги ЦфШнВ-1.00 поз. 190-3.

Из сборного бака шламовых вод поз. 200 водоугольная суспензия насосом ШН-500 поз. 200-5 подается в батарейные гидроциклоны БГЦ-350 поз.200-Б для сгущения, а перелив бака шламовых вод самотеком поступает в шламовый бассейн.

Сгущенный продукт гидроциклонов БГЦ-350 поз. 200-Б поступает на обогащение на винтовые сепараторы МХ-7 поз. 259, а слив – в бак емкостью 8 м<sup>3</sup>. Концентрат винтовых сепараторов поступает на обезвоживание на два грохота ГВЧ-41 поз. 262 напрямую или через пластинчатый сгуститель поз. 260. Надситный продукт грохота крупностью +0,2 мм передается с помощью ленточного конвейера поз. 207 для окончательного обезвоживания в центрифуге ЦфШнВ-1.00 поз. 190-3, подситный продукт с первой части грохота – в бак емкостью 10 м<sup>3</sup>, куда также поступают отходы винтовых сепараторов, а подситный продукт с второй части грохота возвращается в сборный бак шламовых вод поз. 200.

Отходы МВС поступают на грохот ГВЧ-41 поз. 262, надситный продукт которого направляется на породный отвал, а подситный поступает в бак емкостью 10 м<sup>3</sup>, откуда насосами ШН-500 поз. 206<sup>а</sup> перекачиваются в гравитационный сгуститель поз. 500. Слив пластинчатого сгустителя поз. 260 поступает в бак емкостью 8 м<sup>3</sup>, откуда вместе со сливом гидроциклонов ГЦ-350 насосом ШН-270 поз. 206<sup>б</sup> подается в гидроциклоны ГЦ-75 поз. 265, слив который поступает в бак № 1 и далее в гравитационный сгуститель, а сгущенный подается на обезвоживание на грохот ГВЧ-41 поз. 262.

Подситный продукт грохота ГВЧ-41 отходов МВС, слив гидроциклонов ГЦ-75 и шламовая вода из шламового бассейна поз. 341 подвергаются флокуляции в

гравитационном сгустителе поз. 500, сливной продукт которого является оборотной водой и через наружный шламовый отстойник насосами ШН-500 подается в бак оборотной воды, а сгущенный продукт насосами ШН-270 и К40-250 поз.503-1, 2 закачивается в автоцистерны и перевозится на породный отвал для совместного складирования с породой тяжелосредних сепараторов.

Качественно-количественная и водно-шламовая схема ЦОФ «Гуковская» приведена на рис. 4.2, баланс продуктов обогащения в табл. 4.3, а баланс по воде в табл. 4.4.

Из данных табл. 4.3 следует, что выход концентрата составляет 74,2% с зольностью 18,2% и влагой 7,1%. Выход отходов – 25,7% с зольностью 82,5% и влагой 12,5%.

Таблица 4.3

Баланс продуктов обогащения

Продукты	Q, т/ч	$\gamma$ , %	$A^d$ , %	$W^r$ , %
Сухой отсев АШ	52,7	8,8	34,9	7,5
Сорт АК	3,0	0,5	9,2	5,5
Сорт АО	58,8	9,8	8,9	5,5
Сорт АМ	61,2	10,2	10,8	6,0
Сорт АС	115,0	19,2	11,9	7,0
Сорт АШк -18 мм	15,0	2,5	30,4	6,4
Сорт АШк -3 мм	139,4	23,2	23,0	8,3
Итого концентрат	445,1	74,2	18,2	7,1
Отходы СКВП	116,6	19,4	86,2	4,2
Отходы МВС	18,0	3,0	81,9	21,3
Отходы гравитационного сгустителя	20,3	3,4	61,4	52,3
Итого отходов	154,9	25,8	82,5	12,5
Всего	600,0	100,0	34,8	-

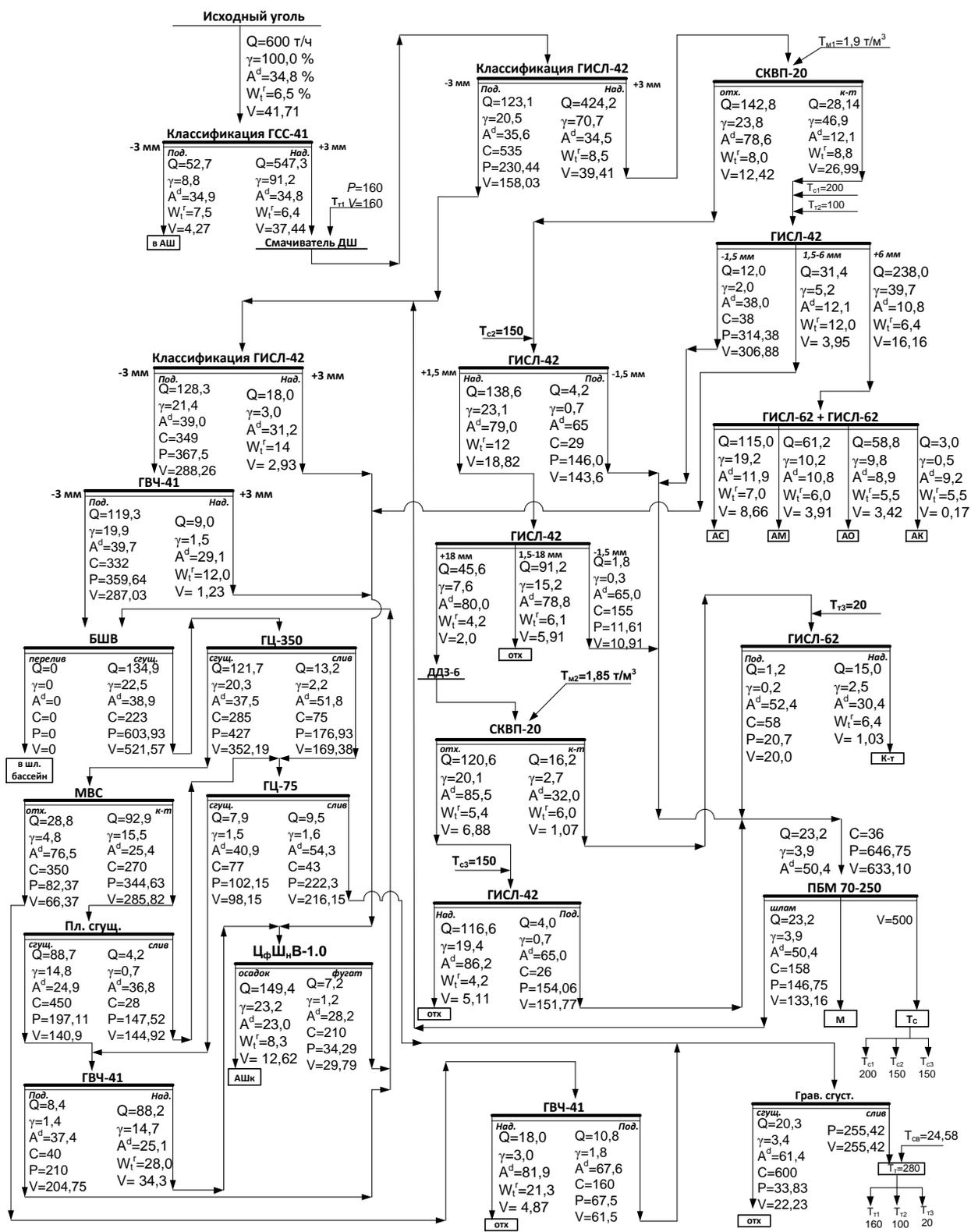


Рис. 4.2. Качественно-количественная и водно-шламовая схема ЦОФ «Гуковская».

Таблица 4.4

## Баланс по воде

Приходит на ЦОФ	V, м <sup>3</sup> /ч	Уходит с продуктами	V, м <sup>3</sup> /ч
Рядовой уголь	41,71	Сорт АШ	4,27
Свежетехническая вода	24,58	Сорт АК	0,17
		Сорт АО	3,42
		Сорт АМ	3,91
		Сорт АС	8,66
		Сорт АШк -18 мм	1,03
		Сорт АШк -3 мм	12,62
		Отходы СКВП	5,11
		Отходы МВС	4,87
		Отходы гравитационного сгустителя	22,23
Итого	66,29	Итого	66,29

Из табл. 4.4 следует, что в систему фабрики необходимо добавлять 24,58 м<sup>3</sup>/ч свежетехнической воды.

Количество технической воды на фабрике составляет 280 м<sup>3</sup>/ч или около 0,5 м<sup>3</sup> на 1 т рядового угля.

#### 4.2.2 Анализ технологии обезвоживания угольных шламов на ЦОФ «Гуковская»

В соответствии с рис. 4.2 высокочастотные грохоты ГВЧ-41 применяются для предварительного обезвоживания следующих продуктов:

- концентрата винтовых сепараторов после сгущения в пластинчатых сгустителях;
- сгущенного продукта гидроциклонов ГЦ-75;
- подситного продукта грохотов ГИСЛ-42 поз. 190-5;
- отходов винтовых сепараторов.

Ранее для обезвоживания этих продуктов применялись: ленточный вакуум-фильтр ЛСХ-15 (поз. 262), который обезвоживал класс 0,2-3 мм до влажно-

сти 28-30%, грохот ГИСЛ-42 (поз. 264), который обезвоживал класс 0,5-6 мм до влажности 17-20%.

В настоящее время на поз. 262 и 264 установлены грохоты ГВЧ-41, на которых обезвоживается класс 0,2-3 мм до влажности:

- при обезвоживании концентрата мокрой винтовой сепарации (МВС) с сгущенным продуктом гидроциклонов ГЦ-75 до 26-30%;
- при обезвоживании отходов МВС до 20-24%.

Применение грохота ГВЧ-41 на поз. 264 для контрольной классификации шлама по крупности 3 мм не рассматривается, так как эта операция не относится к обезвоживающим операциям.

Результаты работы высокочастотных грохотов ГВЧ-41 приведены в табл. 4.5 и 4.6. Исходя из данных табл. 4.5 и 4.6, влажность надситных продуктов должна быть уменьшена при обезвоживании концентрата МВС и сгущенного продукта ГЦ-75 с 28,0% до 20-22%, при обезвоживании отходов МВС с 21,3% до 14-18%.

Таблица 4.5

Усредненные показатели работы грохота ГВЧ-41 на операции обезвоживания концентрата МВС и сгущенного продукта ГЦ-75

Класс, мм	Продукты							
	Исходный		Надситный			Подситный		
	Выход $\gamma_{и}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %	Выход $\gamma_{и}$ , %	Выход $\gamma_{п}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %	Выход $\gamma_{и}$ , %	Выход $\gamma_{п}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %
2-3	15,32	24,2	15,32	19,5	24,2	-	-	-
1,5-2	11,12	26,1	11,12	14,1	26,1	-	-	-
1-1,5	12,24	18,4	12,24	15,6	18,4	-	-	-
0,5-1	13,57	17,6	13,57	17,2	17,6	-	-	-
-0,5	47,75	34,6	26,45	33,6	32,5	21,3	100,0	37,4
Итого	100,0	27,8	78,7	100,0	25,2	21,3	100,0	37,4
Влажность $W^r$ , %	-		28,0			-		
Содержание твердого С, кг/м <sup>3</sup>	425		-			40		

Таблица 4.6

Усредненные показатели работы грохота ГВЧ-41 на операции  
обезвоживания отходов МВС

Класс, мм	Продукты							
	Исходный		Надситный			Подситный		
	Выход $\gamma_{и}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %	Выход $\gamma_{и}$ , %	Выход $\gamma_{п}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %	Выход $\gamma_{и}$ , %	Выход $\gamma_{п}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %
2-3	19,32	86,0	19,32	25,7	86,0	-	-	-
1,5-2	18,64	84,9	18,64	24,6	84,9	-	-	-
1-1,5	11,53	84,3	11,53	15,3	84,3	-	-	-
0,5-1	11,33	81,4	11,33	15,0	81,4	-	-	-
-0,5	39,18	68,9	14,48	19,4	71,2	24,7	100,0	67,6
Итого	100,0	78,4	75,3	100,0	81,9	24,7	100,0	67,6
Влажность $W^r$ , %	-		21,3			-		
Содержание твердого С, кг/м <sup>3</sup>	433		-			160		

#### 4.2.3 Разработка усовершенствованной технологии обезвоживания угольных шламов на грохотах ГВЧ-41М

Исходя из выводов, полученных в разделах 2 и 3 усовершенствование технологии обезвоживания шламовых продуктов нефлотационной крупности на грохоте ГВЧ-41 на ЦОФ «Гуковская» осуществляется путем его модернизации по следующим направлениям: технологическому, конструктивному и вибрационному. Модернизированный грохот ГВЧ-41 получил наименование ГВЧ-41М.

##### Технологическое направление

Содержание твердого в питании грохотов ГВЧ-41М соответствует его рациональному значению при обезвоживании. Удельные нагрузки на 2 грохота ГВЧ-41М (6,7 м<sup>3</sup>) составляют 6,0 т/ч·м<sup>2</sup>.

### Конструктивное направление

Обезвоживающая поверхность грохотов ГВЧ-41М состоит по длине из трех равных участков, причем крайние участки установлены под углом  $-20$  град. (первый участок) и  $+15$  град. (третий участок) относительно второго среднего участка.

### Вибрационное направление

На грохоте ГВЧ-41М устанавливается амплитуда и частота колебаний в зависимости от гранулометрического состава исходного материала соответственно  $1,5-2,0$  мм и  $1000-1400$  мин.<sup>-1</sup>.

Техническая характеристика грохотов ГВЧ-41 и ГВЧ-41М приведена в табл. 4.7, их общий вид помещен на рис. 4.3.

Таблица 4.7

#### Техническая характеристика грохотов

№ п/п	Наименование показателей и единица их измерения	Грохот	
		ГВЧ-41	ГВЧ-41М
1	Площадь сита, м <sup>2</sup>	6,7	6,7
2	Число ярусов сит, шт.	1	1
3	Производительность по исходному (твердому) питанию, т/ч	до 60	до 60
4	Длина сита, мм	4200	4200
5	Ширина сита, мм	1600	1600
6	Количество участков сит, шт.	1	3
7	Угол наклона участка сита, град.:		
	участок № 1	0	до $-20$
	участок № 2	0	0
	участок № 3	0	до $+15$
8	Масса колеблющейся части, кг	3400	3400
9	Амплитуда колебаний, мм	1,5-2,0	1,5-2,0
10	Частота виброперемещений короба, мин. <sup>-1</sup>	972-1450	972-1450
11	Номинальная мощность двигателя, кВт	2x5,5	2x5,5
12	Габаритные размеры, мм:		
	длина	4200	4200
	ширина	2820	2820
	высота	1580	1580
13	Масса грохота, кг	3800	3800

а)



б)



Рис. 4.3. Общий вид грохота типа ГВЧ:

а) до модернизации (ГВЧ-41); б) после модернизации (ГВЧ-41М).

