

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Государственное высшее учебное заведение
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



В.П. Франчук, А.А. Бондаренко

**ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ КЛАССИФИКАТОРЫ.
ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТА**

Монография

Днепропетровск

НГУ

2016

УДК 622. 763

ББК 33.4

Ф83

Рекомендовано до друку вченою радою Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (протокол № 5 від 22.12. 2015 р.)

Рецензенти:

Пілов П.І. – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри збагачення корисних копалин (Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»);

Надутьий В.П. – д-р техн. наук, проф., завідувач відділу механіки машин і переробки мінеральної сировини (ІГТМ НАН України).

Франчук В.П.

Ф83 Горизонтальные классификаторы. Основы теории и расчета: моногр. / В.П. Франчук, А.А. Бондаренко; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2016. – 111 с.

ISBN 978 – 966 – 350 – 582 - 4

Приведены технологические схемы получения строительных песков при гидромеханизированной добыче, основные конструктивные схемы классификаторов, используемых при получении строительных песков. Особое внимание уделено изучению процесса взаимодействия проточной части горизонтального классификатора с совокупностью твердых частиц, расположенных в горизонтальном ускоренном потоке несущей среды. Выполнено математическое моделирование ускоренного движения горизонтального потока и твердых частиц в пределах разнонаклонных поверхностей горизонтального классификатора. Экспериментально изучено гравитационное осаждение твердых частиц, рассмотренное в виде вертикальной и горизонтальной составляющих, а также влияние стесненности движения и перемещения твердых частиц относительно несущего горизонтального потока.

Приведена методика расчета и выбора параметров классификаторов, информация об опыте проектирования и внедрения горизонтальных классификаторов в составе добычных комплексов при освоении обводненных месторождений песков.

Монография может быть полезна студентам, инженерно-техническим работникам, сотрудникам высших учебных заведений, научно-исследовательских институтов и проектных организаций горной промышленности.

Ил. 60. Библиогр.: 89 назв

УДК 622. 763

ББК 33.4

© В.П. Франчук, А.О. Бондаренко, 2016

© Державний ВНЗ «НГУ», 2016

ISBN 978 – 966 – 350 – 582 - 4

ПРЕДИСЛОВИЕ

Рост промышленной активности повышает спрос на формирование проектов развития инфраструктуры страны. Это связано с необходимостью увеличения потенциала отечественных горных предприятий, специализирующихся на добыче и переработке рудных и нерудных зернистых полезных ископаемых. Особенностью, например, строительной отрасли является широкое использование местных строительных материалов – в частности песка на месте добычи, поскольку перевозка на значительные расстояния (как на обогатительное производство, так и на заводы железобетонных изделий или стройплощадки) повышает его стоимость. В то же время насчитывается большое количество промышленно значимых месторождений рудного и нерудного сырья, не вовлеченных в разработку, что продиктовано в основном несоответствием природного материала действующим нормативным документам по физико-механическим свойствам для товарной продукции. При этом отсутствуют апробированные технические и технологические решения, позволяющие осваивать сложноструктурные месторождения, включая переработку сырья. Разработка таких месторождений позволит снизить цены на сырье, особенно для производства строительных материалов, дать толчок к развитию сопутствующих производств и создать новые рабочие места. Таким образом, актуальной проблемой является разработка новых технических решений устройств для переработки зернистых полезных ископаемых при гидромеханизированной добыче. При этом приемлемые условия производства готовой продукции обеспечиваются на основе исследования закономерностей взаимодействия твердых частиц с горизонтальным ускоренным потоком несущей среды, а также гравитационным осаждением и движением по разнонаклонным поверхностям.

Целью настоящей монографии является освещение современного состояния проблемы выделения кондиционных фракций зернистого полезного ископаемого путем гравитационной классификации твердых частиц в горизонтальном несущем ускоренном потоке и определение конструктивных параметров горизонтальных классификаторов.

Ввиду сложности изучения жидкостных потоков, особенно включающих твердые частицы, теоретические основы процесса гравитационной классификации нельзя считать окончательно сформировавшимися. С учетом современного уровня классификационных устройств они требуют дальнейшего совершенствования.

В работе выполнено физическое моделирование осаждения зернистого материала в горизонтальном несущем жидкостном потоке. Математическое моделирование движения ускоренного несущего потока в пределах проточной части горизонтального классификатора и гравитационного осаждения твердых частиц выполнено в три этапа: моделирование с учетом незначительности кривизны живых сечений потока и приравнивания скорости потока в его любой

точке среднему значению; моделирование с учетом зависимости скорости потока от его глубины; моделирование движения твердых частиц в среде ускоренного потока идеальной жидкости.

Особое внимание авторами было уделено лабораторным исследованиям процесса гравитационного разделения зернистых материалов, для их очистки от мелкодисперсных твердых частиц. Также следует отметить значительный объем натурного внедрения полученных научных результатов и технических решений при проектировании горизонтальных классификаторов и систем обратного водоснабжения горных предприятий – применяемых в производстве строительных материалов.

Описанные в настоящей монографии исследования выполнены в 2007 - 2015 гг. на кафедре горных машин и инжиниринга ДВНЗ «Национальный горный университет».

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору, доктору технических наук Пилову П.И. и профессору, доктору технических наук Надутому В.П. за замечания, высказанные при рецензировании книги.

1. СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ГИДРОМЕХАНИЗИРОВАННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

1.1. Обзор и анализ технических средств для разделения кварцевых песков при гидромеханизированной добыче

Природные нерудные пески по набору основных контролируемых физико-механических свойств (модуль крупности, процент глинистых и пылевидных частиц и др.) редко соответствуют действующим нормативным документам [1, 2]. В связи с этим, актуальным является вопрос применения различных технических и технологических средств для обогащения нерудных песков непосредственно в месте их разработки.

Переработка нерудных строительных материалов традиционно предусматривает отделение от песка крупных включений, например, гравийных фракций, мелких пылеватых и глинистых (диспергированных) примесей, комовой глины, растительных включений и примесей ракушки.

Простейшим способом отделения песков от глинистых примесей при гидромеханизированной разработке является складирование песков на карты намыва. Преимущества такого способа состоят в отсутствии капитальных затрат на приобретение классификационного оборудования и необходимости высокой квалификации операторов. При правильном выборе параметров карты намыва можно добиться высоких показателей классификации материала. Однако данному способу разделения присущи следующие недостатки:

- значительный объем бульдозерных и экскаваторных работ с целью строительства и обслуживания первичной и попутных дамб обвалования;
- значительная площадь территорий, занятых под гидроотвал;
- необходимость строительства водоотводящих устройств;
- необходимость постоянной переукладки трубопроводов по мере намыва гидроотвала;
- постоянные изменения дальности гидротранспортирования и геометрической высоты подъема пульпы, приводящие к изменению эксплуатационных характеристик гидротранспортной системы;
- большие потери полезного ископаемого за счет его разубоживания накапливающимися в карте намыва глинистыми частицами.

Все выше перечисленное предопределяет увеличение себестоимости добычи песков. Снижение эксплуатационных затрат на получение товарного песка возможно путем применения специальных классификационных устройств.

Известно, что переработка песков в условиях гидромеханизированного карьера может осуществляться следующими группами устройств [3, 4]:

1. Аппараты, в которых разделение по крупности осуществляется путем грохочения.

2. Устройства, в которых разделение по крупности частиц происходит посредством гидравлической классификации, то есть за счет различия в скорости их падения в воде, находящейся в покое или в движении.

Таким образом, устройства для переработки песков, добываемых гидромеханизированным способом, классифицируют по следующим основным признакам:

- Грохоты:

- неподвижные: колосниковые; дуговые; конические.
- подвижные: вибрационные; вращающиеся.

- Гидроклассификаторы:

- центробежные: гидроциклоны; шнековые классификаторы; цилиндрические классификаторы.
- гравитационные: обогатительные конвейеры; конические; вертикальные; горизонтальные; спиральные; корытные мойки.

Для отделения в исходной пульпе гравия, комков глины, мусора, ракушки и др. обычно применяют неподвижные грохоты, не требующие централизованного энерго-, водо-, пневмоснабжения участка переработки. Разделение материала выполняется ими за счет кинетической энергии движущегося потока гетерогенной смеси [5 – 7].

Простейшим, по конструктивному исполнению, является колосниковый грохот, эффективность работы которого оценивается в 85 – 95 % (рис. 1.1, а, б). Несмотря на существенные недостатки, его часто применяют для выделения из природных песчаных материалов классов +3...+5 мм. Отличительной особенностью дуговых грохотов является то, что их сито изогнуто по дуге окружности, радиус которой выбирается в зависимости от производительности грохота (рис. 1.1, в). Они пригодны для отделения песка и гравия, но имеют относительно малую (около 80 %) эффективность грохочения. Конические грохоты представляют собой наиболее совершенные конструкции среди неподвижных. Их эффективность составляет 85...95 %, причем она возрастает по мере снижения концентрации пульпы, подаваемой на грохот (рис. 1.1, г) [5]. К недостаткам этого типа грохотов относят чрезвычайно быстрый износ сит, являющийся результатом больших скоростей попадающего на них потока пульпы.

Из подвижных грохотов на гидромеханизированных карьерах широко применяются только вибрационные.

С целью получения песка, отвечающего нормам по крупности зерен, содержанию глинистых частиц и другим физико-механическим характеристикам все большее внимание уделяется гидравлическим классификаторам, поскольку известно, что наиболее эффективным способом разделения песков на фракции различной крупности является гидравлический [3 – 5].

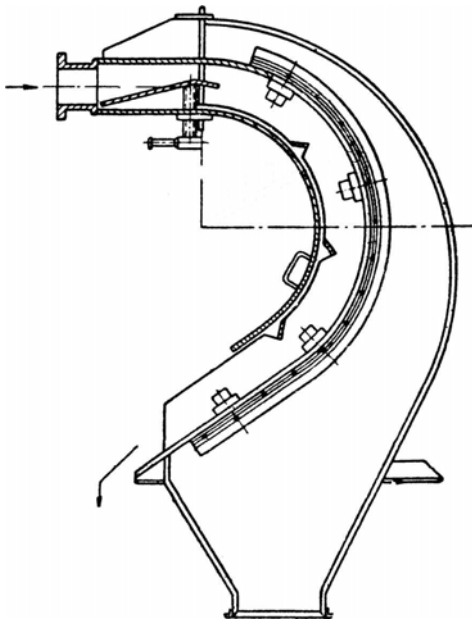
По принципу действия различают классификаторы, в которых процесс разделения осуществляется под действием гравитационных сил и сил сопротивления среды (конические, вертикальные, горизонтальные прямоточные, горизонтальные с изменяющимся рабочим сечением, спиральные, элеваторные), а также такие, в которых помимо указанных действуют еще центробежные силы (гидроциклоны, конические центробежные, цилиндрические, спиральные).



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.1. Неподвижные грохоты

Принцип действия всех гравитационных классификаторов основывается на том, что частицы разной крупности (с одинаковой плотностью) осаждаются в воде с разной скоростью. В случае, если процесс осаждения протекает в восходящем потоке, то частицы, скорость осаждения которых (гидравлическая крупность) будет меньше скорости восходящего потока, окажутся вынесенными вверх в составе мелкой фракции. Частицы с гидравлической крупностью, которая больше скорости восходящего потока, под действием силы тяжести опустятся вниз и составят крупную фракцию.

Из всего многообразия гидравлических классификаторов более основательно остановимся на обзоре конструкций и принципе действия установок, используемых непосредственно на карьерах с гидромеханизированной технологией разработки песков. Упомянем только, что ввиду громоздкости, стационарности исполнения, больших затрат на строительство и эксплуатацию непосредственно на карьерах не применяют такие устройства как: элеваторные классификаторы (багер-зумпфы), прямоточные пирамидальные и конические классификаторы, центрифуги, механические классификаторы отстойного типа и др.

При гидромеханизированных разработках до настоящего времени наибольшее распространение получили вертикальные классификаторы: ВНИИГС типа ГКД-2, ВНИИжелезобетон типа ГКХ (рис. 1.2), ВНИИнеруд, «Реакс», ВНИИГС с крутопадающим потоком типа СК [4, 5].

Традиционная схема работы присуща гидроклассификаторам института ВНИИжелезобетон (рис. 1.2, а). Они выпускаются с маркировкой ГКХ-20, 40, 80, 120, 200.

Особенность принципиальной схемы гидравлического классификатора ВНИИГС, которая отличает его от большинства других конструкций, состоит в том, что ввод исходного материала осуществляется снизу (рис. 1.2, б). На базе классификаторов ВНИИГС разработана целая серия обогатительных аппаратов ГКД-2-100, 400, 800, 1200, 1600, отличающихся производительностью и габаритными размерами.

На принципе действия вертикальной классификации работают также классификаторы ВНИИГС с крутопадающим потоком [4]. На основе такого аппарата созданы классифицирующие устройства СК-3, СК-6,5, СК-10.

Анализ конструкций вертикальных классификаторов показал, что вертикальная схема обогащения дает хороший результат только при выделении песка на границах 0,5 мм. Деление же более мелкого песка, к которому принадлежит подавляющее большинство природного полезного ископаемого, являющегося в настоящее время сырьем для рудной и нерудной промышленности, рационально выполнять в горизонтальных классификаторах.

В последнее время при переработке песков на гидромеханизированных карьерах применяют технологические комплексы под общим названием корытная мойка (рис. 1.3). Исходная пульпа поступает на двухситовой вибрационный грохот, где выделяется мусор и крупная фракция, а пульпа с подрешетным продуктом поступает в корыто и осаждается. При помощи шнека осажденный материал транспортируется к роторному колесу с закрепленными

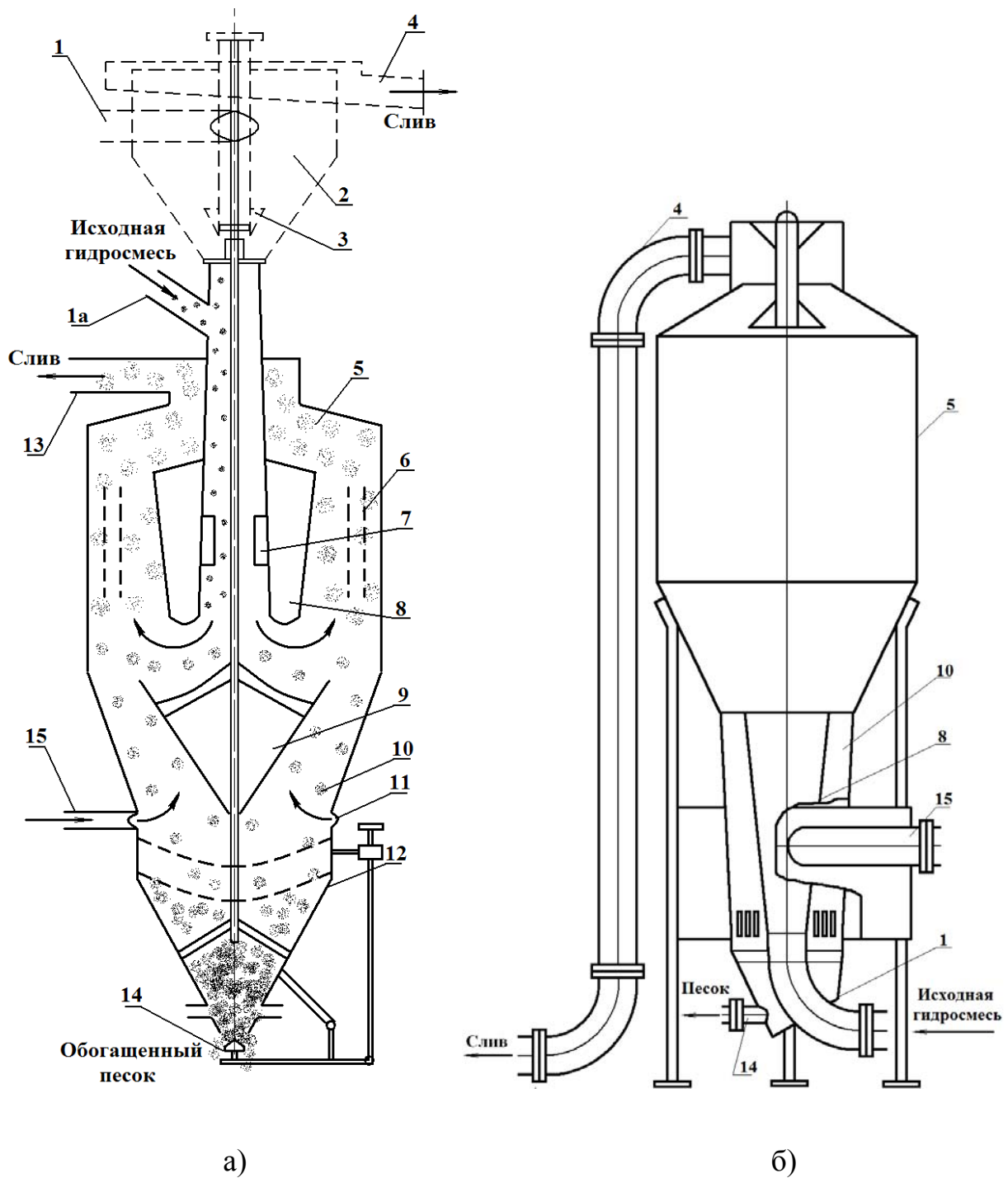


Рис. 1.2. Схемы вертикальных гидравлических классификаторов:
 1 – трубопровод; 2 – бак-дозатор; 3 – клапан; 4 – трубопровод сливной;
 5 – приемно-разделительная камера; 6 – успокоители; 7 – крыльчатка;
 8 – диффузор; 9 – конус-регулятор; 10 – кольцевая камера; 11 – коллектор чистой воды; 12 – разгрузочная камера; 13 – трубопровод шламовый;
 14 – разгрузочный шлюз; 15 – водопровод

на нем ковшами. При вращении роторного колеса материал захватывается ковшами, обезвоживается благодаря сетчатым фильтрам, установленным в основании ковша, и разгружается в бункер отвального конвейера.



Рис.1.3. Барабанная (корытная) мойка для переработки зернистых полезных ископаемых, добываемых гидромеханизированным способом

По критерию минимизации эксплуатационных расходов на переработку полезного ископаемого, добываемого гидромеханизированным способом, наиболее привлекательным является гравитационный способ классификации в горизонтальном потоке пульпы [8 – 15]. Он реализуется в горизонтальных классификаторах (рис. 1.4), преимущества и недостатки которых по сравнению с другими типами описанных выше аппаратов очевидны:

– горизонтальные классификаторы обладают меньшими габаритными размерами и, соответственно, меньшей металлоемкостью чем вертикальные. Это объясняется тем, что разделение материала в горизонтальном

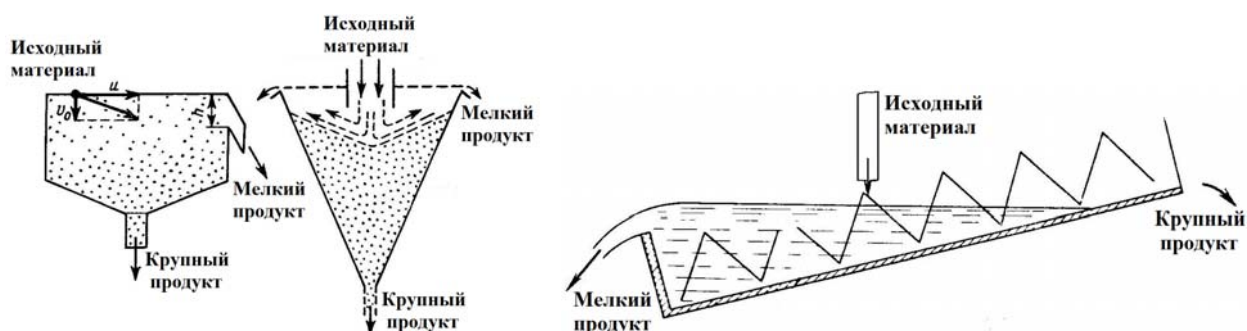


Рис. 1.4. Схемы аппаратов для классификации в горизонтальном потоке

классификаторе обеспечивается при скорости потока пульпы большей, чем в вертикальном классификаторе;

- разделение пульпы в горизонтальном классификаторе не требует дополнительных затрат энергии, т.к. происходит под действием гравитационных сил;

- не требуется подача в классификатор пульпы с большим напором. В связи с этим гидроабразивный износ в горизонтальном классификаторе практически отсутствует;

- выгрузка осажденного материала из классификатора может осуществляться как порционно, посредством затворов различных конструкций, так и постоянно с применением шнеков или элеваторов. Это обеспечивает высокую степень обезвоживания, достаточную для складирования полезного ископаемого в конусный или штабельно-кольцевой склад. При этом отпадает необходимость организации карт намыва.

1.2. Теоретические основы процесса гидравлической классификации

Гидравлическая классификация является гравитационным процессом, в котором имеет место движение твердых частиц в жидкости. Исследованиями в области гравитационной классификации зернистых материалов в потоках пульп и осаждением твердых частиц занимались ученые: Рэлей, Дж. Стокс, П.В. Лященко, В.Н. Шохин, В.А. Олевский, Б.В. Кизевальтер, П.И. Пилов [16 – 23] и др. Закономерности падения твердых частиц в жидкости имеют важное значение для совершенствования теории гравитационных процессов с целью расчета машин и аппаратов. Основным вопросом при этом является определение скорости падения твердых частиц. В гравитационных аппаратах происходит совместное падение в жидкости твердых частиц различной крупности, плотности и формы. Каждый из указанных параметров оказывает влияние на скорость падения. Для последовательного изложения закономерностей падения твердых частиц в жидкости подразделяют на такие группы:

- свободное падение твердых частиц;
- стесненное падение однородных по крупности, плотности и форме твердых частиц;
- стесненное падение разнородных твердых частиц.

Свободное падение частицы – довольно изученный процесс, под которым понимают изолированное осаждение в неограниченной среде при отсутствии механических и гидродинамических взаимодействий между частицами [17 – 19]. При движении частицы испытывают только сопротивление среды. В соответствии с диаграммой Рэля (рис. 1.5, 1.6), полученной на основе экспериментальных данных, формула для определения сил сопротивления среды движению частицы была получена в виде:

$$P = \psi U_0^2 d^2 \rho_{cp}, \quad (1.1)$$

где ψ – коэффициент сопротивления, $\psi = f(Re)$;

U_0 – скорость движения твердой частицы относительно жидкости, м/с;

d – диаметр частицы, м

ρ_{cp} – плотность среды (жидкости), кг/м³.

Число Рейнольдса представлено зависимостью $Re = \frac{U_0 d \rho_{cp}}{\mu} = \frac{U_0 d}{\nu}$,

где μ – вязкость среды (динамический коэффициент вязкости), Нс/м²;

$\nu = \frac{\mu}{\rho_{cp}}$ – кинематическая вязкость среды, м²/с.

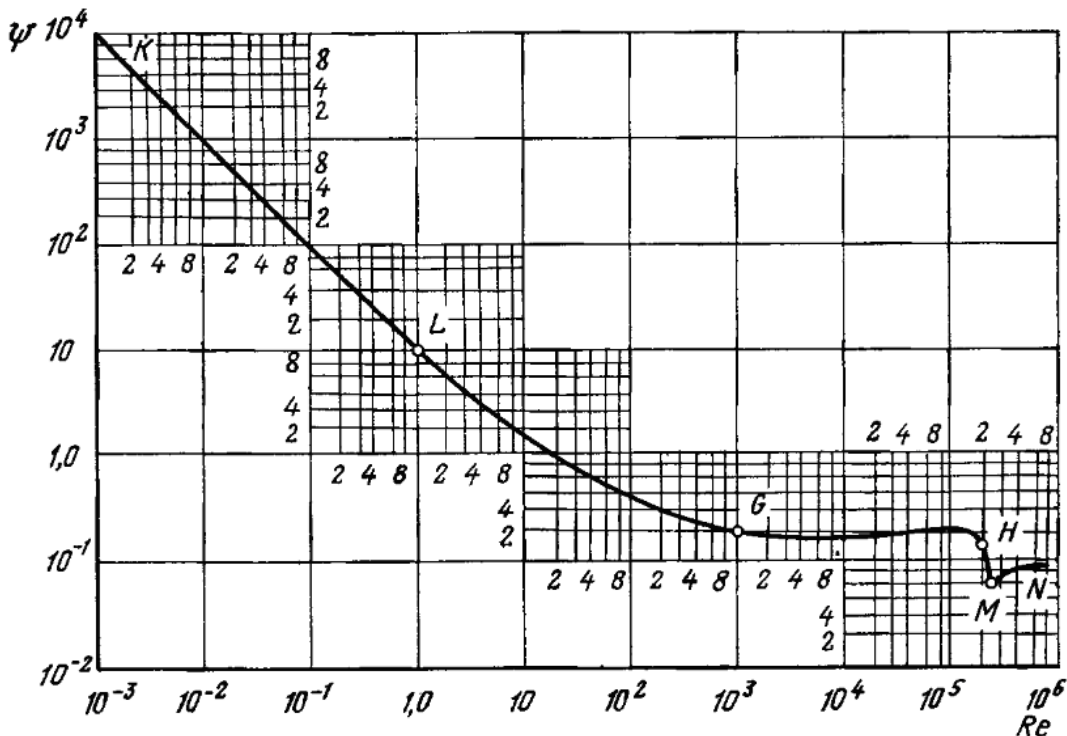


Рис. 1.5. Зависимость коэффициента сопротивления ψ от числа Рейнольдса Re при свободном падении шаров в жидкостях (диаграмма Рэлея)

Начало движения твердой частицы в неподвижной среде характеризуется значением нулевой скорости и соответственно максимальным значением ускорения. Под действием гравитационной силы частица постепенно увеличивает скорость движения, одновременно испытывая возрастающее сопротивление среды.

По истечении некоторого отрезка времени твердая частица приобретает постоянную скорость, называемую **конечной**. После этого гравитационная сила уравновешивается силой сопротивления, а частица продолжает движение без

ускорения. Время от начала движения до момента уравнивания сил составляет доли секунды. Поэтому упрощенно считают, что движение твердой частицы после погружения в жидкость происходит с некоторой конечной скоростью. Это обстоятельство дает основания при расчетах классификационных гравитационных аппаратов пользоваться значениями конечных скоростей движения твердых частиц в жидкости. Расчет скоростей свободного движения твердых частиц традиционно выполняют: по теоретическим зависимостям; по эмпирическим и интерполяционным зависимостям; по номограммам и графикам; по табличным данным, составленным на основе экспериментальных данных.

Конечную скорость свободного падения твердой частицы определяют, зная зависимость коэффициента сопротивления ψ от числа Рейнольдса Re . Как базовая при исследовании движения в жидкости принята сферическая форма частицы. В то же время основные закономерности падения шаров в жидкости справедливы и для реальных, отличных от сферических частиц с корреляцией на отличие от идеальной формы, выполняемой с применением диаграммы [17 – 19] (рис. 1.6).

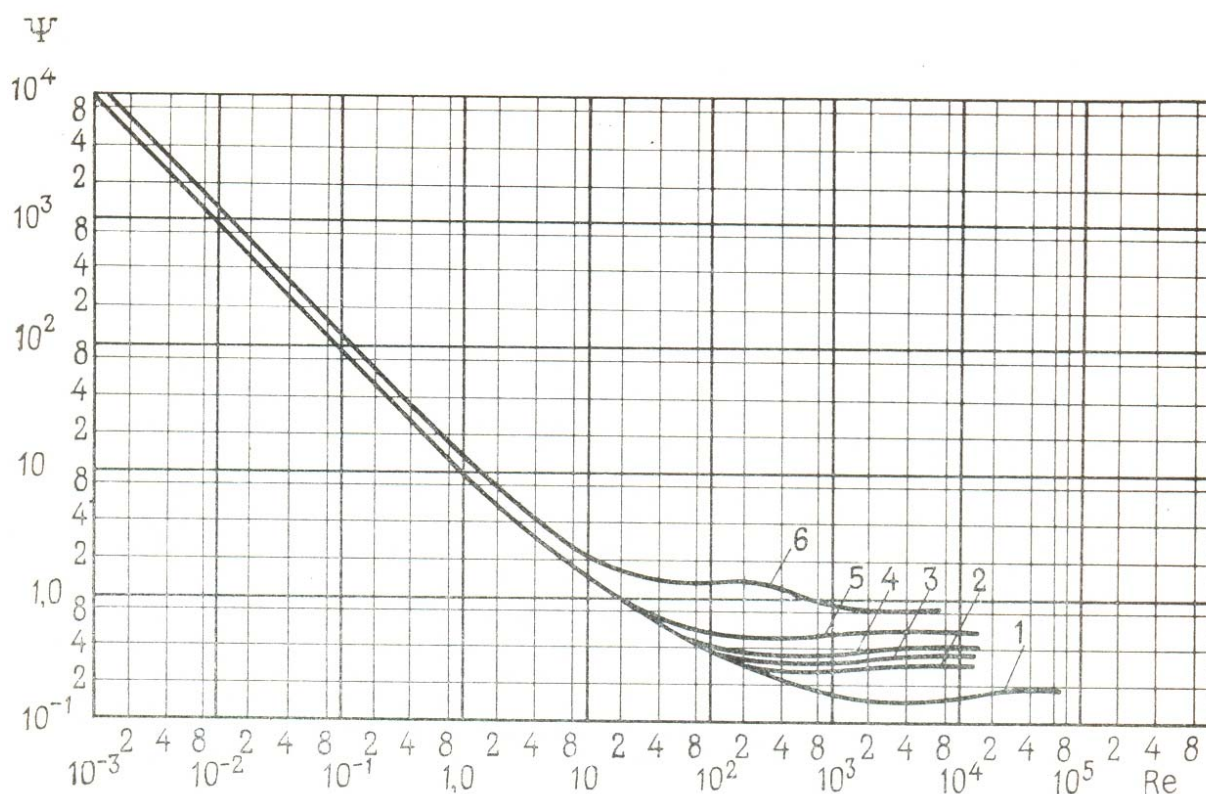


Рис. 1.6. Зависимость коэффициента сопротивления ψ от числа Рейнольдса Re при свободном падении твердых частиц: 1 – шар, 2 – усеченный октаэдр, 3 – октаэдр, 4 – куб, 5 – тетраэдр, 6 – диск

График зависимости коэффициента сопротивления ψ от числа Рейнольдса Re для шаров (диаграмма Рэлея) имеет характерные области [17 – 19]: область малых чисел Re (ламинарный режим), $Re < 1$, $d < 0,16$ мм; переходная область, $1 < Re < 1000$, $0,16 < d < 2$ мм; область постоянства

коэффициента сопротивления ψ (турбулентный режим), $10^3 < Re < 10^5$, $2 < d < 60$ мм; область резкого снижения коэффициента сопротивления ψ (турбулентный режим), $Re > 10^5$, $d > 60$ мм.

1. **Область малых чисел Re – ламинарная**, здесь коэффициент сопротивления ψ уменьшается обратно пропорционально Re , две трети общего гидродинамического сопротивления P составляют силы трения жидкости о поверхность частицы (вязкостное сопротивление), а одна треть приходится на долю сопротивления за счет перепада давления (динамическое сопротивление). Для этой области коэффициент сопротивления был определен Дж. Стоксом: $\psi = 24/Re$.

2. **В переходной области** коэффициент сопротивления ψ убывает медленнее, чем в первой, приближаясь к постоянной величине. Здесь сила сопротивления обуславливается равным влиянием вязкостного и динамического сопротивлений. Среди формул, аппроксимирующих этот участок кривой Рэлея, достаточно точно в диапазоне $Re = 0,1 \dots 5000$ описывает следующая эмпирическая формула:

$$\psi = \psi_0 \left(1 + \frac{2C}{\sqrt{Re}} \right)^2,$$

где $\psi_0 = 0,293$; $C = 4,52$.

3. **В области постоянства коэффициента сопротивления ψ** коэффициент сопротивления почти полностью определяется динамическим сопротивлением и является приблизительно постоянной величиной: $\psi \approx 0,16$.

4. **В области резкого снижения коэффициента сопротивления ψ** с увеличением Re коэффициент сопротивления ψ уменьшается. Это явление получило название «кризис сопротивления» и вызвано сужением вихревой области за частицей вследствие перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный.

Известно, что задача классификации обычно ограничивается удалением определенного количества мелкодисперсной глинистой фракции -0,16 мм до концентраций, ограниченных стандартами [22, 23]. Опыт применения гидравлических классификаторов [3 – 23] показывает, что скорость движения частицы U_0 , достаточная для протекания процесса разделения, принимают от 0,01 до 0,5 м/с. [22, 23].

Таким образом, область исследований ограничена параметрами, характеризующими принадлежность исследуемого процесса переходной области:

Крупность частиц d , мм		Скорость движения частицы U_0		Число Рейнольдса Re	
min	max	min	max	min	max
0,1	2	0,01	0,5	0,9	893

Переходная область характеризует наличие при свободном падении единичных зерен в неограниченной спокойной среде, действие трех сил:

– сила тяжести $F_T = \frac{\pi d^3}{6} \rho_m g$, Н;

где ρ_m – плотность скелета (минерала) твердой частицы, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

– подъемная сила (сила Архимеда) $F_{\Pi} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{cp} g$, Н;

– сила сопротивления (1.1).

Единая теоретическая зависимость для конечной скорости U_0 имеет вид [16 – 18]:

$$U_0 = \sqrt{\left(\frac{\pi d g (\rho_m - \rho_{cp})}{6 \psi \rho_{cp}} \right)}, \text{ м/с.} \quad (1.2)$$

Формула (1.2) универсальна, так как позволяет определить численное значение конечной скорости U_0 при любых режимах движения твердой частицы.

Изучением процессов движения частиц в переходной области активно занимались ряд авторов, в том числе: А. Аллен (A. Allen), П.В. Лященко, Т.Г. Фоменко, Е.М. Погарцева, В.А. Олевский, В.Н. Шохин, Б.В. Кизевальтер и др. Учеными были получены интерполяционные формулы для расчета конечной скорости падения сферических и по форме геометрически правильных частиц, на основании аппроксимации кривой Рэлея.

А. Алленом предложена эмпирическая формула определения скорости падения частиц [11]:

$$U_0 = k \sqrt[3]{\left(\frac{g(\rho_m - \rho_{cp})}{\rho_{cp}} \right)^2} \cdot \frac{r - hr'}{\sqrt[3]{\nu}}, \text{ м/с,}$$

где $k=0,5$ – эмпирический коэффициент;

$h=0,4$ – эмпирический коэффициент;

r – радиус шара, м;

$r'=0,000085$ – наибольшие зерна данного материала, подчиняющиеся закону Стокса, м.

Для воды формула А. Аллена имеет вид:

$$U_0 = 1,146 d \sqrt[3]{(\rho_m - 1000)^2}, \text{ м/с.}$$

Определение конечной скорости падения частиц по параметру Рейнольдса был предложен П.В. Лященко [17]. Вначале предложено определение параметра:

$$\text{Re}^2 \psi = \frac{P \rho_{cp}}{\mu^2} = \frac{F_T \rho_{cp}}{\mu^2}.$$

Затем находят значение числа Re. По нему определяют скорость падения:

$$U_0 = \frac{\text{Re} \mu}{d \rho_{cp}}, \text{ м/с.}$$

Методом Фоменко и Погарцевой конечную скорость падения частиц предложено определять по параметру Архимеда Ar и коэффициенту сопротивления ψ [11]. Первоначально вычисляется значение параметра Ar по зависимости

$$Ar = \frac{d^3 (\rho_m - \rho_{cp}) \rho_{cp} g}{\mu}.$$

Затем для частиц неправильной формы находят значение ψ . Величина конечной скорости падения частиц рассчитываются по формуле (1.2).

По методу Олевского – Павлушенко [17, 22, 23] вычисляют безразмерный диаметр D_0 , пропорциональный действительному диаметру d :

$$D_0 = \sqrt[3]{\text{Re}^2 \psi} = d \sqrt[3]{\frac{\pi g \rho_{cp}}{6 \nu^2}},$$

далее рассчитывают безразмерную скорость V_0 , пропорциональную скорости падения U_0 :

$$V_0 = \sqrt[3]{\frac{\text{Re}}{\psi}} = U_0 \sqrt[3]{\frac{6}{\pi g \nu \rho_{cp}}}.$$

Затем по предложенной диаграмме по одной из величин (D_0 или V_0) находят вторую. При падении шарообразных частиц в воде с температурой 20°C приведенные формулы имеют вид:

$$D_0 = \sqrt[3]{\text{Re}^2 \psi} = 171d \sqrt[3]{\rho_{cp}}, \quad V_0 = \sqrt[3]{\frac{\text{Re}}{\psi}} = 0,585 \frac{U_0}{\sqrt[3]{\rho_{cp}}}.$$

На конечную скорость свободного падения частицы также значительное влияние оказывает отличие формы частицы от шарообразной. При расчете скорости падения по приведенным формулам имеют место отклонения, на значения которых влияет нешарообразная форма зерна. Традиционно форма частицы учитывается путем введения понятия эквивалентного диаметра $d_э$, который определяют как среднегеометрический размер ячеек смежных сит d_i и d_{i+1} , где выделяют класс $d_э = \sqrt{d_i d_{i+1}}$, или как среднеарифметический размер ячеек смежных сит $d_э = \frac{d_i + d_{i+1}}{2}$. Б.В. Кизельвальтером конечную скорость свободного падения частицы неправильной формы предложено вычислять по формуле [18]:

$$U = PU_э, \text{ м/с},$$

где P – поправочный коэффициент, учитывающий форму частицы;

$U_э$ – скорость падения шарообразной частицы, м/с.

Ввиду традиционности применения сырья с большим содержанием окатанных частиц кварца (строительные и стекольные пески) область $0,1 < d < 2$ мм оказалась наиболее изученной экспериментально. В литературных источниках приводятся данные разных авторов, получивших экспериментальные значения скорости свободного падения частиц кварца. Таким образом, ввиду наличия достаточного количества экспериментального материала в дальнейших исследованиях конечная скорость падения окатанных частиц кварца может приниматься по известным в литературе экспериментальным данным.

В отличие от свободных условий стесненное движение твердых частиц осуществляется в ограниченном объеме жидкости и в присутствии других частиц. Стесненное движение минеральных зерен условно делят на движение монодисперсной и полидисперсной твердых фаз. Реальные условия движения зерен в гравитационных аппаратах характеризуется закономерностями массового перемещения группы зерен, при котором каждое зерно испытывает влияние окружающих зерен, а среда – динамическое воздействие каждого зерна в отдельности и всей движущейся массы в целом. Совместное движение зерен сопровождается не только гидродинамическим сопротивлением, но и дополнительным сопротивлением от механического взаимодействия твердых частиц за счет взаимного столкновения, трения частиц друг о друга и стенки гравитационного аппарата. Возникающие дополнительные сопротивления резко меняют характер движения каждой отдельной твердой частицы и гидродинамические условия обтекания ее жидкостью по сравнению с условиями свободного движения.