Грохоты экипированы обезвоживающей поверхностью в виде резиновых сит ООО «АНА-ТЕМС» с характерным размером отверстий 0,2 мм.

Усредненные результаты работы модернизированных грохотов ГВЧ-41М приведены в табл. 4.8 и 4.9, а рассчитанная с учетом их применения.

Таблица 4.8

Усредненные показатели работы грохота ГВЧ-41М на операции обезвоживания концентрата МВС и сгущенного продукта ГЦ-75

Класс, мм	Продукты							
	Исходный		Надситный			Подситный		
	Выход $\gamma_{и}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %	Выход $\gamma_{и}$ , %	Выход $\gamma_{п}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %	Выход $\gamma_{и}$ , %	Выход $\gamma_{п}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %
2-3	17,36	23,5	17,36	24,9	23,5	-	-	-
1,5-2	12,06	22,1	12,06	17,3	22,1	-	-	-
1-1,5	11,22	17,5	11,22	16,1	17,5	-	-	-
0,5-1	12,41	17,3	12,41	17,8	17,3	-	-	-
-0,5	46,95	33,9	16,65	23,9	30,1	30,3	100,0	36,0
Итого	100,0	26,8	69,7	100,0	22,8	30,3	100,0	36,0
Влажность $W^r$ , %	-		22,0			-		
Содержание твердого С, кг/м <sup>3</sup>	425		-			42		

Таблица 4.9

Усредненные показатели работы грохота ГВЧ-41М на операции обезвоживания отходов МВС

Класс, мм	Продукты							
	Исходный		Надситный			Подситный		
	Выход $\gamma_{и}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %	Выход $\gamma_{и}$ , %	Выход $\gamma_{п}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %	Выход $\gamma_{и}$ , %	Выход $\gamma_{п}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %
2-3	20,64	85,2	20,64	30,9	85,2	-	-	-
1,5-2	17,70	84,6	17,70	26,5	84,6	-	-	-
1-1,5	12,42	83,5	12,42	18,6	83,5	-	-	-
0,5-1	10,29	81,6	10,29	15,4	81,6	-	-	-
-0,5	38,95	68,0	15,75	8,6	77,4	33,2	100,0	66,4
Итого	100,0	77,8	66,8	100,0	83,5	33,2	100,0	66,4
Влажность $W^r$ , %	-		16,0			-		
Содержание твердого С, кг/м <sup>3</sup>	433		-			190		

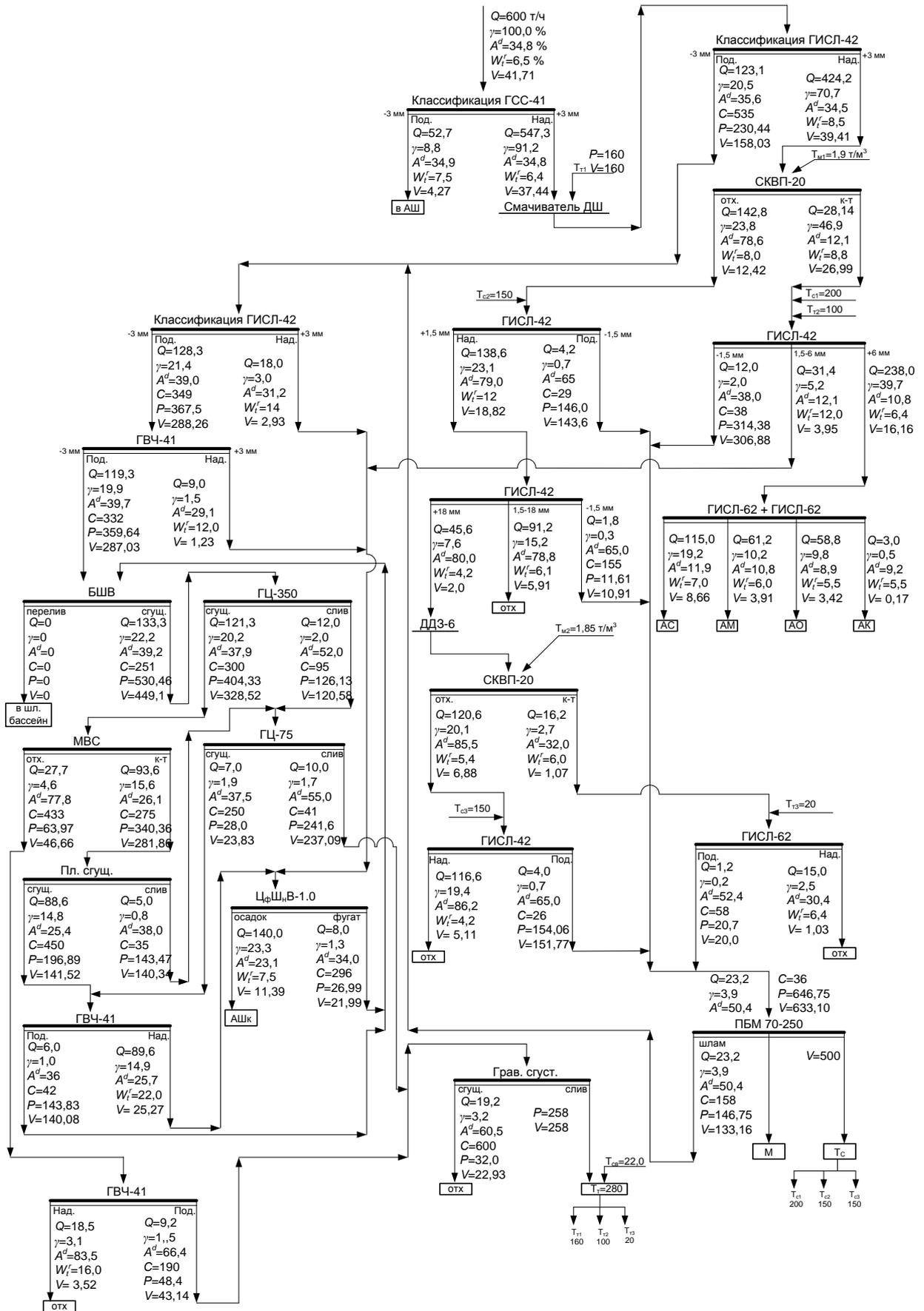


Рис. 4.4. Качественно-количественная и водно-шламовая схема ЦОФ «Гуковская» после внедрения грохотов ГВЧ-41М.

Качественно-количественная и водно-шламовая схема приведена на рис. 4.4.

Баланс продуктов обогащения и баланс по воде этой схемы приведены, соответственно, в табл. 4.10 и 4.11.

Таблица 4.10

Баланс продуктов обогащения

Продукты	Q, т/ч	$\gamma$ , %	A <sup>d</sup> , %	W <sup>r</sup> , %
Сухой отсев АШ	52,7	8,8	34,9	7,5
Сорт АК	3,0	0,5	9,2	5,5
Сорт АО	58,8	9,8	8,9	5,5
Сорт АМ	61,2	10,2	10,8	6,0
Сорт АС	115,0	19,2	11,9	7,0
Сорт АШк -18 мм	15,0	2,5	30,4	6,4
Сорт АШк -3 мм	140,0	23,3	23,1	7,5
Итого концентрат	445,7	74,3	18,2	6,9
Отходы СКВП	116,6	19,4	86,2	4,2
Отходы МВС	18,5	3,1	83,5	16,0
Отходы гравитационного сгустителя	19,2	3,2	60,5	54,4 г/л
Итого отходов	154,3	25,7	82,7	11,9
Всего	600,0	100,0	34,8	-

Таблица 4.11

Баланс по воде

Приходит на ЦОФ	V, м <sup>3</sup> /ч	Уходит с продуктами	V, м <sup>3</sup> /ч
Рядовой уголь	41,71	Сорт АШ	4,27
Свежетехническая вода	22,0	Сорт АК	0,17
		Сорт АО	3,42
		Сорт АМ	3,91
		Сорт АС	8,66
		Сорт АШк -18 мм	1,03
		Сорт АШк -3 мм	11,39
		Отходы СКВП	5,11
		Отходы МВС	3,52
		Отходы грав.сгустителя	22,23
Итого	63,71	Итого	63,71

Из данных табл. 4.10 следует, что выход концентрата составляет 74,3% с зольностью 18,2% и влагой 6,9%. Выход отходов – 25,7% с зольностью 82,7%.

Из табл. 4.11 следует, что в систему фабрики необходимо добавлять 22,0 м<sup>3</sup>/ч свежетехнической воды.

Количество технической воды на фабрике составляет 280 м<sup>3</sup>/ч или около 0,5 м<sup>3</sup> на 1 т рядового угля.

Сравнительный анализ данных табл. 4.5 и 4.8, 4.6 и 4.9 показывает, что применение грохотов ГВЧ-41М вместо грохота ГВЧ-41 снижает влажность надситного продукта при обезвоживании концентрата МВС со сгущенным продуктом гидроциклонов ГЦ-75 в среднем на 6,0% с 28,0% до 22,0%, при обезвоживании отходов МВС на 5,3% с 21,3% до 16,0%.

#### 4.2.4 Экономическая эффективность применения грохотов ГВЧ-41М

В табл. 4.12 приведены данные показателей работы ЦОФ «Гуковская» с применением на операции обезвоживания шламовых продуктов нефлотационной крупности грохотов ГВЧ-41 и ГВЧ-41М.

Таблица 4.12

Показатели работы ЦОФ «Гуковская» с грохотами ГВЧ-41 и ГВЧ-41М

Продукты и их показатели	С применением грохота	
	ГВЧ-41	ГВЧ-41М
Концентрат:		
Q, т/ч	445,1	445,7
γ, %	74,2	74,3
A <sup>d</sup> , %	18,2	18,2
W <sup>r</sup> , %	7,1	6,9
V, м <sup>3</sup> /ч	34,08	32,85
Отходы:		
Q, т/ч	154,9	154,3
γ, %	25,8	25,7
A <sup>d</sup> , %	82,5	82,7
W <sup>r</sup> , %	12,5	11,9
V, м <sup>3</sup> /ч	32,21	30,86

Из табл. 4.12 следует, что применение высокочастотного грохота ГВЧ-41М вместо высокочастотного грохота ГВЧ-41 на рассматриваемой операции позволило снизить влажность отгружаемого концентрата на 0,2% с 7,1% до 6,9%.

При цене энергетического концентрата 346,89 грн./т с НДС (1387,58 руб./т без НДС) [169] при нормированном качестве (по влаге 5,3% [165]) снижение его влажности на 0,2% дает повышение стоимости концентрата на 0,9 грн./т.

При выпуске фабрикой в 2012 г. 654 тыс. т энергетического концентрата [169], увеличение реализационной стоимости товарной угольной продукции составляет

$$P = 654 \cdot 0,9 \approx 0,6 \text{ млн. грн.}$$

Результаты промышленной апробации высокочастотных грохотов и разработанной на их основе технологии обезвоживания шламовых продуктов нефлотационной крупности изложены в [168, 170-173].

## В ы в о д ы

1. Применение на ЦОФ «Октябрьская» высокочастотного грохота ГісМх-2,5х1 на операции обезвоживания сгущенного продукта гидроциклонов ГЦ-1000 вместо грохота ГК-3 снизило влажность шлама на 29,6% с 53,9% до 24,3%, что позволило уменьшить влажность концентрата фабрики на 0,3% с 11,6% до 11,3%.

2. Применение на ЦОФ «Гуковская» модернизированного высокочастотного грохота ГВЧ-41М на операции обезвоживания концентрата и отходов винтовых сепараторов вместо высокочастотного грохота ГВЧ-41 позволило снизить влажность концентрата винтовых сепараторов на 6% с 28,0% до 22,0%, отходов на 5,3% с 21,3% до 16,0%, что позволило уменьшить влажность концентрата фабрики на 0,2% с 7,1% до 6,9%.

3. Суммарный расчетный экономический эффект от применения высокочастотных грохотов ГісМх-2,5х1 на ЦОФ «Октябрьская» и ГВЧ-41М на ЦОФ

«Гуковская», полученный за счет увеличения реализационной стоимости товарной угольной продукции, составил 6,8 млн. грн.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, которая является завершенной научно-исследовательской работой, поставлена и решена актуальная научная задача, заключающаяся в установлении закономерностей виброуплотнения угольных шламов в зависимости от их реологических свойств и параметров вибровозбуждения ситовой поверхности. На основе этих закономерностей разработана усовершенствованная технология механического обезвоживания угольных шламов нефлотационной крупности и создан высокочастотный грохот с разнонаклонными участками рабочей поверхности, внедрение которых в производство позволило снизить влажность товарной угольной продукции за счет частичного удаления капиллярной воды из порового пространства материала.

Наиболее важные научно-практические результаты, выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. Наибольшую трудность в процессах обогащения угля представляет обезвоживание угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на ситовых вибрирующих поверхностях в условиях уменьшения их отверстий с 0,5(1) мм до 0,1(0,2) мм и менее, что снижает живое сечение сит с 33,4% до 5,5% и предопределяет увеличение фронта обезвоживания в 6 раз.

Увеличение количества мелочи в водно-шламовых схемах углеобогажительных фабрик и необходимость полного улавливания шламовых продуктов нефлотационной крупности, предопределило необходимость применения высокочастотных грохотов, что особенно существенно при уменьшении отверстий обезвоживающих сит с 0,5(1) мм до 0,1(0,2) мм. Существующие представления о механическом обезвоживании обводненных угольных продуктов, отсутствие методов расчета технологии обезвоживания на вибрирующей рабочей поверхности не позволяют производить оценку обезвоживания на подобных грохотах и сдерживают их применение.

2. Установлено, что процессы обезвоживания угольных шламов на вибрирующей ситовой поверхности состоит из трех этапов: на первом этапе происходит перевод суспензии в высококонцентрированную за счет сброса свободной воды

под действием гидростатического давления ее слоя; на втором – перевод высококонцентрированной суспензии в вязкопластичный материал за счет удаления внешней поверхностной воды под действием инерционной составляющей виброколебаний; на третьем – перевод вязкопластичного материала в вязкоупругопластичный за счет частичного удаления капиллярной воды из порового пространства зернистого материала путем его виброуплотнения.

На конечных двух этапах обезвоживания материал характеризуется вязкопластическими свойствами и может быть описан реологической моделью Бингама-Шведова.

3. В диапазоне динамических параметров существующих грохотов интенсификация процесса обезвоживания наиболее эффективна путем повышения частоты колебаний рабочей поверхности до величины, ограничиваемой реологическими свойствами материала. При этом необходимым условием перехода вязкой суспензии в концентрированную (до  $600 \text{ кг/м}^3$ ) и далее в вязкопластичный (до  $900 \text{ кг/м}^3$ ) и вязкоупругопластичный материал (более  $900 \text{ кг/м}^3$ ) являются соответствующие значения реологического параметра  $\varepsilon Re > 1$ ,  $\varepsilon Re < 1$ ,  $\varepsilon Re \ll 1$ .

4. Разработана математическая модель процесса виброуплотнения слоя материала в процессе обезвоживания, содержащая реологический параметр материала и включающая в явном виде амплитуду и частоту колебаний рабочей поверхности.

5. Наибольшее значение скорости уплотнения обезвоживаемого материала достигается при амплитуде и частоте колебаний сита грохота соответственно  $1,5\text{-}2,0 \text{ мм}$  и  $1500\text{-}2000 \text{ мин}^{-1}$  в зависимости от толщины слоя, при этом время уплотнения – не менее  $35 \text{ с}$ .

6. Впервые установлено, что обезвоживающая поверхность шламовых высокочастотных грохотов должна состоять из трех разнонаклонных участков, причем начальный и конечный участки должны иметь соответственно отрицательный (до  $-20^\circ$ ) и положительный (до  $+15^\circ$ ) наклон по отношению к среднему участку, что позволило определить конфигурацию обезвоживающей поверхности в виде несимметричной S-образной кривой.

7. Установлено, что общая длина рабочей поверхности высокочастотного грохота при обезвоживании угольных шламов должна быть не менее 2,5 м.

8. Разработана конструкция высокочастотного грохота ГісМх-2,5х1 для обезвоживания угольных шламов, который выдержал приемочные испытания и рекомендован к серийному производству.

9. Определено направление модернизации высокочастотных грохотов путем изменения плоской обезвоживающей поверхности в несимметричную S-образную.

10. Применение на ЦОФ «Октябрьская» высокочастотного грохота ГісМх-2,5х1 на операции обезвоживания сгущенного продукта гидроциклонов ГЦ-1000 вместо грохота ГК-3 снизило влажность шлама на 29,6% с 53,9% до 24,3%, что позволило уменьшить влажность товарной продукции фабрики на 0,3% с 11,6% до 11,3%.

11. Применение на ЦОФ «Гуковская» модернизированного высокочастотного грохота ГВЧ-41М на операции обезвоживания концентрата и отходов винтовых сепараторов вместо высокочастотного грохота ГВЧ-41 позволило снизить влажность концентрата винтовых сепараторов на 6% с 28,0% до 22,0%, отходов на 5,3% с 21,3% до 16,0%, что позволило уменьшить влажность общего концентрата фабрики на 0,2% с 7,1% до 6,9%.

12. Суммарный расчетный экономический эффект от применения высокочастотных грохотов ГісМх-2,5х1 на ЦОФ «Октябрьская» и ГВЧ-41М на ЦОФ «Гуковская», полученный за счет увеличения реализационной стоимости товарной угольной продукции, составил 6,8 млн. грн.

13. Результаты диссертации рекомендованы ОП «Укрнииуглеобогащение» ГП «НТЦ «Углеинновация» для использования в практической деятельности технической службы углеобогатительных предприятий, в научно-исследовательских организациях и заведениях высшего образования горного профиля.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ДСТУ 4083-2012 Вугілля кам'яне та антрацит для пиловидного спалювання на теплових електростанціях. Технічні умови. – Замість ДСТУ 4083-2002: чинний від 2012-12-29. – К: Мінекономрозвитку України, 2013. – 11 с. – (Державний стандарт України).
2. ДСТУ 7146-2010 Уголь каменный и антрацит для бытовых потребителей. Технические условия. – Вместо ДСТУ 7146-2001: действителен от 2010-11-01. – К: Минэкономразвитие Украины, 2011. – 14 с. – (Государственный стандарт Украины).
3. ТУ У 10.1-23472138-245:2012 «Уголь донецкий ПАО «ДТЭК «Октябрьская ЦОФ» для коксования». – Вместо ТУ У 10.1-23472138-245:2007: действителен от 2012-12-01. – Луганск: ТК-92, 2013. – 7 с.
4. ТУ У 10.1-23472138-093:2014 «Уголь донецкий марки А ГП «Свердловантрацит» для слоевого сжигания». – Вместо ТУ У 10.1-23472138-093:2004: действителен от 2014-07-01. – Луганск: ТК-92, 2014. – 8 с.
5. Правила перевозок смерзающихся грузов на железнодорожном транспорте. Утверждены приказом МПС России от 05.04.99 г. № 20Ц. – М: Транспорт, 2000. – 46 с.
6. Кузьмина В.В. Тепловые процессы коксования / В.В. Кузьмина, Т.Е. Никитина. – М.: Металлургиздат, 1987. – 356 с.
7. Филатов Ю.В. Эффективность повышения качества угольных концентратов для коксования / Ю.В. Филатов, М.А. Ильяшов, А.Г. Старовойт и [др.] // Уголь Украины. – 2010. - № 11. – С. 47-50.
8. Назимко Е.И. Повышение требований к качеству угольных концентратов для коксования / Е.И. Назимко, М.А. Ильяшов // Уголь Украины. – 2007. - № 11. – С. 42-43
9. Техничко-економический справочник о работе углеобогатительных фабрик и качестве отгруженных каменных углей и антрацитов по Украине в 1960 г. – Луганск: Укрнииуглеобогашение, 1961. – 253 с.

10. Основные технико-экономические показатели работы углеобогачительных фабрик Украинской и Грузинской ССР за 1965 год. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 1966. – 210 с.

11. Основные технико-экономические показатели работы углеобогачительных фабрик Украинской ССР и Грузинской ССР за 1970 год. – Ворошиловград: Укрнииуглеобогащение, 1971. – 262 с.

12. Технико-экономический анализ работы углеобогачительных фабрик Донбасса и Грузинской ССР за 1975 год. – Ворошиловград: Укрнииуглеобогащение, 1976. – 284 с.

13. Технико-экономический анализ работы углеобогачительных фабрик Украины, Ростовской области и Грузинской ССР за 1976-1980 г.г. – Ворошиловград: Укрнииуглеобогащение, 1981. – 280 с.

14. Технико-экономический анализ работы углеобогачительных фабрик Украинской ССР, Ростовской области и Грузинской ССР за 1985 год. – Ворошиловград: Укрнииуглеобогащение, 1986. – 259 с.

15. Технико-экономический анализ работы углеобогачительных фабрик Украинской ССР, Ростовской области и Грузинской ССР за 1990 год. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 1991. – 192 с.

16. Технико-экономический анализ работы углеобогачительных фабрик Украины за 1995 год. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 1996. – 173 с.

17. Технико-экономический анализ работы углеобогачительных фабрик Украины за 2000 год. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 2001. – 105 с.

18. Технико-экономический анализ работы углеобогачительных фабрик Украины за 2005 год. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2006. – 104 с.

19. Технико-экономический анализ работы углеобогачительных фабрик Украины за 2010 год. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2011. – 124 с.

20. Полулях А.Д. Гидрогрохочение углей / А.Д. Полулях. – Д.: ПП Шевелев Е.А., 2010. – 326 с.

21. Полулях А.Д. Определение коэффициента шламообразования технологической схемы ЦОФ «Червоноградская» / А.Д. Полулях, В.С. Мехальчишин,

П.В. Чигринцев и [др.] // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2009. - Вип. 36(77)-37(78). - С. 161-165.

22. Нищеряков А.Д. Определение коэффициента шламообразования технологической схемы ГОФ «Ровеньковская» / А.Д. Нищеряков, О.И. Бойко, А.М. Берлин и [др.] //Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2010. - Вип. 40(81). - С. 148-154.

23. Полулях А.Д. Определение коэффициента шламообразования технологической схемы ЦОФ «Октябрьская» / А.Д. Полулях, А.О. Пономаренко, Д.А. Полулях и [др.] //Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2011. - Вип. 46(87). - С. 101-106.

24. Курченко И.П. Дополнительные ресурсы угольной продукции / И.П. Курченко // Уголь Украины. – 2006. - № 4. – С. 40-41

25. Пивняк Г.Г. Вторичные ресурсы твердого топлива Украины / Г.Г. Пивняк, П.И. Пилов, А.С. Кирнарский и [др.] // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 1998. - Вип. 1(42). - С. 3-9.

26. Сычев Г.М. Опыт обогащения шламов с целью получения угольных ресурсов для коксования /Г.М. Сычев, С.Л. Иванов, Л.Г. Алексеев и [др.] // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2002. - Вип. 14(55). - С. 27-34.

27. Технично-економический анализ работы углеобогатительных фабрик Украины за 2008 год. – Луганск: ГП «Укрниуглеобогатення», 2009. – 115 с.

28. Справочник по обогащению углей / Под ред. И.С. Благова, А.М. Коткина, Л.С. Зарубина. – М.: Недра, 1984. – 614 с.

29. Фоменко Т.Г. Водно-шламовое хозяйство углеобогатительных фабрик / Т.Г.Фоменко, В.С. Бутовецкий, Е.М. Погарцева. – М.: Недра, 1974. – 272 с.

30. Полулях А.Д. Исследование структурных параметров присадки к питанию дисковых вакуум-фильтров / А.Д. Полулях, В.К. Гарус, С.Н. Ходос, Е.А. Гончаренко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. – 2002. - Вип. 15(56). - С. 116-120.

31. Технологический регламент ОУ по переработке осадка илонакопителя ЦОФ «Дзержинская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2005. – 66 с.

32. Мамренко В.Г. Технология обезвоживания шлама на ленточном фильтр-прессе «Парнаби» / В.Г. Мамренко, Е.П. Слабоспицкий // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2001. - Вип. 13(54). - С. 70-74.

33. Кирнарский А.С. Водно-шламовое хозяйство современных углебогатительных фабрик Германии / А.С. Кирнарский // Уголь Украины. – 2011. - № 2. – С.47-49.

34. Стариков А.П. Прогрессивные технологии обогащения – основа эксплуатационной надежности и эффективности угольного производства / А.П. Стариков, Н.И. Канев, Л.В. Байсаров, А.Н. Редька // Уголь. – 2010. - № 10. – С.52-55.

35. Полулях А.Д. Обезвоживание отходов флотации на фильтр-прессах / А.Д. Полулях // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2011. - Вип.47(88). - С.151-156.

36. ТР 10.1-00185755-004:2007 Технологический регламент обогатительной фабрики (ОФ) «Антрацит» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2007. – 115 с.

37. Технологический регламент ГОФ «Вахрушевская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 2006. – 181 с.

38. Технологический регламент ЦОФ «Дзержинская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2005. – 186 с.

39. ТР 10.1-00185755-010:2008 Технологический регламент центральной обогатительной фабрики (ЦОФ) «Добропольская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2008. – 103 с.

40. ТР 10.1-00185755-015:2011 Технологический регламент центральной обогатительной фабрики (ЦОФ) «Дуванская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2011. – 113 с.

41. ТР 10.1-00185755-003:2009 Технологический регламент групповой обогатительной фабрики (ГОФ) «Известий» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2009. – 119 с.

42. ТР 10.1-00185755-006:2007 Технологический регламент центральной обогатительной фабрики (ЦОФ) «Киевская» АП «Шахта им. Засядько» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2007. – 172 с.

43. Технологический регламент ЦОФ «Колосниковская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2005. – 140 с.

44. Технологические регламенты основных процессов ЦОФ «Комендантская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 2002. – Т.1 – 185 с.

45. ТР 10.1-00185755-009:2008 Технологический регламент групповой обогатительной фабрики (ГОФ) «Краснопартизанская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2008. – 136 с.

46. Технологические регламенты основных процессов ЦОФ «Моспинская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 2000. – Т.1. – 81 с.

47. ТР 10.1-00185755-003:2007 Технологический регламент центральной обогатительной фабрики (ЦОФ) «Нагольчанская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2007. – 146 с.

48. ТР 10.1-00185755-018:2011 Технологический регламент центральной обогатительной фабрики (ЦОФ) «Октябрьская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2011. – 196 с.

49. Технологические регламенты основных процессов ЦОФ «Павлоградская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 1996. – Т.1 – 77 с.

50. Технологический регламент ЦОФ «Павлоградская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 2005. – 264 с.

51. ТР 10.1-00185755-019:2011 Технологический регламент ООО «ЦОФ «Павлоградская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2011. – 219 с.

52. Технологический регламент ЦОФ «Пролетарская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2005. – 162 с.

53. ТР 10.1-00185755-13:2010. Технологический регламент обогатительной установки (ОУ) ООО «Сав-Пласт» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2010. – 187 с.

54. ТР 10.1-00185755-014:2011 Технологический регламент групповой обогатительной фабрики (ГОФ) «Самсоновская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2011. – 96 с.

55. ТР 10.1-00185755-005:2007 Технологический регламент центральной обогатительной фабрики (ЦОФ) «Свердловская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 2007. – 162 с.

56. ТР 10.1-00185755-020:2011 Технологический регламент филиала «Обогатительная фабрика «Свято-Варваринская» ПрАО «ДМЗ» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2011. – 181 с.

57. Технологические регламенты основных процессов ЦОФ «Селидовская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 2004. – 208 с.

58. ТР 10.1-00185755-016:2011 Технологический регламент обогатительной фабрики № 105 / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2011. – 76 с.

59. Технологические регламенты основных процессов ЦОФ «Узловская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 2004. – 208 с.

60. ТР 10.1-00185755-002:2007 Технологический регламент центральной обогатительной фабрики (ЦОФ) «Червоноградская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2007. – 250 с.

61. Технологические регламенты основных процессов ЦОФ «Чумаковская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 2000. – Т.1 – 138 с. (печатн.)

62. ТР 10.1-00185755-008:2008 Технологический регламент групповой обогатительной фабрики (ГОФ) «Центросоюз» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2008. – 197 с.

63. ТР 10.1-00185755-007:2008 Технологический регламент закрытого акционерного общества (ЗАО) «Яновское» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2008. – 143 с.