Закономерности стесненного движения тел основываются на двух основных концепциях:

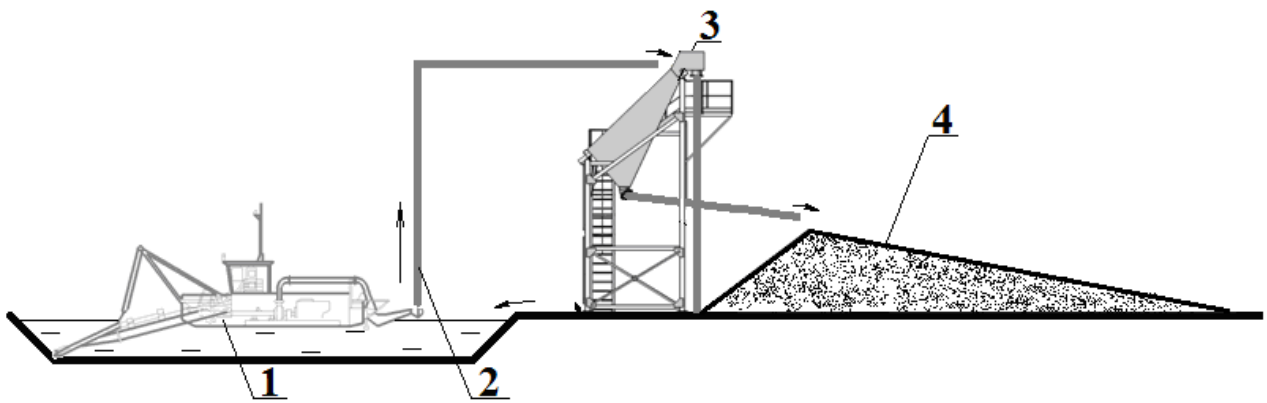
- совокупное движение частиц в виде фильтрационной среды, через которую жидкость протекает в вертикальном направлении снизу вверх;
- падение отдельной частицы, находящейся в массе других.

1.3. Применение классификаторов в составе комплексов добычи и переработки

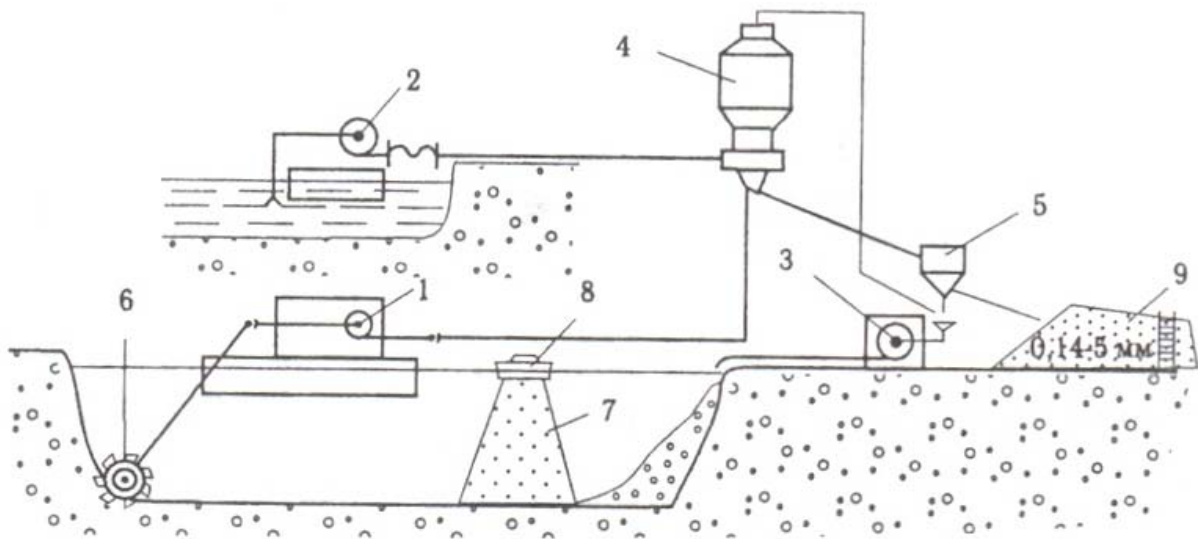
В практике отечественной и мировой гидромеханизации находят применение комплексы оборудования в составе землесосных снарядов, выполняющих разработку и гидротранспортирование песчаной пульпы по пульпопроводам к перерабатывающим установкам [24]. Элементы таких комплексов добычи и переработки (КДП) связаны не только технологически, но и конструктивно. Их применение позволяет снизить себестоимость получения готовой продукции и вести разработку сложноструктурных месторождений с полезным ископаемым, содержащим включения гравийных и мелкодисперсных примесей. Для обеспечения необходимых качеств, например, песка и гравия, применяются различные технологические схемы фракционирования с использованием различного обогатительного оборудования. Приведем наиболее распространенные примеры технологических комплексов добычи и переработки (КДП) для песчаных и песчано-гравийных материалов **«землесосный снаряд – пульпопровод – классификационная установка»** (рис. 1.7 – 1.9) [24].

Схема одного из наиболее простых и распространенных комплексов для добычи песка при содержании в исходном продукте более 3 % пылеватых и глинистых частиц приведена на рисунке 1.7, а. Землесосным снарядом 1, оборудованным разрыхлителем, посредством грунтового насоса пульпа подается по пульпопроводу 2 к классифицирующему устройству 3. После классификации полезное ископаемое в составе пульпы сливают на карту намыва 4, где товарная продукция окончательно классифицируется и обезвоживается.

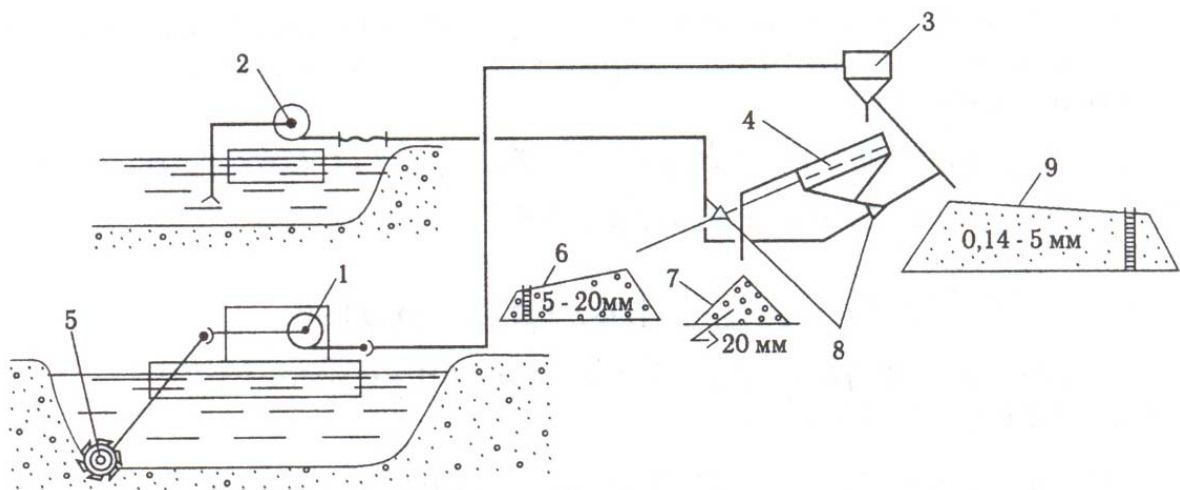
Для разработки карьеров при содержании в полезном ископаемом более 3 % пылевидных и глинистых частиц и до 15 % гравия предназначен комплекс (рис. 1.7, б). Технологическая схема комплекса предусматривает разработку полезного ископаемого землесосным снарядом 1, оборудованным разрыхлителем 6 и гидротранспортирование пульпы к приемному патрубку вертикального гидроклассификатора ГКД-2-1600 4. Подпитка классификатора водой выполняется посредством плавучей насосной станции 2. После классификации крупный песок в составе пульпы сливается в конический грохот 5, где разделяется на песок и гравий. Обезвоженный товарный продукт направляется в склад 9, а шламы при помощи грунтового насоса 3 сливаются в выработанное пространство карьера, огражденное дамбой 7 и соединенное с котлованом подпиточной трубой 8. Комплекс для добычи и фракционирования песчано-гравийных грунтов (рис. 1.7, в) включает землесосный



а)



б)



в)

Рис. 1.7. Схемы КДП «землесосный снаряд – пульпопровод – классификационная установка»

снаряд 1 с разрыхлителем 5, плавучую насосную станцию 2, конический грохот 3, вибрационный грохот 4, гидроэлеваторы 8 и склады товарной продукции 6, 7, 9.

Исходная пульпа подается пульпопроводом на конический грохот, где выполняют предварительное разделение по граничному зерну 5 мм. Фракции крупнее 5 мм, частично засоренные более мелкими зернами, подаются на виброгрохот, где происходит разделение продукта по граничному зерну 20 мм и окончательное отделение зерен мельче 5 мм. Гравий крупностью > 20 мм складировается в конусный склад, а классы 5...20 и 0,14...5 мм гидроэлеваторами подаются на карты намыва.

При необходимости выделения гравия и незначительном содержании тонкодисперсных примесей в полезном ископаемом традиционно применяют комплекс в составе конического грохота (рис. 1.8).

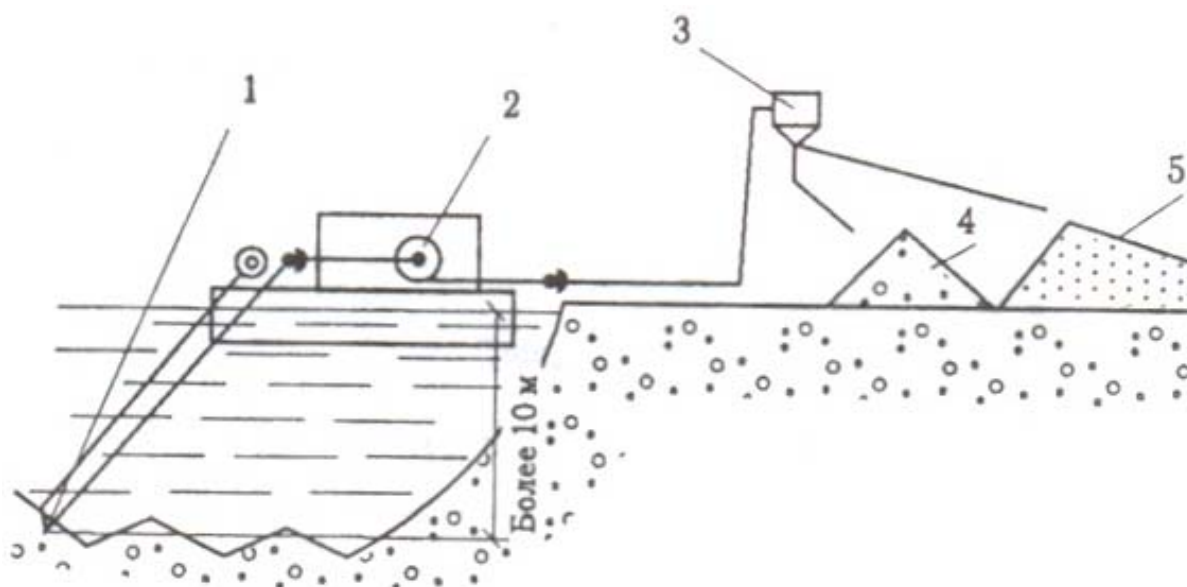


Рис. 1.8. Схема КДП на базе конического грохота: 1 – разрыхлитель; 2 – грунтовой насос; 3 – конический грохот; 4 – склад гравия; 5 – карта намыва

Общим существенным недостатком приведенных схем КДП является необходимость применения для складирования и обезвоживания песков карт намыва, которые как технологический элемент комплекса обладают значительными недостатками, подробно описанными в п. 1.1.

Одним из вариантов комплекса, в котором не применяются карты намыва, является КДП, разработанный ЦНИИС Минтрансстроя (рис. 1.9) [5]. В соответствии с технологической схемой КДП полезное ископаемое разрабатывается землесосным снарядом 1 и по пульпопроводу гидротранспортируется к приемному патрубку конического грохота 2, где классифицируется по крупности 5 мм. Надрешетный продукт подается на вибрационный грохот 3, где промывается и классифицируется. Подрешетный продукт сливается в вертикальный гидравлический классификатор 4. Обезвоженный гравий и песок складировываются ленточными конвейерами 5, 6 в склады 7, 8. Подачу воды на гидравлическую классификацию выполняют

насосом 9. Шламы классификации подают в шламоотстойник 10, а осветленная вода сливается в котлован земснаряда.

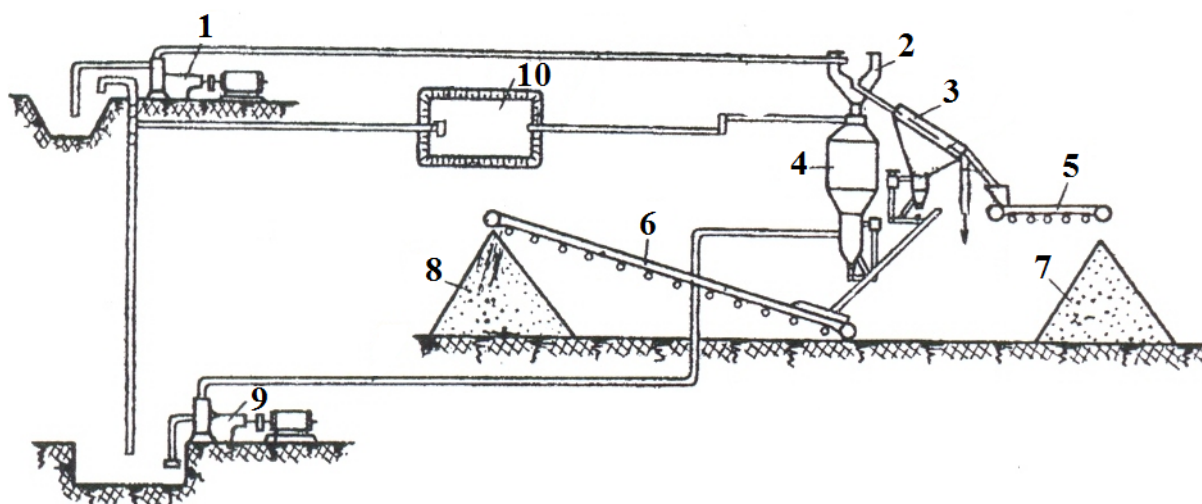


Рис. 1.9. Схема КДП ЦНИИС Минтрансстроя

Опыт разработки и эксплуатации элементов комплексов для гидромеханизированной разработки и переработки рудных и нерудных зернистых полезных ископаемых, анализ состояния исследований и методов расчета их основных параметров позволяют сделать вывод о рациональности применения машин, реализующих гидравлическую классификацию (особенно в горизонтальном несущем потоке) при освоении песчано-гравийных месторождений. Это требует разработки теории процесса гидравлической классификации в горизонтальном несущем потоке, учитывающего его ускоренное движение, и научного обоснования параметров гидравлических классификаторов, в том числе как элементов комплексов для гидромеханизированной добычи и переработки полезных ископаемых.

2. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КЛАССИФИКАТОРА ДЛЯ ГРАВИТАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПОТОКЕ

2.1. Физические основы процесса взаимодействия классификатора с горизонтальным потоком пульпы, несущим твердые частицы

Известно, что исходное качество природных рудных и нерудных песков по набору основных контролируемых физико-механических свойств (модуль крупности, процент глинистых и пылевидных частиц и др.) не соответствует действующим нормам к конечной продукции [1, 2]. В связи с этим необходима переработка исходного сырья, которая предусматривает обычно отделение от песка крупных включений, например, гравийных фракций, мелких пылеватых и глинистых (диспергированных) примесей, комовой глины, растительных включений и примесей ракушки. Удаление из горной массы крупных включений не представляет особых трудностей. В то же время, процесс очистки песков от мелкодисперсных примесей требует более тщательного изучения. В результате обзора средств для переработки песков при гидромеханизированных разработках часты случаи применения гравитационных классификаторов, принцип действия которых основывается на различной скорости осаждения частиц в вертикальном потоке пульпы (п.1.3). К таким аппаратам можно отнести вертикальные классификаторы: ВНИИГС типа ГКД-2, ВНИИжелезобетон типа ГКХ, ВНИИнеруд, «Реакс», ВНИИГС с крутопадающим потоком типа СК и др.

Предварительный обзор, выполненный по критерию минимизации эксплуатационных расходов на переработку полезного ископаемого, добываемого гидромеханизированным способом, подтверждает привлекательность гравитационного способа классификации в горизонтальном потоке пульпы [3 – 5]. Он имеет следующие преимущества и недостатки:

– горизонтальные классификаторы обладают меньшими габаритными размерами и, соответственно, меньшей металлоемкостью, чем вертикальные. Это объясняется тем, что разделение материала в горизонтальном классификаторе обеспечивается при скорости потока пульпы большей, чем в вертикальном классификаторе;

– разделение пульпы в горизонтальном классификаторе не требует дополнительных затрат энергии, т.к. пульпа разделяется под действием гравитационных сил;

– не требуется подача в классификатор пульпы с большим напором как в гидроциклон. В связи с этим гидроабразивный износ в горизонтальном классификаторе практически отсутствует.

Недостатком можно считать зависимость качества товарной продукции от качества исходного сырья и необходимости постоянного контроля технологических параметров.

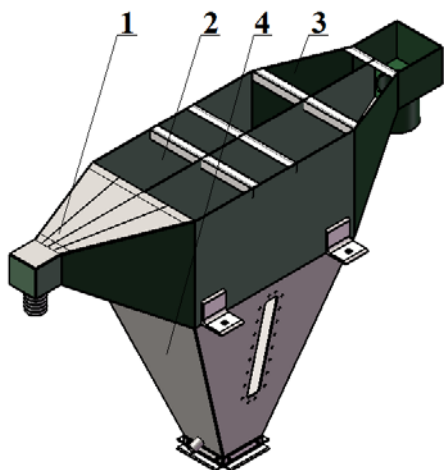


Рис. 2.1. Модель горизонтального классификатора

Классификатор гидравлический горизонтальный состоит из проточной части, разделенной на участки: разделения 1, классификации 2, истечения 3 и бункера для накопления зернистого материала 4 (рис. 2.1). Аппарат для гравитационной переработки зернистых материалов в горизонтальном потоке пульпы может быть изображен в виде схемы (рис. 2.2) [25].

Участок разделения представляет собой область, ограниченную корпусом аппарата с расширяющимся сечением по направлению движения пульпы. Перемещение потока в данной области характеризуется началом процесса осаждения частиц и их движением в область накопления. Движение частиц в рассматриваемой области характеризуется воздействием на них сил: скоростного напора пульпы, тяжести, Архимеда, сопротивления среды.

Участок классификации является областью, ограниченной корпусом аппарата с постоянным или переменным сечением по направлению движения пульпы. В участок классификации пульпа попадает из участка разделения.

Перемещение потока в данной области характеризуется завершением процесса осаждения частиц и их движением в область накопления.

Неосаждаемые частицы выносимых классов продолжают движение в составе горизонтального потока в направлении участка истечения.

Участок истечения ограничен корпусом аппарата с уменьшающимся сечением по направлению движения пульпы. В участок истечения пульпа попадает из участка классификации. Перемещение потока в данной области характеризуется выносом тонкодисперсных неосажденных частиц и их движением за пределы классификатора в слив.

Движение частиц в приведенных участках характеризуется воздействием на них сил скоростного напора пульпы, тяжести, Архимеда, сопротивления среды.

Участок накопления ограничен корпусом аппарата, представляющим собой бункер. Сюда осаждается зернистый материал, движущийся из участков разделения и классификации. Движение частиц в данной области сопровождается процессом падения и характеризуется воздействием на них сил тяжести, Архимеда, сопротивления среды, которые в первом приближении могут быть учтены гидравлической крупностью.

Движение осажденного зернистого материала за пределы участка накопления при его выгрузке из аппарата представляет собой процесс гравитационного истечения из бункера с наклонными стенками [25, 26 – 28].

Выполненный анализ физики процесса гравитационного разделения зернистых материалов в горизонтальном потоке пульпы позволяет приступить к разработке обобщенной математической модели движения частиц в основных областях процесса. При этом необходимо учесть данные, полученные в ходе

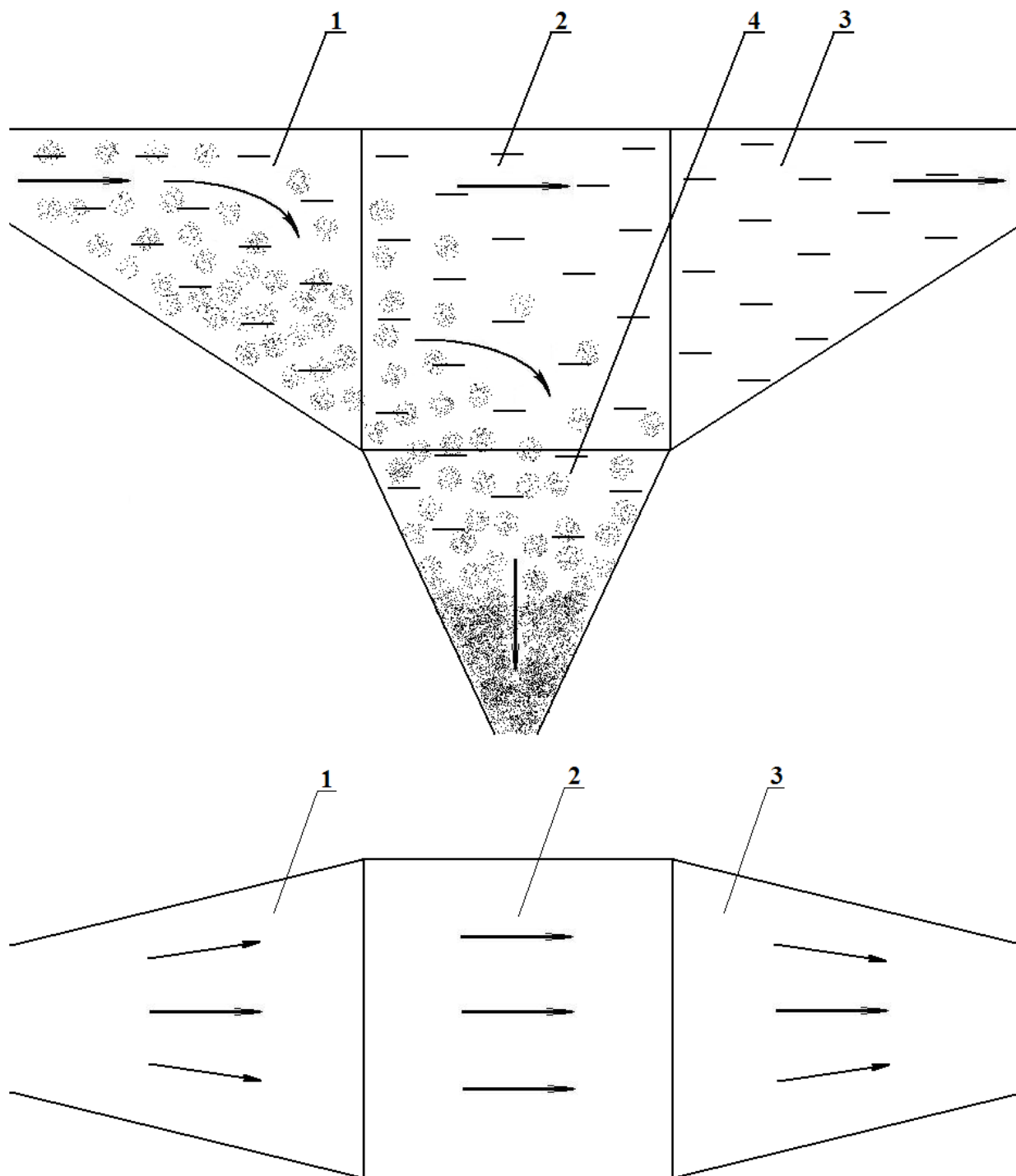


Рис. 2.2. Схема процесса гравитационной переработки зернистых материалов в горизонтальном потоке пульпы: 1 – участок разделения; 2 – участок классификации; 3 – участок истечения; 4 – участок накопления

предварительных экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных аппаратах с постоянной и переменной площадью сечения области разделения [25, 26]. Таким образом, для математического моделирования процесса приняты такие исходные данные ограничения и упрощения:

- область крупности твердых частиц $d = -5+0,15$ мм;
- диапазон скоростей горизонтального потока несущей среды $U_{\Pi} = 0,6 \dots 0,01$ м/с;

- частицы представляют собой шары равных размеров:
 $d_1 = d_2 = d_n = \dots = d_{cp}$;
- плотность всех рассматриваемых частиц одинакова и постоянна:
 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \dots = \rho_{ск}$;
- в процессе движения не происходит изменения первичной крупности частиц;
- плотность несущего потока постоянна.

2.2. Теоретические основы процесса взаимодействия проточной части классификатора с горизонтальным потоком пульпы

Процесс взаимодействия проточной части классификатора с горизонтальным потоком пульпы с целью гравитационной переработки зернистых материалов сопровождается течением несущего потока в пределах разнонаклонных поверхностей, а также оттоком вниз сгущенной пульпы. Рассматриваемый процесс разделен на участки: разделения, классификации, истечения (рис. 2.3) [25]. Корректное описание процесса гравитационной переработки зернистых материалов в горизонтальном потоке пульпы требует разработки математической модели движения потока в проточной части классификатора. В связи с этим разработка теоретических основ процесса движения потока жидкости в проточной части классификатора гидравлического

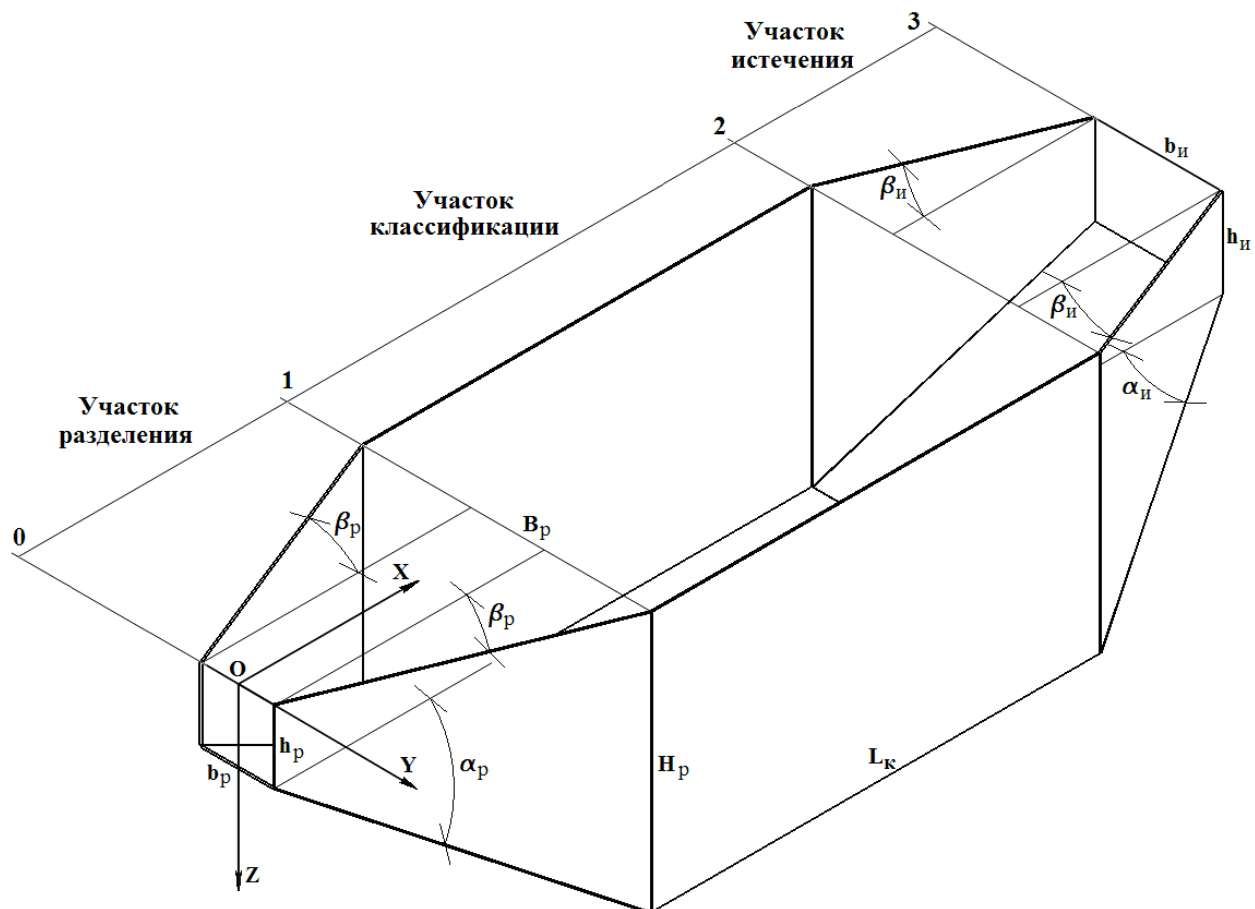


Рис. 2.3. Схема проточной части классификатора гидравлического горизонтального

горизонтального является важной и актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит обосновать рациональные конструктивные параметры классификатора гидравлического горизонтального.

Для математического описания процесса введем следующие обозначения [25]:

Q_p – производительность по исходной пульпе и на участке разделения, м³/с;

Q_k – производительность по пульпе на участке классификации, м³/с;

Q_u – производительность по пульпе на участке истечения, м³/с;

$Q_{нес}$ – производительность по сгущенной пульпе, м³/с;

b_p, h_p – ширина и высота потока в начальном сечении участка разделения, м;

B_p, H_p – ширина и высота потока в конечном сечении участка разделения и начальном сечении участка классификации, м;

b_u, h_u – ширина и высота потока в конечном сечении участка истечения, м;

α_p, β_p – углы расширения потока по осям О-Z и О-Y на участке разделения.

α_u, β_u – углы сужения потока по осям О-Z и О-Y на участке истечения.

Движение потока жидкости в горизонтальном классификаторе ввиду изменения живого сечения потока по длине является плавно изменяющимся и обладает следующими свойствами:

а) кривизна линий тока незначительна, поэтому центробежные силы не учитываются;

б) кривизна живых сечений потока незначительна и они рассматриваются как плоские;

в) скорость горизонтального потока несущей среды в любой точке сечения принимается равной его средней величине;

г) ввиду малой скорости потока вихревые потоки не учитываются;

д) поток питается постоянным гидродинамическим напором, его верхняя граница принимается горизонтальной.

Описание процесса взаимодействия проточной части классификатора с горизонтальным потоком пульпы выполним применяя уравнение Эйлера для идеальной (невязкой) жидкости [25, 29 – 37], которое в общем виде записывают как

$$\begin{cases} \frac{du_x}{dt} = \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z}; \\ \frac{du_y}{dt} = \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z}; \\ \frac{du_z}{dt} = \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z}. \end{cases} \quad (2.1)$$

Рассмотрим движение потока на **участке разделения** (рис. 2.3) вдоль оси О-Х при его расширении в направлениях осей О-У и О-Z. Производительность в сечениях 0 и 1 постоянна, то есть $Q_p = const$, значит

$$Q_p^0 = Q_p^1 = b_p h_p u_{xp}^0 = B_p H_p u_{xp}^1.$$

Тогда скорость потока

$$u_{xp}^0 = \frac{Q_p^0}{b_p h_p}, \quad u_{xp}^1 = \frac{Q_p^1}{B_p H_p}.$$

Изменение параметров прямоугольного сечения по координате x представится в виде:

$$\begin{aligned} b &= b_p + 2x \operatorname{tg} \beta_p; \\ h &= h_p + x \operatorname{tg} \alpha_p. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Зависимость скорости потока в поперечном и вертикальном направлениях, то есть по координатам y и z от скорости в продольном направлении, то есть по координате x примет значение

$$\begin{aligned} u_{yp} &= \frac{db}{dt} = \operatorname{tg} \beta_p \frac{dx}{dt} = \operatorname{tg} \beta_p u_{xp}; \\ u_{zp} &= \frac{dh}{dt} = \operatorname{tg} \alpha_p \frac{dx}{dt} = \operatorname{tg} \alpha_p u_{xp}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Движение потока в проточной части классификатора ввиду изменения площади сечения является неравномерным. На практике неустановившееся движение в естественных и искусственных открытых руслах рассматривается как установившееся [25, 29 – 32]. Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} &= 0. \end{aligned}$$

Для решения простых задач достаточно определения максимальных значений скорости и ускорения, тогда систему уравнений (2.1) с учетом описанных зависимостей скорости потока в поперечном и вертикальном направлениях можно записать в виде:

$$\begin{cases} \frac{du_{xp}}{dt} = u_{xp} \frac{\partial u_{xp}}{\partial x} + 2tg\beta_p u_{xp} \frac{\partial u_{xp}}{\partial y} + tg\alpha_p u_{xp} \frac{\partial u_{xp}}{\partial z}; \\ \frac{du_{yp}}{dt} = u_{xp} tg\beta_p \frac{\partial u_{xp}}{\partial x} + u_{xp} (tg\beta_p)^2 \frac{\partial u_{xp}}{\partial y} + u_{xp} tg\alpha_p tg\beta_p \frac{\partial u_{xp}}{\partial z}; \\ \frac{du_{zp}}{dt} = u_{xp} tg\alpha_p \frac{\partial u_{xp}}{\partial x} + u_{xp} tg\beta_p tg\alpha_p \frac{\partial u_{xp}}{\partial y} + (tg\alpha_p)^2 u_{xp} \frac{\partial u_{xp}}{\partial z}. \end{cases} \quad (2.4)$$

По причине принятых допущений о незначительности кривизны живых сечений потока, приравнении скорости потока в его любой точке среднему значению, приведении параметров живого сечения потока к оси O-X систему уравнений (2.4) можно упростить до вида:

$$\begin{cases} \frac{du_{xp}}{dt} = u_{xp} \frac{\partial u_{xp}}{\partial x}; \\ \frac{du_{yp}}{dt} = u_{xp} tg\beta_p \frac{\partial u_{xp}}{\partial x}; \\ \frac{du_{zp}}{dt} = u_{xp} tg\alpha_p \frac{\partial u_{xp}}{\partial x}. \end{cases} \quad (2.5)$$

На участке разделения изменение параметров прямоугольного сечения по координате x описаны выражениями (2.2), отсюда скорость потока получим как отношение

$$u_{xp} = \frac{Q_p}{(b_p + 2x_p tg\beta_p)(h_p + x_p tg\alpha_p)}.$$

Для упрощения дальнейших преобразований приведем уравнение скорости потока к виду

$$u_{xp} = \frac{Q_p}{2x_p^2 tg\beta_p tg\alpha_p + x_p (b_p tg\alpha_p + 2h_p tg\beta_p) + b_p h_p}.$$

Введем обозначения

$$a = 2tg\beta_p tg\alpha_p; \quad b = b_p tg\alpha_p + h_p 2tg\beta_p; \quad c = b_p h_p. \quad (2.6)$$

Тогда после подстановки обозначений (2.6) с учетом зависимостей параметров расширения потока по координате x (2.3) запишем систему уравнений скорости потока на участке разделения:

$$\begin{cases} u_{xp} = \frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c}; \\ u_{yp} = \operatorname{tg}\beta_p \frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c}; \\ u_{zp} = \operatorname{tg}\alpha_p \frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c}. \end{cases} \quad (2.7)$$

После преобразований частная производная $\frac{\partial u_x}{\partial x}$ примет вид:

$$\frac{\partial u_{xp}}{\partial x} = \frac{-Q_p(2ax_p + b)}{(ax_p^2 + bx_p + c)^2}. \quad (2.8)$$

Тогда, преобразуя систему уравнений (2.5) с учетом вида частной производной (2.8), ускорение потока на участке разделения в направлении осей O-X, O-Y, O-Z запишем как систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{du_{xp}}{dt} = \frac{-Q_p^2(2ax_p + b)}{(ax_p^2 + bx_p + c)^3}; \\ \frac{du_{yp}}{dt} = \operatorname{tg}\beta_p \frac{-Q_p^2(2ax_p + b)}{(ax_p^2 + bx_p + c)^3}; \\ \frac{du_{zp}}{dt} = \operatorname{tg}\alpha_p \frac{-Q_p^2(2ax_p + b)}{(ax_p^2 + bx_p + c)^3}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Участок классификации (рис. 2.3) является областью, ограниченной корпусом аппарата с постоянным сечением по направлению движения пульпы. В участок классификации пульпа попадает из участка разделения. Допускаем, что внизу проточная часть участка ограничена осажженным ранее зернистым материалом, вихревые потоки у образованной поверхности незначительны. Производительность пульпы на участке классификации характеризуется

переменным значением по причине оттока вниз сгущенной пульпы с производительностью $Q_{нес}$. В этом случае производительность пульпы на выходе из участка классификации получим как разницу $Q_k = Q_p - Q_{нес}$. Предположим, что сгущенная пульпа движется вниз по всему сечению участка классификации равномерно. Значит, удельная производительность по сгущенному продукту

$$q = \frac{Q_{нес}}{L_k}.$$

В этом случае, производительность потока на участке классификации получим из формулы:

$$Q_k = Q_p - qx_k.$$

Тогда уравнение скорости потока на участке классификации по оси O-X примет вид:

$$u_{xk} = \frac{Q_p - qx_k}{B_p H_p}. \quad (2.10)$$

Скорость движения сгущенной пульпы вследствие равномерности истечения по всему сечению участка классификации примет постоянное значение:

$$u_{zk} = \frac{q}{B_p}. \quad (2.11)$$

На участке классификации, ввиду постоянства площади сечения потока по направлению движения пульпы, то есть по координате x , отсутствует перемещение потока по оси O-Y. В этом случае $u_{yo} = 0$. Тогда для решения плоской задачи система уравнений для движения потока (2.1) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{du_{xk}}{dt} = u_{xk} \frac{\partial u_{xk}}{\partial x} + u_{zk} \frac{\partial u_{xk}}{\partial z}; \\ \frac{du_{zk}}{dt} = u_{xk} \frac{\partial u_{zk}}{\partial x} + u_{zk} \frac{\partial u_{zk}}{\partial z}. \end{cases} \quad (2.12)$$

Взяв производные по скорости потока (2.10, 2.11) и приняв во внимание принятые ранее допущения, получим систему уравнений для расчета ускорений движения потока на участке классификации:

$$\begin{cases} \frac{du_{xк}}{dt} = \frac{q^2 x_k - Q_p q}{(B_p H_p)^2}, \\ \frac{du_{zк}}{dt} = 0. \end{cases} \quad (2.13)$$

Так как **участок истечения** ограничен корпусом аппарата с уменьшающимся сечением по направлению движения пульпы (рис. 2.3), то перемещение потока в данной области характеризуется увеличением скорости потока. Изменение параметров прямоугольного сечения участка истечения по координате x можно получить в виде:

$$\begin{aligned} B &= B_p - 2x_u \operatorname{tg} \beta_u; \\ H &= H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u. \end{aligned}$$

Производительность по пульпе на участке истечения постоянна и может быть получена как разность: $Q_u = Q_p - Q_{\text{нес}}$. Тогда уравнение скорости потока на участке истечения запишем как отношение:

$$u_{xu} = \frac{Q_u}{(B_p - 2x_u \operatorname{tg} \beta_u)(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u)}.$$

Преобразуем уравнение скорости потока на участке истечения к виду:

$$u_{xu} = \frac{Q_u}{2x_u^2 \operatorname{tg} \beta_u \operatorname{tg} \alpha_u - x_u (B_p \operatorname{tg} \alpha_u + 2H_p \operatorname{tg} \beta_u) + B_p H_p}.$$

Введем обозначения:

$$d = 2 \operatorname{tg} \beta_u \operatorname{tg} \alpha_u; \quad e = B_p \operatorname{tg} \alpha_u + H_p 2 \operatorname{tg} \beta_u; \quad f = B_p H_p.$$

В этом случае система уравнений для скорости потока на участке истечения аналогично (2.7) примет вид:

$$\overbrace{u_{xu} = \frac{Q_u}{dx_u^2 - ex_u + f}; u_{yu} = \operatorname{tg} \beta_u \frac{Q_u}{dx_u^2 - ex_u + f}; u_{zu} = \operatorname{tg} \alpha_u \frac{Q_u}{dx_u^2 - ex_u + f}}. \quad (2.14)$$

После преобразований, выполненных аналогично (2.8), ускорение потока на участке истечения в направлении осей O-X, O-Y, O-Z запишем как систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{du_{xu}}{dt} = \frac{-Q_u^2(2dx_u - e)}{(dx_u^2 - ex_u + f)^3}; \\ \frac{du_{yu}}{dt} = \operatorname{tg}\beta_u \frac{-Q_u^2(2dx_u - e)}{(dx_u^2 - ex_u + f)^3}; \\ \frac{du_{zu}}{dt} = \operatorname{tg}\alpha_u \frac{-Q_u^2(2dx_u - e)}{(dx_u^2 - ex_u + f)^3}. \end{cases} \quad (2.15)$$

Пример графического описания полученных теоретических зависимостей для скорости потока на участках разделения (2.7), классификации (2.10, 2.11) и истечения (2.14) приведен на рисунке 2.4 [25, 32]. Видно, что участок разделения характеризуется закономерным снижением скорости по всем координатам в соответствии с увеличением площади потока, а участок истечения – обратным процессом увеличения скорости при уменьшении площади сечения потока. На участке классификации наблюдается плавное уменьшение скорости потока по оси O-X ввиду оттока сгущенной пульпы, нулевое значение скорости по оси O-Y и линейное увеличение скорости потока по оси O-Z.