64. Технологический регламент ОФ ООО «ПК «Донецкое угольное топливо» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 2006. – 203 с.

65. Разработать рекомендации по совершенствованию технологической схемы установки обработки углесодержащих отходов илонакопителя ООО «Экоэнергоресурс»: Отчет НИР / под рук. А.Д. Полуляха. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2012. – 46 с.

66. Выполнить анализ работы технологической схемы УПЦ-1 ОАО «Авдецкий КХЗ»: Отчет о НИР / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2009. – 96 с.

67. Выполнить комплексное опробование, осуществить расчет качественно-количественной и водно-шламовой схемы и разработать усовершенствованную технологическую схему ОАО «Стахановская обогатительная фабрика»: Отчет о НИР / Рук. В.Г. Мамренко. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2011. – 62 с.

68. ТР 10.1-00185755-017:2011 Технологический регламент центральной обогатительной фабрики (ЦОФ) «Пролетарская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2011. – 206 с.

69. Еремеев И.В. Анализ результатов обезвоживания угольных шламов нефлотационной крупности / И.В. Еремеев // Материалы Международной научно-практической конференции «Форум горняков-2012». – Днепропетровск: Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 51(92). – С. 178-184.

70. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии / С.С. Воюцкий. – М.: Химия, 1975. – 512 с.

71. Урьев Н.Б. Высококонтрированные дисперсные системы / Н.Б. Урьев. – М.: Химия, 1980. – 320 с.

72. Рейнер М. Деформация и течение. Введение в реологию / М. Рейнер. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 382 с.

73. Кривощек В.И. Особенности гидродинамики смежных потоков двухфазной среды / В.И. Кривощек // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. -2013. – Вип. 54(95). – С. 80-86.

74. Кривощек В.И. Определение коэффициента диффузии твердых частиц в турбулентном потоке пульпы / В.И. Кривощек // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. -1999. – Вип. 4(45). – С. 77-78.

75. Пальмов В.А. Колебания упруго-пластических тел / В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1976. – 382 с.

76. Гончаревич И.Ф. Виброреология в горном деле / И.Ф. Гончаревич. – М.: Наука, 1977. – 144 с.

77. Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И.Ф. Гончаревич, К.В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 320 с.

78. Руденко И.Ф. Формирование изделий поверхностными виброустройствами / И.Ф. Руденко. – М.: Стройиздат, 1972. – 104 с.

79. Кунное Г.Я. Вибрационная технология бетона / Г.Я. Кунное. – Л. Стройиздат, 1967. – 168 с.

80. Савинов О.А. Вибрационная техника уплотнения и формирования бетонных смесей / О.А. Савинов, Е.В. Литвинович. – Л.: Стройиздат, 1986. – 280 с.

81. Фоменко Т.Г. Отходы флотации и их свойства / Т.Г. Фоменко, А.Ф. Кондратенко. – М.: Недра, 1977. – 125 с.

82. Сансиев В.Г. Обоснование параметров и разработка грохотов с непосредственным возбуждением сит: дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск: ИГТМ АН Украины. – 1985. – 225 с.

83. Гарус В.К. Совершенствование технологии тонкого грохочения илосодержащих угольных шламов Западного Донбасса: дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск: НГАУ. – 2004. – 129 с.

84. Булава Ю.И. Гидрогрохочение и обесшламливание при обогащении углей / Ю.И. Булава, А.Д. Полулях. – Днепропетровск: Полиграфист, 2000. – 175 с.

85. Оборудование для обогащения угля / Под ред. Б.Ф. Братченко. – М.: Недра, 1979. – 335 с.

86. Майдуков Г.Л. Криволинейные грохоты в угольной промышленности / Г.Л. Майдуков. – М.: Недра, 1968. – 104 с.

87. ГОСТ 908/74-71. Сетка щелевая колосниковообразная из проволоки фасонного сечения. – М.: Госкомстандарт, 1971. – 15 с.

88. Полулях А.Д. Современные технологии обогащения угольных шламов / А.Д.Полулях, А.С. Кирнарский, Н.А. Бутенко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2001. - Вип. 11(52). - С. 22-31.

89. Шевченко Г.А. Поличастотные грохоты для разделения тонких сыпучих материалов / Г.А. Шевченко, В.Г. Шевченко, А.Р. Кадыров // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2009. - Вип. 38(79). - С. 44-50.

90. Егурнов А.И. Обоснование и расчет параметров эластичных просеивающих поверхностей для вибрационных грохотов: дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск: НГУ. – 2004. – 125 с.

91. Кофанов А.С. Проблемы и достижения в создании обогатительной техники / А.С. Кофанов // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2000. - Вип. 8(49). - С.19-25.

92. Новые грохоты. Каталог ООО «Луганский машиностроительный завод имени А.Я. Пархоменко. – Луганск: ООО «ЛМЗ им. А.Я. Пархоменко», 2008. – 53 с.

93. Сансиев В.Г. Тонкое грохочение угольных шламов / В.Г. Сансиев // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2000. - Вип. 7(48). - С. 71-75.

94. Богданов А.А. Динамика механического обезвоживания // А.А. Богданов / Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2008. - Вип. 34(75). - С.125-131.

95. Анциферов А.В. Результаты экспериментальных исследований по механическому обезвоживанию мела / А.В. Анциферов, А.А. Богданов // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2007. - Вип. 29(70)-30(71). - С.190-194.

96. Полулях А.Д. Обезвоживание угольного шлама на сите вибрационного грохота / А.Д. Полулях, В.Г. Сансиев, С.Н. Ходос, В.В. Черкасов // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2004. - Вип. 20(61). - С. 110-117.

97. Надутый В.П. Определение условий прохождения жидкости через просеивающую поверхность вибрационного грохота / В.П. Надутый // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2011. - Вип. 44(85). - С. 54-61.

98. Лапшин Е.С. Пути интенсификации обезвоживания минерального сырья на вибрационных грохотах / Е.С. Лапшин, А.И. Шевченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2011. - Вип. 47(88). - С. 144-151.

99. Надутый В.П. Исследование кинетики обезвоживания при вибрационном грохочении / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, А.И. Шевченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2012. - Вип. 49(90). - С. 112-119.

100. Надутый В.П. Математическое моделирование сегрегации при вибрационном грохочении влажного минерального сырья / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 33(74). – С. 43-44.

101. Дуда В.П. Цемент / В.П. Дуда. – М.: Стройиздат, 1981. – 457 с.

102. Сівко В.Й. Перехідні процеси при ущільненні бетонних сумішей / В.Й. Сівко, М.І. Назаренко // Вибрації в техніці і технологіях. – 2004. - № 1(33). – С. 73-77.

103. Barneveld S. Macquarie process rationalization based on neut plant design principles: XIV international cool preparation congress and exhibition / S. Barneveld, C. Hillardi. – Sandton: Sandton Convention Centre. – 2002. – S. 29-35.

104. Rutherford L.J. Mining and preparation considerations to combat problems of boiler slogging and fouling: XIV international cool preparation congress and exhibition / L.J. Rutherford. – Sandton: Sandton Convention Centre. – 2002. – S. 97-106.

105. Sinha V.P. Dekade of coal Washing in India-Challenges and Remedy / V.P. Sinha, V.R. Sinha // 10-th Anniversary International Conference. – New Delhi(India). - 2010. - S. 113-119.

106. Schlebuseh Z. Wurfsiibmaschinen / Z. Schlebuseh // Aufbereitungs-Technik. – 1982. - № 7. – S. 347-352.

107. Kodukula U.B. Yield optimization and Expansion of Arcelor Mittal Prime Processing Plant // U.B. Kadukula, Y. Kennedy, M. Andrade, G. Yessey // 10-th Anniversary International Conference. – New Delhi(India). – 2010. – S. 275-283.

108. Каталог оборудования ООО НПК «ЛЭМЗ-ОГМК». – Луганск: ООО НПК «ЛЭМЗ-ОГМК», 2012. – 51 с.

109. Белянин Г.С. Обогажительная фабрика «Коксовая» - гарантия качества угля для филиала «Бачатский угольный разрез» ООО «УК «Кузбассразрезуголь» / Г.С. Белянин // Уголь. – 2010. - № 6. – С. 58-61.

110. Чумак В.Д. Опыт работы в области грохочения / В.Д. Чумак // Уголь. – 2010. - № 7. – С. 38-41.

111. Еремеев И.В. Физическая модель процесса обезвоживания угольных шламовых суспензий на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности / И.В. Еремеев // Материалы Международной научно-практической конференции «Форум горняков – 2013». – Днепропетровск: Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 54(95). – С. 132-136.

112. Фридман С.Э. Обезвоживание продуктов обогащения / С.Э. Фридман, О.К. Щербаков, А.М. Комлев. – М.: Недра, 1988. – 247 с.

113. Теория и практика обезвоживания угольной мелочи. – М.: Недра, 1966. – 520 с.

114. Полулях А.Д. Принцип подбора параметров вибровозбуждения при обезвоживании угольных суспензий / А.Д. Полулях, И.В. Еремеев, А.Н. Иванченко // Материалы III международной научно-практической конференции «Папушинские чтения». – Донецк: ГВУЗ «ДНТУ», Известия Донецкого горного института. – 2013. - № 2. – С. 184-188.

115. Назимко Е.И. Исследование влияния проницаемости осадков на перемещение влаги в порах / Е.И. Назимко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 51(92). – С.171-177.

116. Полулях А.Д. Физическая модель обезвоживания угольного шлама на сите виброгрохота / А.Д. Полулях, И.В. Еремеев // Вибрации в технике и технологиях. – 2013. - № 3(71). – С. 29-32.

117. Любимов Д.В. Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях / Д.В. Любимов, Г.П. Любимова, А.А. Черепанов. – М.: Физматлит, 2003. – 216 с.

118. Lizuka E. High Capacity Vibrating Screens. Proceedings XVI international Coal Preparation Congress / E. Lizuka, O. Delfim. – Littleton / USA: SME. – 2010. – S. 257-265.

119. Шевченко Г.А. Развитие научных основ процессов вибрационного перемещения и разделения минерального сырья в жидкости на колеблющейся поверхности: дис. ... докт. техн. наук. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – 2011. – 523 с.

120. Бейлин М.И. Теоретические основы процессов обезвоживания углей / М.И.Бейлин. – М.: Недра, 1969. – 240 с.

121. Гирчидов А.Д. Два подхода к описанию турбулентной диффузии / А.Д. Гирчидов // Гидравлика и гидромеханика. – 1973. – Вып. 17. – С. 24-30.

122. Шрайбер А.А. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным материалом / А.А. Шрайбер, В.Н. Милютин, В.П. Яценко. – К.: Наукова думка, 1980. – 252 с.

123. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий / В.А. Жужиков. – М.: Химия, 1980. – 398 с.

124. Keles S. Development of the Centrifugal Dewatering Technology. Proceedings XVI international Coal Preparation Congress / S. Keles, T. Egteç, P. Bethell. – Littleton / USA: SME. – 2010. – S. 488-495.

125. Назимко Е.И. Моделирование процесса удаления влаги из осадков / Е.И. Назимко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 45(86). – С. 153-158.

126. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы (Движение жидкости с изменением расхода вдоль пути) / Г.А. Петров. - Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1964. - 224 с.

127. Ерошенко В.М. Гидродинамика и теплообмен на проницаемых поверхностях / В.М. Ерошенко, Л.И. Зайчик. - М.: Наука, 1984. - 275 с.

128. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. - М.: Наука, 1987. - 840 с.
129. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. - М.: Наука, 1988. - 736 с.
130. Сансиев В.Г. Стационарный поток вязкой жидкости с медленно меняющейся глубиной / В.Г. Сансиев // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2000. - Вип. 9(50). - С. 14-21.
131. Сансиев В.Г. Течение жидкости через щель колосникового сита тонкого грохочения / В.Г. Сансиев // Обогащение полезных ископаемых: наук.-техн. сб. - 2004. - Вып. 20(61). - С. 88-94.
132. Найфе А. Методы возмущений / А. Найфе. - М.: Мир, 1976. - 456 с.
133. Полулях А.Д. Определение условий перехода вязкой суспензии в вязкопластичный материал на сите виброгрохота / А.Д. Полулях, И.В. Еремеев // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 51(92). – С.74-82.
134. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 216 с.
135. Ричардсон Э. Динамика реальных жидкостей / Э. Ричардсон. – М.: Мир, 1965. – 328 с.
136. Yoon R. Development of Advanced Fine Coal Dewatering Technologies. Proceedings XV international Coal Preparation Congress / R. Yoon, K. Eryadin, J Zhang. – Pikin / China: China University of Mining and Technology Press. – 2007. – S. 575-583.
137. Allen B. Effect of Asphalt Emulgion in Vacuum Filtration Dewatering of Fine Coal. Proceedings XV international Coal Preparation Congress / B. Allen, R. Honaker, D. Tao. – Pikin / China: China University of Mining and Technology Press. – 2007. – S. 562-574.
138. Ржаницын А.Р. Строительная механика / А.Р. Ржаницын. – М.: Высш. шк., 1991. – 439 с.
139. Шламы, их улавливание и обезвоживание / Т.Г. Фоменко, И.С. Благгов, А.М. Коткин. В.С. Бутовецкий. – М.: Недра, 1968. – 203 с.

140. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
141. Овчинников П.Ф. Виброреология / П.Ф. Овчинников. – Киев: Наук. думка, 1983. – 272 с.
142. Шевченко А.И. Влияние импульсного воздействия акустических колебаний на эффективность обезвоживания минерального сырья / А.И. Шевченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 52(93). – С.106-114.
143. Блехман И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964. – 412 с.
144. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний / Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1971. – 240 с.
145. Шевченко А.И. Интенсификация разделения по крупности и обезвоживание минерального сырья при новом способе виброударного грохочения / А.И. Шевченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 54(95). – С. 157-167.
146. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
147. Клешнин А.А. Исследование процесса фильтрования угольных шламов различного гранулометрического состава: дис. ... канд. техн. наук. - Донецк: ДПИ. – 1974. – 148 с.
148. Анисимов Н.Т. Совершенствование технологических схем на основе исследований свойств шламов / Н.Т. Анисимов, З.В. Багмут // Уголь Украины. – 2003. - № 6. – С. 45-46.
149. Полулях А.Д. Применение ударной нагрузки для очистки щелей сит от гидратной составляющей / А.Д. Полулях, В.Г. Сансиев, В.К. Гарус // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2003. – Вип. 17(58). – С. 33-38.
150. Полулях А.Д. Изменение структурно-механических свойств угольного шлама в процессе обезвоживания на сите грохота / А.Д. Полулях, И.В.Еремеев // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2013. - Вип. 52(93). - С. 96-106.

151. Еремеев И.В. Анализ уравнения скорости уплотнения слоя материала на вибрирующем сите / И.В. Еремеев // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 53(94). – С. 148-153

152. Polulyakh A. Determination of Coal Slurry Thickening Rate At Dewatering on Vibrating Screen. Proceedings XVII International Coal Preparation Congress/ A. Polulyakh, D. Polulyakh, I. Eremejev, V. Garus . – Istanbul/Turkey: edited by. - 2013. – P. 421-424.

153. Полулях А.Д. Математическое моделирование виброуплотнения угольного шлама при обезвоживании на вибрационном грохоте / А.Д. Полулях, Д.А. Полулях, И.В. Еремеев // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб.- 2013. – Вип. № 55(96). – С. 78-86.

154. Полулях А.Д. Математическое описание процесса виброуплотнения угольного шлама нефлотационной крупности при обезвоживании на вибрационном грохоте /А.Д. Полулях, Д.А. Полулях, И.В. Еремеев // Вибрации в технике и технологиях. – 2013. - № 3(71). – С. 33-40.

155. Рафалес-Ламарка Э.Э. Инструкция по планированию экспериментов / Э.Э. Рафалес-Ламарка. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 1959. – 102 с.

156. Шупов Л.П. Прикладные математические методы в обогащении полезных ископаемых / Л.П. Шупов. – М.: Недра, 1972. – 170 с.

157. Рекомендации по применению математического метода оптимизации технологических схем обогащения угля с использованием ЭВМ. – Ворошиловград: Укрнииуглеобогащение, 1972. – 468 с.

158. Полулях А.Д. Исследование процесса обезвоживания угольных шламовых суспензий на лабораторной модели высокочастотного грохота с разнонаклонными участками сит / А.Д. Полулях, Д.А. Полулях, И.В. Еремеев // Материалы XVI международной научно-практической конференции по обогащению полезных ископаемых. – Бердянск: Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 53(94). – С. 138-148.

159. Кофанов А.С. Опыт Гипромашуглеобогащения в разработке высокочастотных грохотов / А.С. Кофанов, В.Ф. Чумак // Уголь Украины. – 2005. - № 12. – С. 38-40.

160. Полулях А.Д. Технологические испытания устройства УРШ-2,5 на операции обезвоживания шламовых продуктов / А.Д. Полулях, В.В. Черкасов // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. - 2002. - Вип. 14(55). - С. 58-62.

161. Егурнов А.И. Устройство для разделения шламов УРШ-2,5 / А.И. Егурнов, И.П. Курченко, А.Д. Полулях, В.В. Черкасов // Вибрации в технике и технологиях. – 2002. - № 5(26). – С. 35-36.

162. Створити високочастотний грохот для розділення шламів за крупністю: Звіт про НДР, номер держреєстрації 0103U007165 / Кер. О.Д. Полулях, І.Д. Пейчев. – Луганськ: Укрндівуглебагачення, 2003. – 43 с.

163. Технологический регламент ЦОФ «Октябрьская» / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2004. – 181 с.

164. Приказ Министерства энергетики и топливной промышленности Украины от 16.09.11 г. № 509.

165. Полулях А.Д. Технологические регламенты углеобогажительных фабрик: Справочно-информационное пособие / А.Д. Полулях. – Д.: НГУ, 2002. – 855 с.

166. Технично-економический анализ работы углеобогажительных фабрик Украины за 2004 год. – Луганск: Укрнииуглеобогащение, 2005. – 105 с.

167. Разработать технологию обезвоживания угольных шламовых суспензий на высокочастотных грохотах: Отчет о НИР, номер госрегистрации 0113U002351 / Рук. А.Д. Полулях. – Луганск: ГП «Укрнииуглеобогащение», 2012. – 105 с.

168. Еремеев И.В. Снижение потерь угля с отходами тяжелосреднего обогащения на ЦОФ «Гуковская» / И.В. Еремеев // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 52(93). – С. 59-62.

169. Форма № 6 ТЭЖ за 2012 год. – Гуково: ЦОФ «Гуковская», 2013. – 2 с.

170. Берлин А.М. Особенности обработки угольного шлама на ЦОФ «Гуковская» / А.М. Берлин, И.В. Еремеев // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 54(95). – С. 137-144.

171. Полулях А.Д. Сравнительные промышленные испытания технологии обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на грохотах ГВЧ-41 и ГВЧ-41М в условиях ЦОФ «Гуковская» / А.Д. Полулях, А.М. Берлин, И.В. Еремеев // Материалы XVII международной научно-практической конференции по обогащению полезных ископаемых. – Бердянск: Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2014. - № 56(97). – С. 169-174.

172. Полулях А.Д. Особенности применения эластичных обезвоживающих поверхностей на высокочастотных грохотах / А.Д. Полулях, А.И. Егурнов, И.В. Еремеев // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип.54(95). – С. 127-131.

173. Полулях А.Д. Особенности обогащения рядового антрацита на ЦОФ «Гуковская» / А.Д. Полулях, И.В. Еремеев // Уголь Украины. – 2014. - № 1. – С.41-44.

174. Полулях А.Д. Течение водоугольной суспензии по ситовой поверхности / А.Д. Полулях, В.Г. Сансиев, И.В. Еремеев // Уголь Украины. – 2013. - №7. – С. 46-49.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт и протокол приемочных испытаний грохота ГісМх-2,5х1

УТВЕРЖДАЮ

Директор Государственного  
департаamenta угольной промышленности  
Минтопэнерго Украины



Н.И. Красько

2003 г.

## АКТ приемочных испытаний

г. Белицкое

18 марта 2003 г.

### Приемочная комиссия в составе:

- |                  |  |
|------------------|--|
| Протасов А.В.    | технический директор ГХК "Донбассуголеобогащение"<br>(председатель);   |
| Полулях А.Д.     | начальник Приднепровской лаборатории института "Укрниуголеобогащение" (заместитель председателя);                |
| Базарный С.Н.    | вице-президент ЗАО "АНА-ТЕМС" (по согласованию);   |
| Мехальчишин В.С. | ведущий научный сотрудник института "Укрниуголеобогащение";  |
| Кочешков Б.А.    | главный конструктор проектов института "Укрниуголеобогащение";   |
| Евтушенко С.В.   | заместитель главного инженера ЦОФ "Октябрьская";   |
| Пушкарев В.Н.    | начальник основного производства ЦОФ "Октябрьская";  |
| Ермоленко Н.В.   | заведующий санитарно-гигиенической отделом Добропольской санитарно-эпидемиологической станции (по согласованию); |
| Гайдарь Г.Е.     | председатель Совета профкомов углеобогащения ЦК профсоюза работников угольной промышленности (по согласованию);  |
| Заблоцкий В.А.   | начальник Донецкой государственной инспекции горного и энерго-механического контроля (по согласованию),          |

назначенная приказом директора Государственного департаamenta угольной промышленности Минтопэнерго Украины Н. Красько от 18.02.2003 г. №1/Д, рассмотрела результаты приемочных испытаний опытного образца грохота ГСМх-2,5×1, выполненных в соответствии с утвержденной программой и методикой.

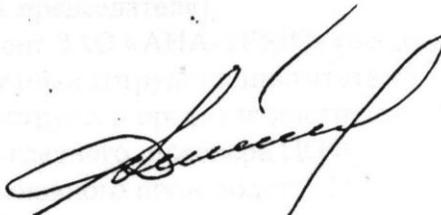
Комиссия считает, что разработанный грохот ГСМх-2,5х1 выдержал приемочные испытания и предлагает:

1. Грохот ГСМх-2,5х1 рекомендовать к промышленному производству с 2004 года.
2. Проект технических условий на грохот ГСМх-2,5х1 считать согласованным.

Протокол приемочных испытаний от «18» марта 2003 г.

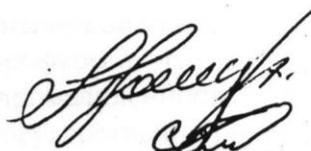
прилагается.

Председатель  
приемочной комиссии



А.В.Протасов

Заместитель председателя  
приемочной комиссии



А.Д.Полулях

Члены комиссии:



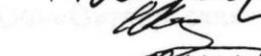
С.Н.Базарный



В.С.Мехальчишин



Б.А.Кочешков



С.В.Евтушенко



В.Н.Пушкарев



Н.В.Ермоленко



Г.Е.Гайдарь



В.А.Заблочкин

## ПРОТОКОЛ

### приемочных испытаний грохота ГСМх-2,5х1

г.Белицкое

18 марта 2003 г.

Приемная комиссия в составе:

- Протасов А.В.            технический директор ГХК «Донбассуглеобогащение»  
(председатель);
- Полулях А.Д.            начальник Приднепровской лаборатории института  
(заместитель председателя);
- Базарный С.Н.           вице-президент ЗАО «АНА-ТЕМС» (по согласованию);
- Мехальчишин В.С.       ведущий научный сотрудник института «УкрНИИУглеобогащение»;
- Кочешков Б.А.           главный конструктор проектов института «УкрНИИУглеобогащение»;
- Евтушенко С.В.          заместитель главного инженера ЦОФ «Октябрьская»;
- Пушкарев В.Н.           начальник основного производства ЦОФ «Октябрьская»;
- Ермоленко Н.В.          заведующий санитарно-гигиеническим отделом Добропольской  
санитарно-эпидемиологической станции (по согласованию);
- Гайдарь Г.Е.            председатель Совета профкомов углеобогащения ЦК профсоюза  
работников угольной промышленности (по согласованию);
- Заблоцкий В.А.          начальник Донецкой государственной инспекции горного и  
энерго-механического контроля (по согласованию),

назначенная приказом директора Государственного департамента угольной промышленности Минтопэнерго Украины № 1/Д от 18 февраля 2003 г. провела приемочные испытания опытного образца грохота ГСМх-2,5х1 на ЦОФ «Октябрьская» ГХК «Донбассуглеобогащение» в период с 10 по 20 марта 2003 года.

В результате испытаний установлено следующее:

**РАЗДЕЛ 1.** Объект испытаний, назначение, техническая характеристика, намеченная область применения.

Объектом испытаний является опытный образец грохота ГСМх-2,5х1.

Грохот предназначен для обезвоживания и классификации шламовых продуктов по граничной крупности разделения от 0,2 до 0,5 мм и выше на действующих, реконструируемых, вновь строящихся углеобогащительных фабриках и комплексах для переработки шламов из илонакопителей.

Техническая характеристика испытываемого грохота ГСМх-2,5х1 приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1 - Техническая характеристика грохота ГСМх-2,5х1

№№ п.п.	Наименование показателей	Величина
1	2	3
1	<b>Показатели назначения</b>	
1.1	Удельная производительность по твердому, т/ч·м <sup>2</sup> , не более: при граничной крупности разделения 0,2 мм при граничной крупности разделения 0,5 мм	3 6
1.2	Крупность исходного продукта, мм	0-3
1.3	Размеры просеивающей поверхности, мм, не менее ширина длина	1000 2500
1.4	Ширина щели просеивающей поверхности, мм	0,2-0,5

Продолжение табл. 1.1

1	2	3
1.5	Площадь просеивающей поверхности, м <sup>2</sup> , не менее	2,5
1.6	Количество секций просеивающей поверхности (по длине грохота), шт.	3
1.7	Угол наклона секций просеивающей поверхности к горизонту: секция загрузочная секция промежуточная секция разгрузочная	0°; +3°; +6° 0° -3°; 0°; +3°
1.8	Амплитуда колебаний, мм	0,5-2
1.9	Частота колебаний, мин. <sup>-1</sup>	1000; 1500; 1750
1.10	Угол направления колебаний (к горизонту)	40°; 45°; 50°
1.11	Угол наклона грохота к горизонту	0°
1.12	Эффективность грохочения, %, не менее: при граничной крупности разделения 0,2 мм при граничной крупности разделения 0,5 мм	55 75
1.13	Влажность обезвоженного продукта, %	21-26
1.14	Габаритные размеры, мм, не более: длина ширина высота	2850 2100 1650
1.15	Номинальная мощность электропривода, кВт, не более	2,5x2
1.16	Амплитудное значение виброускорения, м.с. <sup>-2</sup>	16,8-67,1
<b>2</b>	<b>Показатели надежности</b>	
2.1	Коэффициент времени восстановления	0,05
2.2	Наработка на отказ, ч, не менее	3000
2.3	Средний ресурс до капитального ремонта, ч, не менее	24000
<b>3</b>	<b>Показатели экономного использования энергии и материалов</b>	
3.1	Масса, кг, не более	2200
3.2	Удельная масса, кг/м <sup>2</sup> ч, не более	0,037
3.3	Удельный расход электроэнергии, МДж/т, не более	1,2

**РАЗДЕЛ 2.** Цель, задачи, объем испытаний

Основной целью приемочных испытаний опытного образца является определение возможности постановки изделия на производство.

Основными задачами приемочных испытаний являются:

- 1) проверка соответствия изделия утвержденному техническому заданию;
- 2) проверка соответствия изделия требованиям стандартов и конструкторской документации;
- 3) проверка соответствия изделия требованиям безопасности, санитарно-гигиенических норм;
- 4) определение соответствия реальных факторов условий испытаний требованиям технического задания, проверка соответствия состава и комплектности изделия;
- 5) проверка работоспособности изделия в реальных условиях эксплуатации (обеспечение стабильности работы, соответствия требованиям санитарно-гигиенических норм и т.п.);

- 6) определение фактических показателей качества изделия и возможности его производства;
- 7) проверка удобства обслуживания и проведения ремонта;
- 8) выявление эксплуатационных и конструктивных недостатков;
- 9) целесообразность промышленного производства грохота.

**РАЗДЕЛ 3.** Промышленные и технологические условия испытаний опытного образца грохота ГСМх-2,5х1

3.1. Условия и место проведения приемочных испытаний соответствует технической характеристике грохота ГСМх-2,5х1 и обеспечивает возможность проверки технологических и эксплуатационных характеристик.

3.2. Опытный образец грохота ГСМх-2,5х1 смонтирован на отметке +29,4 м главного корпуса ЦОФ «Октябрьская» ГХК «Донбассуглеобогащение». Исходным питанием грохота является крупнозернистый шлам (сгущенный продукт гидроциклонов ГЦ-1000).