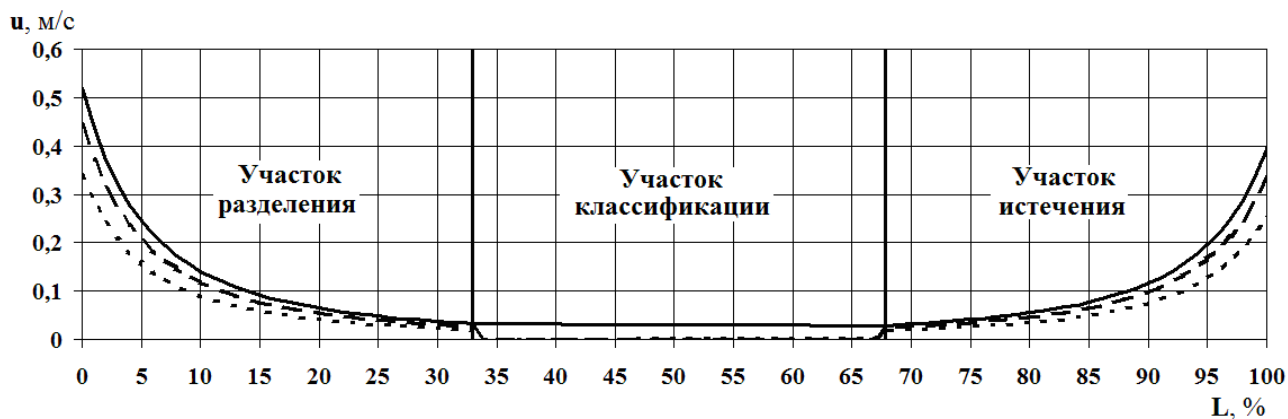


Рис. 2.4. Скорость потока в классификаторе гидравлическом горизонтальном: — — — по координате x ; — — — по координате y ; · · · · — по координате z .

Пример графического представления математического моделирования ускорения потока на участках разделения (2.9), классификации (2.13) и истечения (2.15) приведен на рисунке 2.5. На участке разделения по всем осям течение потока характеризуется отрицательными, приближающимися к нулю значениями ускорения. На участке классификации ускорение потока остается практически неизменным. На участке истечения наблюдается увеличение

ускорения по всем осям от отрицательных близких к нулю до положительных значений.



Рис. 2.5. Ускорение потока в классификаторе гидравлическом горизонтальном: — — — по координате x ; — — — по координате y ; · · · · · по координате z .

2.3. Теоретические основы процесса взаимодействия проточной части классификатора с горизонтальным потоком пульпы с учетом распределения скорости потока

Полученные ранее зависимости описывают движение потока в классификаторе (рис. 2.3) приняв допущение о незначительности кривизны живых сечений потока. Таким образом, полученные выражения позволяют определить средние значения скорости потока. Однако известно, что в зависимости от режима движения жидкости скорость потока распределяется по нелинейным законам [25, 29 – 31, 33]. Определим параметры взаимодействия проточной части классификатора с горизонтальным потоком пульпы. В предлагаемой конструкции горизонтальный поток разделен на n параллельных потоков посредством продольных перегородок (рис. 2.6). В связи с этим примем допущение, что кривизна сечения всего потока вдоль оси $O-Y$ незначительна, поэтому приравняем скорость потока в его любой точке среднему значению, тогда частная производная $\partial u_x / \partial y = 0$. Эксплуатация горизонтального классификатора предполагается в составе комплекса «землесосный снаряд – пульпопровод – классификационная установка». В соответствии с опытом применения земснарядов при разработке рудных и нерудных песков средняя объемная концентрация пульпы не превышает 20 % [20, 38, 39]. При такой низкой концентрации и параметрах движения близких к турбулентному распределение скорости может быть описано степенным законом [18, 25, 40 – 43]. В соответствии с исследованиями движения потока в открытом русле зависимость скорости потока от его глубины, например, в принятых обозначениях для участка разделения классификатора (рис. 2.3, 2.6), имеет вид функции:

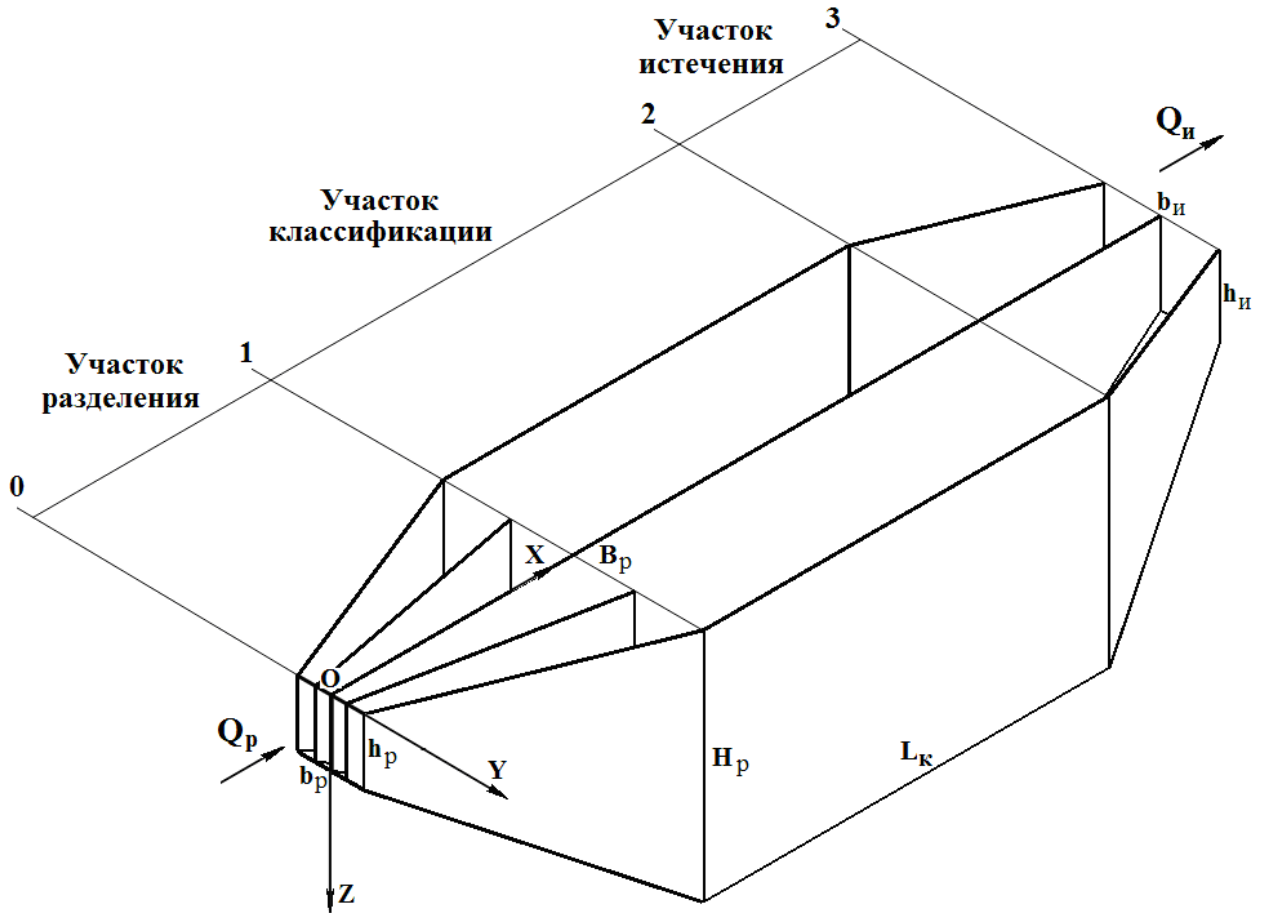


Рис. 2.6. Схема проточной части классификатора гидравлического горизонтального с разделительными перегородками

$$U_{xp} = u_{xp} \frac{p+1}{p} \left(\frac{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p}{h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p} \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (2.16)$$

где p – эмпирический коэффициент, который для гладких поверхностей принимают из диапазона 7...10 [44];

z_p – текущее значение глубины потока на участке разделения, м.

В этом случае $\frac{\partial U_{xp}}{\partial z} \neq 0$, тогда систему уравнений (2.4) представим как выражение:

$$\begin{cases} \frac{dU_{xp}}{dt} = U_{xp} \frac{\partial U_{xp}}{\partial x} + \operatorname{tg} \alpha_p U_{xp} \frac{\partial U_{xp}}{\partial z}; \\ \frac{dU_{yp}}{dt} = U_{xp} \operatorname{tg} \beta_p \frac{\partial U_{xp}}{\partial x} + U_{xp} \operatorname{tg} \alpha_p \operatorname{tg} \beta_p \frac{\partial U_{xp}}{\partial z}; \\ \frac{dU_{zp}}{dt} = U_{xp} \operatorname{tg} \alpha_p \frac{\partial U_{xp}}{\partial x} + (\operatorname{tg} \alpha_p)^2 U_{xp} \frac{\partial U_{xp}}{\partial z}. \end{cases} \quad (2.17)$$

Учитывая приведенную зависимость скорости от глубины потока (2.16), система уравнений скорости потока на участке разделения примет вид

$$\begin{cases} U_{xp} = \frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p}{h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot H(f_1(x, z)); \\ U_{yp} = \operatorname{tg} \beta_p \frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p}{h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot H(f_1(x, z)); \\ U_{zp} = \operatorname{tg} \alpha_p \frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p}{h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot H(f_1(x, z)), \end{cases} \quad (2.18)$$

где $H(f_1(x, z))$ – функция Хевисайда, равна единице при положительном и нулю при нулевом и отрицательном значениях $f_1(x, z)$.

$$\text{Для участка разделения } f_1(x, z) = \left[1 - \left(\frac{z_p}{h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p} \right)^2 \right].$$

Пример графического описания полученных теоретических зависимостей для скорости потока на участке разделения (2.18) приведен на рисунке 2.7, а. Из графиков видно, что на участке разделения скорости по всем координатам закономерно снижаются пропорционально увеличению площади сечения потока.

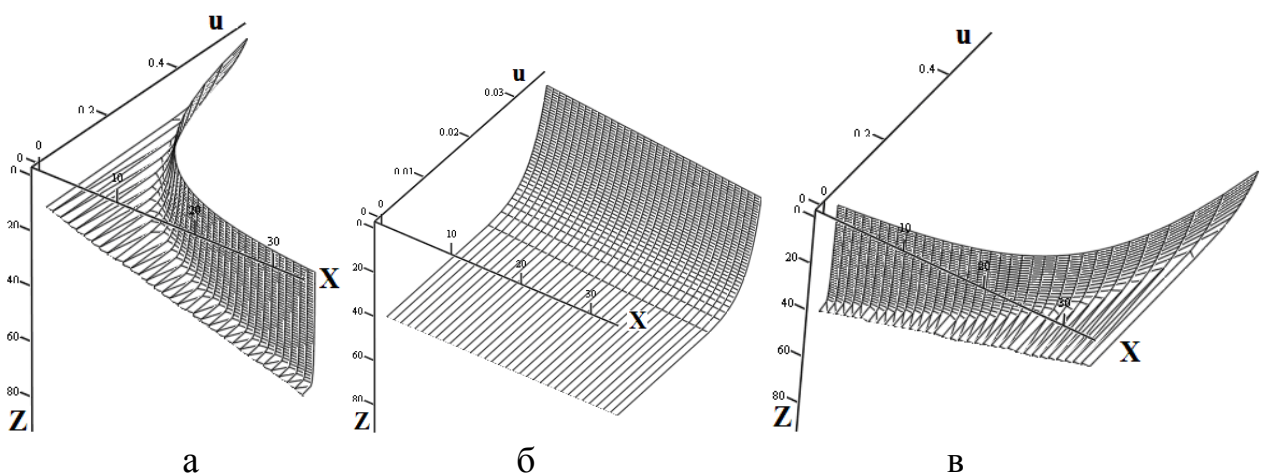


Рис. 2.7. Скорость потока в классификаторе гидравлическом горизонтальном в участках: а – разделения; б – классификации; в – истечения

Распределение ускорения потока по его глубине получим, взяв частные производные $\frac{\partial U_x}{\partial x}$ и $\frac{\partial U_x}{\partial z}$, тогда для участка разделения

$$\frac{\partial U_{xp}}{\partial x} = \frac{-Q_p(2ax_p + b)}{(ax_p^2 + bx_p + c)^2} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p}{h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot H(f_1(x, z)) +$$

$$+ \frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c} \cdot \left\{ \frac{p+1}{p} \left[\frac{z_p}{h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p} \right]^{\frac{1}{p}-1} \cdot \frac{-z_p \operatorname{tg} \alpha_p}{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)^2} \right\} \cdot H(f_1(x, z)),$$

$$\frac{\partial U_{xp}}{\partial z} = \frac{-Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c} \cdot \frac{p+1}{p^2} \cdot \frac{[(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]^{\frac{1}{p}-1}}{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)^{\frac{1}{p}}} \cdot H(f_1(x, z)).$$

После преобразований и упрощений систему (2.17) для определения распределения ускорений потока во всех точках сечения на участке разделения в направлении осей O-X, O-Y, O-Z запишем как систему уравнений (2.19).

Ускорение потока на участке разделения, пример расчета которого изображен на рисунке 2.8, имеет отрицательные значения с уменьшением абсолютных значений по гиперболическому закону до близких нулю при переходе в область осаждения.

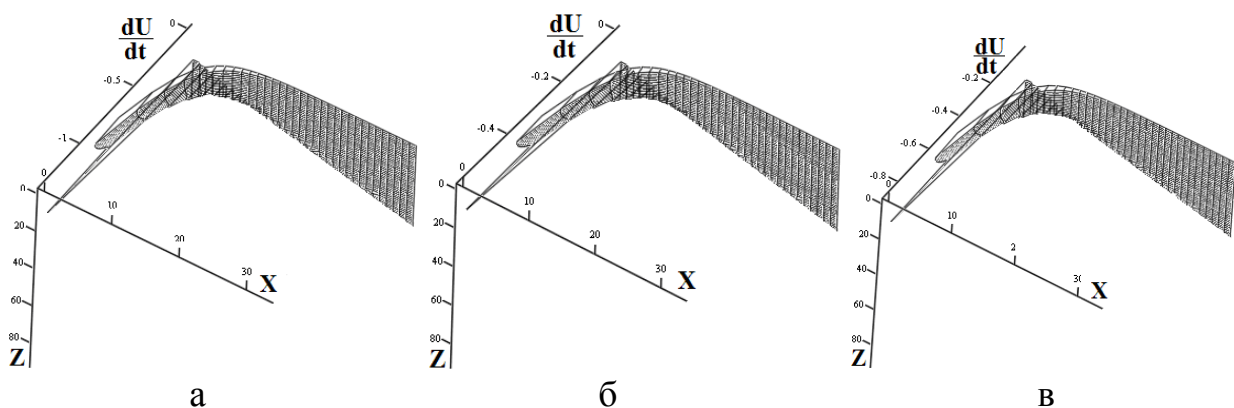


Рис. 2.8. Ускорение потока в области разделения: а – по координате x ; б – по координате y ; в – по координате z

Для определения скорости горизонтального потока на участке классификации воспользуемся полученными ранее выражениями (2.10, 2.11), характеризующими скорость течения потока по осям О-Х и О-Z при незначительной кривизне сечения потока. Значит, с учетом закономерности распределения ускорения потока по его глубине выражение скорости потока на участке классификации получим в виде системы уравнений (2.20):

$$\left\{ \begin{aligned}
 & \frac{dU_{xp}}{dt} = \frac{Q_p^{2(p+1)^2} \cdot [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]_p^{\frac{1}{p}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c) \cdot p}{p^3 \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)^3 (h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)_p^{\frac{2}{p}}} \times \\
 & \times \left[\frac{(2ax_p + b) [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]_p^{\frac{1}{p}}}{\operatorname{tg} \alpha_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)} - \frac{\frac{1}{z_p^p}}{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)} - \left[(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)_p^{\frac{1}{p}} - \frac{1}{p} z_p^{\frac{1}{p-1}} \right] \right] \cdot H(f_1(x, z)); \\
 & \frac{dU_{yp}}{dt} = \frac{Q_p^{2(p+1)^2} \cdot [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]_p^{\frac{1}{p}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_p \cdot \operatorname{tg} \beta_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c) \cdot p}{p^3 \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)^3 (h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)_p^{\frac{2}{p}}} \times \\
 & \times \left[\frac{(2ax_p + b) [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]_p^{\frac{1}{p}}}{\operatorname{tg} \alpha_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)} - \frac{\frac{1}{z_p^p}}{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)} - \left[(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)_p^{\frac{1}{p}} - \frac{1}{p} z_p^{\frac{1}{p-1}} \right] \right] \cdot H(f_1(x, z)); \\
 & \frac{dU_{zp}}{dt} = \frac{Q_p^{2(p+1)^2} \cdot [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]_p^{\frac{1}{p}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c) \cdot p}{p^3 \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)^3 (h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)_p^{\frac{2}{p}}} \times \\
 & \times \left[\frac{(2ax_p + b) [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]_p^{\frac{1}{p}}}{\operatorname{tg} \alpha_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)} - \frac{\frac{1}{z_p^p}}{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)} - \operatorname{tg} \alpha_p \cdot \left[(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)_p^{\frac{1}{p}} - \frac{1}{p} z_p^{\frac{1}{p-1}} \right] \right] \cdot H(f_1(x, z)).
 \end{aligned} \right.$$

(2.19)

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{x\kappa} = \frac{Q_p - qx_\kappa}{B_p H_p} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{H_p - z_\kappa}{H_p} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot H(f_2(x, z)); \\ U_{z\kappa} = \frac{q}{B_p} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{B_p - z_\kappa}{B_p} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot H(f_2(x, z)), \end{array} \right. \quad (2.20)$$

где z_κ – текущее значение глубины потока на участке классификации, м;

$$f_2(x, z) = \left[1 - \left(\frac{z_\kappa}{H_p} \right)^2 \right] - \text{вид функции Хевисайда для участка классификации.}$$

Пример построения поверхности для скорости потока на участке классификации показан на рисунке 2.7, б. Из графика видно скорость потока незначительно уменьшается вследствие оттока сгущенной пульпы.

Частные производные $\frac{\partial U_{x\kappa}}{dx}$, $\frac{\partial U_{x\kappa}}{dz}$ при движении потока на участке классификации получим в виде выражений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_{x\kappa}}{dx} &= \frac{q^2 x_\kappa - Q_p q}{(B_p H_p)^2} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{H_p - z_\kappa}{H_p} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot H(f_2(x, z)), \\ \frac{\partial U_{x\kappa}}{dz} &= \frac{qx_\kappa - Q_p}{B_p H_p^{\frac{1}{p}+1}} \cdot \frac{p+1}{p^2} (H_p - z_\kappa)^{\frac{1}{p}-1} \cdot H(f_2(x, z)). \end{aligned}$$

Тогда, применив полученные выражения (2.10, 2.11, 2.12), после подстановок и преобразований запишем выражение для определения ускорений потока во всех точках сечения на участке классификации в направлении осей О-Х, О-З в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_{x\kappa}}{dt} = \frac{q^2 x_\kappa - Q_p q}{1} \cdot \frac{p+1}{p} \cdot \frac{(H_p - z_\kappa)^{\frac{1}{p}}}{B_p^2 H_p^{\frac{p^2+p+1}{p}}} \left[\frac{Q_p - qx_\kappa}{B_p (H_p)^{2p}} + \frac{1}{p(H_p - z_\kappa)} \right] \cdot H(f_2(x, z)); \\ \frac{dU_{z\kappa}}{dt} = \frac{-(qx_\kappa - Q_p)^2}{B_p^2 H_p^{\frac{1}{p}+2}} \cdot \frac{p+1}{p^2} (H_p - z_\kappa)^{\frac{1}{p}-1} \cdot H(f_2(x, z)). \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Пример построения поверхности для ускорения потока на участке классификации показан на рисунке 2.9. Ускорение потока на данном участке остается практически неизменным близким нулю в отрицательной области значений.

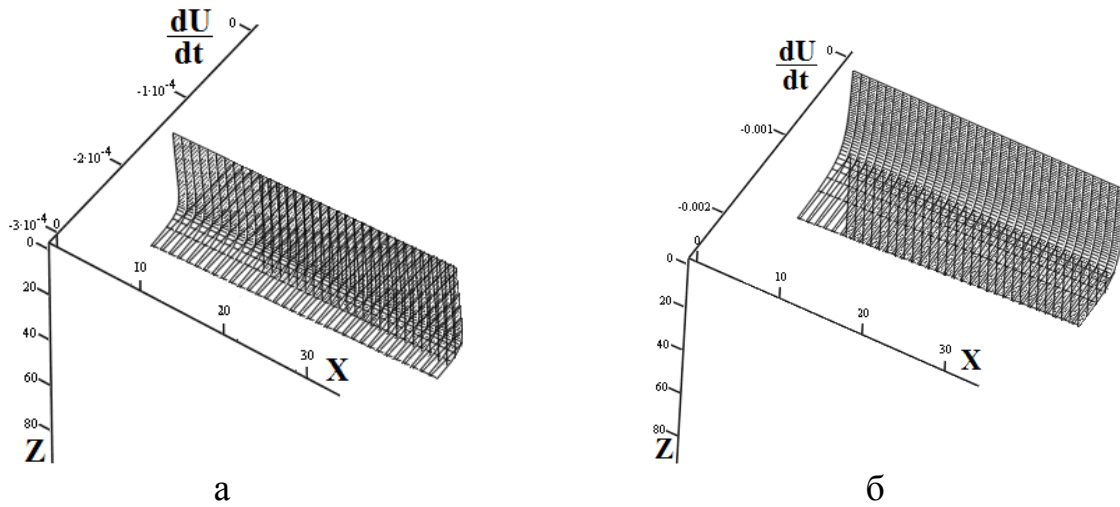


Рис. 2.9. Ускорение потока в области классификации: а – по координате x ; б – по координате z

Гидродинамические показатели течения потока в области истечения опишем аналогично зависимостям, полученным для области разделения. Тогда зависимость скорости потока от его глубины в рассматриваемой области запишем как функцию

$$U_{xu} = u_{xu} \frac{p+1}{p} \left(\frac{(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u}{H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u} \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (2.22)$$

где z_u – текущее значение глубины потока на участке истечения, м.

Ввиду наличия перегородок, разделяющих поток в области истечения, аналогично рассмотрению движения потока на участке разделения принимаем, что кривизна сечения всего потока вдоль оси $O-Y$ незначительна, поэтому частная производная $\partial U_{xu} / \partial y = 0$. Также, учитывая приведенную зависимость скорости от глубины потока (2.22), считаем, что $\partial U_{xu} / \partial z \neq 0$, значит систему уравнений (2.4) для скорости потока на участке истечения представим как

$$\begin{cases} \frac{dU_{xu}}{dt} = U_{xu} \frac{\partial U_{xu}}{\partial x} + \operatorname{tg} \alpha_u U_{xu} \frac{\partial U_{xu}}{\partial z}; \\ \frac{dU_{yu}}{dt} = U_{xu} \operatorname{tg} \beta_u \frac{\partial U_{xu}}{\partial x} + U_{xu} \operatorname{tg} \alpha_u \operatorname{tg} \beta_u \frac{\partial U_{xu}}{\partial z}; \\ \frac{dU_{zu}}{dt} = U_{xu} \operatorname{tg} \alpha_u \frac{\partial U_{xu}}{\partial x} + (\operatorname{tg} \alpha_u)^2 U_{xu} \frac{\partial U_{xu}}{\partial z}. \end{cases} \quad (2.23)$$

Тогда, учитывая приведенное выражение скорости от глубины потока (2.22), система уравнений скорости потока на участке истечения примет вид:

$$\begin{cases} U_{xu} = \frac{Q_u}{dx_u^2 - ex_u + f} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u}{H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot H(f_3(x, z)); \\ U_{yu} = \operatorname{tg} \beta_u \frac{Q_u}{dx_u^2 - ex_u + f} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u}{H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot H(f_3(x, z)); \\ U_{zu} = \operatorname{tg} \alpha_u \frac{Q_u}{dx_u^2 - ex_u + f} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u}{H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot H(f_3(x, z)), \end{cases} \quad (2.24)$$

где $f_3(x, z) = \left[1 - \left(\frac{z_u}{H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u} \right)^2 \right]$ – вид функции Хевисайда для участка истечения.

Пример графического описания разработанной математической модели для скорости потока на участке истечения (2.24) приведен на рисунке 2.7, в. Отсюда видно, что на участке истечения скорости по всем координатам увеличиваются пропорционально уменьшению площади сечения потока.

Частные производные примут вид выражений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_{xu}}{\partial x} &= \frac{-Q_u(2dx_u - e)}{(dx_u^2 - ex_u + f)^2} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u}{H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u} \right)^{\frac{1}{p}} \cdot H(f_3(x, z)) + \\ &+ \frac{Q_u}{dx_u^2 - ex_u + f} \cdot \left\{ \frac{p+1}{p} \left[\frac{z_u}{H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u} \right]^{\frac{1}{p}-1} \cdot \frac{-z_u \operatorname{tg} \alpha_u}{(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u)^2} \right\} \cdot H(f_3(x, z)), \\ \frac{\partial U_{xu}}{\partial z} &= \frac{-Q_u}{dx_u^2 - ex_u + f} \cdot \frac{p+1}{p^2} \cdot \frac{\left[\frac{(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u}{H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u} \right]^{\frac{1}{p}-1}}{\left(\frac{(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u}{H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u} \right)^{\frac{1}{p}}} \cdot H(f_3(x, z)). \end{aligned}$$

Тогда, применив полученные выражения (2.23, 2.24), зная вид записи частных производных $\frac{\partial U_{xu}}{\partial x}$ и $\frac{\partial U_{xu}}{\partial z}$, после преобразований запишем ускорение потока во всех точках сечения на участке истечения в направлении осей O-X, O-Y, O-Z как систему уравнений:

$$\left[\begin{aligned}
 & \frac{dU_{xu}}{dt} = \frac{Q_p^2 (p+1)^2 \cdot [(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u]^{\frac{1}{p}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_u \cdot (dx_u^2 - ex_u + f) \cdot p}{p^3 \cdot (dx_u^2 - ex_u + f)^3 (H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u)^p} \times \\
 & \times \left[\frac{(2dx_u - e) [(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u]^{\frac{1}{p}}}{\operatorname{tg} \alpha_u \cdot (dx_u^2 - ex_u + f)} - \frac{z_u^{\frac{1}{p}}}{(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u)} - \left[(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u)^{\frac{1}{p}} - \frac{1}{p} z_u^{\frac{1}{p}-1} \right] \right] \cdot H(f_3(x, z)); \\
 & \frac{dU_{yu}}{dt} = \frac{Q_p^2 (p+1)^2 \cdot [(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u]^{\frac{1}{p}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_u \cdot \operatorname{tg} \beta_u \cdot (dx_u^2 - ex_u + f) \cdot p}{p^3 \cdot (dx_u^2 - ex_u + f)^3 (H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u)^p} \times \\
 & \times \left[\frac{(2dx_u - e) [(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u]^{\frac{1}{p}}}{\operatorname{tg} \alpha_u \cdot (dx_u^2 - ex_u + f)} - \frac{z_u^{\frac{1}{p}}}{(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u)} - \left[(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u)^{\frac{1}{p}} - \frac{1}{p} z_u^{\frac{1}{p}-1} \right] \right] \cdot H(f_3(x, z)); \\
 & \frac{dU_{zu}}{dt} = \frac{Q_p^2 (p+1)^2 \cdot [(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u]^{\frac{1}{p}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_u \cdot (dx_u^2 - ex_u + f) \cdot p}{p^3 \cdot (dx_u^2 - ex_u + f)^3 (H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u)^p} \times \\
 & \times \left[\frac{(2dx_u - e) [(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u) - z_u]^{\frac{1}{p}}}{\operatorname{tg} \alpha_u \cdot (dx_u^2 - ex_u + f)} - \frac{z_u^{\frac{1}{p}}}{(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u)} - \operatorname{tg} \alpha_u \cdot \left[(H_p - x_u \operatorname{tg} \alpha_u)^{\frac{1}{p}} - \frac{1}{p} z_u^{\frac{1}{p}-1} \right] \right] \cdot H(f_3(x, z)).
 \end{aligned} \right. \quad (2.25)$$

На рисунке 2.10 видно, что участок истечения в соответствии с разработанной математической моделью характеризуется увеличением

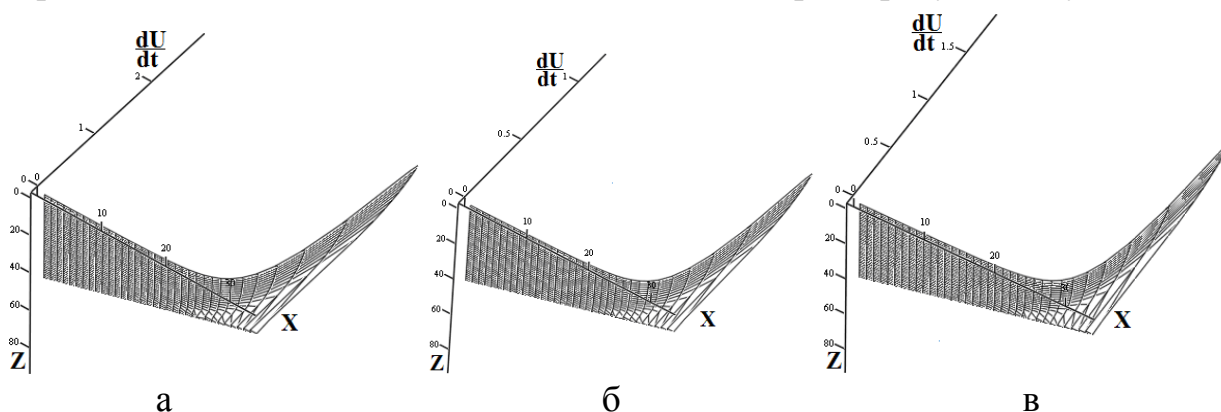


Рис. 2.10. Ускорение потока в области истечения: а – по координате x ; б – по координате y ; в – по координате z

значений ускорений потока по гиперболическому закону от близких нулю отрицательных при переходе из участка классификации до максимальных положительных в конце участка истечения.

2.4. Теоретические основы процесса взаимодействия проточной части классификатора с горизонтальным, несущим твердые частицы потоком пульпы

Рассмотрим процесс взаимодействия проточной части классификатора с твердыми частицами, увлекаемыми горизонтальным потоком жидкости. Предположим, что скорость движения жидкости U мало меняется в пределах расстояний, соответствующих диаметру твердой частицы d . Также считаем, что U – это скорость движения жидкости в пределах координат расположения тела при его отсутствии. Таким образом, скорость U постоянна вдоль всего объема, занимаемого твердой частицей. Скорость твердой частицы обозначим $Uч$. В случае, если бы твердая частица полностью увлекалась потоком жидкости, то есть при $U=Uч$, на нее действовала та же сила, которая действует на жидкость в объеме, занимаемом твердой частицей при ее отсутствии. Однако известно, что в действительности твердая частица полностью не увлекается несущим потоком. Возникает движение твердой частицы относительно жидкости, значит $Uч = U - v$, в результате сама жидкость приобретает дополнительное движение. Л. Прандтль [18, 25, 45] назвал силу, возникающую при ускоренном движении тела относительно жидкости, равную $\zeta \rho V \frac{dv}{dt}$, где ζ – коэффициент присоединенной массы, зависящий от формы тела, ρ – плотность жидкости, V – объем тела, гидродинамическим дальнедействием [18, 45]. Значит, уравнение движения твердой частицы в среде ускоренного потока идеальной жидкости примет вид [18]:

$$\rho_T V \frac{dU_{\text{ч}}}{dt} = \rho V \frac{dU}{dt} - \zeta \rho V \frac{dv}{dt}.$$

Для оценки режима взаимодействия твердой частицы и потока несущей среды при скоростях, характерных для горизонтального классификатора, предположим, что поток обтекает неподвижную твердую частицу. В этом случае значения числа Рейнольдса ($Re = \frac{ud}{\nu}$) не превысят 30. Ранее установлено, что в приведенном диапазоне неравномерность движения тел относительно жидкости не приводит к их вращению или колебанию, то есть они двигаются без определенной ориентации [18]. Также известно, что при $Re < 30$ режим движения тел различной формы, кроме дисков, выражается одной кривой (рис. 1.5) [18, 45]. В реальности твердые частицы увлекаются потоком при малых относительных скоростях v . Допустим, что в пределах крупностей 0,15...5 мм режим обтекания потоком твердой частицы будет ламинарным. Движение твердой частицы относительно жидкости при малых числах Рейнольдса ($Re < 1$), то есть при ламинарном обтекании, может быть описано известным уравнением Дж. Стокса [18, 25, 45]:

$$v = \frac{g(\rho_T - \rho_{\text{ж}})d^2}{18\mu},$$

где ρ_T – плотность твердой частицы, кг/м³;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³;

μ – динамический коэффициент вязкости, кг/м·с.

Приведенное уравнение применимо при падении твердой частицы в неподвижной жидкости после истечения начального неустановившегося режима движения, во время чего твердая частица падает с ускорением, то есть после достижения конечной скорости. Очевидно, что движение твердой частицы в ускоренном горизонтальном несущем потоке находится в области неустановившегося движения, когда на скорость движения твердой частицы значительное влияние оказывает ускорение несущего потока. Тогда обозначив

$\lambda = \frac{\rho_T d^2}{18\mu}$, получим выражение для относительной скорости твердой частицы и

ускоренного потока жидкости в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} v_x = \lambda \left(\frac{dU_x}{dt} \right); \\ v_y = \lambda \left(\frac{dU_y}{dt} \right); \\ v_z = \lambda \left(\frac{dU_z}{dt} \right). \end{cases}$$

Применительно к условиям движения ускоренного потока в горизонтальном классификаторе на рисунках 2.11 – 2.13 приведены примеры графического изображения для скорости твердой частицы с крупностью d , равной 0,15 мм, относительно несущего потока в пределах участков разделения, классификации, истечения.