**РАЗДЕЛ 4.** Данные наблюдений за эксплуатацией опытного образца

4.1. Испытания опытного образца грохота проводились по программе и методике приемочных испытаний ГСМх-2,5х1.00.000.ПМ1. Во время проведения приемочных испытаний велись записи данных наблюдений в «Журнал записи данных наблюдений».

4.2. Приемочным испытаниям грохота предшествовал комплекс работ по наладке и регулировке в соответствии с «Руководством по эксплуатации ГСМх-2,5х1.00.000.РЭ».

4.3. При испытаниях грохот работал устойчиво, в заданном режиме, процесс обезвоживания и классификации протекал стабильно, не нарушая технологический цикл работы фабрики в целом.

Грохот находился в эксплуатации более 480 часов.

4.4. Наблюдения и результаты проверки показали, что конструкция грохота выполнена в соответствии с требованиями «Правил безопасности на предприятиях по обогащению и брикетированию углей (сланцев)», действующими стандартами, регламентирующими выполнение требований техники безопасности и эксплуатации грохота.

Проверка соответствия грохота требованиям безопасности проводилась методом измерений и визуального контроля.

**РАЗДЕЛ 5.** Результаты измерений, проведенных в эксплуатационных условиях

5.1. В период с июля 2002 г. по март 2003 г. в присутствии членов приемочной комиссии было проведено опробование грохота и определены его технологические показатели, приведенные в табл.5.1.

В качестве рабочей поверхности применялись резиновые сита ЗАО «АНА-ТЕМС» и шпальтовые сита со щелью 0,5 мм.

5.2. Частота колебаний сита составила 1000, 1500, 1750 мин.<sup>-1</sup>, амплитуда колебаний изменялась в диапазоне от 0,5 до 2 мм.

В процессе выполнения пуско-наладочных работ установлено, что лучшие технологические показатели работы грохота достигнуты при следующих вариантах параметров колебаний сита:

- 1) частота 1750 мин.<sup>-1</sup>, амплитуда 0,5 мм;
- 2) частота 1500 мин.<sup>-1</sup>, амплитуда 0,6 мм.

Технологические показатели работы грохота (эффективность классификации и влажность надрешетного продукта) практически не изменялись при этих значениях параметров колебаний просеивающей поверхности.

Производительность грохота составила 5-17,6 т/ч, удельная производительность 1,6-5,2 т/ч·м<sup>2</sup>.

Таблица 5.1 - Результаты технологических испытаний опытного образца грохота ГСМх-2,5х1 на ЦОФ «Октябрьская»  
ГХК «Донбассуглеобогащение»

№№ п.п.	Дата	Шахта-поставщик рядового угля	Размер отвер- стой просеи- вающей по- верхности, мм	Исходный продукт		Удельная производи- тельность, т/ч·м <sup>2</sup>	Расход воды на отмывку шлама, м <sup>3</sup> /ч	Удельный расход воды на отмывку шлама, м <sup>3</sup> /т
				Производи- тельность, т/ч	Содержание твердого, г/л			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
В режиме обезвоживания шлама								
1	19.07.02 г.	Новодонецкая	0,5	13,0	450	5,2	-	-
2	19.07.02 г.	Белозерская	0,5	17,6	460	7,0	-	-
3	19.07.02 г.	Самарская	0,5	16,7	480	6,7	-	-
4	18.08.02 г.	Юбилейная	0,5	15,0	400	6,0	-	-
5	18.09.02 г.	Сташкова	0,5	13,3	400	5,3	-	-
В режиме классификации шлама								
6	19.07.02 г.	Новодонецкая	0,5	6,0	400	2,4	1,2	0,2
7	19.07.02 г.	Белозерская	0,5	5,0	390	2,0	1,5	0,3
8	19.07.02 г.	Самарская	0,5	5,4	450	2,2	1,1	0,2
9	18.08.02 г.	Юбилейная	0,5	4,0	420	1,6	0,8	0,2
10	18.09.02 г.	Сташкова	0,5	5,0	380	2,0	1,5	0,3

Продолжение табл. 5.1

№№ п.п.	Дата	Шахта-поставщик рядового угля	Гранулометрический состав, %													Выход к продук- ту, %							
			Исходный продукт																				
			Классы, мм																				
			+3	1-3	0,5-1	0,25-0,5	0,16-0,25	0,08-0,16	14	15	16	17											
1	2	3	10	11	12	13	14	15	16	17													
В режиме обезвоживания шлама																							
1	19.07.02 г.	Новодонецкая	-	6,4	25,2	37,4	10,6	12,6	7,8	100,0													
2	19.07.02 г.	Белозерская	-	-	11,8	44,2	11,8	20,4	11,8	100,0													
3	19.07.02 г.	Самарская	-	5,1	36,4	40,0	6,6	6,8	5,1	100,0													
4	18.08.02 г.	Юбилейная	-	13,1	23,5	30,9	9,3	10,8	12,4	100,0													
5	18.09.02 г.	Сташкова	0,7	3,7	36,7	27,4	8,1	12,2	11,2	100,0													
В режиме классификации шлама																							
6	19.07.02 г.	Новодонецкая	-	6,4	24,2	37,4	11,6	12,6	7,8	100,0													
7	19.07.02 г.	Белозерская	-	-	15,0	42,3	13,9	19,6	9,2	100,0													
8	19.07.02 г.	Самарская	-	4,0	35,4	40,3	6,7	8,0	5,6	100,0													
9	18.08.02 г.	Юбилейная	-	12,1	22,5	31,8	10,5	12,8	10,3	100,0													
10	18.09.02 г.	Сташкова	0,7	2,4	35,4	29,3	9,2	12,1	10,9	100,0													

Продолжение табл. 5.1

№№ п.п.	Дата	Шахта- поставщик рядового угля	Гранулометрический состав, %											
			Надрешетный продукт											
			Классы, мм											
			+3	1-3	0,5-1	0,25-0,5	0,16-0,25	0,08-0,16	-0,08	к про- дукту	Выход, %	к ис- ход- ному		
1	2	3	18	19	20	21	22	23	24	25	26			
В режиме обезжелезивания шлама														
1	19.07.02 г.	Новодонецкая	-	9,8	33,7	31,6	9,2	10,7	5,0	100,0	54,3			
2	19.07.02 г.	Белозерская	-	-	17,1	45,5	13,8	16,8	6,8	100,0	51,0			
3	19.07.02 г.	Самарская	-	6,5	46,9	31,3	5,8	4,9	4,6	100,0	72,0			
4	18.08.02 г.	Юбилейная	-	19,6	30,7	27,2	6,3	8,6	7,6	100,0	54,4			
5	18.09.02 г.	Сташкова	0,9	4,6	45,2	27,0	7,0	8,4	6,9	100,0	75,0			
В режиме классификации шлама														
6	19.07.02 г.	Новодонецкая	-	13,6	47,9	17,1	7,9	8,5	5,0	100,0	47,0			
7	19.07.02 г.	Белозерская	-	-	40,2	27,3	11,4	14,6	6,5	100,0	36,0			
8	19.07.02 г.	Самарская	-	7,6	64,8	15,3	4,2	4,1	4,0	100,0	52,5			
9	18.08.02 г.	Юбилейная	-	25,7	44,7	13,3	5,2	6,1	5,0	100,0	47,0			
10	18.09.02 г.	Сташкова	1,4	4,6	65,7	15,0	4,0	5,1	4,2	100,0	51,6			

Продолжение табл. 5.1

№№ п.п.	Дата	Шахта-поставщик рядового угля	Гранулометрический состав, %										Влажность надре-шного про-дукта, %	
			Подрешетный продукт					Выход, %		Содержание кл.0,5 мм в надре-шном продукте, %	Эффек-тивность грохо-чения, %	Влаж-ность надре-шного про-дукта, %		
			Классы, мм					к про-дукту	к ис-ход-ному					
			+3	1-3	0,5-1	0,25-0,5	0,16-0,25							0,08-0,16
1	19.07.02	3	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
В режиме обезвоживания шлама														
1	19.07.02 г.	Новодонецкая	-	2,4	15,1	44,2	12,2	14,9	11,2	100,0	45,7	56,5	40,0	23,6
2	19.07.02 г.	Белозерская	-	-	6,3	42,9	9,8	24,1	16,9	100,0	49,0	82,9	35,1	24,3
3	19.07.02 г.	Самарская	-	1,4	9,3	62,5	8,6	11,8	6,4	100,0	28,0	46,6	38,1	24,9
4	18.08.02 г.	Юбилейная	-	5,3	14,9	35,3	12,9	13,4	18,2	100,0	45,6	49,7	43,0	25,8
5	18.09.02 г.	Сташкова	-	1,2	1,2	28,4	11,6	23,6	24,0	100,0	25,0	49,3	32,1	25,4
В режиме классификации шлама														
6	19.07.02 г.	Новодонецкая	-	-	3,2	55,5	14,9	16,2	10,2	100,0	53,0	38,5	72,4	38,5
7	19.07.02 г.	Белозерская	-	-	0,8	50,8	15,3	22,3	10,8	100,0	64,0	59,8	73,7	35,0
8	19.07.02 г.	Самарская	-	-	2,9	68,0	9,5	12,2	7,4	100,0	47,5	27,6	75,2	36,0
9	18.08.02 г.	Юбилейная	-	-	2,8	48,3	15,3	18,7	14,9	100,0	53,0	29,6	77,8	40,0
10	18.09.02 г.	Сташкова	-	-	3,1	44,6	14,7	19,6	18,0	100,0	48,4	28,3	75,3	35,0

Начальник основного производства  
ЦОФ «Октябрьская»



В.Н.Пушкарев

Ведущий научный сотрудник института  
«УкрНИИУглубогащение», к.т.н.



В.С.Мехальчишин

Инженер



С.Н.Ходос

Инженер

И.В.Еремеев

Исходный продукт (сгущенный шлам гидроциклонов ГЦ-1000) являлся трудно грохотимым материалом, так как при ширине щели сита 0,5 мм содержание зерен класса 0,25-0,5 мм близких по размерам к граничной крупности, разделения 0,5 мм, было значительным и составило 29,3-44,2%. При нагрузке 13,0-17,6 т/ч влажность надрешетного продукта составила 23,6-25,8%.

При уменьшении нагрузки на грохот до 6 т/ч и подаче дополнительного количества воды на отмывку шлама в пределах 0,2-0,3 м<sup>3</sup> произошло значительное улучшение качества разделения шлама по крупности (эффективность грохочения составила 72,4-77,8%). Однако, при этих условиях увеличилась влажность надрешетного продукта, которая составила 35-40%.

Анализ приведенных данных показывает, что грохот ГСМх-2,5х1 наиболее эффективно может быть использован на операции обезвоживания шлама. Эффективная классификация шлама возможна только при малой производительности (5-6 т/ч) и подаче дополнительного количества технической воды (0,2-0,3 м<sup>3</sup>/т) для отмывки тонких частиц, что приводит к увеличению влажности надрешетного продукта до 35-40%. Таким образом, грохот не может при производительности до 15 т/ч одновременно обеспечить требуемую высокую эффективность классификации и влажность обезвоженного надрешетного продукта.

Следовательно использование грохота наиболее целесообразно на операции обезвоживания шламовых продуктов.

5.3. Во время испытаний были проведены измерения, касающиеся техники безопасности эксплуатации грохота ГСМх-2,5х1 и охраны труда.

Корректированный уровень звуковой мощности грохота ГСМх-2,5х1 при работе на холостом ходу составляет 98 дБА, что ниже допустимого уровня - 115 дБА по ГОСТ 12.2.105-84. Подача нагрузки (жидкой гидропульпы) не создает дополнительных шумовых помех. Замер шумовых характеристик при работе грохота ГСМх-2,5х1 под нагрузкой, из-за влияния шумовых помех расположенных на отм.+29,4 м двух грохотов ГИСЛ-62 и другого работающего оборудования, является нецелесообразным.

Среднее значение амплитуд виброперемещений корпуса в вертикальном и горизонтальном направлениях составили соответственно 1,65 и 1,25 мм. Амплитудное значение динамических нагрузок от грохота на строительные конструкции в вертикальном и горизонтальном направлениях составили соответственно 0,5 и 0,17 кН, что не превышает максимально допустимое значение этого параметра 10 кН.

Защитное заземление электрооборудования выполнено в соответствии с ГОСТ 122.007.0-75. Величина сопротивления между заземляющим болтом электрооборудования и каждой металлической не токопроводящей частью грохота, которая может оказаться под напряжением; составила 0,05 Ом.

Концентрация пыли при эксплуатации грохота составляет от 1,0 до 3,0 мг/м<sup>3</sup> при ПДУ - 4,0 мг/м<sup>3</sup>.

Вращающиеся части грохота защищены ограждением.

Температура подшипниковых узлов вибратора и переходников не превышала 72°.

5.4. Грохот отличается простотой конструкции. обеспечивается свободный доступ к обслуживаемым узлам. Контроль технического состояния не вызывает затруднений.

### **РАЗДЕЛ 6. Техничко-экономические показатели эксплуатации**

Результаты приемочных испытаний разработанного грохота показали, что факторами экономической эффективности являются:

- снижение на 4-6% влажности обезвоженного шлама по сравнению с влажностью этого продукта достигнутой на традиционно используемых на этой операции грохотах типа ГИСЛ или ГИСТ;

- снижение капитальных и эксплуатационных затрат при использовании нового грохота взамен применяемых для обезвоживания шлама грохотов большего типоразмера типа (ГИСЛ -42, ГИСЛ-62У, ВП-2).

Годовой экономический эффект от использования грохота будет уточнен по результатам его промышленной эксплуатации на не менее чем трех фабриках.

### **РАЗДЕЛ 7. Проверка соответствия опытного образца техническому заданию**

Результаты проверки соответствия опытного образца грохота техническому заданию приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1 - Карта результатов испытаний

№№ п.п.	Наименование показателей	По техническому заданию	Фактически при испытаниях
1	2	3	4
1	<b>Показатели назначения</b>		
1.1	Удельная производительность по твердому, т/ч·м <sup>2</sup> , не более: при граничной крупности разделения 0,2 мм при граничной крупности разделения 0,5 мм	3 6 -	- 6,0 (режим обезвоживания) 2,0 (режим классификации)
1.2	Крупность исходного продукта, мм	0-3	0-3
1.3	Размеры просеивающей поверхности, мм, не менее ширина длина	1000 2500	1000 2500
1.4	Ширина щели просеивающей поверхности, мм	0,2-0,5	0,5
1.5	Площадь просеивающей поверхности, м <sup>2</sup> , не менее	2,5	2,5
1.6	Количество секций просеивающей поверхности (по длине грохота), шт.	3	3
1.7	Угол наклона секций просеивающей поверхности к горизонту: секция загрузочная секция промежуточная секция разгрузочная	0°; +3°; +6° 0° -3°; 0°; +3°	0° 0° 3°
1.8	Амплитуда колебаний, мм	0,5-2	0,6
1.9	Частота колебаний, мин. <sup>-1</sup>	1000; 1500; 1750	1500
1.10	Угол направления колебаний (к горизонту)	40°; 45°; 50°	45°

Продолжение табл. 7.1

1	2	3	4
1.11	Угол наклона грохота к горизонту	0°	0°
1.12	Эффективность грохочения, %, не менее: при граничной крупности разделения 0,2 мм при граничной крупности разделения 0,5 мм	55 75	- 37,7 (режим обезвоживания) 75,0 (режим классификации)
1.13	Влажность обезвоженного продукта, %	21-26	23,6-25,8 (режим обезвоживания) 35,0-40,0 (режим классификации)
1.14	Габаритные размеры, мм, не более: длина ширина высота	2850 2100 1650	2760 1750 1600
1.15	Номинальная мощность электропривода, кВт, не более	2,5x2	2,0x2
1.16	Амплитудное значение виброускорения, м.с. <sup>-2</sup>	16,8-67,1	20,2
<b>2</b>	<b>Показатели надежности</b>		
2.1	Коэффициент времени восстановления	0,05	xx
2.2	Наработка на отказ, ч, не менее	3000	xx
2.3	Средний ресурс до капитального ремонта, ч, не менее	24000	xx
<b>3</b>	<b>Показатели экономного использования энергии и материалов</b>		
3.1	Масса, кг, не более	2200	2040
3.2	Удельная масса, кг/м <sup>2</sup> ·ч, не более	0,037	0,034
3.3	Удельный расход электроэнергии, МДж/т, не более	1,2	0,96

<sup>xx</sup>Численное значение показателей надежности грохота должны быть установлены при дальнейшей его промышленной эксплуатации.

**РАЗДЕЛ 8.** Конструктивные и эксплуатационные недостатки. Предложения по их устранению

По результатам приемочных испытаний комиссия считает необходимым при корректировке рабочей документации для промышленного производства грохота ГІсМх-2,5х1 выполнить следующие работы.

- 8.1. Вариант установки вибраторов в нижнем положении исключить.
- 8.2. Частота колебаний сита должна составить 1500 мин.<sup>-1</sup>.
- 8.3. Первую и вторую секцию сит установить горизонтально, третью секцию в месте надрешетного продукта - под углом - 6 град.
- 8.4. увеличить ширину короба до 1250 мм (под 4 секции резиновых сит ЗАО «АНА-ТЕМС» по ширине просеивающей поверхности).
- 8.5. Предусмотреть возможность экипировки рабочей поверхности грохота резиновыми и шпальтовыми металлическими ситами.
- 8.6. Угол направления вибраций постоянный и должен составить 45 град.
- 8.7. Переходные подшипниковые блоки исключить.

### **РАЗДЕЛ 9.** Выводы и предложения

Приемочные испытания опытного образца грохота ГІсМх-2,5х1 проведены в полном объеме и в соответствии с программой и методикой приемочных испытаний ГІсМх-2,5х1.00.000 ПМ1.

#### 9.1. В ы в о д ы

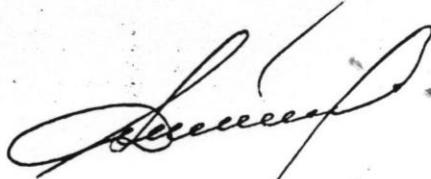
- 9.1.1. Грохот ГІсМх-2,5х1.00.000 ПМ1 соответствует техническому заданию.
- 9.1.2. Испытаниями подтверждены технологические показатели работы грохота ГІсМх-2,5х1, его технико-экономические параметры, заложенные в техническом задании и конструкторской документации.
- 9.1.3. Выявленные в ходе испытаний недостатки не являются принципиальными и устраняются при корректировке технической документации.

#### 9.2. П р е д л о ж е н и я

- 9.2.1. Приемочные испытания грохота ГІсМх-2,5х1 считать законченными.
- 9.2.2. Опытный образец грохота ГІсМх-2,5х1 считать выдержавшим приемочные испытания.
- 9.2.3. Рекомендовать грохот ГІсМх-2,5х1 применять на операции обезвоживания и классификации шламовых продуктов.
- 9.2.4. Рекомендовать грохот ГІсМх-2,5х1 к промышленному производству с 2004 г. после корректировки технической документации, учитывающей предложения раздела 8, технические условия на серийный выпуск грохота согласовать с Государственной санитарно-эпидемиологической станцией Луганской области.

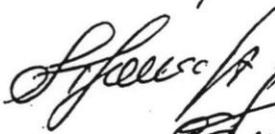
9.2.5. Технические условия на грохот ГСМх-2,5х1 и конструкторскую документацию считать согласованными.

Председатель  
приемочной комиссии



А.В.Протасов

Заместитель председателя  
приемочной комиссии

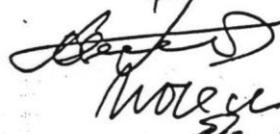


А.Д.Полулях

Члены комиссии:



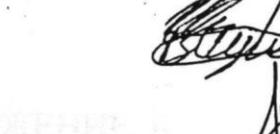
С.Н.Базарный



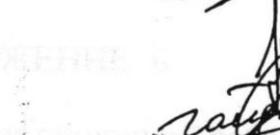
В.С.Мехальчишин



Б.А.Кочешков



С.В.Евтушенко



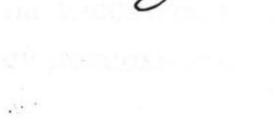
В.Н.Пушкарев



Н.В.Ермоленко



Г.Е.Гайдарь



В.А.Заболоцкий

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения результатов диссертационной работы Еремеева И.В.  
«Технология обезвоживания угольных шламовых суспензий  
нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с  
разнонаклонными участками рабочей поверхности на ЦОФ «Гуковская»»

**УТВЕРЖДАЮ**

Технический директор  
ЦОФ «Гуковская»



В.И. Ковалев

2013 г.

## **А К Т**

**внедрения результатов диссертационной работы Еремеева И.В.  
«Технология обезвоживания угольных шламовых суспензий  
нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с  
разнонаклонными участками рабочей поверхности» на ЦОФ «Гуковская»**

г. Гуково

15 мая 2013 г.

Комиссия в составе

Чаплыгина С.Б. - заместителя технического директора ЦОФ «Гуковская»;

Филипишина В.И. - начальника основного производства ЦОФ «Гуковская»;

Невзорова С.Б. - главного механика ЦОФ «Гуковская»;

Полуляха А.Д. - начальника научно-исследовательской Приднепровской лаборатории совершенствования технологий и методов обогащения угля ГП «Укрнииуглеобогащение», д-ра техн. наук, профессора;

Берлина А.М. - ведущего научного сотрудника ГП «Укрнииуглеобогащение», канд. техн. наук,

рассмотрев результаты промышленных исследований усовершенствованной технологии обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на ЦОФ «Гуковская» (Протокол промышленных испытаний усовершенствованной технологии обезвоживания от 15 мая 2013 г. является неотъемлемой частью настоящего Акта и прилагается) установила следующее:

1. На ЦОФ «Гуковская» в феврале 2013 года осуществлено внедрение усовершенствованной технологии обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности путем модернизации высокочастотных грохо-

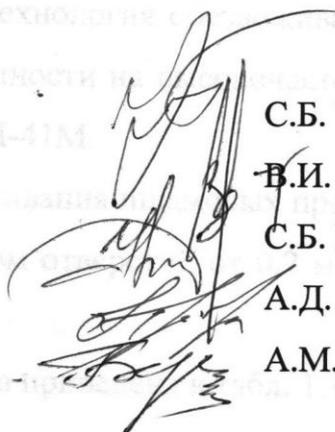
тов ГВЧ-41 на операции обезвоживания концентрата мокрой винтовой сепарации совместно со сгущенным продуктом гидроциклонов ГЦ-75 и операции обезвоживания отходов мокрой винтовой сепарации (МВС).

2. Усовершенствование технологии обезвоживания угольных шламовых продуктов на ЦОФ «Гуковская» осуществлена на основе научных результатов и практических рекомендаций диссертационной работы Еремеева И.В. «Технология обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности» путем модернизации высокочастотного грохота ГВЧ-41 в грохот ГВЧ-41М. Модернизация осуществлена путем изменения конфигурации его рабочей поверхности за счет применения разного наклона загрузочного и разгрузочного участков сит относительно среднего участка обезвоживающей поверхности.

3. Внедрение усовершенствованной технологии позволило снизить влажность концентрата мокрой винтовой сепарации и сгущенного продукта гидроциклонов ГЦ-75 на 6,0% с 28,0% до 22,0%, отходов мокрой винтовой сепарации на 5,3% с 21,3% до 16,0%.

4. Годовой расчетный экономический эффект от внедрения усовершенствованной технологии обезвоживания шламовых угольных суспензий нефлотационной крупности на ЦОФ «Гуковская» составляет около 2,4 млн. руб. за счет снижения влажности отгружаемой товарной угольной продукции фабрики на 0,2% с 7,1% до 6,9%.

Протокол сравнительных промышленных испытаний от 15 мая 2013 г. прилагается.



С.Б. Чаплыгин

В.И. Филипишин

С.Б. Невзоров

А.Д. Полулях

А.М. Берлин

**ПРОТОКОЛ**  
**промышленных испытаний усовершенствованной технологии**  
**обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной**  
**крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками**  
**рабочей поверхности на ЦОФ «Гуковская»**

г. Гуково

15 мая 2013 г.

Комиссия в составе:

Чаплыгина С.Б. - заместителя технического директора ЦОФ «Гуковская»;

Филипишина В.И.- начальника основного производства ЦОФ «Гуковская»;

Невзорова С.Б. - главного механика ЦОФ «Гуковская»;

Полуляха А.Д. - начальника научно-исследовательской Приднепровской лаборатории совершенствования технологий и методов обогащения угля ГП «Укрнииуглеобогащение», д-ра техн. наук, профессора;

Берлина А.М. - ведущего научного сотрудника ГП «Укрнииуглеобогащение», канд. техн. наук,

в период с 12 марта по 15 мая 2013 года провела сравнительные промышленные испытания технологии обезвоживания шламовых угольных суспензий нефлотационной крупности на высокочастотных грохотах ГВЧ-41 и ГВЧ-41М и установила следующее:

**Раздел 1.** Объект испытаний, техническая характеристика и область применения. Объектом испытаний является технология обезвоживания шламовых угольных суспензий нефлотационной крупности на высокочастотных грохотах ГВЧ-41 и модернизированном грохоте ГВЧ-41М.

Грохоты предназначены для обезвоживания шламовых продуктов на вибрирующей рабочей поверхности с размером отверстий от 0,2 мм до 0,5 мм на углеобогатительных фабриках.

Техническая характеристика грохотов приведена в табл. 1.1

Таблица 1.1 – Техническая характеристика грохотов

№ п/п	Наименование показателей и единица их измерения	Грохот	
		ГВЧ-41	ГВЧ-41М
1	Площадь сита, м <sup>2</sup>	6,7	6,7
2	Число ярусов сит. шт.	1	1
3	Производительность по исходному (твердому) питанию, т/ч	до 60	до 60
4	Длина сита, мм	4200	4200
5	Ширина сита, мм	1600	1600
6	Количество участков сит, шт.	1	3
7	Угол наклона участка сита, град.:		
	участок № 1	0	до -20
	участок № 2	0	0
	участок № 3	0	до +15
8	Масса колеблющейся части, кг	3400	3400
9	Амплитуда колебаний, мм	1,5-2,0	1,5-2,0
10	Частота виброперемещений короба, мин <sup>-1</sup>	972-1450	972-1450
11	Номинальная мощность двигателя, кВт	2x5,5	2x5,5
12	Габаритные размеры, мм:		
	длина	4200	4200
	ширина	2820	2820
	высота	1580	1580
13	Масса грохота, кг	3800	3800

## Раздел 2. Цель и задачи испытания

Основной целью промышленных испытаний является определение технологической эффективности процесса обезвоживания шламовых угольных суспензий нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности.

Основными задачами испытаний является:

- а) сравнение показателей влажности надситных продуктов высокочастотных грохотов ГВЧ-41 и ГВЧ-41М, работающих в одинаковых условиях;
- б) установление конструктивных особенностей грохота ГВЧ-41М и их соответствие выводам и рекомендациям, изложенным в диссертационной работе Еремеева И.В.

## Раздел 3. Промышленные и технологические условия испытаний

3.1. Условия и место испытаний высокочастотных грохотов ГВЧ-41 и ГВЧ-41М равнозначны и обеспечивают возможность проверки их технологических характеристик.

3.2. Грохоты установлены в технологической схеме фабрики на операции обезвоживания концентрата мокрой винтовой сепарации и сгущенного продукта гидроциклонов ГЦ-75, а также на операции обезвоживания отходов мокрой винтовой сепарации.

3.3. Грохот ГВЧ-41 переводится в грохот ГВЧ-41М путем изменения углов наклона участков обезвоживающей поверхности в соответствии с рекомендациями диссертационной работы Еремеева И.В.

#### **Раздел 4. Результаты измерений, проведенных в эксплуатационных условиях**

4.1. В период с 12 марта по 15 мая 2013 г. в присутствии членов комиссии было выполнено опробование обезвоживающих грохотов ГВЧ-41 и ГВЧ-41М и определение условий и технологических показателей процесса обезвоживания, результаты которых приведены в табл. 4.1 и 4.2.

В качестве рабочей поверхности применялись резиновые сита ООО «АНА-ТЕМС» со щелью 0,2 мм.

Частота колебаний грохотов изменялась дискретно: 1000, 1200 и 1400 мин<sup>-1</sup>; амплитуда: 1,5 и 2,0 мм.

4.2. Усредненные показатели работы гидрогрохотов ГВЧ-41 и ГВЧ-41М в режимах обезвоживания концентрата МВС и сгущенного продукта гидроциклонов ГЦ-75, а также отходов МВС приведены в табл. 4.3-4.6.