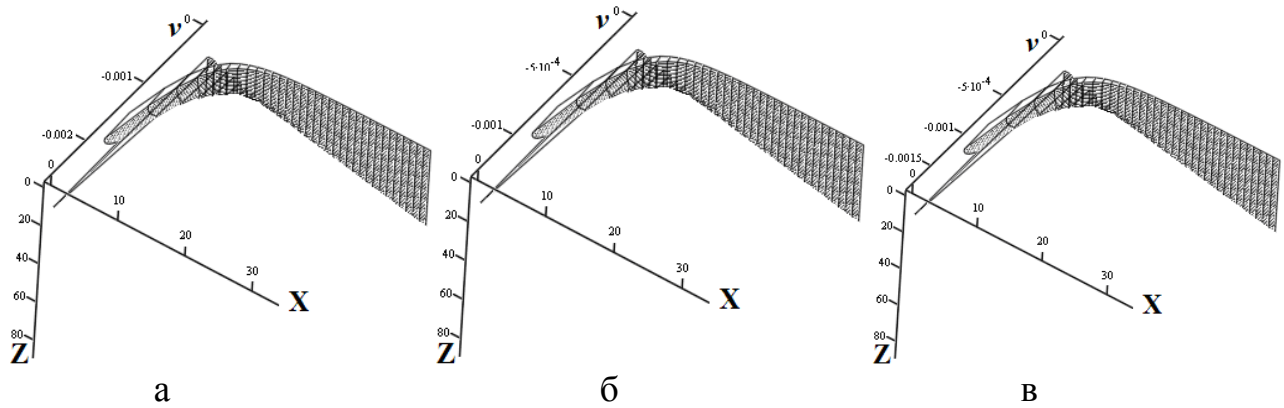


Рис. 2.11. Относительная скорость частицы на участке разделения:
а – по координате x ; б – по координате y ; в – по координате z

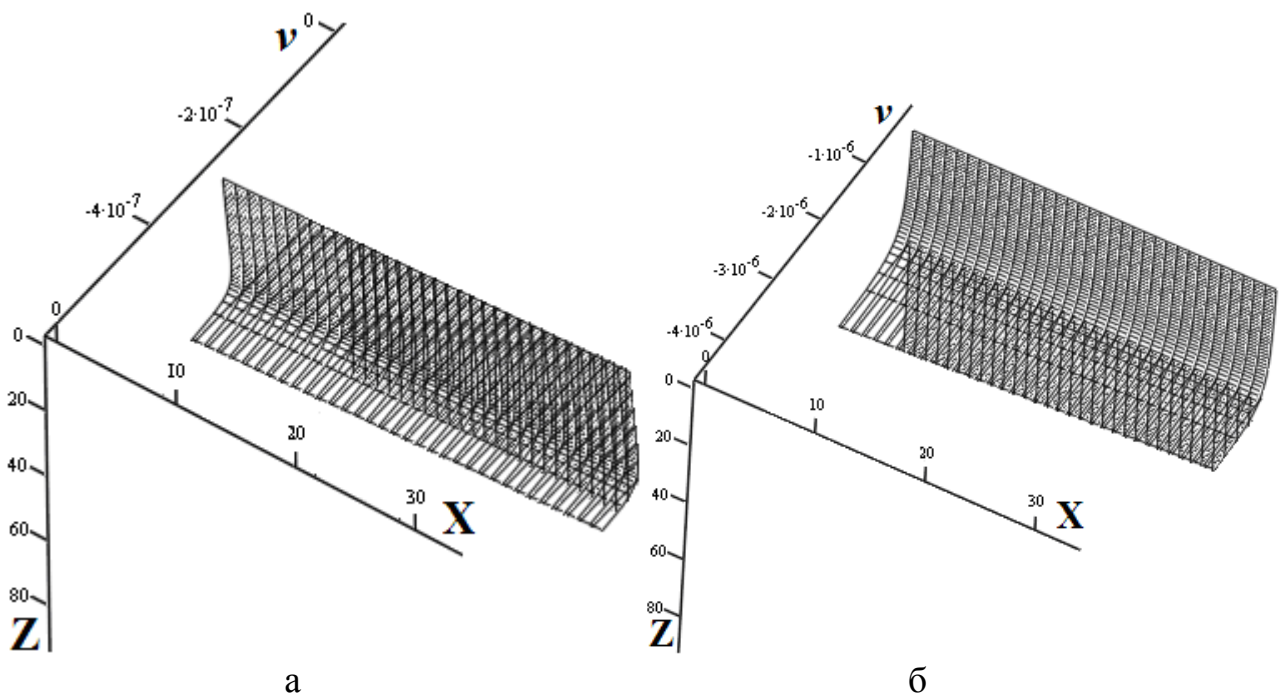


Рис. 2.12. Относительная скорость частицы на участке классификации:
а – по координате x ; б – по координате z

Зная скорость потока, получим выражение для определения абсолютной скорости твердой частицы. Движение частицы вниз сопровождается дополнительным влиянием гравитационных сил, которые учитываются скоростью свободного падения v_2 . Тогда

$$\begin{cases} Uv_x = U_x - v_x = U_x - \lambda \left(\frac{dU_x}{dt} \right); \\ Uv_y = U_y - v_y = U_y - \lambda \left(\frac{dU_y}{dt} \right); \\ Uv_z = U_z - v_z + v_2 = U_z - \lambda \left(\frac{dU_z}{dt} \right) + v_2. \end{cases} \quad (2.26)$$

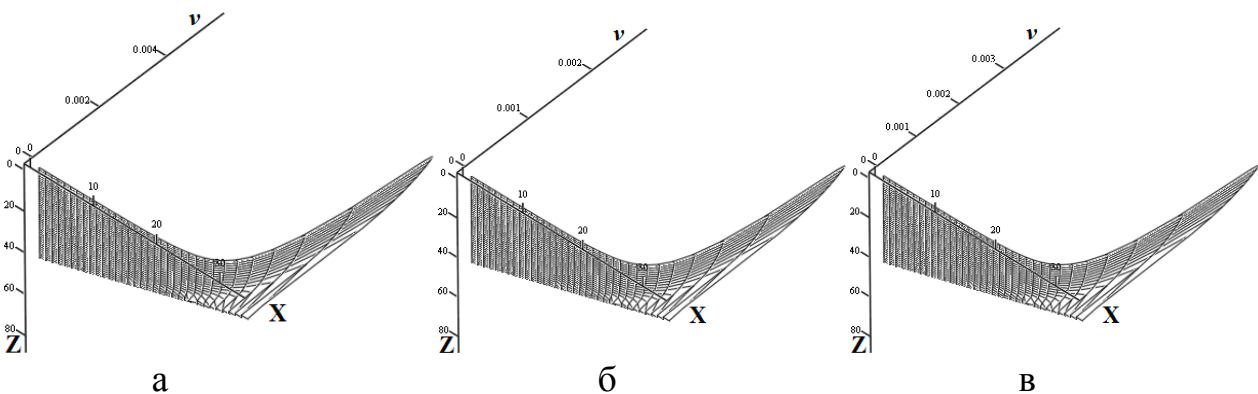


Рис. 2.13. Относительная скорость частицы на участке истечения:
а – по координате x ; б – по координате y ; в – по координате z

Очевидно, что при известном экспериментальном значении скорости свободного падения ω твердой частицы в неподвижной воде систему уравнений (2.26) можно записать в виде:

$$\begin{cases} Uv_x = U_x - \lambda \left(\frac{dU_x}{dt} \right); \\ Uv_y = U_y - \lambda \left(\frac{dU_y}{dt} \right); \\ Uv_z = U_z - \lambda \left(\frac{dU_z}{dt} \right) + \omega. \end{cases} \quad (2.27)$$

Для визуализации процесса перемещения твердой частицы ускоренным несущим потоком в пределах горизонтального классификатора (рис. 2.3, 2.6) приведем пример графического изображения математической модели (2.27) для

абсолютной скорости твердой частицы с крупностью d , равной 0,15 мм (рис. 2.14), при движении вдоль оси $O-Z$ в пределах участков разделения, классификации, истечения. В качестве составляющей уравнения U и $\frac{dU}{dt}$ применим полученные ранее зависимости для скорости (2.18, 2.20, 2.24) и ускорения потока (2.19, 2.21, 2.25). На графиках видно, что на участке разделения абсолютная скорость твердой частицы больше скорости потока, то есть $U_{ч_{xp}} > U_{xp}, U_{ч_{yp}} > U_{yp}, U_{ч_{zp}} > U_{zp}$. На участке классификации разница в скоростях становится более заметной ввиду малых значений ускорения потока и повышении влияния гидравлической крупности. Здесь также $U_{ч_{xo}} > U_{xo}, U_{ч_{zo}} > U_{zo}$. Участок истечения характеризуется отставанием твердой частицы от несущего потока, при этом $U_{ч_{xu}} < U_{xu}, U_{ч_{yu}} < U_{yu}$, однако вследствие влияния гидравлической крупности $U_{ч_{zu}} > U_{zu}$.

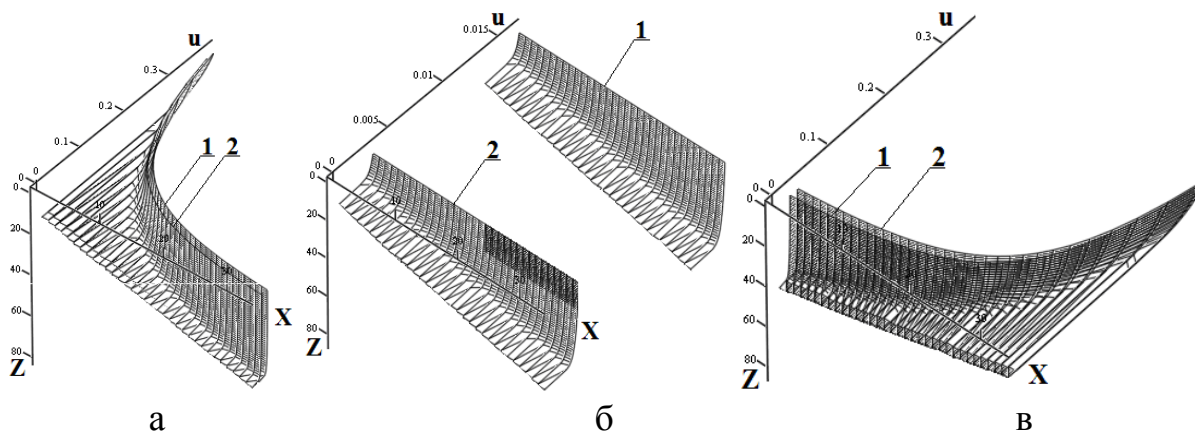


Рис. 2.14. Скорость движения твердой частицы (1) и несущего потока (2) и на участках: а – разделения; б – классификации; в – истечения

2.5. Траектория движения твердых частиц в классификаторе гидравлическом горизонтальном

Траекторию движения элементарной частицы жидкости или твердой частицы получим путем определения ее текущей координаты. Следует указать, что траектория движения твердой частицы необходима для обоснования конструктивных параметров горизонтального классификатора, в связи с чем интересно определение текущих координат частицы только в плоскости $X-Z$. Для этого рассмотрим процесс перемещения элементарной частицы жидкости в составе потока. В соответствии с методом Лагранжа текущая координата частицы является функцией исходной координаты и времени [25, 36, 37, 46 – 49] (рис. 2.15). При плоском движении траектория частицы жидкости описывается системой уравнений:

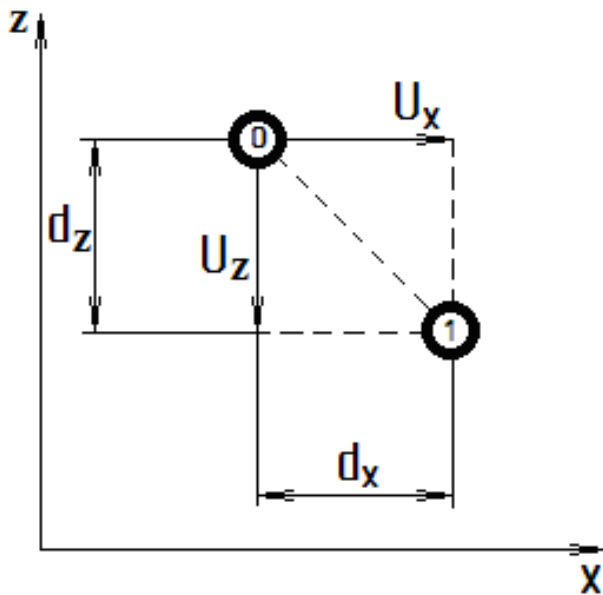


Рис. 2.15. Схема процесса движения частицы жидкости под действием горизонтального потока

$$x = f_1(x_0, z_0, t);$$

$$z = f_2(x_0, z_0, t).$$

Известный метод [36, 37, 46 – 49] рассматривает движение частицы жидкости за единицу времени dt со скоростью:

$$U_x = \frac{dx}{dt};$$

$$U_z = \frac{dz}{dt}.$$

Проекция текущей координаты частицы жидкости на ось X , Z описывается системой уравнений в виде:

$$\begin{cases} dx = U_x dt; \\ dz = U_z dt. \end{cases}$$

Решением приведенной системы на плоскости является уравнение линии тока [25, 36, 37, 46 – 54]:

$$\frac{dx}{U_x} = \frac{dz}{U_z}.$$

Зная, что координата z показывает глубину осаждения частицы, а x – проекцию длины пути на ось $O-X$, текущее приращение глубины осаждения частицы можно определить из выражения: $dz = \frac{U_z}{U_x} dx$.

Приращение глубины осаждения частицы определим путем подстановки известных выражений для определения абсолютной скорости твердой частицы (2.27), тогда

$$dz = \frac{U_z - \lambda \left(\frac{dU_z}{dt} \right) + \omega}{U_x - \lambda \left(\frac{dU_x}{dt} \right)} dx.$$

Зная, что в соответствии с выражением (2.3) для участка разделения скорость потока $U_{zp} = \operatorname{tg} \alpha_p U_{xp}$, а с учетом системы уравнений (2.17) ускорение потока $\frac{dU_z}{dt} = \operatorname{tg} \alpha_p \frac{dU_x}{dt}$, после подстановки получим:

$$dz_p = \frac{\operatorname{tg} \alpha_p U_x - \operatorname{tg} \alpha_p \lambda \left(\frac{dU_x}{dt} \right) + \omega}{U_x - \lambda \left(\frac{dU_x}{dt} \right)} dx_p.$$

Отсюда текущее приращение глубины осаждения частицы на участке разделения

$$dz_p = \frac{\operatorname{tg} \alpha_p U_{xp} + \omega}{U_{xp}} dx_p. \quad (2.28)$$

Зная, что скорость движения сгущенной пульпы u_{zo} по всему сечению участка классификации имеет постоянное значение $\frac{q}{B_p}$ (2.11), приращение глубины осаждения твердой частицы на участке классификации получим из выражения:

$$dz_k = \frac{\frac{q}{B_p} + \omega}{U_{xk}} dx_o. \quad (2.29)$$

Для описания осаждения твердых частиц путем определения текущего приращения, воспользовавшись уравнениями (2.23, 2.24, 2.27), аналогично описанию участка разделения получим выражение вида:

$$dz_u = \frac{\operatorname{tg} \alpha_u U_{xu} + \omega}{U_{xu}} dx_u. \quad (2.30)$$

Пользуясь выражениями (2.28, 2.29), для определения значений приращения глубины осаждения на участках разделения и классификации можно построить траектории движения твердых частиц.

Для удобства построения траектории движения получим выражение, дающее возможность определить глубину осаждения твердой частицы при известном значении горизонтальной проекции ее пути. Рассмотрим горизонтальный несущий поток, протекающий в пределах участка разделения с

учетом принятых допущений о незначительности кривизны живых сечений потока и приравнении скорости потока в его любой точке среднему значению. Тогда, подставив в выражение (2.28) полученные ранее зависимости для скорости (2.7) и ускорения (2.9) потока, получим выражение:

$$dz_p = \frac{tg\alpha_p \frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c} - tg\alpha_p \lambda \frac{-Q_p^2(2ax_p + b)}{(ax_p^2 + bx_p + c)^3} + \omega}{\frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c} - \lambda \frac{-Q_p^2(2ax_p + b)}{(ax_p^2 + bx_p + c)^3}} dx_p.$$

После преобразований получим зависимость:

$$dz_p = \left[tg\alpha_p + \frac{\omega(ax_p^2 + bx_p + c)^3}{Q_p(ax_p^2 + bx_p + c)^2 + \lambda Q_p^2(2ax_p + b)} \right] dx_p.$$

Выражение для определения глубины осаждения твердой частицы в пределах участка разделения получим в виде зависимости:

$$Z_p = tg\alpha_p x_p + \int_0^{x_p} \frac{\omega(ax_p^2 + bx_p + c)^3}{Q_p(ax_p^2 + bx_p + c)^2 + \lambda Q_p^2(2ax_p + b)} dx_p. \quad (2.31)$$

Ввиду сложности интегрирования в общем виде второй части выражения (2.31) получим численное решение с применением пакета MathCad. Пример графического описания численного решения уравнения (2.31) для глубины осаждения твердой частицы на участке разделения приведен на рисунке 2.16, а.

Для построения траектории движения твердой частицы в пределах участка классификации, рассматривая горизонтальный несущий поток как имеющий незначительную кривизну живых сечений, преобразуем выражение (2.29) с учетом зависимостей скорости (2.11) и ускорения (2.13) потока, тогда получим:

$$dz_k = \frac{\frac{q}{B_p} + \omega}{\frac{Q_p - qx_k}{B_p H_p} - \lambda \frac{q^2 x_k - Q_p q}{(B_p H_p)^2}} dx_k.$$

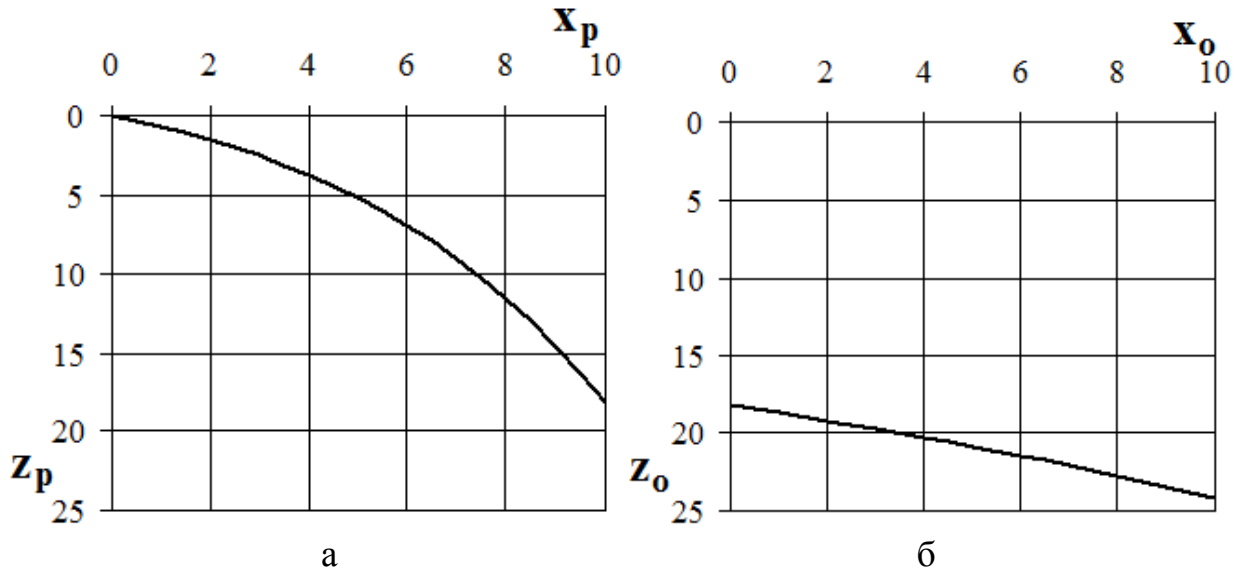


Рис. 2.16. Траектория движения твердой частицы на участках: а – разделения; б – классификации

Преобразуем это выражение и получим зависимость вида:

$$dz_k = \frac{\left(\frac{q}{B_p} + \omega\right)(B_p H_p)^2}{Q_p(B_p H_p + \lambda q) - x_k(B_p H_p q + \lambda q^2)} dx_k.$$

Тогда для определения глубины осаждения твердой частицы в пределах участка классификации запишем выражение:

$$Z_k = \left(\frac{q}{B_p} + \omega\right)(B_p H_p)^2 \int_0^{x_k} \frac{1}{Q_p(B_p H_p + \lambda q) - x_k(B_p H_p q + \lambda q^2)} dx_k.$$

Примем обозначения: $k = Q_p(B_p H_p + \lambda q)$; $l = -(B_p H_p q + \lambda q^2)$.

Тогда получим:

$$Z_k = \left(\frac{q}{B_p} + \omega\right)(B_p H_p)^2 \int_0^{x_k} \frac{1}{k + x_k l} dx_k.$$

После взятия квадратур решение примет вид:

$$Z_{\kappa} = \left(\frac{q}{B_p} + \omega \right) (B_p H_p)^2 \frac{1}{l} \ln \left(1 + \frac{x_{\kappa} l}{k} \right).$$

Выполнив подстановки, выражение для определения глубины осаждения твердой частицы в пределах участка классификации запишем как:

$$Z_{\kappa} = - \frac{\left(\frac{q}{B_p} + \omega \right) (B_p H_p)^2}{(B_p H_p q + \lambda q^2)} \ln \left(1 - \frac{x_{\kappa} (B_p H_p q + \lambda q^2)}{Q_p (B_p H_p + \lambda q)} \right). \quad (2.32)$$

Известно, что в участок классификации твердая частица попадает из участка разделения. Двигаясь по траектории, описываемой уравнением (2.31), в конце участка разделения, то есть при $x_{p.max}$, твердая частица приобретает конечную глубину осаждения $Z_{p.max}$. Значит, учитывая предварительное осаждение, выражение для определения глубины осаждения твердой частицы в пределах участка классификации примет вид:

$$Z_{\kappa} = Z_{p.max} - \frac{\left(\frac{q}{B_p} + \omega \right) (B_p H_p)^2}{(B_p H_p q + \lambda q^2)} \ln \left(1 - \frac{x_{\kappa} (B_p H_p q + \lambda q^2)}{Q_p (B_p H_p + \lambda q)} \right). \quad (2.33)$$

Пример графического описания численного решения уравнения (2.32), то есть глубины осаждения твердой частицы на участке классификации, приведен на рисунке 2.16, б.

Траектория построена только для участков разделения и классификации, так как в них происходит процесс классификации зернистых материалов. На участке истечения из процесса классификации выносятся взвешенные твердые мелкодисперсные частицы, построение траектории осаждения которых в данной работе не вызывает интереса.

С учетом того, что распределение скорости движения несущего потока (при этом принимается во внимание низкая концентрация и близкие к турбулентным параметры движения) ранее описано степенным законом, подставив в выражение (2.28) полученные ранее зависимости для скорости (2.16) и ускорения (2.19) потока, получим выражение для определения глубины осаждения твердой частицы:

$$\begin{aligned}
& \operatorname{tg} \alpha_p \frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p}{h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p} \right)^{\frac{1}{p}} - \\
& - \operatorname{tg} \alpha_p \lambda \left[\frac{Q_p^2 (p+1)^2 \cdot [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]^{\frac{1}{p}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c) \cdot p}{p^3 \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)^3 (h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)^{\frac{2}{p}}} \times \right. \\
& \times \left[\frac{(2ax_p + b) [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]^{\frac{1}{p}}}{\operatorname{tg} \alpha_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)} - \frac{\frac{1}{z_p^p}}{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)} \right] + \omega \\
& \left. - \left[(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)^{\frac{1}{p}} - \frac{1}{p} z_p^{\frac{1}{p}-1} \right] \right] dx_p.
\end{aligned}$$

$$dz_p = \text{---} dx_p.$$

$$\begin{aligned}
& \frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p}{h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p} \right)^{\frac{1}{p}} - \\
& - \lambda \left[\frac{Q_p^2 (p+1)^2 \cdot [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]^{\frac{1}{p}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c) \cdot p}{p^3 \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)^3 (h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)^{\frac{2}{p}}} \times \right. \\
& \times \left[\frac{(2ax_p + b) [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]^{\frac{1}{p}}}{\operatorname{tg} \alpha_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)} - \frac{\frac{1}{z_p^p}}{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)} \right] \\
& \left. - \left[(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)^{\frac{1}{p}} - \frac{1}{p} z_p^{\frac{1}{p}-1} \right] \right]
\end{aligned}$$

Преобразовав, а также выполнив интегрирование первой части выражения, и ввиду сложности интегрирования второй части, оставив ее без изменений, получим выражение для определения глубины осаждения твердой частицы в пределах участка разделения

$$\begin{aligned}
& Z_p = \operatorname{tg} \alpha_p x_p + \\
& + \omega \int_0^{x_p} \left[\frac{Q_p}{ax_p^2 + bx_p + c} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p}{h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p} \right)^{\frac{1}{p}} - \right. \\
& \left. \frac{Q_p^2 (p+1)^2 \cdot [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]^{\frac{1}{p}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c) \cdot p}{p^3 \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)^3 (h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)^{\frac{2}{p}}} \times \right. \\
& \left. - \lambda \left[\frac{(2ax_p + b) [(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p) - z_p]^{\frac{1}{p}}}{\operatorname{tg} \alpha_p \cdot (ax_p^2 + bx_p + c)} - \frac{z_p^{\frac{1}{p}}}{(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)} \right] \right. \\
& \left. - \left[(h_p + x_p \operatorname{tg} \alpha_p)^{\frac{1}{p}} - \frac{1}{p} z_p^{\frac{1}{p}-1} \right] \right] dx_p
\end{aligned} \tag{2.34}$$

По причине сложности интегрирования в общем виде второй части выражения (2.34) получим численное решение с применением пакета MathCad. Пример графического описания численного решения уравнения (2.34), выполненного в пакете MathCad, для глубины осаждения твердой частицы на участке разделения приведен на рисунке 2.17, а.

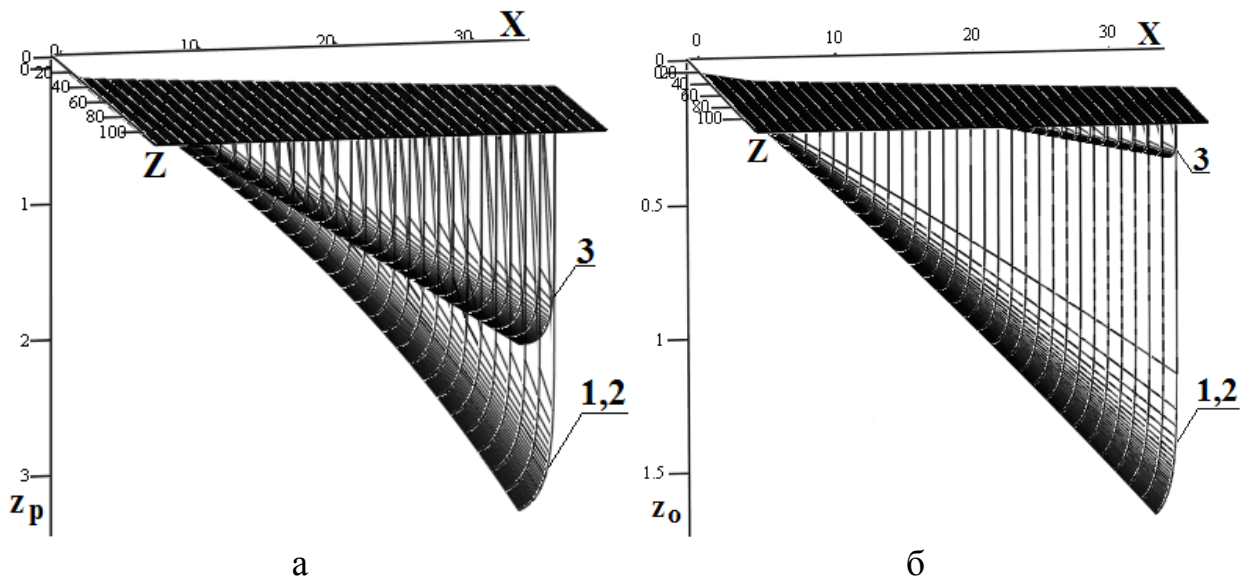


Рис. 2.17. Траектория движения твердых частиц с учетом движения относительно потока жидкости (1) и без учета движения (2) относительно потока жидкости (3)

Рассматривая распределенный по глубине горизонтальный несущий поток на участке классификации, преобразуем выражение (2.29) зная зависимости для скорости (2.20) и ускорения (2.21) потока, имеем:

$$dz_{\kappa} = \left[\frac{q}{B_p} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{B_p - z_{\kappa}}{B_p} \right)^{\frac{1}{p}} + \omega \right. \\ \left. \frac{Q_p - qx_{\kappa}}{B_p H_p} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{H_p - z_{\kappa}}{H_p} \right)^{\frac{1}{p}} - \right. \\ \left. - \lambda \frac{q^2 x_{\kappa} - Q_p q}{1} \cdot \frac{p+1}{p} \cdot \frac{(H_p - z_{\kappa})^{\frac{1}{p}}}{\frac{p^2+p+1}{p}} \left[\frac{Q_p - qx_{\kappa}}{B_p (H_p)^{2p}} + \frac{1}{p(H_p - z_{\kappa})} \right] \right] dx_{\kappa}.$$

Выражение для определения глубины осаждения твердой частицы в пределах участка классификации примет вид:

$$Z_{\kappa} = \int_0^{x_{\kappa}} \left[\frac{q}{B_p} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{B_p - z_{\kappa}}{B_p} \right)^{\frac{1}{p}} + \omega \right. \\ \left. \frac{Q_p - qx_{\kappa}}{B_p H_p} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{H_p - z_{\kappa}}{H_p} \right)^{\frac{1}{p}} - \right. \\ \left. - \lambda \frac{q^2 x_{\kappa} - Q_p q}{1} \cdot \frac{p+1}{p} \times \right. \\ \left. \times \frac{(H_p - z_{\kappa})^{\frac{1}{p}}}{\frac{p^2+p+1}{p}} \left[\frac{Q_p - qx_{\kappa}}{B_p (H_p)^{2p}} + \frac{1}{p(H_p - z_{\kappa})} \right] \right] dx_{\kappa}. \quad (2.35)$$

Интегрирование полученного выражения (2.35) выполним в численном виде с применением пакета MathCad. Пример графического описания численного решения уравнения (2.35) для глубины осаждения твердой частицы на участке классификации приведен на рисунке 2.17, б.

Учитывая предварительное осаждение в пределах участка разделения и зная значение конечной глубины осаждения $Z_{p.max}$, выражение для определения глубины осаждения твердой частицы в пределах участка классификации примет вид:

$$Z_k = Z_{p.max} + \int_0^{x_0} \left[\frac{q}{B_p} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{B_p - z_k}{B_p} \right)^{\frac{1}{p}} + \omega - \frac{Q_p - qx_k}{B_p H_p} \cdot \frac{p+1}{p} \left(\frac{H_p - z_k}{H_p} \right)^{\frac{1}{p}} - \lambda \frac{q^2 x_k - Q_p q}{1} \cdot \frac{p+1}{p} \times \frac{(H_p - z_k)^{\frac{1}{p}}}{B_p^2 H_p \frac{p^2 + p + 1}{p}} \left[\frac{Q_p - qx_k}{B_p (H_p)^{2p}} + \frac{1}{p (H_p - z_k)} \right] \right] dx_k. \quad (2.36)$$

На рисунке 2.17 видно, что уже на участке разделения жидкость и твердые частицы движутся по разным траекториям ввиду влияния на твердые частицы, помимо ускорений несущего потока, сил тяжести, интегрально учтенных в известном экспериментальном параметре – гидравлической крупности ω . Твердые частицы двигаются по криволинейной траектории, причем из-за малых значений перемещений твердых частиц относительно потока жидкости v разница в описании их движения с учетом и без учета движения относительно потока жидкости невелика. На участке классификации наблюдается более прямолинейная траектория движения твердых частиц. Характерно, что разница в траекториях движения потока жидкости и твердых частиц увеличивается.

Применяя зависимости (2.34, 2.36) и построив траекторию движения твердых частиц, можно путем последовательных приближений, меняя исходные параметры, приведенные в п. 2.2, обосновать рациональные конструктивные параметры проточной части классификатора гидравлического горизонтального, то есть: длину камер разделения L^p и классификации L^k ; высоту проточной частиц H_k^p ; ширину проточной частиц B_k^p , угол наклона днища камеры разделения α_p ; угол расширения камеры разделения β_p (рис. 2.18).

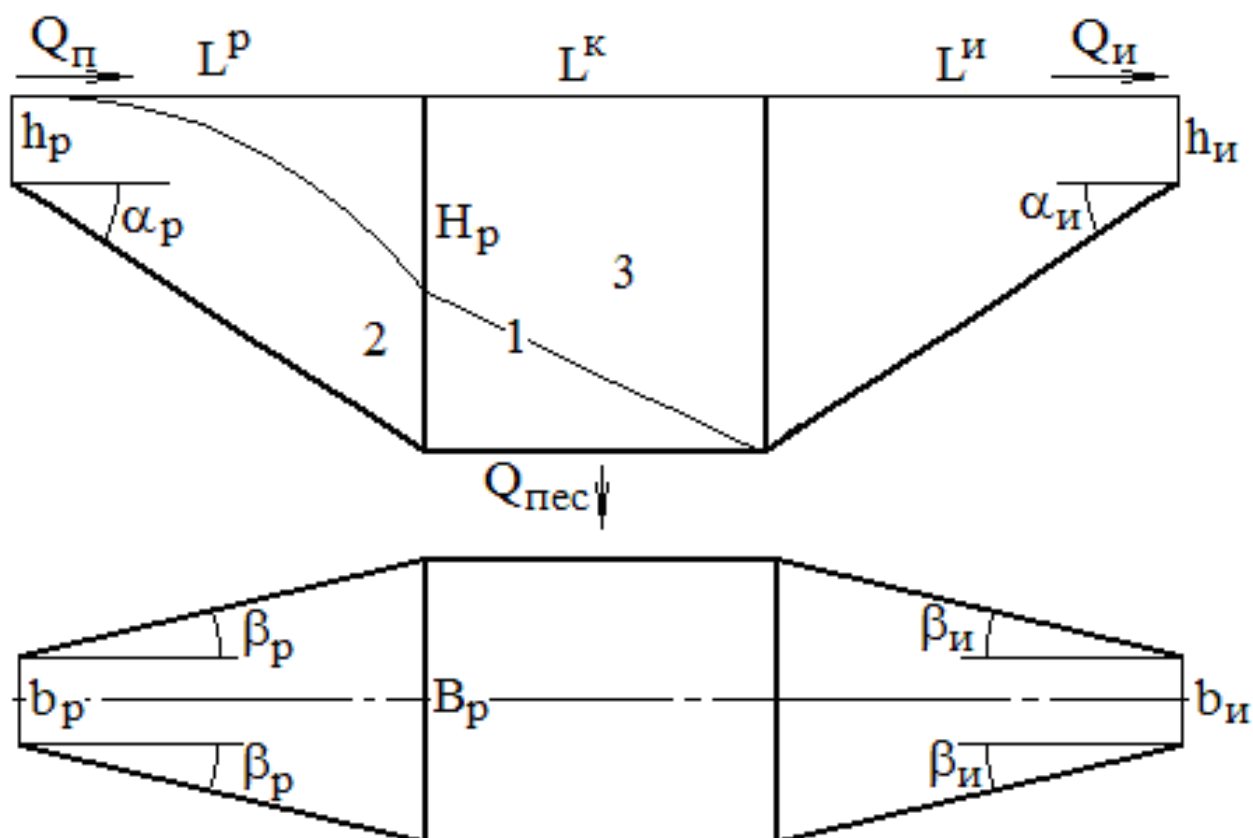


Рис. 2.18. Схема проточной части классификатора гидравлического горизонтального: 1 – траектория движения твердой частицы граничной крупности; 2 – область осаждаемых частиц; 3 – область выносимых частиц

Конструктивные параметры классификатора следует назначать, ориентируясь на траекторию осаждения твердой частицы граничной крупности. При этом глубина проточной части должна соответствовать максимальной глубине осаждения такой частицы (рис. 2.17).

2.6. Математическое моделирование процесса взаимодействия наклонного дна классификатора с твердыми частицами

Рассмотрим процесс взаимодействия наклонного дна области разделения классификатора гидравлического горизонтального с единичной твердой частицей (рис. 2.19). Описываемое движение твердой частицы протекает по наклонному дну расширяющегося потока при уменьшении его скорости [25, 55, 56]. Частица совершает движение под действием сил: скоростного напора пульпы, тяжести, Архимеда, трения, сопротивления среды. Форма записи указанных сил в приведенных условиях примет следующий вид:

– нормальная составляющая силы тяжести на поверхность дна

$$F_T^N = \rho_{ск} \frac{\pi d^3}{6} g \cos \alpha_p, \text{ Н,}$$

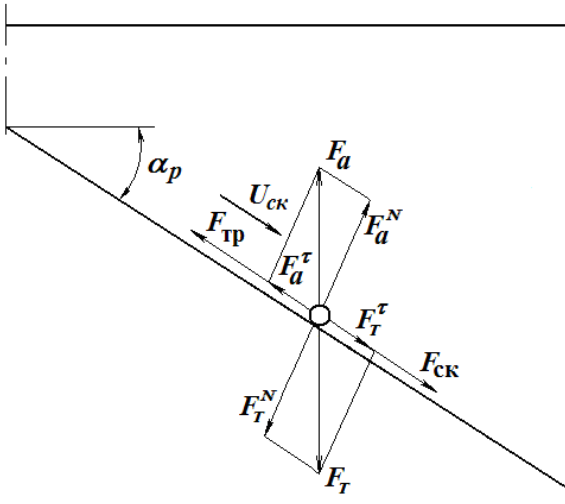


Рис. 2.19. Расчетная схема движения твердой частицы по днищу области разделения

где $\rho_{ск}$ – плотность скелета твердой частицы, кг/м³;

d – диаметр твердой частицы, м;

α_p – угол наклона днища относительно горизонтали, град.;

– касательная составляющая силы тяжести $F_T^\tau = \rho_{ск} \frac{\pi d^3}{6} g \sin \alpha_p$, Н;

– нормальная составляющая силы Архимеда (подъемной силы) на поверхность днища

$$F_a^N = \rho_n \frac{\pi d^3}{6} g \cos \alpha_p, \text{ Н,}$$

где ρ_n – плотность среды (пульпы), $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

– касательная составляющая силы Архимеда (подъемной силы)

$$F_a^\tau = \rho_n \frac{\pi d^3}{6} g \sin \alpha_p, \text{ Н;}$$

– сила сопротивления среды движению твердой частицы $P = \theta U_q^2 d^2 \rho_n$, Н, где θ – коэффициент сопротивления, $\theta = f(\text{Re})$; U_q – скорость движения твердой частицы, м/с. Число Рейнольдса представлено зависимостью $\text{Re} = \frac{U_0 d}{\nu_n}$, где U_0 – скорость движения среды, м/с;

– сила скоростного напора $F_{ск} = C_\phi \frac{\pi d^2}{4} \rho_v \frac{U_{ск}^2}{2}$, Н,

где C_ϕ – коэффициент лобового сопротивления твердой частицы;

– сила трения твердой частицы о днище $F_{тр} = (F_T^N - F_a^N) f_1$, Н,

где f_1 – коэффициент внешнего трения твердой частицы о материал днища.