4.3. Наилучшие показатели влажности надситного продукта при обезвоживании концентрата МВС и сгущенного продукта гидроциклонов ГЦ-75 достигнуты при прочих равных условиях на грохоте ГВЧ-41 в среднем 28,0% при  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0^\circ$ , а на грохоте ГВЧ-41М в среднем 22,0% при углах наклона участков обезвоживающей поверхности:  $\alpha_1 = -20^\circ$ ,  $\alpha_2 = 0^\circ$ ,  $\alpha_3 = +15^\circ$ ; при обезвоживании отходов МВС – в среднем 21,3% на грохоте ГВЧ-41 при  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0^\circ$  и 16% на грохоте ГВЧ-41М при  $\alpha_1 = -15^\circ$ ,  $\alpha_2 = 0^\circ$ ,  $\alpha_3 = +10^\circ$ .

Таблица 4.1

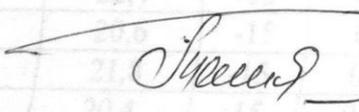
## Условия промышленных испытаний

№ п/п	Дата	Нагрузка по пульпе, м <sup>3</sup> /ч	Содержание твердого, г/л	Амплитуда колебаний, мм	Частота колебаний, мин. <sup>-1</sup>
<b>1</b>	<b>Обезвоживание концентрата МВС и сгущенного продукта ГЦ-75</b>				
1.1	12.03.13	232,4	425	2,0	1000
1.2	13.03.13	228,6	421	2,0	1000
1.3	14.03.13	236,8	428	2,0	1000
1.4	15.03.13	220,6	415	2,0	1200
1.5	18.03.13	207,4	410	2,0	1200
1.6	19.03.13	228,6	422	2,0	1200
1.7	25.03.13	229,4	425	1,5	1450
1.8	26.03.13	210,7	438	1,5	1400
1.9	27.03.13	230,0	433	1,5	1400
1.10	28.03.13	215,8	441	1,5	1400
1.11	02.04.13	218,9	432	1,5	1400
1.12	03.04.13	229,5	429	1,5	1400
1.13	04.04.13	234,5	436	1,5	1400
<b>2</b>	<b>Обезвоживание отходов МВС</b>				
2.1	12.03.13	68,0	413	2,0	1000
2.2	13.03.13	71,4	410	2,0	1000
2.3	14.03.13	53,8	452	2,0	1000
2.4	15.03.13	65,6	418	2,0	1200
2.5	18.03.13	59,9	425	2,0	1200
2.6	19.03.13	65,2	431	2,0	1200
2.7	25.03.13	62,6	428	1,5	1400
2.8	26.03.13	64,3	433	1,5	1400
2.9	27.03.13	57,6	448	1,5	1400
2.10	28.03.13	72,5	394	1,5	1400
2.11	02.04.13	61,6	426	1,5	1400
2.12	03.04.13	62,5	430	1,5	1400
2.13	04.04.13	67,0	422	1,5	1400

Начальник ОТК  
ЦОФ «Гуковская»

Ведущий научный сотрудник,  
ГП «Укрнииуглеобогащение», к.т.н.

Диссертант

  
Т.П. Белова

  
А.М. Берлин

  
И.В. Еремеев

Таблица 4.2

## Результаты промышленных испытаний

№ п/п	Технология обезвоживания с применением высокочастотных грохотов							
	ГВЧ-41				ГВЧ-41М			
	Угол наклона участков обезвоживающей поверхности, град.			Влажность надсытного продукта, %	Угол наклона участков обезвоживающей поверхности, град.			Влажность надсытного продукта, %
$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_1$		$\alpha_2$	$\alpha_3$		
<b>1</b>	<b>Обезвоживание концентрата МВС и сгущенного продукта ГЦ-75</b>							
1.1	0	0	0	30,6	-10	0	+5	29,5
1.2	0	0	0	28,4	-10	0	+10	27,3
1.3	0	0	0	31,2	-10	0	+15	25,2
1.4	0	0	0	26,7	-15	0	+5	28,4
1.5	0	0	0	24,8	-15	0	+10	26,9
1.6	0	0	0	25,9	-15	0	+15	24,6
1.7	0	0	0	29,0	-20	0	+5	27,3
1.8	0	0	0	27,4	-20	0	+10	24,8
1.9	0	0	0	29,4	-20	0	+15	23,4
1.10	0	0	0	27,2	-20	0	+15	21,7
1.11	0	0	0	28,6	-20	0	+15	20,8
1.12	0	0	0	26,5	-20	0	+15	22,3
1.13	0	0	0	28,3	-20	0	+15	21,8
Среднее 1.9-1.13	0	0	0	28,0	-20	0	+15	22,0
<b>2</b>	<b>Обезвоживание отходов МВС</b>							
2.1	0	0	0	19,8	-10	0	+5	19,1
2.2	0	0	0	22,6	-10	0	+10	18,6
2.3	0	0	0	21,5	-10	0	+15	17,2
2.4	0	0	0	22,0	-15	0	+5	18,9
2.5	0	0	0	23,1	-15	0	+10	17,5
2.6	0	0	0	19,3	-15	0	+15	16,9
2.7	0	0	0	20,8	-20	0	+5	18,0
2.8	0	0	0	21,6	-20	0	+10	17,3
2.9	0	0	0	21,0	-20	0	+15	16,8
2.10	0	0	0	22,4	-15	0	+10	15,2
2.11	0	0	0	20,6	-15	0	+10	16,4
2.12	0	0	0	21,8	-15	0	+10	16,7
2.13	0	0	0	20,4	-15	0	+10	15,7
Среднее 1.9-1.13	0	0	0	21,3	-15	0	+10	16,0

Начальник ОТК  
ЦОФ «Гуковская»  
Ведущий научный сотрудник,  
ГП «Укрниинуглеобогащение», к.т.н.  
Диссертант



Т.П. Белова  
А.М. Берлин  
И.В. Еремеев

Таблица 4.3

**Усредненные показатели работы грохота ГВЧ-41 на операции  
обезвоживания концентрата МВС и сгущенного продукта ГЦ-75**

Класс, мм	Продукты							
	Исходный		Надситный			Подситный		
	Выход $\gamma_{\epsilon}$ , %	Зольность $A^d$ , %	Выход, %		Зольность $A^d$ , %	Выход, %		Зольность $A^d$ , %
			$\gamma_{\epsilon}$	$\gamma_{\Gamma}$		$\gamma_{\epsilon}$	$\gamma_{\Gamma}$	
2-3	15,32	24,2	15,32	19,5	24,2	-	-	-
1,5-2	11,12	26,1	11,12	14,1	26,1	-	-	-
1-1,5	12,24	18,4	12,24	15,6	18,4	-	-	-
0,5-1	13,57	17,6	13,57	17,2	17,6	-	-	-
-0,5	47,75	34,6	26,45	33,6	32,5	21,3	100,0	37,4
<b>Итого</b>	<b>100,0</b>	<b>27,8</b>	<b>78,7</b>	<b>100,0</b>	<b>25,2</b>	<b>21,3</b>	<b>100,0</b>	<b>37,4</b>
Влажность $W^r$ , %	425 г/л		28,0			40 г/л		

Начальник ОТК  
ЦОФ «Гуковская»

Ведущий научный сотрудник,  
ГП «Укрниуглеобогащение»,  
канд.техн.наук

Диссертант



Т.П. Белова



А.М. Берлин

И.В. Еремеев

Таблица 4.4

**Усредненные показатели работы грохота ГВЧ-41 на операции  
обезвоживания отходов МВС**

Класс, мм	Продукты							
	Исходный		Надситный			Подситный		
	Вы- ход $\gamma_{\epsilon}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %	Выход, %		Золь- ность $A^d$ , %	Выход, %		Золь- ность $A^d$ , %
			$\gamma_{\epsilon}$	$\gamma_{\Gamma}$		$\gamma_{\epsilon}$	$\gamma_{\Gamma}$	
2-3	19,32	86,0	19,32	25,7	86,0	-	-	-
1,5-2	18,64	84,9	18,64	24,6	84,9	-	-	-
1-1,5	11,53	84,3	11,53	15,30	84,3	-	-	-
0,5-1	11,33	81,4	11,33	15,0	81,4	-	-	-
-0,5	39,18	68,9	14,48	19,4	71,2	24,7	100,0	67,6
<b>Итого</b>	<b>100,0</b>	<b>78,4</b>	<b>75,3</b>	<b>100,0</b>	<b>81,9</b>	<b>24,7</b>	<b>100,0</b>	<b>67,6</b>
Влажность $W^r$ , %	433 г/л		21,3			160 г/л		

Начальник ОТК  
ЦОФ «Гуковская»

Ведущий научный сотрудник,  
ГП «Укрнииуглеобогащение»,  
канд.техн.наук

Диссертант



Т.П. Белова



А.М. Берлин

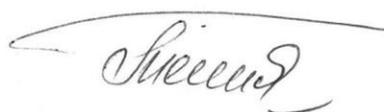
И.В. Еремеев

Таблица 4.5

**Усредненные показатели работы грохота ГВЧ-41М на операции  
обезвоживания концентрата МВС и сгущенного продукта ГЦ-75**

Класс, мм	Продукты							
	Исходный		Надситный			Подситный		
	Выход $\gamma_{\epsilon}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %	Выход, %		Золь- ность $A^d$ , %	Выход, %		Золь- ность $A^d$ , %
			$\gamma_{\epsilon}$	$\gamma_{\tau}$		$\gamma_{\epsilon}$	$\gamma_{\tau}$	
2-3	17,36	23,5	17,36	24,9	23,5	-	-	-
1,5-2	12,06	22,1	12,06	17,3	22,1	-	-	-
1-1,5	11,22	17,5	11,22	16,1	17,5	-	-	-
0,5-1	12,41	17,3	12,41	17,8	17,3	-	-	-
-0,5	46,95	33,9	16,65	23,9	30,1	30,3	100,0	36,0
<b>Итого</b>	<b>100,0</b>	<b>26,8</b>	<b>69,7</b>	<b>100,0</b>	<b>22,8</b>	<b>30,3</b>	<b>100,0</b>	<b>36,0</b>
Влажность $W^r$ , %	425 г/л		22,0			42 г/л		

Начальник ОТК  
ЦОФ «Гуковская»



Т.П. Белова

Ведущий научный сотрудник,  
ГП «Укрниуглеобогащение»,  
канд.техн.наук



А.М. Берлин

Диссертант

И.В. Еремеев

Таблица 4.6

**Усредненные показатели работы грохота ГВЧ-41М на операции  
обезвоживания отходов МВС**

Класс, мм	Продукты							
	Исходный		Надситный			Подситный		
	Выход $\gamma_{\Sigma}$ , %	Золь- ность $A^d$ , %	Выход, %		Золь- ность $A^d$ , %	Выход, %		Золь- ность $A^d$ , %
			$\gamma_{\Sigma}$	$\gamma_T$		$\gamma_{\Sigma}$	$\gamma_T$	
2-3	20,64	85,2	20,64	30,9	85,2	-	-	-
1,5-2	17,70	84,6	17,70	26,5	84,6	-	-	-
1-1,5	12,42	83,5	12,42	18,6	83,5	-	-	-
0,5-1	10,29	81,6	10,29	15,4	81,6	-	-	-
-0,5	38,95	68,0	15,75	8,6	77,4	33,2	100,0	66,4
<b>Итого</b>	<b>100,0</b>	<b>77,8</b>	<b>66,8</b>	<b>100,0</b>	<b>83,5</b>	<b>33,2</b>	<b>100,0</b>	<b>66,4</b>
Влажность $W^r$ , %	433 г/л		16,0			190 г/л		

Начальник ОТК  
ЦОФ «Гуковская»



Т.П. Белова

Ведущий научный сотрудник,  
ГП «Укрнииуглеобогащение»,  
канд.техн.наук



А.М. Берлин

Диссертант

И.В. Еремеев

## Раздел 5. Техничко-экономические показатели эксплуатации

Результаты испытаний показали, что фактором экономической эффективности внедрения грохота ГВЧ-41М являются:

- снижение влажности надситного продукта при обезвоживании концентрата МВС и сгущенного продукта гидроциклонов ГЦ-75 на 6% с 28,0% до 22,0%, при обезвоживании отходов на 5,3% с 21,3% до 16,0%;

- снижение влажности товарной угольной продукции фабрики на 0,2% с 7,1% до 6,9%.

Расчетный годовой фактический экономический эффект от внедрения технологии обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на высокочастотных грохотах с разнонаклонными участками рабочей поверхности, полученный за счет увеличения реализационной стоимости товарной угольной продукции улучшенного качества (снижение влажности на 0,2%) при ее выпуске 654 тыс. т в год составляет около 2,4 млн. руб.

## Раздел 6. Выводы и предложения

### 6.1. Выводы

6.1.1. Промышленные испытания технологии обезвоживания угольных шламовых суспензий на высокочастотных грохотах с разнонаклонными участками рабочей поверхности проведены в полном объеме.

6.1.2. Модернизация грохота ГВЧ-41 в грохот ГВЧ-41М произведена в соответствии с выводами и рекомендациями диссертационной работы Еремеева И.В. «Технология обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности».

6.1.3. Применение высокочастотного грохота ГВЧ-41М вместо высокочастотного грохота ГВЧ-41 позволило снизить влажность надситного продукта при обезвоживании концентрата МВС и сгущенного продукта гидроциклонов ГЦ-75 на 6,0% с 28,0% до 22,0%, при обезвоживании отходов МВС на 5,3% с 21,3% до 16,0%.

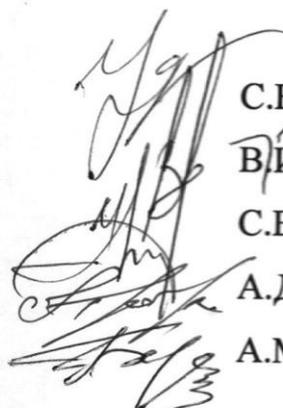
Снижение влажности товарной угольной продукции составляет 0,2% с 7,1% до 6,9%.

6.1.4. Расчетный годовой фактический экономический эффект от внедрения технологии обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на высокочастотных грохотах с разнонаклонными участками рабочей поверхности, полученный за счет увеличения реализационной стоимости товарной угольной продукции улучшенного качества (снижение влажности на 0,2%) при ее выпуске 654 тыс. т год составляет около 2,4 млн. руб.

## 6.2. Предложения

6.2.1. Промышленные испытания технологии считать законченными.

6.2.2. Рекомендовать технологию обезвоживания угольных шламовых суспензий нефлотационной крупности на высокочастотном грохоте с разнонаклонными участками рабочей поверхности для внедрения на других углеобогачительных предприятиях на аналогичных операциях.



С.Б. Чаплыгин  
В.И. Филипишин  
С.Б. Невзоров  
А.Д. Полулях  
А.М. Берлин