Исходя из расчетной схемы (рис. 2.19), силу трения запишем как:

$$F_{тр} = f_1 \frac{\pi d^3}{6} (\rho_{ск} - \rho_n) g \cos \alpha_p, \text{ Н,}$$

Дифференциальное уравнение движения единичной твердой частицы грунта по наклонному днищу области разделения примет вид [25, 55, 56]

$$m \frac{dU}{dt} = F_{ск} + F_T^\tau - F_{тр} - F_a^\tau.$$

Следует заметить, что процесс протекает при скоростях потока, близких нулю (п. 1.2, 2.1), поэтому в решении данной задачи силы сопротивления среды при обтекании частицы не учитывались. Важнейшее значение при рассмотрении процесса перемещения частицы по наклонному днищу имеет условие ее равновесия. При рассмотрении неподвижной частицы ее ускорение равно нулю, то есть $m \frac{dU}{dt} = 0$. С учетом действующих на твердую частицу сил уравнение равновесия частицы, находящейся на наклонной поверхности днища, представим как:

$$C_{\phi} \frac{\pi d^2}{4} \rho_{\text{в}} \frac{U_{\text{СК}}^2}{2} + \rho_{\text{СК}} \frac{\pi d^3}{6} g \sin \alpha_p - \\ - f_1 \frac{\pi d^3}{6} (\rho_{\text{СК}} - \rho_n) g \cos \alpha_p - \rho_n \frac{\pi d^3}{6} g \sin \alpha_p = 0.$$

После преобразований промежуточная запись уравнения равновесия примет вид:

$$C_{\phi} \frac{\pi d^2 U_{\text{СК}}^2 \rho_{\text{в}}}{8} = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_{\text{СК}} - \rho_n) g (f_1 \cos \alpha_p - \sin \alpha_p).$$

Таким образом, уравнение скорости потока, воздействующего на частицу, расположенную на наклонной поверхности днища (рис. 2.19), в результате воздействия которого твердая частица находится в равновесии [25, 55, 56]:

$$U_{\text{СК}} = \sqrt{\frac{4 dg (\rho_{\text{СК}} - \rho_n)}{3 C_{\phi} \rho_n} (f_1 \cos \alpha_p - \sin \alpha_p)}. \quad (2.37)$$

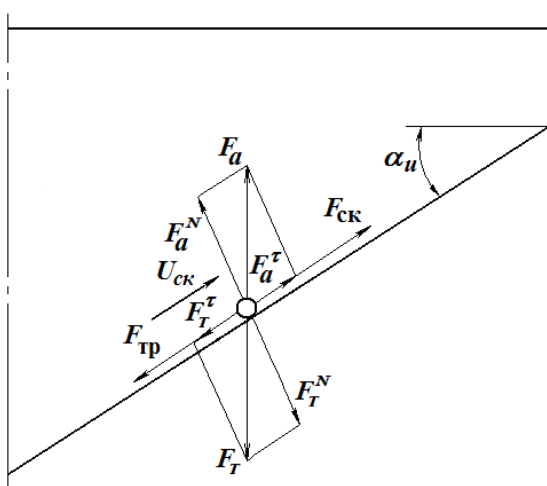


Рис. 2.20. Расчетная схема движения твердой частицы по днищу области истечения

Движение единичной твердой частицы по наклонному днищу области истечения протекает в условиях сужающегося потока при увеличении его скорости (рис. 2.20). Также как и в расчетной схеме (рис. 2.19) частица совершает движение под действием сил: скоростного напора пульпы, тяжести, Архимеда, трения, сопротивления среды.

Дифференциальное уравнение движения единичной твердой частицы по наклонному днищу области истечения запишем в виде:

$$m \frac{dU}{dt} = F_{\text{ск}} + F_a^\tau - F_{\text{тр}} - F_T^\tau.$$

С учетом действующих сил уравнение равновесия твердой частицы, находящейся на наклонной поверхности дна области истечения, получим как выражение

$$C_\phi \frac{\pi d^2}{4} \rho_B \frac{U_{\text{ск}}^2}{2} + \rho_n \frac{\pi d^3}{6} g \sin \alpha_u - \\ - f_1 \frac{\pi d^3}{6} (\rho_{\text{ск}} - \rho_n) g \cos \alpha_u - \rho_{\text{ск}} \frac{\pi d^3}{6} g \sin \alpha_u = 0.$$

После преобразований промежуточная запись уравнения равновесия примет вид:

$$C_\phi \frac{\pi d^2 U_{\text{ск}}^2 \rho_B}{8} = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_{\text{ск}} - \rho_n) g (f_1 \cos \alpha_u + \sin \alpha_u).$$

После преобразований уравнение равновесия твердой частицы, находящейся в условиях (рис. 2.20), запишем как [25, 55, 56]:

$$U_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{4 dg (\rho_{\text{ск}} - \rho_n)}{3 C_\phi \rho_n} (f_1 \cos \alpha_u + \sin \alpha_u)}. \quad (2.38)$$

Частным случаем является движение единичной твердой частицы по горизонтальной поверхности под действием сил: скоростного напора пульпы, тяжести, Архимеда, трения, сопротивления среды (рис. 2.21).

Общее дифференциальное уравнение движения единичной твердой частицы по горизонтальной поверхности примет вид:

$$m \frac{dU}{dt} = F_{\text{ск}} - F_{\text{тр}}.$$

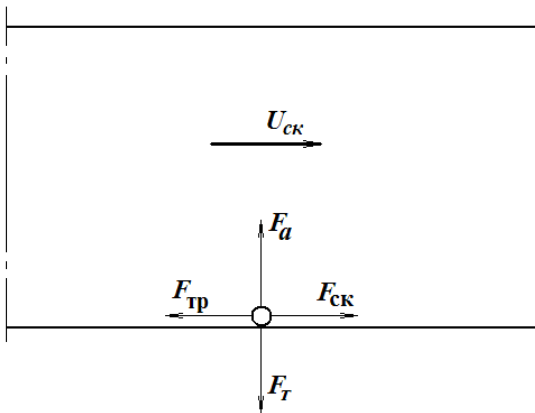


Рис. 2.21. Расчетная схема движения твердой частицы по горизонтальной поверхности

Отсюда уравнение равновесия твердой частицы:

$$C_\phi \frac{\pi d^2}{4} \rho_B \frac{U_{\text{ск}}^2}{2} - f_1 \frac{\pi d^3}{6} (\rho_{\text{ск}} - \rho_n) g = 0.$$

После преобразований уравнение скорости потока, действующего на твердую частицу, расположенную на горизонтальной поверхности (рис. 2.21), в результате воздействия которого она находится в равновесии, примет вид [25, 55, 56]:

$$U_{ск} = \sqrt{\frac{4}{3} f_1 \frac{dg}{C_{\phi}} \frac{(\rho_{ск} - \rho_n)}{\rho_n}}. \quad (2.39)$$

Характерно, что, подставив в формулы 2.37, 2.38 значение угла наклона поверхности, равное нулю, формула определения равновесной скорости также примет вид записи 2.39.

Проанализируем более полную картину движения твердой частицы по поверхности наклонного днища в среде пульпы. Рассмотрим движение материала по слою уже осажденных твердых частиц, что является вероятным практическим случаем, реализуемым в гравитационных классификационных установках и лотках [25, 55, 56]. Схемы такого движения твердых частиц по разнонаклонным и горизонтальным поверхностям приведены на рисунках 2.22, 2.23.

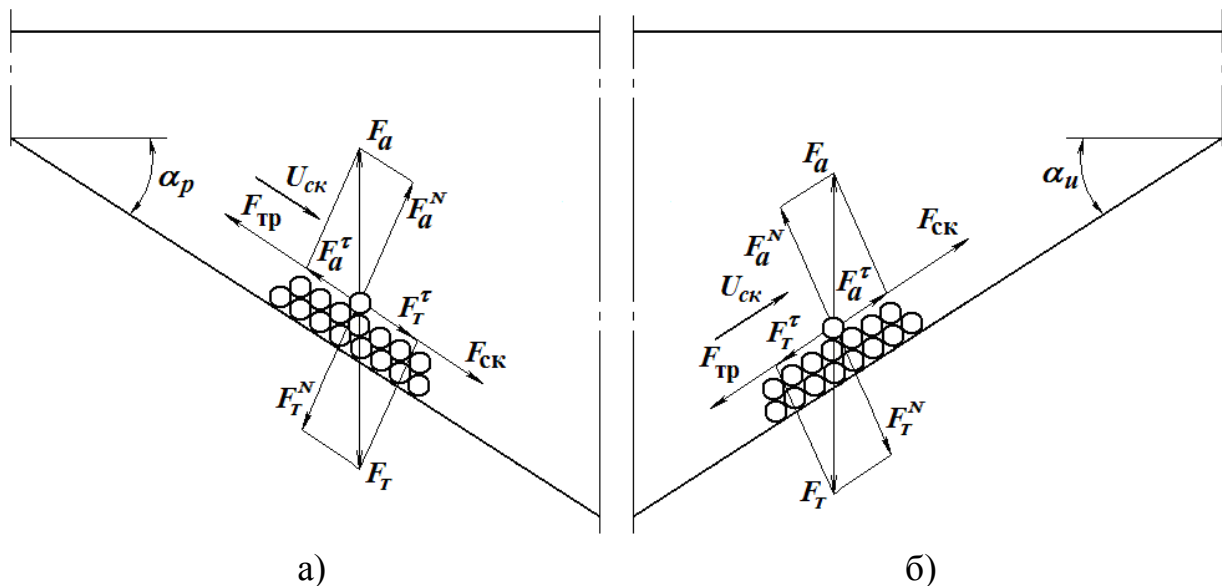


Рис. 2.22. Расчетная схема движения единичной твердой частицы по слою зернистого материала, осажденного на наклонной поверхности

В соответствии с приведенной расчетной схемой уравнение равновесной скорости потока, действующего на твердую частицу, расположенную на слое зернистого материала, осажденного на наклонной поверхности (рис. 2.22), имеет вид:

для расчетной схемы (рис. 2.22, а):

$$U_{ск} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{dg}{C_{\phi}} \frac{(\rho_{ск} - \rho_n)}{\rho_n} (f_2 \cos \alpha_p - \sin \alpha_p)}. \quad (2.40)$$

для расчетной схемы (рис. 2.22, б):

$$U_{\text{СК}} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{dg}{C_{\phi}} \frac{(\rho_{\text{СК}} - \rho_n)}{\rho_n} (f_2 \cos \alpha_u + \sin \alpha_u)}, \quad (2.41)$$

где f_2 – коэффициент внутреннего трения грунта.

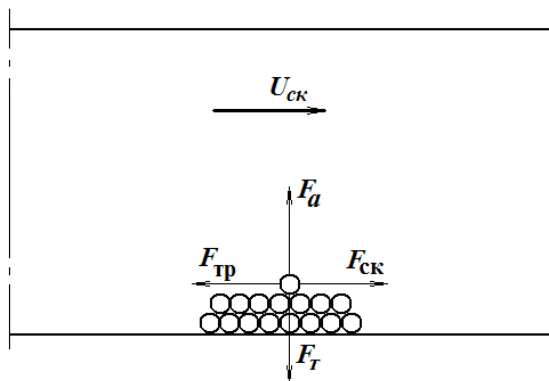


Рис. 2.23. Расчетная схема движения твердой частицы по слою зернистого материала на горизонтальной поверхности

При отсутствии угла наклона поверхности перемещение материала происходит в соответствии с расчетной схемой (рис. 2.23), а формула 2.39 для определения равновесной скорости потока примет вид:

$$U_{\text{СК}} = \sqrt{\frac{4}{3} f_2 \frac{dg}{C_{\phi}} \frac{(\rho_{\text{СК}} - \rho_n)}{\rho_n}}. \quad (2.42)$$

В результате предварительных расчетов, выполненных с применением известных зависимостей для определения коэффициента лобового сопротивления частицы C_{ϕ} и ориентировочных значений коэффициента трения частицы, принятых для мелкозернистого песка на основании [20], получен вид зависимости скорости потока среды от угла наклона поверхности (рис. 2.24).

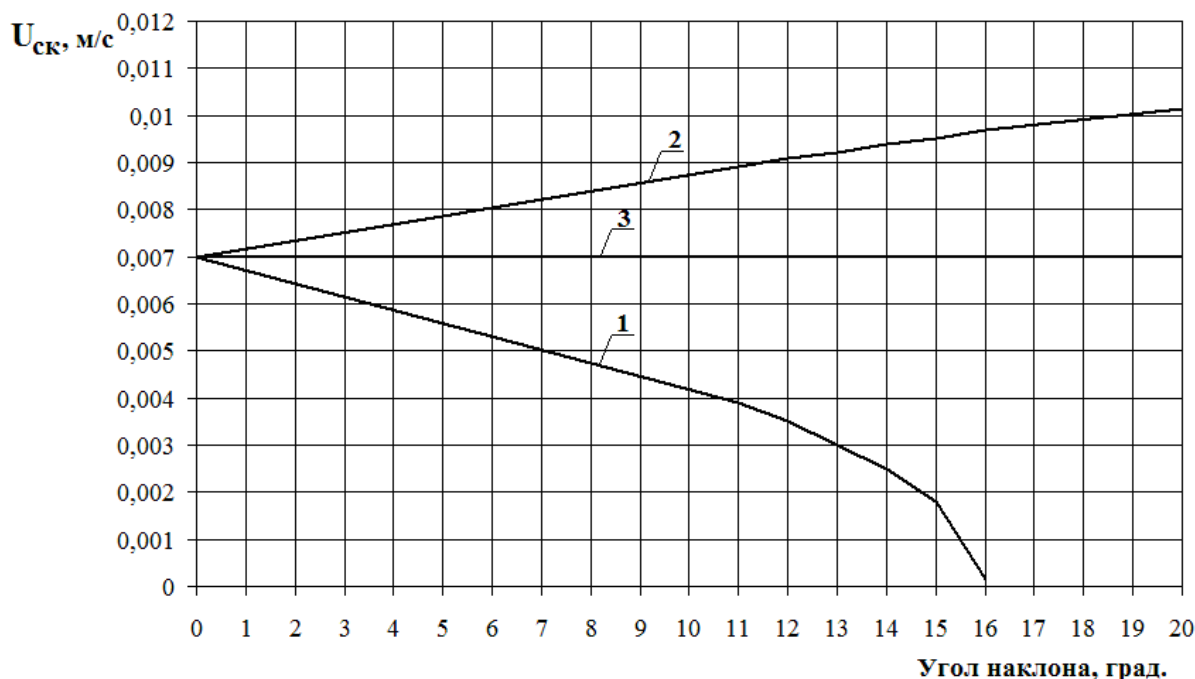


Рис. 2.24. Равновесное состояние частицы, расположенной на поверхности, наклоненной вниз (1), вверх (2); 3 – поверхность горизонтальна

Очевидно, что с увеличением угла наклона поверхности при движении твердой частицы вниз равновесная скорость будет уменьшаться, а при движении вверх – увеличиваться. Для более точного определения численных значений и построения реальной графической зависимости процесса требуется экспериментальное определение коэффициентов внешнего и внутреннего трения частиц зернистых материалов при движении по материалам рабочих поверхностей классификационных установок.

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КЛАССИФИКАТОРА С ЗЕРНИСТЫМ МАТЕРИАЛОМ

3.1. Обоснование параметров лабораторной установки

Лабораторное оборудование для изучения процесса взаимодействия проточной части классификационного устройства с потоком пульпы, несущим твердые частицы, с целью гравитационной переработки зернистых материалов устроено на базе применения классификатора гидравлического горизонтального КГГ и классификатора горизонтального многосекционного КГМ [25, 57]. С применением классификатора КГМ выполнены лабораторные исследования по изучению влияния конструктивных параметров проточной части классификатора на параметры осаждения частиц зернистого материала, движимых горизонтальным потоком несущей среды. Классификатор КГГ является более практичным и технологичным устройством, в котором реализуются аналогичные процессы разделения зернистого материала на составляющие классы.

Лабораторная установка на базе классификатора КГМ состоит из классификатора горизонтального многосекционного 1, струйного питателя 2, системы подачи воды (рис. 3.1).

Классификатор горизонтальный многосекционный представляет собой удлиненный сосуд прямоугольного сечения 1, в нижней части разделенный на 12 отсеков 3, оборудованных разгрузочными патрубками 4. Питание осуществляется через приемный патрубок 5, слив шлама через сливной патрубок 6.

Струйный питатель 2 предназначен для приготовления пульпы заданных параметров и подачи ее в приемный патрубок 5 классификатора горизонтального многосекционного 1. Приготовление пульпы в струйном питателе 2 выполняется путем подачи воды через гребенку с оросительными форсунками 7, транспортирование приготовленной пульпы осуществляется посредством струйного насоса 8. Для водоснабжения гребенки 7 и струйного насоса 8 применяют систему подачи воды.

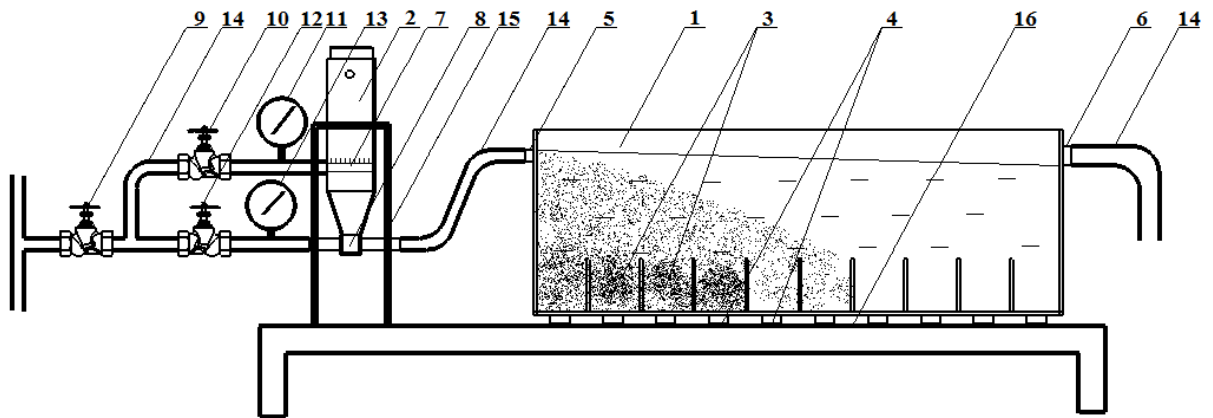
Система подачи воды состоит из сетевого вентиля 9, регулировочного вентиля 10 и манометра 11 системы водоснабжения оросительной гребенки 7, регулировочного вентиля 12 и манометра 13 системы водоснабжения струйного насоса 8. Транспортирование воды и шлама выполняется по гибким патрубкам 14. Оборудование установлено на опорных рамах 15, 16.

Источником воды для работы лабораторного оборудования является водопроводная сеть.

Лабораторная установка на базе классификатора КГГ разработана для более полного моделирования процессов взаимодействия проточной части классификатора с зернистым материалом, движимым горизонтальным потоком несущей среды с целью гравитационной переработки минерального сырья в условиях горного предприятия, и состоит из классификатора гидравлического горизонтального 1, струйного питателя 2, системы подачи воды (рис. 3.2).



а)

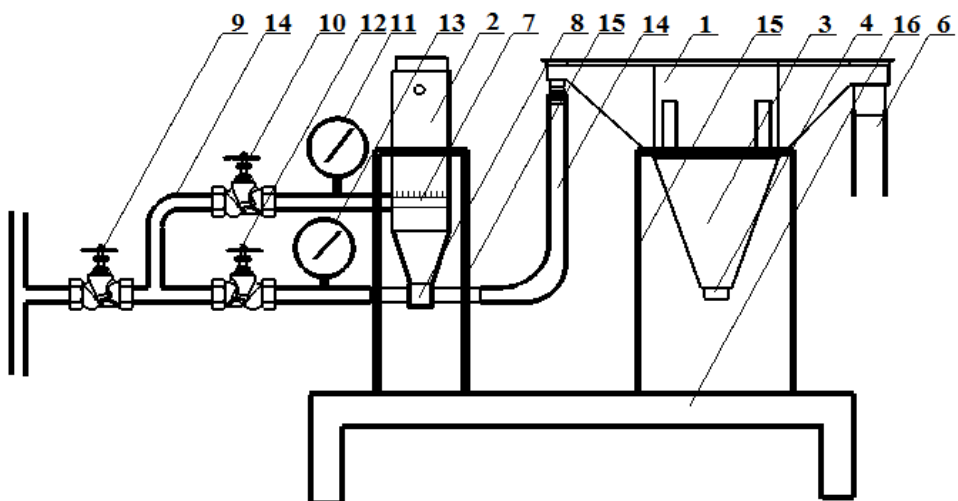


б)

Рис. 3.1. Лабораторная установка на базе классификатора КГМ:
а) общий вид; б) принципиальная схема



а)



б)

Рис. 3.2. Лабораторная установка на базе КГГ: а) общий вид; б) принципиальная схема

Классификатор гидравлический горизонтальный 1 представляет собой устройство, состоящее из отдельных камер: приемной, разделения, классификации, истечения, сливной. При этом камера разделения и камера истечения представляют собой четырехгранную усеченную скошенную пирамиду и установлены так, что сообщены основаниями с камерой классификации, а усеченными вершинами соответственно с приемной и сливной камерами, проточная внутренняя часть камеры разделения состоит из отдельных отсеков, разделенных вертикальными перегородками. Исходная пульпа поступает через приемный патрубок приемной камеры в камеру разделения в виде потока, разделенного на несколько потоков посредством вертикальных перегородок. В камере классификации крупные зерна осаждаются, накапливаются в песковом бункере 3 и в обезвоженном виде, самотеком эвакуируются через песковый патрубок 4. Эвакуация осажденного песка выполняется как непрерывно, так и периодически, и осуществляется при помощи пробкового затвора. Тонкие частицы и шламы в составе осветленных вод выводятся из устройства для гидравлической классификации через камеру истечения и сливной патрубок 6 сливной камеры. Оборудование установлено на опорных рамах 15, 16. Для более полного моделирования процессов, происходящих при подводной добыче и переработке зернистых материалов, также разработана лабораторная установка (рис. 3.3, а). Добыча несвязного песка выполняется посредством грунтозаборного устройства на базе струйного насоса (рис. 3.3,б). При этом песок в составе пульпы, добытой в забое, расположенном в передней секции бака посредством грунтозаборного устройства, по патрубку направляется в приемный патрубок приемной камеры классификатора КГГ. Слив шламов из камеры истечения сливным патрубком сливной камеры направляется в канализацию.

Для выполнения необходимых замеров применено следующее стандартное оборудование:

1. Манометр прецизионный типа МЗМ с ценой деления $0,005 \text{ кгс/см}^2$ (класс точности 0,6).
2. Цилиндр лабораторный объемом 1 литр с ценой деления 2 мл.
3. Секундомер "Агат" с ценой деления 0,5 с.
4. Весы ВНЦ-2, цена деления 2 г, ТУ 25-06-2068-82.
5. Весы РН-10Ц13М, цена деления 5 г, ГОСТ 7327-55.
6. Сито лабораторное СЛ-200 с ячейкой 0,1 мм, 0,2 мм, 0,315 мм, 0,4 мм, 0,5 мм, 0,63 мм, 1,25 мм, 2,5 мм.
7. Встряхиватель лабораторный Усманского завода литейного оборудования.
8. Шкаф сушильный.

Основные конструктивные характеристики лабораторной установки определены в результате предварительных расчетов с применением известных зависимостей. При осаждении зернистого материала, движущегося в горизонтальном потоке пульпы (рис. 3.4), зависимость основных величин можно выразить в виде формулы [58 – 60]:



а)



б)

Рис. 3.3. Лабораторная установка для исследования процессов добычи и гравитационной переработки зернистых материалов на базе КГГ: а) общий вид; б) грунтозаборное устройство на базе струйного насоса

$$L_{oc} = \frac{v_{ч} \cdot H_{oc}}{\omega_{ч}},$$

где L_{oc} – дальность перемещения частицы по горизонтали, м;

H_{oc} – глубина погружения частицы, м;

$v_{ч}$ – скорость потока пульпы, м/с;

$\omega_{ч}$ – гидравлическая крупность частицы, м/с.

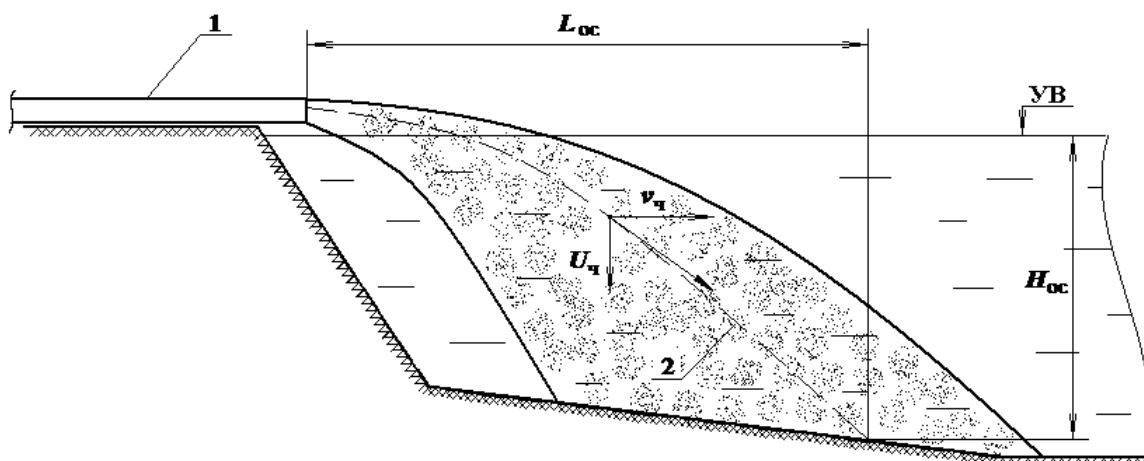


Рис. 3.4. Схема осаждения частиц в горизонтальном потоке:

1 – сливной трубопровод; 2 – траектория движения частиц

Достаточный диапазон скоростей движения пульпы в классификаторе горизонтальном многосекционном при питании из водопроводной сети для переработки зернистого материала крупностью $-5+0,1$ мм, получен при следующих параметрах проточной части КГМ: длина 1000 мм, ширина 50 мм, высота 200 мм (рис. 5.20). Конструктивные параметры классификатора КГГ (рис. 3.2 – 3.3) также принимались с использованием приведенной зависимости.

Диаметры приемного 5, сливного 6, гибких патрубков 14 отвечают условию максимального пропуская воды.

3.2. Тарировка лабораторного оборудования

Для обеспечения приемлемой достоверности данных лабораторных исследований перед началом выполнения экспериментов оборудование было тарировано в требуемом диапазоне [25, 57]. Тарированию подлежала система подачи к классификаторам КГГ и КГМ пульпы, приготовленной в струйном питателе. Тарировку выполняли в два этапа:

1 – тарировка манометра, то есть определение зависимости показаний манометра струйного насоса от производительности пульпы, подаваемой к классификаторам КГГ и КГМ;

2 – тарировка контрольных отверстий, то есть определение концентрации подаваемой пульпы в зависимости от номера отверстия.

Тарирование манометра выполняли следующим образом. Открывали вентиль сети и регулировочные вентили системы водоснабжения, подавали воду к оросительной гребенке струйного питателя и струйному насосу. Стрелку манометра устанавливали в фиксированное положение, пользуясь рядом чисел: 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65. Зернистый материал распределенным потоком подавали в приемный бункер струйного питателя. Расход пульпы, подаваемой струйным насосом, определяли объемным методом. Для этого мерную емкость подводили под сливной патрубок классификатора и одновременно включали секундомер на определенное время. По его истечении мерную емкость убирала из-под сливного патрубка, секундомер отключали. Объемную концентрацию определяли при помощи цилиндра лабораторного.

Тарирование контрольных отверстий выполняли путем подачи распределенным потоком зернистого материала в приемный бункер струйного питателя через одно из пяти отверстий. При этом также определяли расход пульпы и ее концентрацию.

Описанный выше комплекс экспериментальных замеров в лабораторных условиях производили для водонасыщенных разрыхленных природных песчаных грунтов со средней крупностью частиц d_{cp} , равной 0,33 мм.

3.3. Методика лабораторных исследований процесса гравитационной переработки зернистых материалов

Экспериментальные исследования процесса гравитационной переработки зернистых материалов предназначены для решения следующих актуальных задач:

- предварительное визуальное изучение процесса гравитационной переработки зернистых материалов в горизонтальном потоке несущей среды для разработки физической модели;
- изучение закономерностей взаимодействия проточной части классификационного устройства с зернистым материалом, несомым горизонтальным потоком пульпы (при его разделении на классы в ходе гравитационной переработки);
- получение экспериментальных данных и подтверждение достоверности математической модели взаимодействия проточной части горизонтального классификатора с потоком пульпы, несущим твердые частицы (при их гравитационной классификации);
- качественная и количественная оценка влияния концентрации зернистого материала в исходной пульпе на процесс его классификации;
- оценка влияния процесса гравитационной переработки на гранулометрический состав конечного продукта. Оценка эффективности процесса классификации.

Исследования процесса взаимодействия проточной части горизонтального классификатора с потоком пульпы, несущим твердые частицы, для гравитационной переработки проводили в три этапа:

а) гравитационная переработка с использованием классификатора КГМ при питании струйным питателем (рис. 3.1);

б) гравитационная переработка с применением классификатора КГГ при питании струйным питателем (рис. 3.2);

в) гравитационная переработка с применением классификатора КГГ при питании грунтозаборным устройством на базе струйного насоса (рис. 3.3).

Этап А. Исследования процесса гравитационной переработки с применением классификатора КГМ при питании струйным питателем (рис. 3.1) проводили в следующей последовательности [25, 57].

Открывали вентиль сети и регулировочные вентили системы водоснабжения, подавали воду к оросительной гребенке струйного питателя и струйному насосу. Давление в системе водоснабжения контролировали манометрами и поддерживали установленное положение. Заполняли водой проточные полости классификатора КГМ и соединительных патрубков. Полное заполнение контролировали наличием слива воды из классификатора. Порцию контрольного зернистого материала (песка) засыпали в питатель и через контрольное отверстие распределенным потоком подавали в приемный бункер струйного питателя. Приготовленная при помощи оросительной гребенки пульпа струйным насосом подавалась в приемный патрубок классификатора КГМ. Выполняли визуальное наблюдение за процессом классификации зернистого материала в горизонтальном потоке и его осаждения в отдельных отсеках. Расход пульпы определяли объемным методом. Полученные значения заносили в журнал исследований. Процесс классификации останавливали после завершения приготовления и подачи пульпы струйным питателем. Подачу воды к оросительной гребенке и струйному насосу прекращали.

Цикл эксперимента завершали путем извлечения зернистого материала из первых 6 камер через разгрузочные патрубки. Извлеченный материал подвергали сушке и дальнейшему рассеву по классам. С этой целью применяли сита лабораторные с размером ячейки: 0,1, 0,2, 0,315, 0,4, 0,5, 0,63, 1,25, 2,5 мм. Полученные значения заносили в журнал исследований. После завершения эксперимента цикл замеров повторяли с новой порцией зернистого материала.

Этап Б. Исследования процесса гравитационной переработки с применением классификатора КГГ при питании струйным питателем (рис.3.2) проводили в последовательности, описанной ранее. Отличием является только применение классификатора КГГ с одним песковым бункером.

Этап В. Исследования процесса гравитационной переработки с применением классификатора КГГ при питании грунтозаборным устройством на базе струйного насоса (рис. 3.3) проводили в следующей последовательности.

Открывали вентиль сети и регулировочный вентиль системы водоснабжения струйного насоса. Давление в системе водоснабжения контролировали манометром и поддерживали установленное положение.

Грунтозаборное устройство устанавливали в забое и выполняли подачу пульпы транспортным пульпопроводом к приемному патрубку классификатора КГГ. Выполняли визуальное наблюдение за процессом классификации зернистого материала в горизонтальном потоке и его осаждения в песковом бункере. Расход пульпы определяли объемным методом. Полученные значения заносили в журнал исследований. Процесс классификации останавливали после заполнения пескового бункера материалом. Подачу воды к струйному насосу прекращали.

Цикл эксперимента завершали путем извлечения зернистого материала из пескового бункера через разгрузочный патрубок. Извлеченный материал подвергали сушке и дальнейшему рассеву по классам. Полученные значения заносили в журнал исследований.

Для выполнения лабораторных исследований процесса взаимодействия проточной части горизонтального классификатора с потоком пульпы, несущим твердые частицы, с целью гравитационной переработки зернистых полезных ископаемых принимали следующие типы зернистых материалов.

1. **Этап А** – применение классификатора КГМ и струйного питателя:

- а) песок природный речной, средняя крупность частиц $d_{cp} = 0,33$ мм;
- б) песок природный речной классифицированный, крупность частиц 0,4...0,5 мм, 0,315...0,4 мм, 0,2...0,315 мм, -0,2 мм. Классификация песка выполнена с применением сит лабораторных СЛ-200.

Эксперименты с песком природным речным ($d_{cp} = 0,33$ мм) выполняли за 15 циклов замеров с применением пяти контрольных отверстий. Таким образом, рассев по классам выполнен для 90 порций материала.

Эксперименты с природным речным классифицированным песком проведены в следующем объеме:

- а) 0,4...0,5 мм – 6 циклов, обработано 18 порций материала;
- б) 0,315...0,4 мм – 10 циклов, обработано 50 порций материала;
- в) 0,2...0,315 мм – 6 циклов, обработано 36 порций материала;
- г) -0,2 мм – 5 циклов, обработано 40 порций материала.

2. **Этап Б** – применение классификатора КГГ и струйного питателя:

- а) песок природный карьерный Александровского месторождения (Николаевская обл.), средняя крупность частиц $d_{cp} = 0,51$ мм. Выполнено 3 эксперимента, обработано 3 порции материала;

3. **Этап В** – применение классификатора КГГ и грунтозаборного устройства:

- а) песок природный речной, средняя крупность частиц $d_{cp} = 0,33$ мм. Выполнено 3 эксперимента, обработано 3 порции материала;
- б) песок природный карьерный Александровского месторождения (Николаевская обл.), средняя крупность частиц $d_{cp} = 0,51$ мм. Выполнено 3 эксперимента, обработано 3 порции материала.

Полученные экспериментальные данные приведены в приложении П.

В ходе экспериментальных исследований по гравитационной переработке зернистых материалов всего выполнено 36 циклов, при этом было обработано 153 порции зернистого материала.

3.4. Определение параметров процесса взаимодействия проточной части горизонтального классификатора с потоком пульпы, несущим твердые частицы

Сложность моделирования процесса взаимодействия проточной части горизонтального классификатора с потоком пульпы, несущим твердые частицы, с целью гравитационной переработки зернистых материалов в движущемся горизонтально потоке несущей среды заключается в необходимости учета горизонтального и вертикального движения твердых частиц. При этом на процесс движения твердой частицы некоторое влияние могут оказывать следующие факторы: совместно протекающее относительное вертикальное и горизонтальное движение твердых частиц; стесненность движения твердых частиц; перемещение твердых частиц относительно несущего горизонтального потока.

Учет приведенных факторов и количественная оценка их влияния на процесс гравитационной переработки зернистых материалов были выполнены в результате обработки полученных экспериментальных данных. При этом решались задачи количественного определения и оценки необходимости учета таких факторов:

- движение твердых частиц относительно несущего горизонтального потока;
- стесненность движения твердых частиц;
- влияние конструктивных параметров проточной части классифицирующего устройства на движение твердых частиц в различных участках процесса гравитационной переработки.

Известным фактором, влияющим на процесс гравитационной переработки зернистых материалов, является скорость падения твердых частиц в неподвижной жидкой среде. Описанию и моделированию этого процесса посвящено много работ [8 – 13, 15 – 19, 22, 23, 25]. В результате выполненных исследований разработаны математические модели и получено достаточное количество экспериментальных данных. Наиболее изученной областью оказался наиболее распространенный и доступный материал – частицы кварца крупностью $0,15 < d < 5$ мм и уголь.

Несмотря на массовость работ, посвященных изучению процесса падения твердых частиц в неподвижной среде, практически не изученным остается процесс движения твердых частиц относительно движущегося горизонтального потока несущей среды. Бездоказательно считается, что в несущем горизонтальном потоке твердая частица движется со скоростью потока [13, 16 – 19, 23, 25].

Известно, что рациональной для гравитационной переработки, например, частиц кварца является крупность $0,15 < d < 5$ мм. При этом границей разделения для горизонтальных классификаторов можно считать крупность $0,1 < d < 0,2$ мм.

Таким образом, для обоснования рациональных параметров устройства для гравитационной переработки зернистых материалов в горизонтальном

потоке достаточно моделирование движения твердых частиц из области ожидаемых значений границы разделения.

Изучению движения твердых частиц из этой области крупностей были посвящены экспериментальные исследования, проведенные на лабораторной установке с применением классификатора горизонтального многосекционного КГМ (рис. 3.1).

В результате лабораторных исследований изучено движение частиц кварца окатанной формы в диапазоне крупностей $-0,2$ мм. Расчет теоретической траектории движения частиц выполнен с применением зависимости 2.35 (рис. 3.5). Процесс осаждения протекал при средней скорости горизонтального потока $0,03$ м/с. Обработка данных экспериментов показала, что в диапазоне крупностей $-0,2$ мм, более 90 % твердых частиц садились в отсеки №№ 2 – 6, находящиеся в теоретической области осаждения окатанных частиц кварца крупностей $0,1 \dots 0,2$ мм (табл. 3.1, рис. 3.6). Таким образом, минимальное значение вероятности попадания окатанной частицы кварца крупностью $0,1 \dots 0,2$ мм в теоретическую область осаждения составляет 90 %. А при учете наличия в применяемом сырье частиц крупностью менее $0,1$ мм теоретическая область расширяется и вероятность стремится к 100 %.

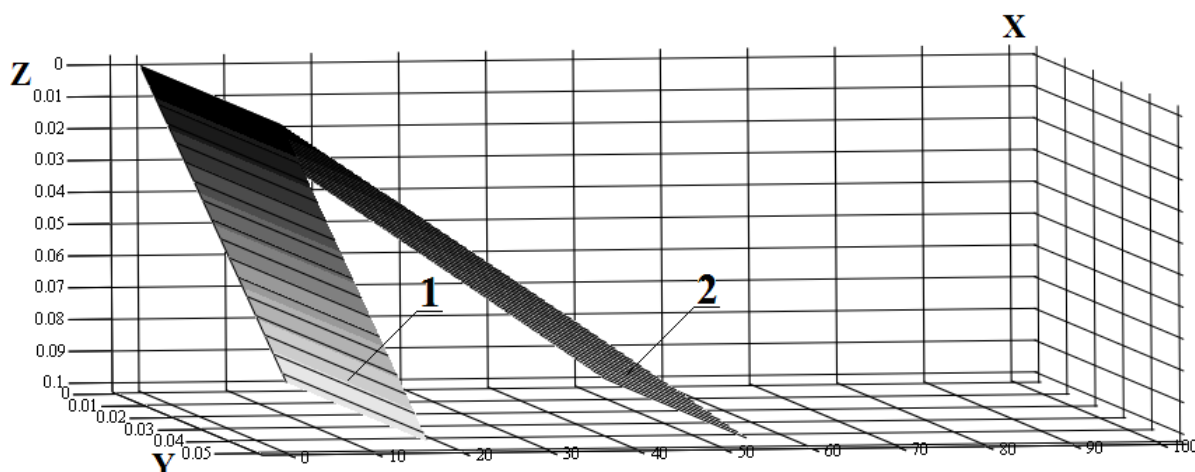


Рис. 3.5. Теоретическая траектория движения окатанных частиц кварца крупностью, мм: 1 – $0,2$; 2 – $0,1$

Таблица 3.1

Осаждение частиц кварца крупностью $-0,2$ мм, %

Концентрация питания, %	№ камеры КГМ								Σ №2-6
	2	3	4	5	6	7	8	9	
3,0	37,4	18,4	14,9	12,1	8,4	4,7	2,7	1,4	94,1
6,0	44,1	18,6	14,1	10,5	6,8	3,5	1,6	0,8	92,0
10,0	40,1	18,8	14,2	11,1	7,7	4,3	2,5	1,2	93,4
13,0	42,3	18,6	14,0	11,0	7,6	3,6	2,0	1,0	89,7
19,0	36,0	18,0	14,6	12,2	9,0	5,6	3,2	1,5	91,2

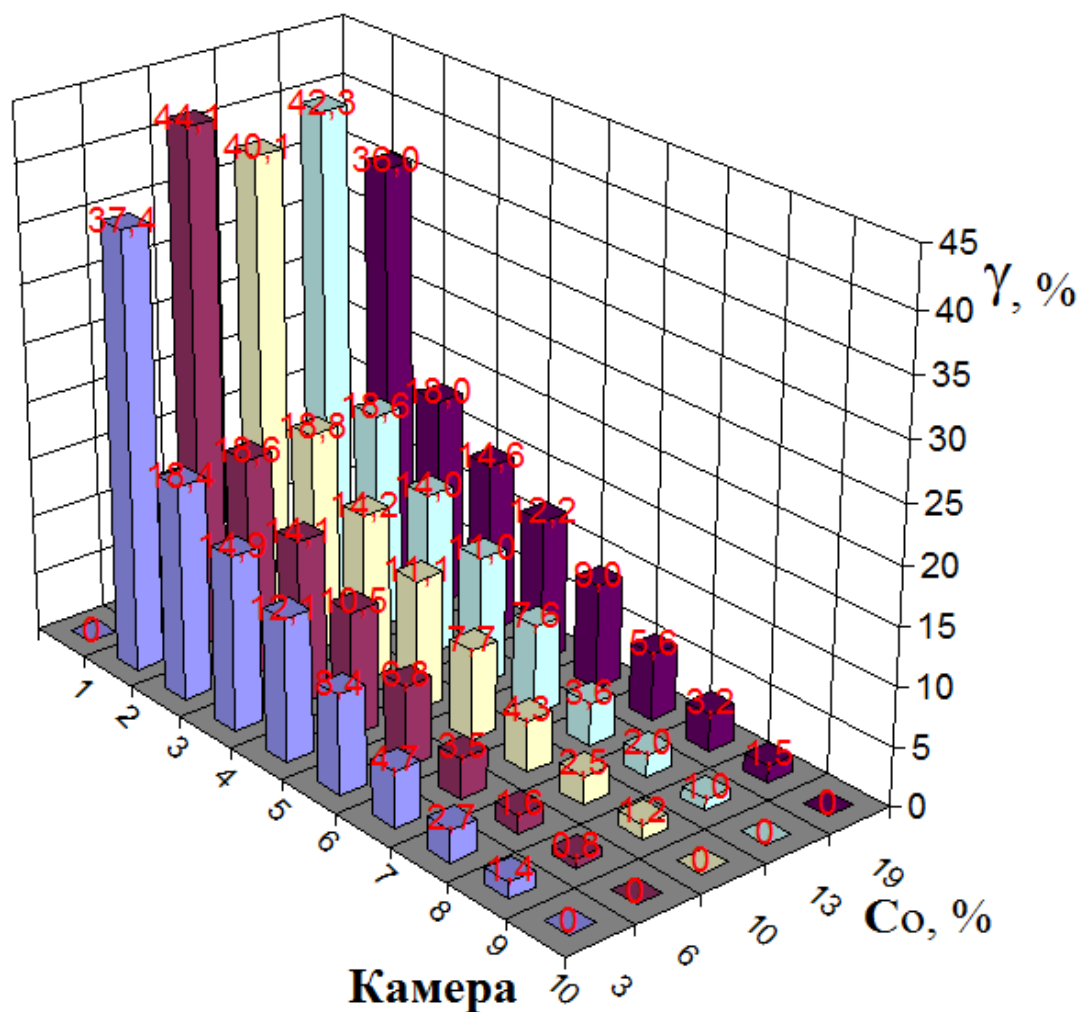


Рис. 3.6. Осаждение окатанных частиц кварца при питании процесса с объемной концентрацией: ■ – 3 %; ■ – 6 %; ■ – 10 %; ■ – 13 %; ■ – 19 %

Целью лабораторных исследований являлось также определение влияния концентрации твердых частиц в питании на процесс осаждения. Обработка экспериментальных данных показала, что концентрация твердого оказывает влияние на стесненность движения частиц, вызывая снижение скорости падения (рис. 3.7). При детальном изучении массовых характеристик материала, осажденного в области с 90 % вероятностью попадания окатанной частицы кварца крупностью 0,1...0,2 мм, среднее значение разницы масс в камерах №№ 2 – 6 при концентрации твердого в питании пульпы 3 % и 19 % составило 3 %.

Анализ экспериментальных данных лабораторных исследований движения частиц кварца окатанной формы крупностью -1,8 мм показал, что влияние концентрации твердого в питании пульпы в пределах от 0 до 20 % на среднюю крупность осажденного в отсеках зернистого материала не выходит за значение 5 %, а в среднем погрешность составляет 1,6 % (табл. 3.2) (рис. 3.8, 3.9).

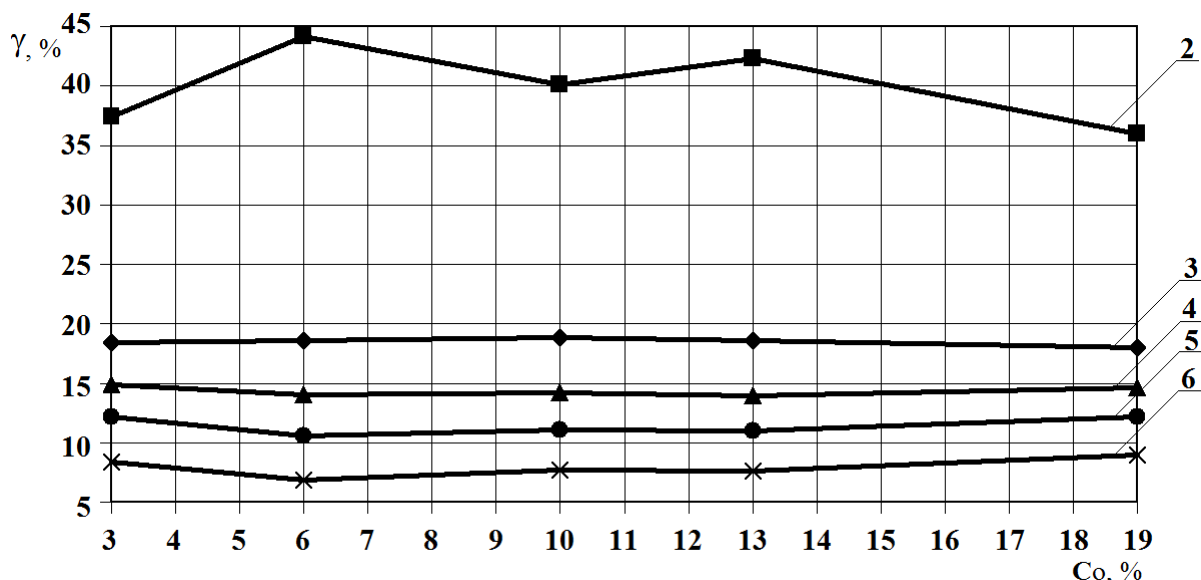


Рис. 3.7. Влияние концентрации пульпы на процесс осаждения окатанных частиц кварца крупностью -0,2 мм: 2, 3, 4, 5, 6 – номер камеры

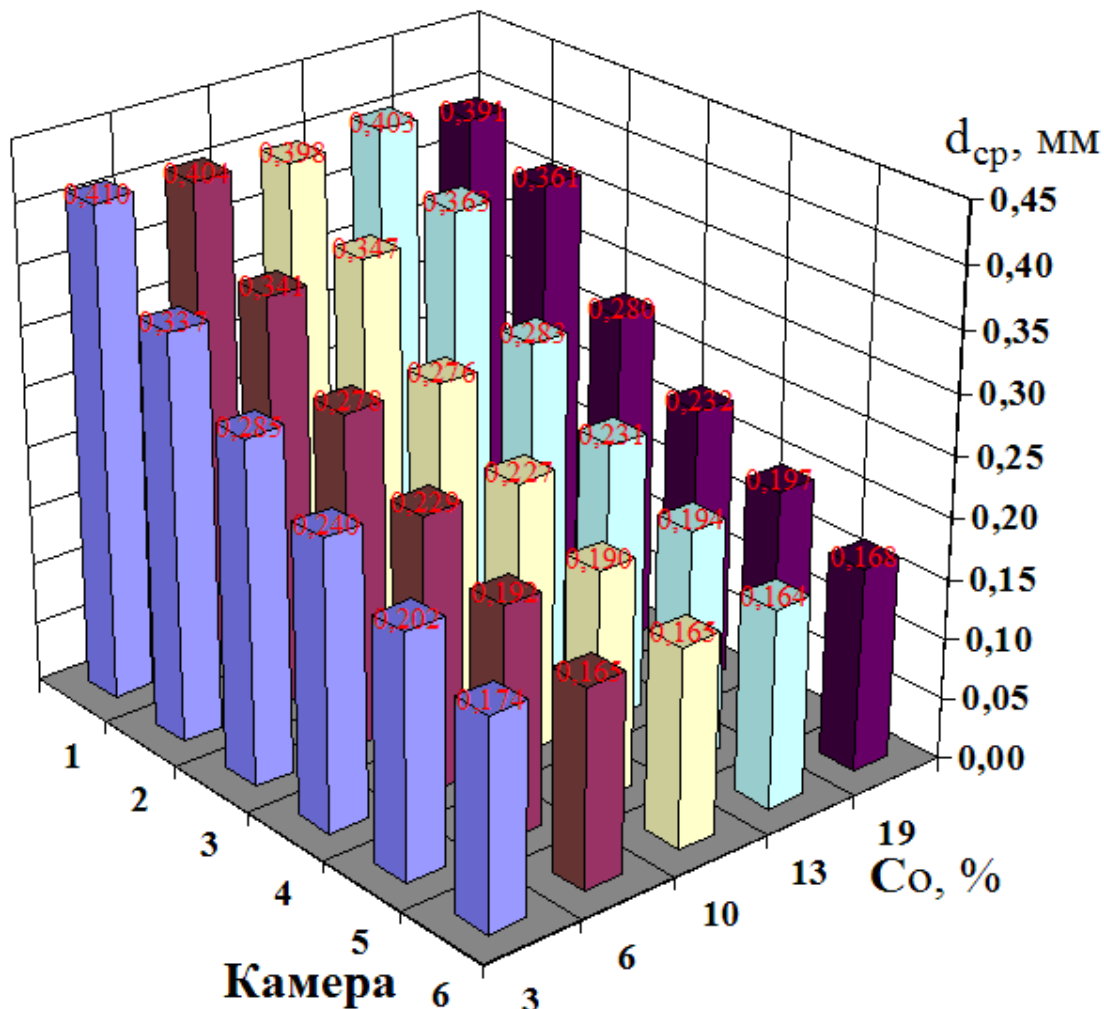


Рис. 3.8. Осаждение окатанных частиц кварца крупностью -1,8 мм при питании с объемной концентрацией: ■ – 3 %; ■ – 6 %; ■ – 10 %; ■ – 13 %; ■ – 19 %

Таблица 3.2

Средняя крупность осажденных частиц кварца крупностью -1,8 мм, %

Концентрация питания, %	№ камеры КГМ					
	1	2	3	4	5	6
3,0	0,41	0,337	0,285	0,24	0,202	0,174
6,0	0,404	0,341	0,278	0,229	0,192	0,165
10,0	0,398	0,347	0,276	0,227	0,19	0,165
13,0	0,403	0,363	0,283	0,231	0,194	0,164
19,0	0,391	0,361	0,28	0,232	0,197	0,168

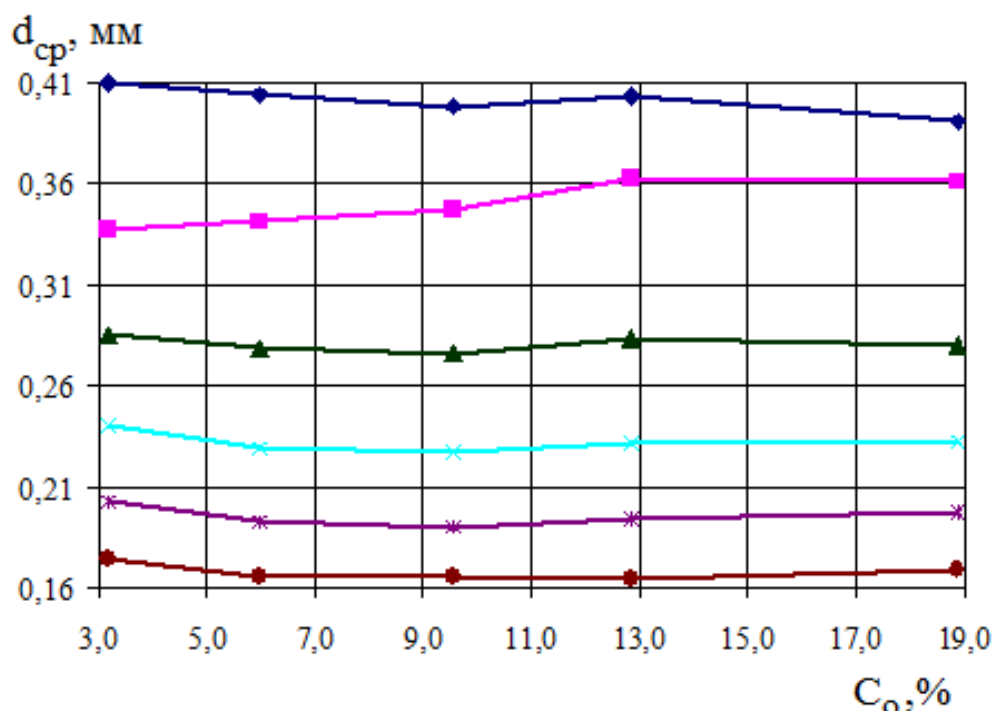


Рис. 3.9. Влияние концентрации пульпы на процесс осаждения окатанных частиц кварца крупностью -1,8 мм: 2, 3, 4, 5, 6 – номер камеры

Такое значение указывает на факт незначительности влияния данного фактора на процесс осаждения твердых частиц в исследуемом диапазоне концентраций. Таким образом, выполненные лабораторные исследования процесса осаждения окатанных частиц кварца под влиянием горизонтального потока несущей среды подтверждают актуальность применения зависимостей 2.34 – 2.36. То есть, при наличии в конструкции горизонтального классификатора камер с переменным и постоянным сечением потока высота проточной части равна сумме глубины осаждения твердой частицы на участке с переменным сечением потока и на участке с постоянным сечением потока в виде интеграла отношения скорости осаждения твердой частицы (с учетом гидравлической крупности) к горизонтальной проекции скорости твердой частицы. Указанная зависимость рекомендована при крупности твердых частиц не более 0,2 мм при объемной концентрации пульпы до 20 %.

4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО КЛАССИФИКАТОРА

Настоящая методика предусматривает определение конструктивных и технологических параметров классификатора гидравлического горизонтального (КГГ) при переработке зернистых материалов. В методике использованы известные и апробированные зависимости, применяемые для расчета конструктивных параметров неподвижных грохотов для классификации исходного сырья [3, 15 – 20, 25], а также аналитические зависимости, полученные впервые и приведенные в разделах 2, 3 [25, 50, 55]. Методика предусматривает выполнение расчетов, разделенных в три группы:

- расчет конструктивных параметров оборудования для классификации исходного сырья;
- расчет конструктивных параметров классификаторов гидравлических горизонтальных.

Перечень определяемых параметров классификатора гидравлического горизонтального (КГГ) приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Параметры классификатора гидравлического горизонтального (КГГ)

Параметры классификатора	
Конструктивные	Технологические
β_p – угол расширения камеры разделения, град.	$Q_{n.pec}$ – производительность по пульпе на песковый патрубок, м ³ /ч
β_u – угол сужения камеры истечения, град.	
α_p, α_u – углы наклона днищ камер разделения и истечения, град.	$Q_{n.u}$ – производительность по пульпе на патрубок истечения, м ³ /ч
L^p, L^k, L^u – длина камер разделения, классификации, истечения, м	
H_k^p, H_o^u – высота камер разделения и истечения, м	$Q_{m.pec}$ – производительность по песку на песковый патрубок, м ³ /ч
B_k^p, B_o^u – ширина камер разделения и истечения, м	
d_{pec} – диаметр пескового патрубка, м	$Q_{m.u}$ – производительность по твердому на патрубок истечения, м ³ /ч
d_u – диаметр патрубка истечения, м	

4.1. Расчет конструктивных параметров оборудования для классификации исходного сырья

Переработка исходного песчано-гравийного сырья перед гидравлической классификацией может быть выполнена с применением: вибрационных, подвижных и неподвижных грохотов. При гидромеханизированной добыче, учитывая опыт эксплуатации сортировочных установок [3 – 21, 24, 25] рациональным является применение неподвижных колосниковых, дуговых и конических грохотов. Здесь и далее приведена методика расчета конструктивных и технологических параметров конического грохота [5 – 7].

Производительность грохота по пульпе рассчитывают по формуле:

$$Q_{гр} = q_{зр} S, \text{ м}^3/\text{час},$$

где S – площадь сита, выполненного в виде цилиндрической и конусной поверхности, м^2 ;

$q_{зр}$ – удельная производительность конического грохота, $\text{м}^3/(\text{час} \cdot \text{м}^2)$ (табл. 4.2) [5].

Таблица 4.2

Удельная производительность конического грохота

Скорость ввода пульпы, м/с	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
Удельная производительность конического грохота на 1 м^2 поверхности сита, $q_{зр}$, $\text{м}^3/\text{час}$	90	100	110	120	130

Геометрические параметры конического грохота рекомендовано принимать в соответствии с такими формулами (рис. 4.1) [5]:

$$h_{в.ц.} = 0,45D_g; h_{в.к.} = 0,47D_g; l = 0,665D_g.$$

После подстановок расчетная производительность $Q = 2,53qD_g^2$.

Диаметр отверстий в конической части грохота рассчитывают по формуле [5]:

$$d_0 = (2...2,4)d_{зр},$$

где $d_{зр}$ – граничная крупность разделения.

Ширина щели в цилиндрической части грохота рассчитывают по формуле [5]:

$$b = (1,6...1,8)d_{зр}.$$

При круглых отверстиях в цилиндрической и конической части грохота

$$d_0 = (2,4 \dots 2,6)d_{зр}.$$

Расстояние между центрами отверстий $e = 1,5d_0$.

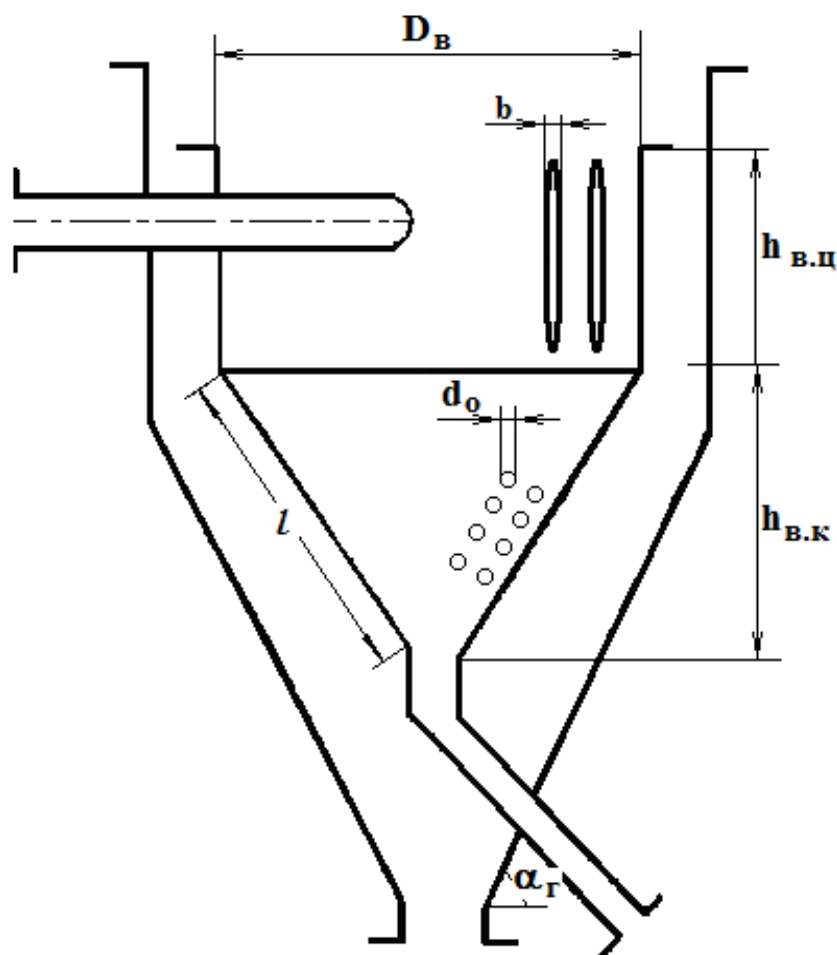


Рис. 4.1. Расчетные конструктивные параметры конического грохота

4.2. Расчет конструктивных параметров классификатора гидравлического горизонтального

Обоснование рациональных конструктивных и технологических параметров классификатора гидравлического горизонтального (КГГ) выполняется на основании построения траектории движения твердых частиц зернистого материала (рис. 4.2). Исходными данными являются:

- производительность гидротранспортной системы землесосного снаряда по пульпе, $Q_{п}$;
- физико-механические характеристики зернистого материала: гранулометрический состав, плотность скелета и насыпная, пористость, коэффициент разрыхления, форма частицы;
- концентрация твердого в пульпе, объемная;

- начальная и конечная высота и ширина камеры разделения, H_0^p, B_0^p ;
- H_k^p, B_k^p ;
- углы расширения камеры разделения β_p ;
- угол наклона днища камеры разделения α_p ;
- длина камеры классификации L^k ;
- конечная высота и ширина камеры истечения H_k^u, B_k^u ;
- угол сужения камеры истечения β_u ;
- угол наклона днища камеры истечения, α_u .

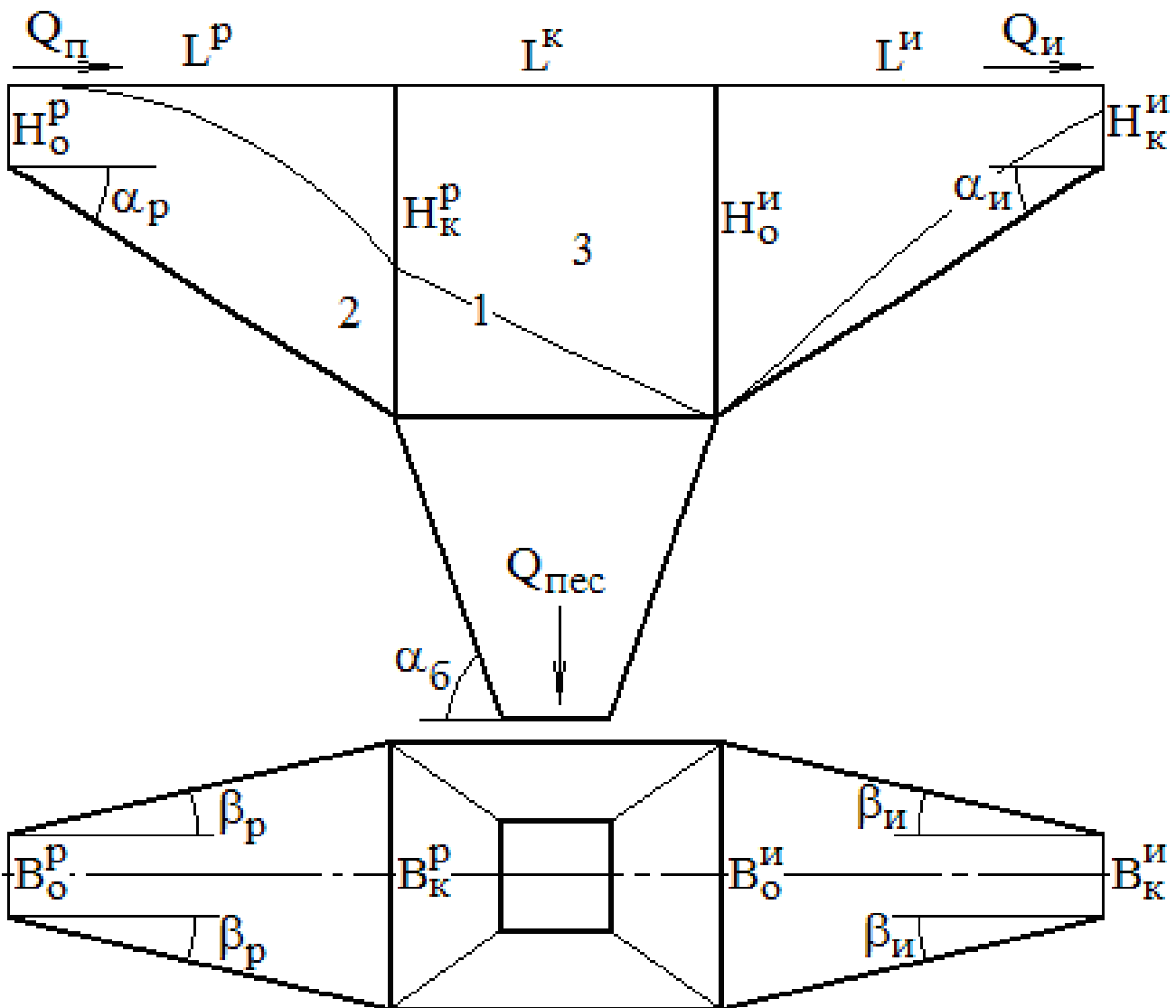


Рис. 4.2. Расчетная схема процесса гравитационной гидравлической классификации в горизонтальном потоке: 1 – траектория движения частицы граничной крупности; 2 – область осаждаемых частиц крупностью больше граничной; 3 – область выносимых частиц крупностью меньше граничной

Обоснование конструктивных параметров КГГ начинают с определения начальной высоты и ширины камеры разделения на основании данных о диаметре подающего пульпопровода, расчет которого выполняется по известной формуле:

$$D = 1,128 \cdot \sqrt{\frac{Q_n}{V}}, \quad (4.1)$$

где Q_n – производительность земснаряда по пульпе м³/с;

V – скорость движения пульпы по трубопроводу, принимают 3 м/с [20, 21, 61 – 63].

Углы расширения камеры разделения β_p и сужения камеры истечения β_u принимают таким образом, чтобы конечная ширина камеры разделения $B_k^p = B_o^u$ соответствовала длине камеры осаждения L^o .

Определение угла наклона днища. Рациональные технологические параметры процесса осаждения твердых частиц могут быть получены при рациональных значениях углов наклона днища камер разделения α_p и истечения α_u . С этой целью следует применить аналитические зависимости (2.37) и (2.38), полученные в главе 2:

$$U_{ск}^p = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{dg}{C_\phi} \frac{(\rho_{ск} - \rho_n)}{\rho_n} (f_1 \cos \alpha_p - \sin \alpha_p)}, \text{ м/с;}$$

$$U_{ск}^u = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{dg}{C_\phi} \frac{(\rho_{ск} - \rho_n)}{\rho_n} (f_1 \cos \alpha_u + \sin \alpha_u)}, \text{ м/с,}$$

где f_1 – экспериментальные значения коэффициента внешнего трения скольжения (к.в.т.с.) твердых частиц заданной крупности о заданный материал днища.

В качестве расчетного значения крупности твердой частицы и соответствующего ему значения к.в.т.с. для определения угла наклона α_p следует принять ближайшее значение крупности больше обозначенной граничной крупности разделения. Для определения угла наклона α_u необходимо принять значение к.в.т.с. для твердой частицы граничной крупности разделения.

Построение траектории движения твердых частиц выполняется с применением зависимостей, полученных в главе 2. Следует отметить, что достоверная траектория движения может быть построена для твердой частицы крупностью $d \leq 0,2$ мм. Для более крупных гарантированно осаждаемых частиц достаточно построение траекторий, близких к достоверным. Построение

траектории твердой частицы в области разделения и классификации выполняется путем последовательного определения текущего приращения глубины осаждения частицы с применением полученных в главе 2 зависимостей (2.28, 2.29) (рис. 4.2):

$$\text{Для области разделения} - dz_p = \frac{\operatorname{tg} \alpha_p U_{ч\,xp} + \omega}{U_{ч\,xp}} dx_p, \text{ м,}$$

$$\text{Для области классификации} - dz_o = \frac{\frac{q}{B_p} + \omega}{U_{ч\,xo}} dx_o, \text{ м.}$$

При необходимости путем последовательных приближений, изменением геометрических параметров следует обеспечить осаждение частиц больше граничной крупности и удаление в слив твердых частиц меньше граничной крупности.

Накопление и выгрузка зернистого материала. Участок накопления представляет собой бункер, который в простейшем исполнении выполнен с квадратным сечением и четырьмя наклонными стенками. Полного извлечения зернистого материала из бункера добиваются путем обеспечения гравитационного истечения осадка. В соответствии с исследованиями процесса истечения из бункеров [27, 28] и практических рекомендаций углы наклона стенок бункера следует принимать не менее 70° . Расчет диаметра пескового патрубка необходимо выполнять по известной формуле (4.1), где скорость течения водонасыщенного зернистого материала принимается на основании экспериментальных замеров. Объемная концентрация осадка при сливе из бункера принимается на основании значений, полученных в результате выполнения лабораторных исследований: $C_{\text{пес}} = 80\%$.

Слив шлама. Для обеспечения высоких расчетных показателей классификации зернистого материала необходимо обеспечить слив шлама. Диаметр сливного патрубка рассчитывают с применением известной зависимости (4.1), где скорость истечения шлама принимается в соответствии с практическими рекомендациями [64, 65].

5. ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Научные и практические результаты выполненных в работе исследований многократно применялись в ходе рабочего проектирования горных предприятий. Разработанные проекты гидравлических классификаторов были внедрены в производство с получением экономического и социального эффекта. В ходе рабочего проектирования и внедрения обоснована технологическая рациональность, практическая реализуемость и экономическая эффективность применения комплексов нового технического уровня на базе горизонтальных классификаторов, предназначенных для освоения подводных морских, речных, озерных или континентальных обводненных месторождений зернистых полезных ископаемых.

5.1. Проектирование и эксплуатация комплексов для добычи и переработки песков

Методика расчета рациональных конструктивных и технологических параметров классификаторов гидравлических горизонтальных, в состав которой входят полученные впервые и известные зависимости, апробирована при разработке технических систем и технологических процессов, применяемых при переработке рудных и нерудных природных и искусственных песков для получения продукции, соответствующей действующим стандартам [1, 2]. Наиболее полно методика применена при рабочем проектировании КДП «землесосный снаряд – пульпопровод – классификационная установка» нового технического уровня для разработки Подгороднянского, Александровского, Восточно-Бугского месторождений песков [25, 66, 67 – 70]. Частично разработанную методику использовали при обосновании рациональных параметров оборудования, разработке и модернизации технологических процессов дробильно-сортировочных комплексов предприятий: Балаклавское рудоуправление, Редутский щебеночный карьер, Гайворонский специализированный карьер и др. [25, 71 – 73].

Наиболее полно рациональные параметры КДП «землесосный снаряд – пульпопровод – классификационная установка» впервые были обоснованы при рабочем проектировании разработки Подгороднянского месторождения песка [261, 262, 266].

Сложность разработки месторождения обусловлена горно-геологическими условиями залегания горных пород и физико-механическими характеристиками полезного ископаемого. Вскрышные породы в виде суглинков, красно-бурых глин и глинистых тонкозернистых песков залегают мощностями соответственно: 0,8 – 3,4 м, 1,5 – 4,8 м, 0,3 – 4,5 м. Средняя мощность их составляет 6,6 м. Полезное ископаемое залегает мощностью от 6,3 м до 13 м при среднем значении 10,5 м. Месторождение расположено на водообильном склоне балки Вербовой, которая впадает в балку Топчиева, а последняя – в реку Южный Буг, что обусловило технологию его разработки.

В соответствии с рабочим проектом [69, 74] строительство карьера предусматривает его вскрытие и строительство дамбы для образования технологического водоема (рис. 5.1). Добычные работы выполняются землесосным снарядом, оборудованным грунтовым насосом Warman 8/6, которым пульпа рефулерным и стационарным пульпопроводом диаметром 180 мм гидротранспортируется на участок сортировки. Классифицированный песок обезвоживается и складывается. В результате переработки полезное ископаемое классифицируют на гравий, строительный песок и шлам. После переработки гравий и песок складываются, а шламы сливаются в шламоотстойники для осаждения. Осветленная в шламоотстойниках вода сливным трубопроводом отводится в котлован земснаряда для его пополнения и обеспечения добычных работ. Уровень воды в котловане, в который поступают воды водоносных горизонтов и атмосферные осадки, регулируется шандорным колодцем.

Для переработки полезного ископаемого принята технологическая схема с применением классификатора гидравлического горизонтального КГГ250-0,16. Исходный продукт в виде пульпы подается землесосным снарядом непосредственно в приемную камеру классификатора. Граничная крупность разделения $d_{гр} = 0,16$ мм. После переработки класс +0,16 мм выдают через песковый патрубок на отвальный обезвоживающий элеватор и в конусный склад (рис. 5.1). Шламы сливным патрубком сливаются в шламоотстойники для осаждения мелкодисперсных классов крупностью меньше 0,16 мм. Обоснование рациональных конструктивных и технологических параметров КГГ 250-0,16 выполнено с применением разработанной методики расчета конструктивных и гидродинамических параметров классификаторов гидравлических горизонтальных. Разработанный метод расчета позволил построить траектории движения твердых частиц в классификаторе (рис. 5.2) и его характеристику (рис. 5.3).

Полученные в ходе расчетов конструктивные размеры классификатора послужили основой для разработки его конструкции (рис. 5.4). В ходе проектирования классификатора КГГ 250-0,16 для переработки песка Подгороднянского месторождения был выполнен значительный объем проектно-конструкторских работ [70, 74]. Расчеты проверялись с применением лабораторной установки, описание которой приведено в п. 3.1 (рис. 3.3). Проектно-конструкторские работы позволили определить назначение, область применения, требования к инженерному обеспечению, преимущества классификатора.

КГГ предназначен для переработки песков природных и отсева дробления скальных пород в потоке пульпы с получением товарного продукта и эффективным удалением тонкодисперсных глинистых частиц крупностью менее 0,16 мм. Область применения классификатора обозначена карьерами по производству строительных песков, в том числе с использованием плавучих землесосных снарядов. Для обеспечения работы КГГ требуется наличие электроснабжения участка и источник технического водоснабжения.

Экспликация оборудования и сооружений	
№ п/п	Наименование
1	Экскаватор гидравлический ЭО – 4124 А
2	Позвучик фронтальный РН – 956
3	Бульдозер ДЗ – 110
4	Землесейный снаряд с грунтовыми насосами Магнат 8/6
5	Классификатор гидравлический КГГ – 250
6	Автомасшала Катас 35111
7	Пулыграбав напарный
8	Пулыграбав слывный
9	Трансформаторная подстанция ПКТП 10/0,4 100 кВА
10	Кабель гибкий КГ ЗР 25 + 17 10
11	Линия электропередач на передвижных аппаратах провод А-25
12	Автомобильная дорога
13	Временный склад почвенно-растительных пород
14	Преобразовательный паровый вал
15	Дамба
16	Шановный колдобец
17	Склад обогащенного песка
18	Внешний склад почвенно-растительных пород
19	Внешний склад суглинкав и красных глин
20	Камбев отвалыный
21	Плиты асфальтовые
22	Осветительная мачта с светильниками ПЗМ – 35
23	Шламолотосынок

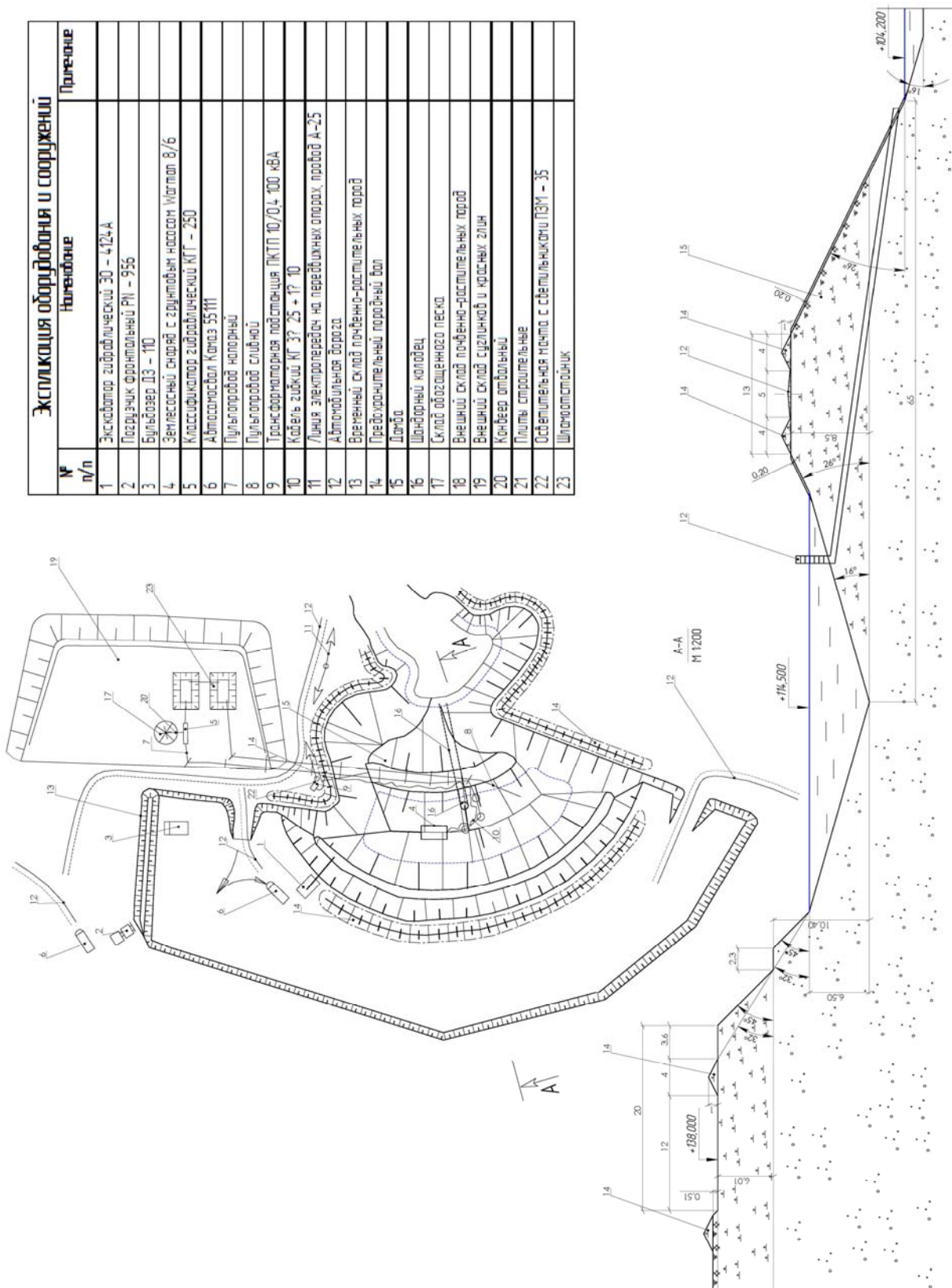


Рис. 5.1. Вскрытие Подгороднянского месторождения песка

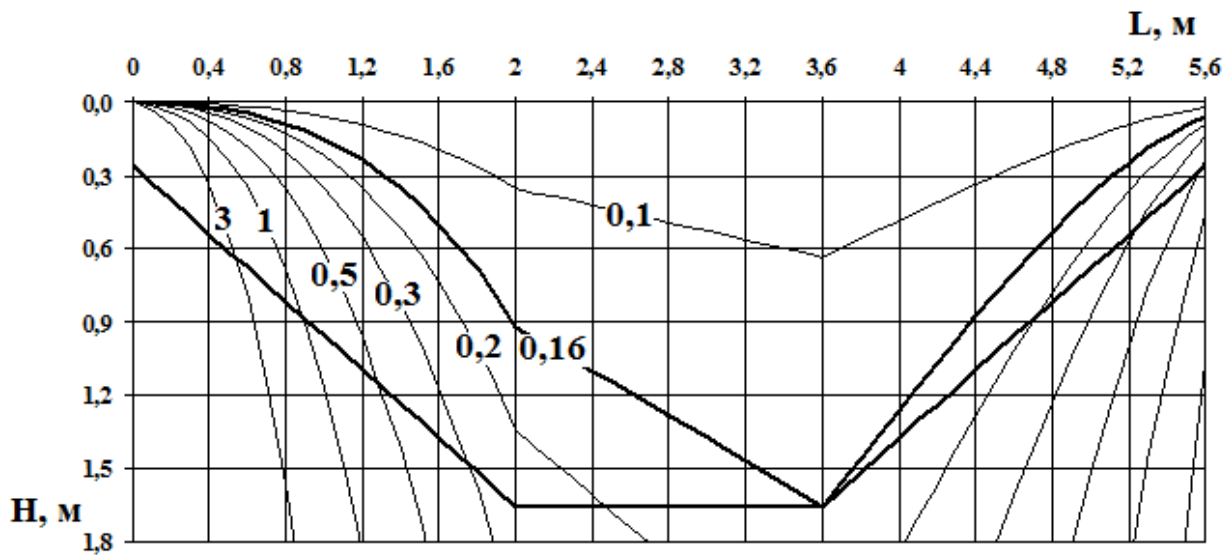


Рис. 5.2. Траектория движения твердых частиц в КГГ 250-0,16

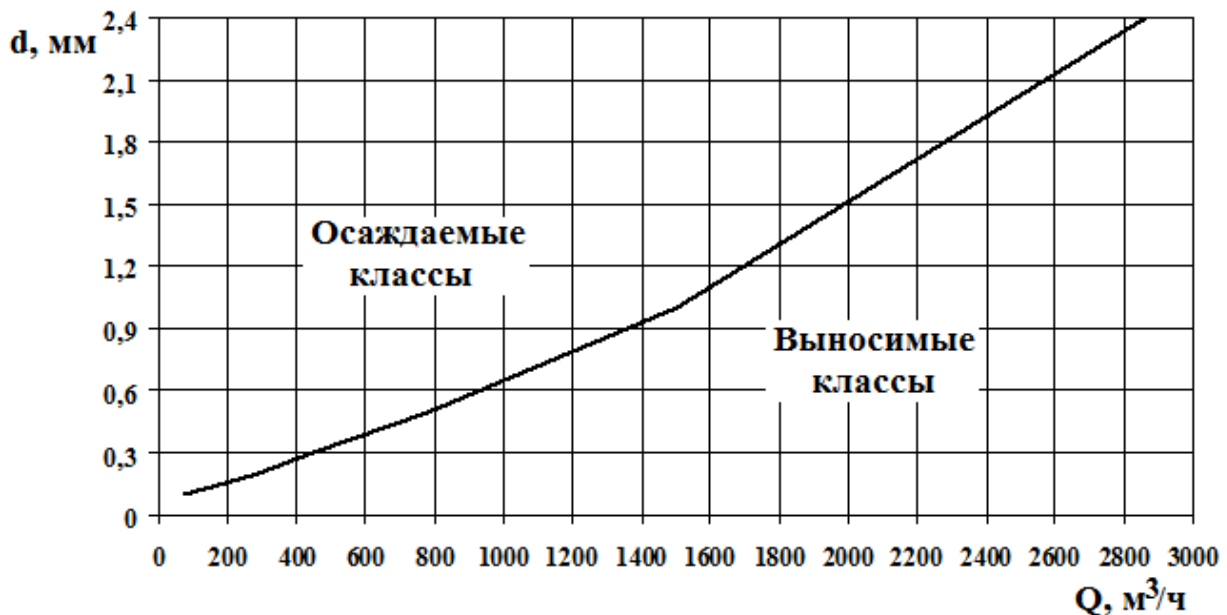


Рис. 5.3. Характеристика классификатора КГГ 250-0,16

Классификатор обеспечивает эффективность: по удалению классов $-0,16$ мм – 76 %; $-0,1$ мм – 96 %; $-0,063$ мм – 98 %. Преимуществами классификатора КГГ являются: низкая удельная энергоемкость, поскольку процесс происходит под действием гравитационных сил; низкий напор подаваемой в классификатор пульпы. В связи с этим затраты на подачу пульпы минимальные, а гидроабразивный износ практически отсутствует; выгрузка осажденного материала из классификатора осуществляться самотеком. Шлюз управляется оператором или автоматически; обеспечивается обезвоживание материала, достаточное для его складирования в конусный или штабельно-кольцевой склад. Технологический процесс отделения песка от тонкодисперсных примесей с применением классификаторов КГГ не требует организации карт намыва, что значительно снижает себестоимость переработки. Новизна предложенного способа и устройства для его реализации подтверждены патентами на полезную модель и изобретение [74 – 78].

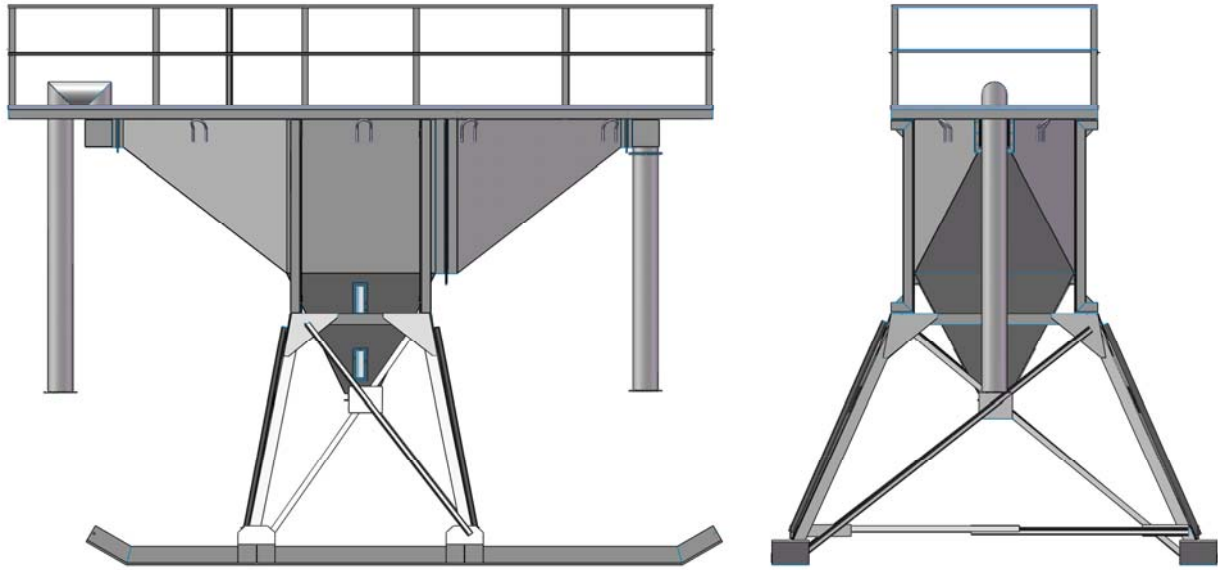


Рис. 5.4. Классификатор КГГ 250-0,16

Разработанный метод построения траекторий движения твердых частиц в горизонтальном несущем потоке пульпы был также применен при проектировании горизонтальных отстойников. В результате построения траекторий движения твердых частиц ожидаемой крупности были определены конструктивные параметры горизонтальных отстойников (рис. 5.5).

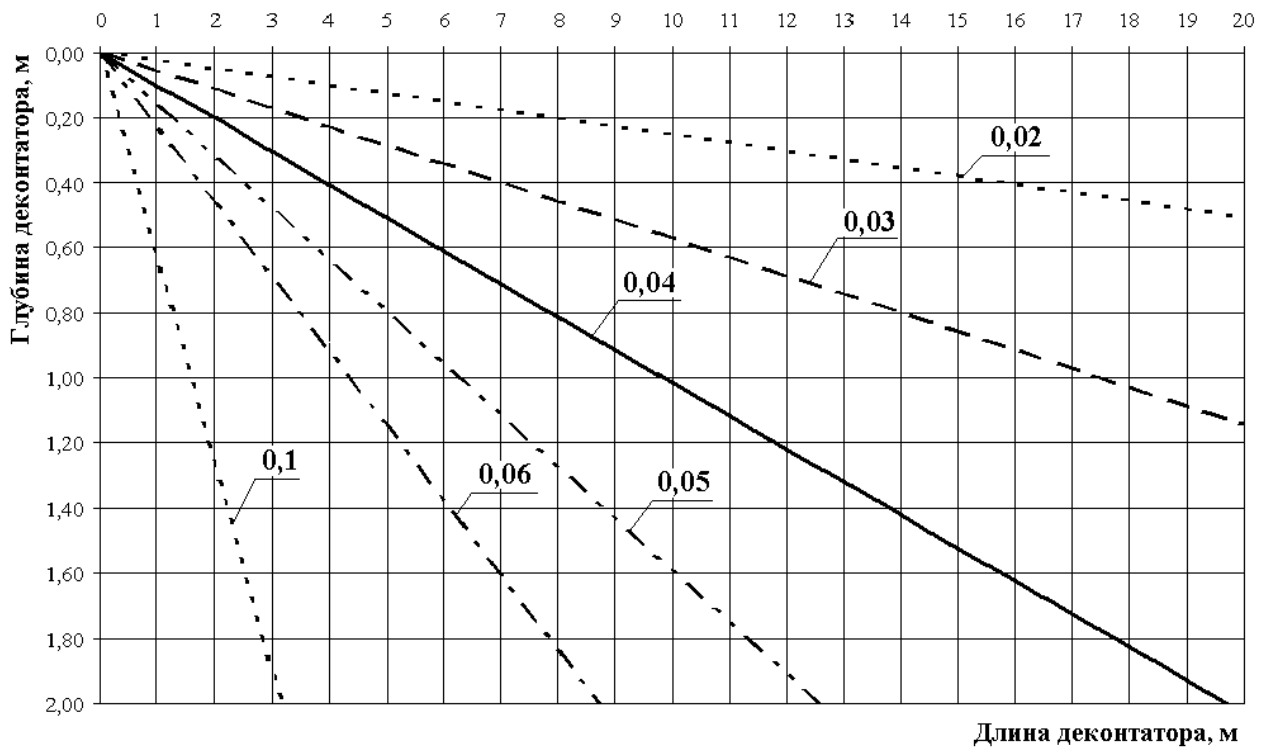


Рис. 5.5. Траектории движения твердых частиц в горизонтальном отстойнике

5.2. Добычный комплекс для освоения Александровского месторождения строительных песков

Александровское месторождение строительных песков находится вблизи г. Вознесенск и разделено на несколько участков [66, 79]. По особенностям геологического строения месторождение относится к 1 группе типа пластовых, выдержанных по строению, мощности и качеству полезного ископаемого. Месторождение находится в условиях, способствующих разработке открытым способом средствами гидромеханизации. Поверхность карьера практически горизонтальная со слабым наклоном в северо-западном направлении. Абсолютные отметки поверхности колеблются в пределах +7,0...+12,0 м.

Вскрышные породы на месторождении представлены почвенно-растительным слоем и суглинками. Их мощность колеблется от 0 до 0,41 м. Средняя мощность на месторождении составляет 0,315 м, в том числе: почвенно-растительный слой – 0,27 м, суглинки – 0,045 м. Мощность полезного слоя песков – от 17,66 до 18,63 м средняя 18,22 м.

Гидрологические условия месторождения способствуют его разработке открытым способом средствами гидромеханизации: полезная толща песков обводнена. Приток карьерных вод обусловлен дебетом водоносных горизонтов и атмосферными осадками.

Освоение таких месторождений традиционно выполняют путем разработки горных пород землесосными снарядами, гидротранспортирования пульпы и переработки полезного ископаемого на стационарном оборудовании или картах намыва, расположенных за пределами карьерного поля. Приведенная технологическая схема имеет низкую эффективность ввиду наличия таких недостатков:

- загрязнение окружающей среды за пределами карьерного поля вследствие размещения площадки обогащения;
- значительные энергозатраты на гидротранспортирование полезного ископаемого на большие расстояния от забоя до площадки обогащения;
- небольшой диапазон полученных классов продукции.

Новый способ разработки обводненного месторождения предусматривает применение КДП «землесосный снаряд – пульпопровод – классификационная установка». Технология предусматривает поблочную разработку полезного ископаемого землесосным снарядом, гидротранспортирование пульпы на площадку переработки, расположенную на территории соседнего с забоем блока в пределах карьерного поля, переработку полезного ископаемого с применением классификационного оборудования и карт намыва, получение различных классов продукции и его обезвоживание. Предложенный новый способ разработки защищен патентом [80] и приведен на рисунке 5.6. Для описания способа приняты следующие обозначения: **А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З** – блоки месторождения; 1 – граница карьерного поля; 2 – полустационарное сортировочное оборудование; 3 – карты намыва; 4 – забой вскрышного уступа;

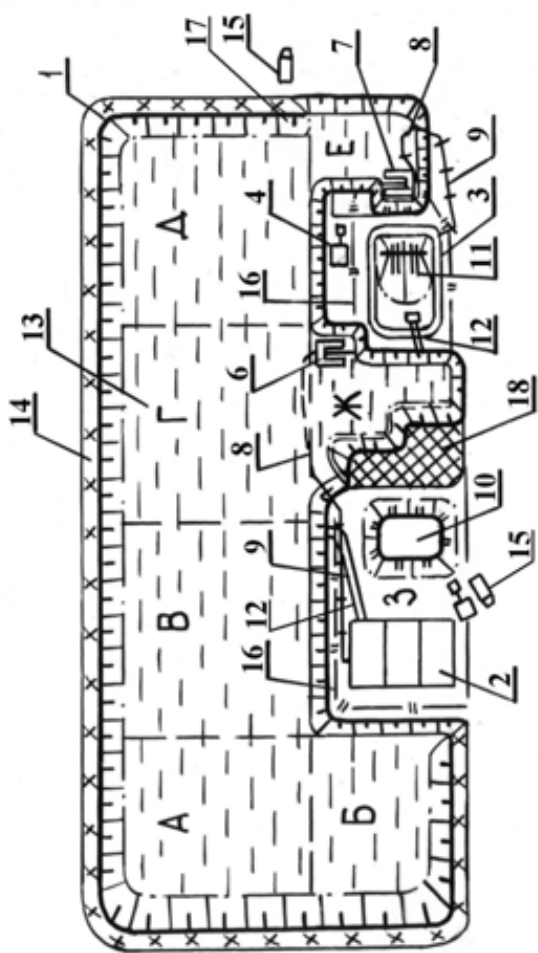
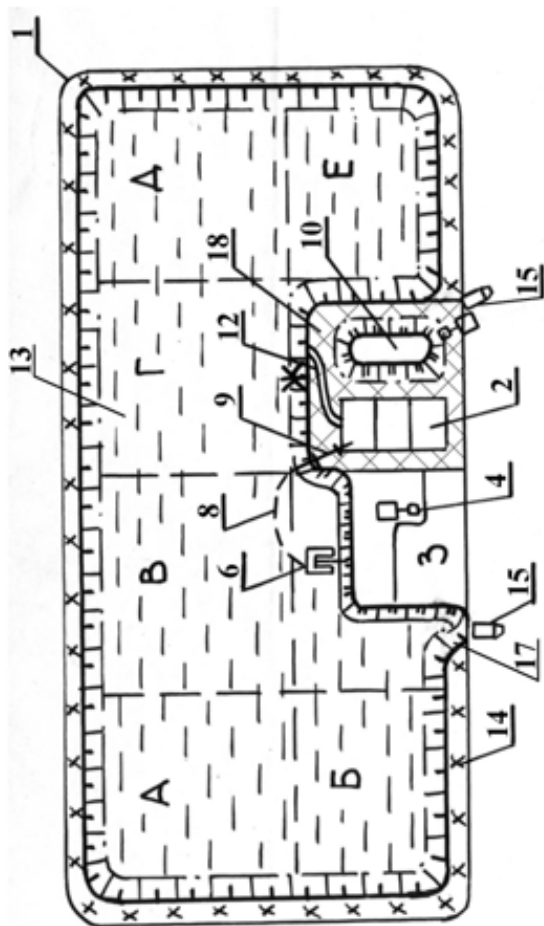
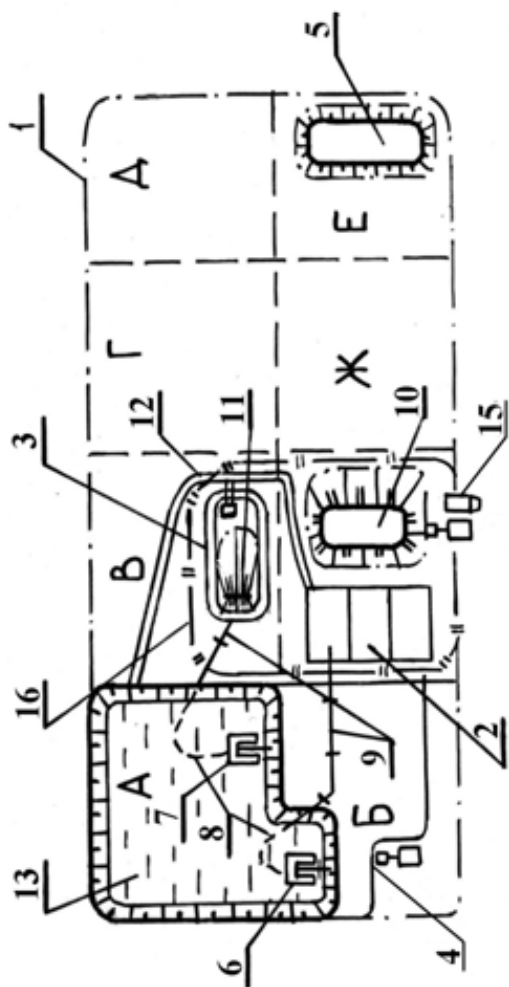
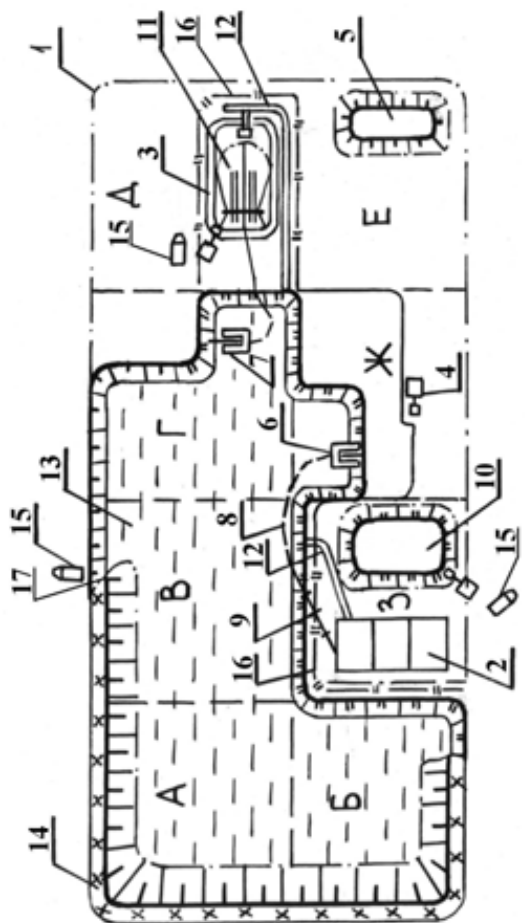


Рис. 5.6. Технология разработки обводненного месторождения нерудных песков

5 – временный внутренний отвал вскрышных пород; 6 – плавучий землесосный снаряд; 7 – плавучий землесосный снаряд; 8 – рефулерный пульпопровод; 9 – береговой стационарный пульпопровод; 10 – склад готовой продукции стационарного сортировочного оборудования; 11 – склад готовой продукции карт намыва; 12 – водоотводная канава; 13 – выработанное пространство; 14 – постоянный внутренний отвал вскрышных пород в выработанном пространстве карьера; 15 – транспортные сосуды; 16 – граница участков площадки полустационарного сортировочного оборудования и карт намыва; 17 – укладка вскрышных пород на внутренний отвал; 18 – внутренний отвал, площадка для переноса полустационарного сортировочного оборудования.

Способ реализуют таким образом. Карьерное поле месторождения полезного ископаемого в границах 1 предварительно разделяют на блоки **А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З**. Горные работы начинают с блока **А**, потом фронт горных работ продвигается к блоку **Б**. На территории блоков **З** и **В** предусматривают два участка площадки переработки: участок для размещения полустационарного сортировочного оборудования 2 (блок **З**) и участок размещения карт намыва 3.

Разработку месторождения выполняют двумя землесосными снарядами 6, 7. Земснарядом 6 добывают полезное ископаемое и гидротранспортируют его в виде пульпы рефулерным 8 и стационарным береговым 9 пульпопроводами до полустационарного сортировочного оборудования 2. На полустационарном сортировочном оборудовании получают готовую продукцию и складывают в склад 10.

Земснарядом 7 полезное ископаемое гидротранспортируют на карты намыва для формирования склада готовой продукции 11. Шламы обогащения по водоотводной канаве 12 сливают в выработанное пространство карьера 13.

Разработку складов готовой продукции 10 и 11 выполняют экскаваторами или фронтальными погрузчиками 17.

После доработки карьерного поля 1 земснаряд 6, пульпопроводы 8 и 9, полустационарное сортировочное оборудование 3 демонтируют. В выработанном пространстве 13 остается водоем, который используют для выращивания рыбы, отдыха, накопления воды, водоснабжения.

Описанный способ принят для разработки Александровского месторождения строительных песков. В соответствии с рабочим проектом [66] разработка месторождения предусмотрена одним добычным уступом землесосного снаряда на всю мощность полезного ископаемого в пределах утвержденных запасов. Для этого применяются земснаряд ЗГМ-1-350А (С42) с грунтовым насосом НАВЕРНАН KBPL-300 при гидротранспортировании горной массы на стационарную классификационную установку ES 5018 BL-120 фирмы STICHWEN и ЗГМ-1-350А (С42) с грунтовым насосом Гру 800/40 при намыве песков на карты намыва, размещаемые перед фронтом горных работ.

В результате классификации из песка удаляются гравий и глинистые классы (рис. 5.7, 5.8). Гравий направляется в отвал, а шламы сливаются в шламоотстойники для осветления. Осветленная вода по трубопроводу и водоотводной канаве самотеком сливается в котлован земснарядов. На картах

намыва песок очищается от глинистых фракций, которые вместе с осветленной водой по водоотводной канаве самотеком удаляется в котлован. При намыве и классификации песка в карьере в работе находится две карты. Во время намыва одной карты с другой производится отгрузка песка только после ее полного обезвоживания путем дренирования воды в котлован.

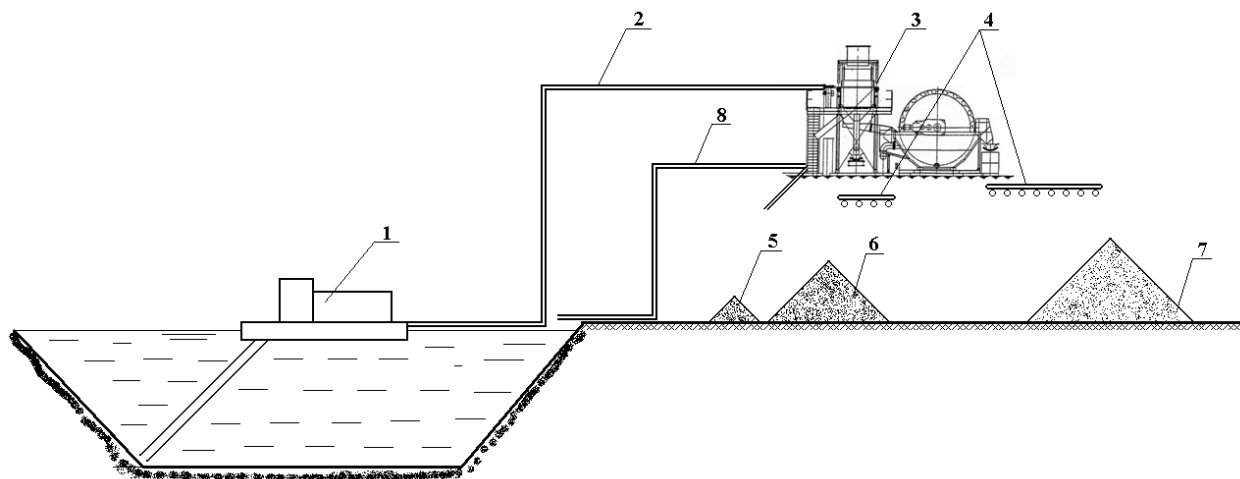


Рис. 5.7. Схема КДП для освоения Александровского месторождения: 1 – землесосный снаряд; 2 – пульпопровод; 3 – классификационная установка; 4 – отвальные конвейеры; 5, 6 – склады крупного и мелкого гравия; 7 – склад товарного песка; 8 – патрубок отвода шламов



Рис. 5.8. Участок переработки Александровского месторождения

Способ открытой разработки обводненных осадочных месторождений применяется при разработке Александровского месторождения строительных песков. Его внедрение показало высокую эффективность. Основные характеристики горных работ по прототипу и новому варианту приведены в таблице 5.1.

Таким образом, внедрение способа обеспечило: увеличение производительности карьера на 104,3 тыс. м³/год (28 %); уменьшение себестоимости продукции на 1,94 грн / м³ (13 %); увеличение количества получаемых классов готовой продукции до 4.

Фактический годовой экономический эффект от внедрения «Способа открытой разработки обводненных осадочных месторождений» в соответствии с патентом Украины №27853, полученный при разработке Александровского месторождения строительных песков, учитывая фактические затраты, по результатам 2007 – 2008 г.г. составил 931 394 грн.

Таблица 5.1

Технико-экономические показатели разработки Александровского месторождения строительных песков

Характеристики горных работ	Способ по прототипу	Предложенный способ
Производительность по полезному ископаемому, тыс. м ³ /год	375,8	480,1
Затраты электроэнергии, тыс. кВт ч/год	1262,4	1821,5
Затраты горюче-смазочных материалов, т/год	163,2	103,4
Затраты за участок земли под карты намыва (площадь 4,9 га), в том числе экологические платежи, тыс. грн/год	2,5	0
Количество выделяемых классов готовой продукции	1	4
Себестоимость готового классифицированного продукта, грн/м ³	15,25	13,31

5.3. Обоснование параметров комплекса «землесосный снаряд – пульпопровод – классификационная установка»

Обоснование рациональных параметров КДП «землесосный снаряд – пульпопровод – классификационная установка» выполнено в результате сравнения технико-экономических показателей применения различных комплексов для добычи и переработки нерудных песков. Сравнение выполнено на этапе технико-экономического обоснования технологии разработки

Александровского месторождения строительных песков при расчетной производительности по полезному ископаемому 500 тыс. м³ в год [25, 66, 81 – 85]. Сравнивались такие варианты КДП:

1. Землесосный снаряд – пульпопровод – карта намыва;
2. Землесосный снаряд – пульпопровод – стационарно установленная за пределами карьера классификационная установка ES 5018 BL-120;
3. Землесосный снаряд – пульпопровод – передвижная классификационная установка на базе классификаторов КГГ;
4. Землесосный снаряд – пульпопровод – стационарно установленная за пределами карьера классификационная установка на базе классификаторов КГГ.

Основным критерием для рекомендации комплекса приняли удельную себестоимость товарной продукции. Технологические расчеты выполнены для следующих, общих для всех схем комплексов, элементов системы разработки месторождения. Разработка обводненной залежи предусмотрена одним добычным уступом землесосного снаряда на всю мощность полезного ископаемого. С этой целью применена технологическая схема гидромеханизированной разработки земснарядом ЗГМ-1-350А (С42) с грунтовым насосом НАВЕРНАН KBPL-300 и гидротранспортированием горной массы на площадку переработки.

Важными критериями выбора элементов комплекса «землесосный снаряд – пульпопровод – классификационная установка» являются удельный объем и стоимость горно-капитальных работ, которые проводятся как ряд мероприятий, требуемых для освоения месторождения. Для принятых вариантов комплексов учтены такие виды горно-капитальных работ:

1. Строительство дамб обвалования двух карт намыва и водоотводной канавы для отвода осветленной воды. Осуществляется гидравлическим экскаватором Daewoo-500 (Solar), Comatsu PC-400 с доставкой песка автосамосвалами КрАЗ-256, МАЗ-551605 и окончательным формированием посредством бульдозера ДЗ-110.

2. Строительство двух шламоотстойников для осветления воды после переработки сырья на классификационной установке STICHWEN ES 5018 BL-120, водоотводной канавы для отвода осветленной воды из шламоотстойников. Строительство шламоотстойников и водоотводной канавы выполняется посредством экскаваторов Daewoo-500 (Solar), Comatsu PC-400.

3. Горнокапитальные работы присутствуют только в части выравнивания площадки под установку комплекса классификационных установок на базе классификаторов КГГ.

4. Строительство двух шламоотстойников и водоотводной канавы для отвода осветленной воды.

Объемы и время строительства при подготовке промышленной разработки и в период эксплуатации Александровского месторождения строительных песков приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Горно-капитальные работы

Технологическая схема	Вариант			
	1	2	3	4
Объект строительства	Объем строительства, м ³ / время строительства, смен			
Количество карт намыва, намываемых за расчетный период	12 шт.	-	-	-
Дамбы первичного обвалования карт намыва	10175/12 (61050/72)	-	-	-
Дамба попутного обвалования №1, 2 карты	5565/7 (33390/42)	-	-	-
Дамба попутного обвалования №2, 2 карты	7124/9 (42744/54)	-	-	-
Дамба попутного обвалования №3, 2 карты	5640/7 (33840/42)	-	-	-
Водоотводная канава	1300/2 (7800/12)	1300/2	-	1300/2
Шламоотстойники классификационной установки		3800/4	-	3800/4
Строительство в период эксплуатации	178824/222	5100/6	-	5100/6

Исходя из особенностей вариантов комплексов рассмотрены такие виды работ:

1. Добычные работы выполняются земснарядом ЗГМ-1-350А (С42), который подает разрабатываемую песчаную горную массу грунтовым насосом НАВЕРНАН KBPL-300 рефулерным и далее стационарным пульпопроводом на карты намыва, размещаемые перед фронтом горных работ. Наибольшее расстояние от забоя до сливных патрубков карт намыва, с запасом на нерациональную трассу укладки пульпопровода, составляет – 250 м.

2. Добычные работы выполняются земснарядом ЗГМ-1-350А (С42), который подает разрабатываемую песчаную горную массу грунтовым насосом НАВЕРНАН KBPL-300 рефулерным и далее стационарным пульпопроводом на стационарную классификационную установку STICHWEN ES 5018 BL-120. Выгрузку классифицированного песка выполняют в штабельно-кольцевой склад отвальным конвейером. Наибольшее расстояние от забоя до сливного патрубка классификационной установки – 500 м.

3. Добычные работы выполняются земснарядом ЗГМ-1-350А (С42), который подает разрабатываемую песчаную горную массу грунтовым насосом НАВЕРНАН KBPL-300 рефулерным и далее стационарным пульпопроводом на передвижной комплекс классификационных установок на базе

классификаторов КГГ. Наибольшее расстояние от забоя до сливных патрубков классификационных установок – 250 м.

4. Добычные работы выполняются земснарядом ЗГМ-1-350А (С42), который подает разрабатываемую песчаную горную массу грунтовым насосом НАВЕРНАН KBPL-300 рефулерным и далее стационарным пульпопроводом на стационарно установленный комплекс классификационных установок на базе классификаторов КГГ. Наибольшее расстояние от забоя до сливных патрубков классификационных установок – 500 м.

В результате построения расходно-напорных характеристик гидротранспортных систем добычных комплексов установлены значения производительности и затрат электроэнергии. Сравнение технико-экономических показателей в ценах 2007 г. по вариантам комплексов показало, что наименьшая себестоимость готовой продукции может быть получена при реализации третьего варианта добычного комплекса в составе передвижных классификационных установок на базе классификаторов КГГ (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Сравнение технико-экономических показателей

Наименование	Вариант комплекса			
	1	2	3	4
Производительность, м ³ /год	863442	660279	863442	660279
	Затраты на 1 м ³ , грн			
Материалы	0,008	0,011	0,008	0,011
Электроэнергия на технологические нужды	0,82	1,18	0,93	1,22
Основная и дополнительная зарплата рабочих	0,58	0,67	0,51	0,67
Начисления на зарплату (36,2 %)	0,21	0,24	0,18	0,24
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	1,93	2,49	1,75	2,31
Цеховые расходы	0,10	0,13	0,10	0,13
Итого цеховая себестоимость, грн/м ³	3,65	4,72	3,48	4,58
Соотношение в себестоимости, %	0	+29,32	-4,66	+25,48
Количество получаемых классов	1	4	2	3

5.4. Обоснование параметров систем оборотного водоснабжения горных предприятий

Системы оборотного водоснабжения горных предприятий применяются для реализации комплексов, требующих обработки минерального сырья при выходе шламов с большим содержанием твердых частицу крупностью менее 0,1 мм. Такие комплексы обычно используются в процессах промывания

природных и искусственных песков с получением товарной продукции без мелкодисперсных примесей. Шламы, образовавшиеся в процессе промывания, подлежат переработке с целью возврата осветленной воды в технологический процесс, то есть организации оборотного водоснабжения. Качество осветленной воды систем оборотного водоснабжения нормируется по показателю сухого остатка минералов, который не должен превышать 2 г/л [20, 64, 65]. Оборотное водоснабжение процессов горного производства в основном реализуют на базе вертикальных и горизонтальных отстойников (рис. 5.9). Отсутствие высоких требований к механизации процесса осветления вод привели к широкому распространению горизонтальных отстойников.

Процесс классификации твердых частиц в горизонтальных отстойниках происходит в горизонтальном потоке несущей среды, а значит, подчиняется математической модели, разработанной в главе 5. Характерно, что движение твердых частиц крупностью менее 0,1 мм в горизонтальных отстойниках

а)



б)



Рис. 5.9. Отстойники для осветления вод оборотного водоснабжения: а) – вертикальный отстойник; б) – горизонтальный отстойник

происходит при скоростях, соответствующих ламинарному режиму движения, то есть может быть описано зависимостью (4.29). Разработанный метод расчета параметров процесса движения твердых частиц и конструктивных параметров отстойников применен при проектировании систем оборотного водоснабжения предприятий: Балаклавское рудоуправление, Редутский щебеночный карьер, Никитовский гранитный карьер, Гайворонский специализированный карьер, Петровский гранитный карьер и др. [66, 67 – 73, 81 – 89].

Комплекс оборотного водоснабжения Кадыковской дробильно-обогадательной фабрики (КДОФ) Балаклавского рудоуправления характеризуется тем, что выработанное пространство Кадыковского карьера используется как отстойник [71, 86]. В ходе проектирования комплекса выполнено обоснование безопасного расстояния от точки слива шламов до всасывающего патрубка системы водоснабжения технологического процесса (рис. 5.10). Задача решена путем построения траекторий движения твердых

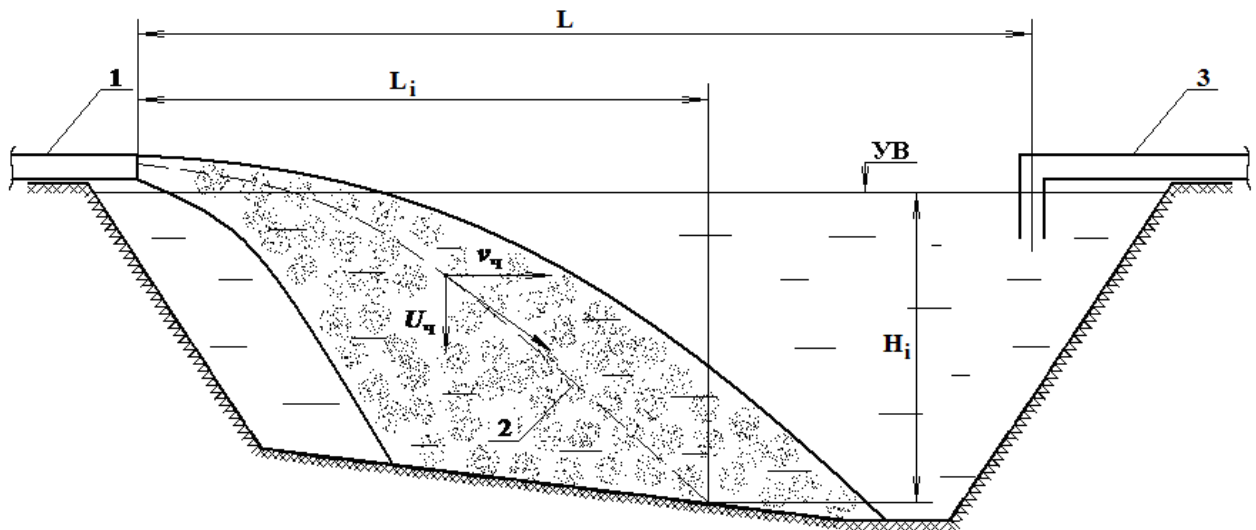


Рис. 5.10. Расчетная схема оборотного водоснабжения КДОФ: 1 – сливной патрубок; 2 – траектория расчетной частицы; 3 – всасывающий патрубок

частиц, сбрасываемых в составе шламов КДОФ. Для расчета длины пути осаждения твердых частиц определена скорость растекания пульпы $v_{\text{ч}}$ из сливного патрубка в неограниченное пространство (рис. 5.11).

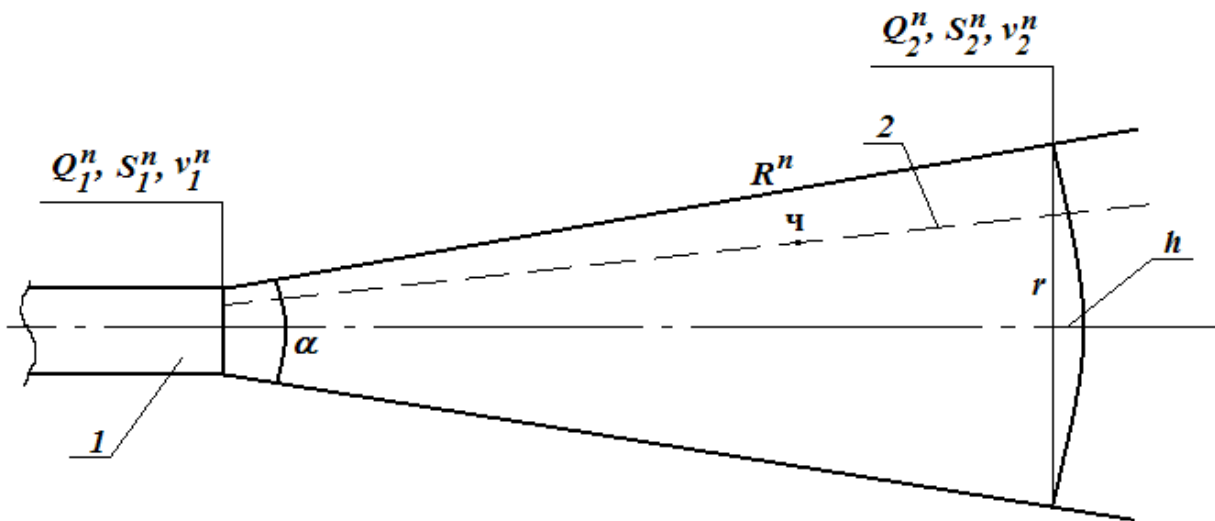


Рис. 5.11. Расчетная схема истечения пульпы в неограниченное пространство: 1 – сливной патрубок; 2 – траектория движения частицы

Решение задачи выполнено с допущением, что угол растекания пульпы соответствует углу расширения турбулентной затопленной струи, истекающей в неограниченное пространство [86]. Для описания процесса введены следующие обозначения: Q_1^n – расход пульпы через сливной патрубок, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_2^n – расход пульпы через рассматриваемое сечение, $\text{м}^3/\text{с}$; S_1^n – площадь сечения сливного патрубка, м^2 ; S_2^n – площадь рассматриваемого сечения, м^2 ;

v_1^n – скорость истечения пульпы из сливного патрубка, м/с; v_2^n – скорость течения пульпы в рассматриваемом сечении, м/с; R^n – расстояние от сливного патрубка до рассматриваемого сечения, м; α – угол растекания пульпы, град.

В результате преобразований зависимость для определения скорости течения потока пульпы в сечении, удаленном от сливного патрубка на расстояние R^n , имеет вид:

$$v_2^n = \frac{Q_1^n}{0,052\pi(R^n)^2}. \quad (5.1)$$

При производительности сброса шламов, характерной для КДОФ $Q_1^n=0,075$ м³/с, графическая зависимость скорости частицы V_i в i -том сечении от расстояния до него примет вид (рис. 5.12). Траектория движения твердой частицы построена по формуле (4.29) при известных значениях горизонтальной составляющей скорости частицы V_i в i -том сечении и гидравлической крупности (рис. 5.13).

Всасывание условно чистой воды, не включающей расчетный i -тый класс твердых частиц, возможно в области, ограниченной радиусом, через которую не проходит траектория движения твердых частиц i -того класса. Для определения значения радиуса всасывания применена зависимость. В условиях шламоотстойника КДОФ при всасывании осветленной воды с производительностью Q_1^6 , равной 0,075 м³/с, расчетное значение минимального расстояния L составило 20 м.

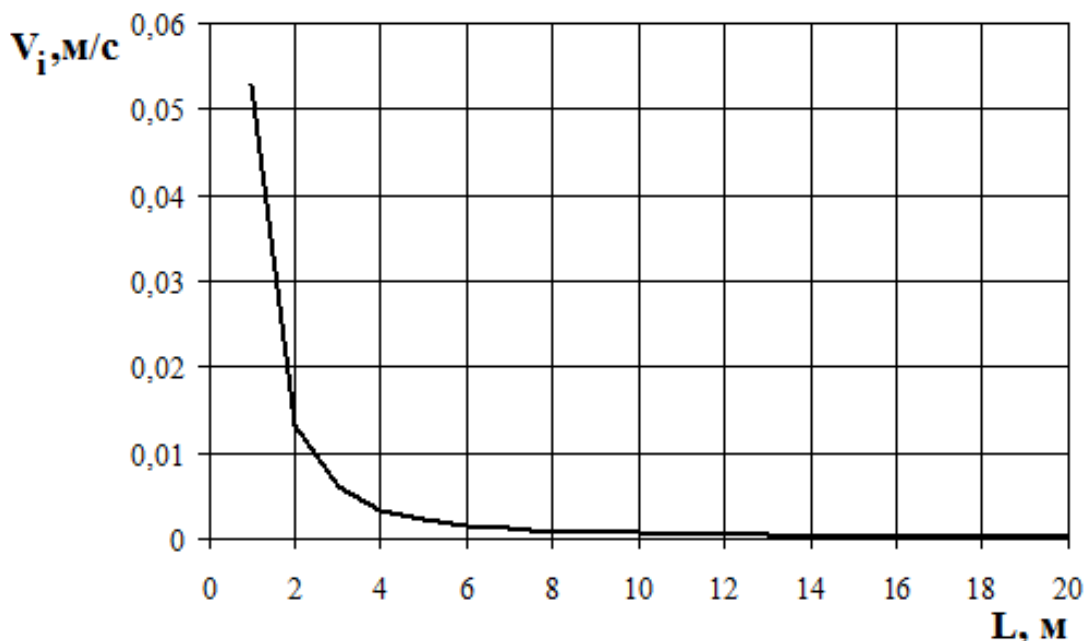


Рис. 5.12. Скорость течения потока в i -том сечении

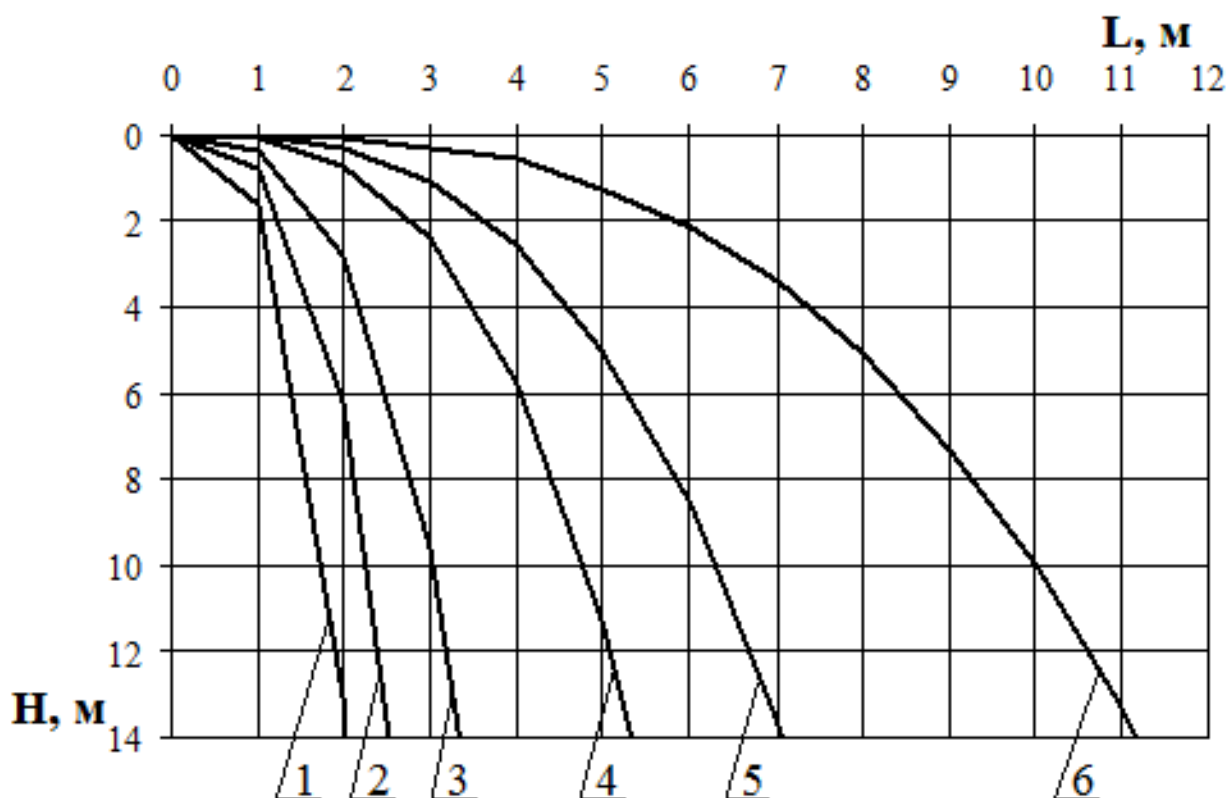


Рис. 5.13. Траектория движения частиц, сбрасываемых в составе пульпы в шламоотстойник КДОФ: 1 – 6 – траектории движения частиц крупностью 1+0,5; -0,5+0,25; -0,25+0,1; -0,1+0,071; -0,071+0,056; -0,056 мм

В ходе проектных работ, выполненных с целью реконструкции Редутского щебеночного карьера, обоснована рациональность применения комплекса для переработки песка вскрышных пород [72]. В соответствии с проектом рекомендовано использование технологической схемы промывания песков (рис. 5.14).

Технологией предусмотрена подача исходной горной массы в зумпф 1, откуда грунтовым насосом 2, приводимым электрическим двигателем 3, по транспортному пульпопроводу 4 на конический грохот 5. На коническом

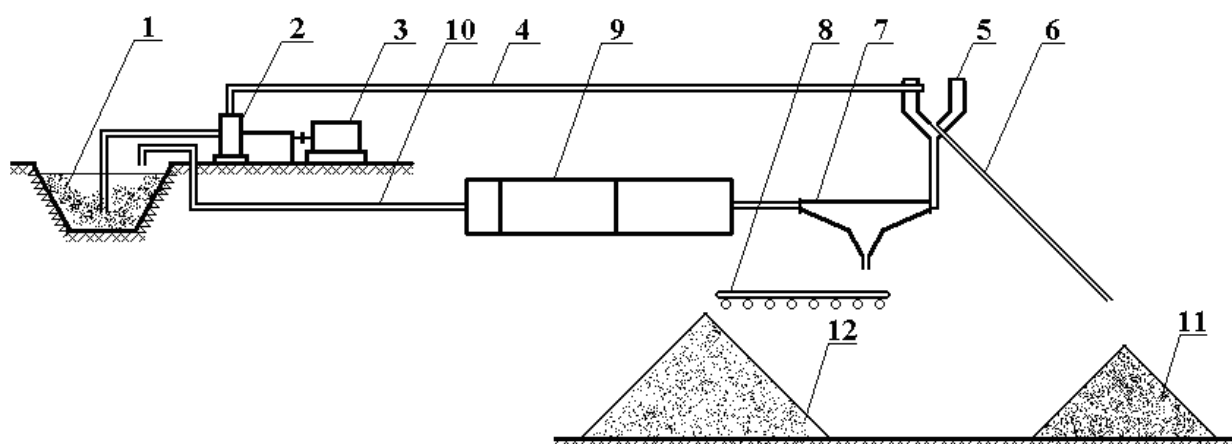


Рис. 5.14. Схема цепи аппаратов для переработки песков вскрышных пород Редутского щебеночного карьера

грохоте с ячейкой 4 мм поток пульпы разделяется на две фракции. Фракция +4 мм, обезвоженная до 20...30 %, по наклонному лотку 6 направляется на склад 11, фракция -4 мм в составе пульпы сливается в классификатор гидравлический горизонтальный 7. В гидроклассификаторе поток пульпы выносит мелкозернистую фракцию -0,14 мм в горизонтальный отстойник 9, а готовая продукция с фракционным составом -4...+0,14 мм, в сгущенном виде истекает на отвальный ленточный конвейер 8. Конвейер дополнительно обезвоживает и транспортирует песок на склад готовой продукции 12. В горизонтальном отстойнике производится осаждение глинистых классов под действием силы тяжести в движущемся потоке шламовых вод, а осветленная вода самотеком по водопроводу 10 транспортируется к зумпфу для приготовления пульпы. Таким образом, обеспечивается замкнутый цикл оборотного водоснабжения. При этом потери воды пополняются за счет естественного наполнения зумпфа водой из верхнего водоносного горизонта, залегающего во вскрышных песках Редутского щебеночного карьера.

Расчет параметров осаждения глинистых частиц, поступающих в горизонтальный отстойник в составе шламовых вод, выполнен на основании исходных данных о производительности слива шламов ($Q_{шл}=0,022 \text{ м}^3/\text{с}$) и твердого в его составе ($Q_t=0,0006 \text{ м}^3/\text{с}$).

Для обеспечения нормативного качества осветленной воды обоснованы рациональные конструктивные параметры горизонтального отстойника в соответствии с принятой расчетной схемой (рис. 5.15).

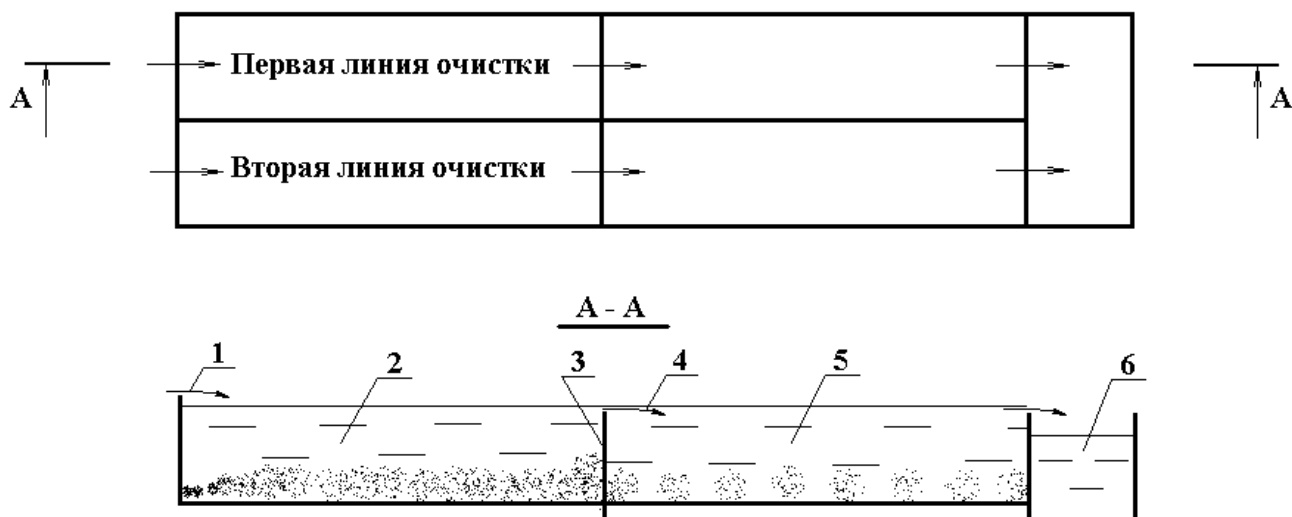


Рис. 5.15. Расчетная схема горизонтального отстойника: 1 – слив пульпы; 2 – отделение первичной очистки; 3 – сливной порог; 4 – перелив шлама; 5 – отделение тонкой очистки; 6 – отделение осветленной воды

Расчет глубины осаждения частиц в горизонтальном отстойнике выполнен с учетом его конструктивных особенностей и степени заполнения осадками. Конструктивные параметры горизонтального отстойника установлены с применением разработанной методики (разделы 2-4) по результатам построения траектории движения осаждаемых частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные темпы развития экономики и, в частности, строительной отрасли требуют увеличения объемов добычи высококачественного сырья, в основном для производства строительных материалов и смесей. Известно, что более 75 % месторождений песков, расположенных на территории Украины, обводнены, а запасы строительных песков только Азово-Черноморского бассейна оцениваются в более 100 млрд т. Это подтверждает актуальность применения подводного и гидромеханизированного способа добычи полезных ископаемых.

Анализ сырья, добываемого из показательного ряда месторождений рудных и нерудных песков, свидетельствует о низком качестве исходной руды. Так, по основному набору физико-механических свойств (модуль крупности, процент глинистых и пылевидных частиц и др.) природное ископаемое не соответствует действующим нормам к конечной продукции. В связи с этим требуется переработка исходного сырья, предусматривающая очистку от крупных включений (гравий, комки глины, растительные фрагменты, ракушка), а также мелко- и тонкодисперсных глинисто-илистых примесей. Удаление из горной массы крупных включений не представляет особых трудностей. В то же время, процесс очистки песков от мелкодисперсных примесей требует более тщательного изучения.

Для получения качественного товарного продукта применяются различные методы переработки. В частности при гидромеханизированной добыче актуальны гидравлические способы очистки, классификации и выделения требуемого продукта. Технологической особенностью гидравлической добычи песков является возможность снижения себестоимости переработки продукции путем применения мобильных классифицирующих установок.

В книге представлены результаты научных исследований процесса гравитационного осаждения твердых частиц крупностью от 0,15 до 5 мм, движимых горизонтальным ускоренным потоком несущей среды с описанием движения частиц относительно потока. Разработанная на базе уравнения Эйлера математическая модель процесса взаимодействия проточной части классификатора гидравлического горизонтального с горизонтальным ускоренным потоком пульпы позволила определить гидродинамические параметры потока при характерном распределении скоростей и ускорений по его глубине. Результатом математического моделирования процесса взаимодействия проточной части классификатора, разделенной на n потоков, с горизонтальным ускоренным несущим твердые частицы потоком пульпы явилось описание процесса движения твердых частиц относительно попутного горизонтального несущего ускоренного потока.

Результатом моделирования процесса взаимодействия проточной части классификатора, ограниченной разнонаклонными поверхностями устройства, с горизонтальным ускоренным несущим твердые частицы попутным потоком пульпы явилась визуализация осаждения твердых частиц в виде траектории,

характерной обозначенным участкам процесса и учитывающей перемещение твердых частиц относительно несущего потока. С этой целью получены теоретические зависимости для построения траекторий движения твердых частиц в условиях гравитационного осаждения под действием попутного горизонтального ускоренного несущего потока, учитывающие отток вниз сгущенной пульпы и возможные сценарии относительного перемещения твердых частиц и жидкости. Установлено, что конструктивные параметры классификатора, реализующего процесс гравитационного осаждения твердых частиц крупностью от 0,15 до 5 мм в горизонтальном несущем ускоренном потоке при границе разделения от 0,1 до 0,2 мм и концентрации исходной пульпы не более 20 %, рационально определять путем построения траектории движения твердых частиц граничной крупности.

Применение разработанной модели достаточно для рационального проектирования систем гидравлической классификации процессов переработки сырья и оборотного водоснабжения. Комплексная методика расчета гидродинамических и конструктивных параметров гидравлических классификаторов, разработанная с применением математических моделей и аналитических зависимостей, полученных авторами впервые, применялась при проектировании гидравлических классификаторов и систем оборотного водоснабжения действующих горных предприятий.

Предложенные в книге научные и технические решения прошли апробацию в научных изданиях при выполнении научных и технических проектов внедрены на специализированных предприятиях с получением экономического эффекта. Приведенные разработки являются оригинальными и защищены патентами. Внедрение изложенных решений и рекомендаций будет способствовать повышению эффективности процессов гидравлической классификации при переработке и обогащении полезных ископаемых.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ДСТУ Б.В.2.7-32-95. – ДСТУ Б.В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1996. – 30 с. (Державний стандарт України).
2. ДСТУ Б.В.2.7-29-95. – ДСТУ Б.В.2.7-29-95. Будівельні матеріали. Дрібні заповнювачі природні, із відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. – [Чинний від 1996-01-01.] – К.: Держстандарт України, 1996. – 30 с. (Державний стандарт України).
3. Основы обогащения полезных ископаемых. Справочник по оборудованию. – Metso Minerals, 2003. – 337 с.
4. Дударев П. Опыт обогащения песка при его добыче / П. Дударев, В. Сухарев. – Водный транспорт. – 1973. – №6. – С. 36 – 38.
5. Шкундин Б.М. Машины для гидромеханизации земляных работ / Б.М. Шкундин. – М.: Стройиздат, 1982. – 184 с.
6. Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: учеб. пособие для вузов / В.А. Перов, Е.Е. Андреев, Л.Ф. Биленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 301 с.
7. Нурок Г.А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ / Г.А. Нурок. – М.: Недра, 1985. – 357 с.
8. Берт Р.О. Технология гравитационного обогащения / Р.О. Берт при участии К. Миллза; пер. с англ. Е.Д. Бачева. – М.: Недра, 1990. – 574 с.
9. Процессы и машины для обогащения полезных ископаемых / В.И. Кармазин, Е.Е. Серго, А.П. Жендринский и др. – М.: Недра, 1974. – 560 с.
10. Келина И.М. Обогащение руд / И.М. Келина. – М.: Недра, 1979. – 221 с.
11. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1982. – 366 с.
12. Справочник по обогащению руд: в 3-х т. Т. 2 Основные и вспомогательные процессы / гл. ред. О.С. Богданов. – М.: Недра, 1974. – 448 с.
13. Бедрань Н.Г. Машины для обогащения полезных ископаемых: Учеб. пособие для вузов / Н.Г. Бедрань. – Киев – Донецк: Вища школа. Головное изд-во, 1980. – 416 с.
14. Бондаренко А.А. Обоснование способа обогащения кварцевых песков при их гидромеханизированной добыче / А.А. Бондаренко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. – 2007. – Вип.29(70) – 30(71). – С.70 – 84.
15. Шохин В.Н. Гравитационные методы обогащения: учебное пособие для вузов / В.Н. Шохин, А.Г. Лопатин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1993. – 350 с.
16. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения / П.В. Лященко. – М. – Л.: Гостоптехиздат, 1940. – 359 с.

17. Олевский В.А. О свободном падении частиц в жидкой среде / В.А. Олевский. // Гравитационные методы обогащения. / В.А. Олевский. – М.: Металлургиздат, 1953. – с. 7 – 44.
18. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных методов обогащения / Б.В. Кизевальтер. – М.: Недра, 1979.
19. П.И. Пилов. Гравитационная сепарация полезных ископаемых: учебное пособие / Пилов П.И. ; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т – Д.: НГУ, 2003. – 123 с.
20. Нормы технологического проектирования предприятий промышленности нерудных строительных предприятий. – Л.: Стройиздат, 1977. – 366 с.
21. Справочник по горнорудному делу: в ? т. Т. 1. Открытые работы / под ред. Е.Ф. Шешко, В.В. Ржевского. – М.: ГОСГОРТЕХИЗДАТ, 1960. – 926 с.
22. Олевский В.А. Диаграмма для определения скорости свободного падения шарообразных частиц в жидкости / В.А. Олевский // Обогащение руд. – 1971. – №1. – С.35 –39.
23. Олевский В.А. Конструкция и расчет механических классификаторов и гидроциклонов / В.А. Олевский. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 156 с.
24. Бессонов Е.А. Технология и механизация гидромеханизированных работ: справ. пособие для инж. и техн. / Е.А. Бессонов. – М.: Центр, 1999. – 543 с.
25. Бондаренко А.А. Научное обоснование параметров комплексов нового технического уровня для гидромеханизированной добычи и переработки зернистых полезных ископаемых: дис. ... докт. техн. наук. : защищена 03.06.2015 : утверждена 30.06.2015 / Бондаренко Андрей Алексеевич. – Д., 2015. – 358 с.
26. Бондаренко А.А. Физические основы процесса гравитационного разделения зернистых материалов в горизонтальном потоке пульпы / А.А. Бондаренко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 52(93). – С. 77 – 80.
27. Зенков Р.Л. Механика насыпных грунтов / Р.Л. Зенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1964. – 251 с.
28. Зенков Р.Л. Бункерные устройства / Р.Л. Зенков, Г.П. Гриневич, В.С. Исаев. – М.: Машиностроение, 1977. – 223 с.
29. Богомоллов А.И. Гидравлика: учебник для вузов / А.И. Богомоллов, К.А. Михайлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.
30. Киселев П.Г. Гидравлика / П.Г. Киселев. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 424 с.
31. Коваль П.В. Гидравлика и гидропривод горных машин: учебник для вузов по специальности «Горные машины и комплексы» / П.В. Коваль. – М.: Машиностроение, 1979. – 319 с.
32. Франчук В.П. Теоретические основы процесса движения жидкости в гидравлическом горизонтальном классификаторе / В.П. Франчук, А.А. Бондаренко // Геотехнічна механіка: зб. наук. пр. – 2014, № 115. – С. 188 – 199.

33. Франчук В.П. Розробка математичної моделі руху потоку в класифікаторі гідравлічному горизонтальному/ В.П. Франчук, А.О. Бондаренко // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2013, № 3(66). – С. 140 – 149.
34. Гидравлика и гидропривод: учебник для вузов / В.Г. Гейер, В.С. Дулин, А.Г. Боруменский, А.Н. Заря. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 295 с.
35. Гидравлика и гидропривод: учебник для вузов / В.Г. Гейер, В.С. Дулин, А.Н. Заря. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991. – 331 с.
36. Гідравліка, гідро- та пневмопривод : підручник / за ред. О.О. Федорця, О.Ф. Саленка. – 2-ге вид., переробл. і допов. – К.: Знання, 2009. – 502 с. – (Вища освіта ХХІ століття).
37. Пилов П.И. Гидравлика: учеб. пособие для студентов направления 0903 Горное дело / П.И. Пилов, А.М. Туркенич. – Д: НГА Украины, 2000. – 49 с.
38. Ялтанец И.М. Гидромеханизация / И.М. Ялтанец, В.К. Егоров. – М.: Изд-во МГГУ, 1999. – ? с.
39. Шкундин Б.М. Гидромеханизация в энергетическом строительстве / Б.М. Шкундин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
40. Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков / В.Н. Гончаров. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 452 с.
41. Леви И.И. Динамика русловых потоков / И.И. Леви. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 252 с.
42. Богатов А.Д. Разделение минералов во взвесенесущих потоках малой толщины / А.Д. Богатов, Ю.Л. Зубынин. – М.: Недра, 1973. – 144 с.
43. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков / В.Н. Гончаров. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 374 с.
44. Ландау Л.Д. Механика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Гос. изд. технико-теоретической лит, 1954. – 795 с.
45. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. / Л. Прандтль – М.: ИЛ, 1949. – 350 с.
46. Чугаев Р.Р. Гидравлика : учебник для вузов / Р.Р. Чугаев. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ие, 1982. – 672 с.
47. Рабинович Е.З. Гидравлика / Е.З. Рабинович. – М.: Недра, 1998. – 246 с.
48. Большаков В.А. Гидравлика. Общий курс: учебник для вузов / В.А. Большаков, В.Н. Попов. – К.: Вища школа, 1989. – 215 с.
49. Сергель О.С. Прикладная гидрогазодинамика: учебник для авиационных вузов / О.С. Сергель. – М.: Машиностроение, 1981. – 374 с.
50. Бондаренко А.А. Теоретические основы процесса взаимодействия твердой частицы с потоком жидкости / А.А. Бондаренко // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. – 2013. – №3(23). – С. 151 – 158.
51. Верхотуров М.В. Гравитационные методы обогащения / М.В. Верхотуров. – М.: Макс Пресс, 2006.

52. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1984. – 208 с.
53. Тихонов О.Н. Теоретические основы сепарационных процессов обогащения полезных ископаемых: учебное пособие / О.Н. Тихонов. – Л.: ЛГИ, 1978. – 97 с.
54. Меринов Н.Ф. Гравитационные методы обогащения / Н.Ф. Меринов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005.
55. Бондаренко А.А. Математическое моделирование движения частиц под влиянием скоростного напора / А.А. Бондаренко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – №1. – С. 66 – 68.
56. Бондаренко А.А. Обоснование рационального угла наклона днища гидравлического классификатора / А.А. Бондаренко // *Геотехнічна механіка: зб. наук. праць*. – 2013, № 112. – С. 145 – 151.
57. Бондаренко А.А. Разработка лабораторной установки для обоснования параметров горизонтального классификатора / А.А. Бондаренко // *Сборник научных трудов НГУ*. – 2014, № 42. – С. 101 – 106.
58. Нурок Г.А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ: учебник для вузов / Г.А. Нурок. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 471 с.
59. Екологічно зберігаючі технологічні рішення з подальшої розробки флюсових вапняків на ВАТ “Балаклавське рудоуправління ім. О.М. Горького” / В.І. Симоненко, А.О. Бондаренко, В.Д. Кірнос, А.І. Богданець, В.В. Гафіулов // *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. – 2006. – №III(38). – С. 176 – 182.
60. Ялтынец И.М. Экологически рациональная технология формирования гидроотвалов / И.М. Ялтынец // *Вопросы теории открытых горных работ*. – М.: Издательство МГГУ, 1994. – С. 254 – 272.
61. Огородников С.П. Гидромеханизация разработки грунтов / С.П. Огородников. – М.: Стройиздат, 1986. – 256 с.
62. Инструкция по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов. – НИИ Гидротехники. – Р. 59 – 72.
63. Кривченко Г.И. Гидравлические машины / Г.И. Кривченко. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
64. СНиП 2.04.03-85. Канализация. наружные сети и сооружения. – Введ. 1986-01-01. – М.: Стандартиформ, 1985.
65. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – Введ. 1985-01-01. – М.: Стандартиформ, 1984.
66. Рабочий проект разработки участка "Коминтерн-2" Александровского месторождения строительных песков: рабочий проект / Национальный горный университет (НГУ); рук. А.А. Бондаренко. – № ДР 0107U009443. – Д., 2007.
67. Реконструкція кар'єра для розробки Східно-Бузького-2 родовища пісків: робочий проект / Национальный горный университет (НГУ); рук. А.А. Бондаренко. – Д., 2010.

68. Проект опытно-промышленной разработки участка «Коминтерн-1» Александровского месторождения песка: Рабочий проект / Национальный горный университет (НГУ); Руководитель В.И. Симоненко. – ГР0105U004155. – Днепропетровск, 2005. – 62 с.

69. Рабочий проект разработки Подгороднянского месторождения песка: Рабочий проект / Национальный горный университет (НГУ); Руководитель А.А.Бондаренко. – ГР 0108U004592. – Днепропетровск, 2008.

70. Обоснование параметров гидравлического классификатора для обогащения строительного песка Подгороднянского месторождения: НИР / Национальный горный университет (НГУ); Научный руководитель А.А. Бондаренко. – ГР 0108U004590. – Днепропетровск, 2008.

71. Розробити проект Будівництво шламосховища у виробленому просторі Кадиківського кар'єру: Рабочий проект / Национальный горный университет (НГУ); рук. В.І. Симоненко. – ГР 0105U002095. – Днепропетровск, 2005.

72. Розробити доповнення до техно-робочого проекту гірничих робіт «Складування розкривних порід у відвалі та попутної мінеральної сировини в техногенному складі на кар'єрі Редутського щебзаводу»: Рабочий проект / Национальный горный университет (НГУ); рук. В.І. Симоненко. – ГР 0106U012636. – Днепропетровск, 2006.

73. Виконати передпроектні розробки з обґрунтування технологічних систем розробки Бірзулівського родовища ільменітових пісків: Рабочий проект / Национальный горный университет (НГУ); рук. В.І. Симоненко. – ГР 0108U005243. – Днепропетровск, 2008.

74. Бондаренко А.А. Обоснование параметров и внедрение комплекса «землесосный снаряд – пульпопровод – классификационная установка» для разработки Подгороднянского месторождения песка/ А.А. Бондаренко // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: науково-виробничий журнал Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2014, № 1. – С. 103 – 111.

75. Патент № 87591 Україна, В03В 5/64. Спосіб гідравлічної класифікації та пристрій для його здійснення / А.О. Бондаренко (Україна); заявник і патентовласник Національний гірничий університет – № у 2007 13180; заявл. 27.11.2007; опубл. 27.07.2009, Бюл. №14.

76. Патент № 33731 Україна, В03В 5/00. Спосіб гідравлічної класифікації / А.О. Бондаренко (Україна) ; заявник і патентовласник Національний гірничий університет – № у 2008 02487; заявл. 26.02.2008 ; опубл. 10.07.2008, Бюл. №13.

77. Патент № 35923 Україна, В03В 5/00. Пристрій для гідравлічної класифікації / А.О. Бондаренко (Україна); заявник і патентовласник Національний гірничий університет – № у 2008 05535; заявл. 29.04.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. №19.

78. Патент 92830 Україна, В03В 5/00. Спосіб переробки зернистих матеріалів / В.О. Кузик, А.О. Бондаренко, А.І. Ковальов (Україна) ; заявник і патентовласник А.О. Бондаренко – № у 2014 02132; заявл. 03.03.2014 ; опубл. 10.09.2014, Бюл. №17.

79. Бондаренко А.О. Проектування та впровадження комплексів видобутку та переробки «земснаряд – пульпопровід – класифікаційна установка» при освоєнні осадових родовищ / А.О. Бондаренко, О.М. Клеван // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2013, № 4(67). – С. 89 – 93.

80. Патент № 27853 Україна, E21C 41/26. Спосіб відкритої розробки обводнених осадових родовищ / В.І. Симоненко, А.О. Бондаренко, В.Ю. Мороз, В.Г. Шевченко (Україна); заявник і патентовласник Симоненко В.І., Бондаренко А.О., Мороз В.Ю., Шевченко В.Г. – № u 2007 10306; заявл. 17.09.2007; опубл. 12.11.2007, Бюл. №18.

81. Бондаренко А.О. До питання побудови економіко-математичної моделі кар'єру для розробки обводнених родовищ пісків / А.О. Бондаренко // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 11. – С. 16 – 20.

82. Бондаренко А.А. Экономико-математическая модель карьера для разработки обводненных месторождений нерудных кварцевых песков / А.А. Бондаренко // Открытая и подводная добыча полезных ископаемых – высокая эффективность, экологическое производство: материалы IX международной конференции. – Варна, 2007. – С. 158 – 165.

83. Бондаренко А.А. О экологически щадящей технологии подводной добычи песков / А.А. Бондаренко, В.И. Симоненко // Качество минерального сырья: сб. науч. трудов. – Кривой рог: Минерал. 2005. – С. 359 – 361.

84. Бондаренко А.А. Обоснование рациональной технологической схемы разработки обводненных месторождений песков / А.А. Бондаренко, В.И. Симоненко // Metallurgical and Mining Industry. – 2006. – № 3. – С. 75 – 77.

85. Франчук В.П. К вопросу о рациональной технологии выемки подводных россыпных полезных ископаемых / В.П. Франчук, Е.С. Запара, А.А. Бондаренко // Науковий вісник НГА України. – 1999. – №6. – С. 12 – 15.

86. Alternative technologies of opencast mining with minimum ecological disturbance / A.Y. Dryzhenko, V.I. Symonenko, A.A. Bondarenko, O.A. Anisimov // Scientific Reports on Resource Issues. – 2013, V. 1, P II. – P. 52 – 57.

87. Бондаренко А.О. Про один з аспектів комплексного вирішення питання будівництва каналу Азовське море – Молочний лиман / А.О. Бондаренко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2012. – Вип.50(91). – С. 21 – 26.

88. Бондаренко А.А. К обоснованию рациональной технологии обогащения мелкозернистых материалов / А.А. Бондаренко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2008. – Вип.33(74). – С. 9 – 15.

89. Бондаренко А.А. Освоение месторождений строительных песков в маловодных районах / А.А. Бондаренко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – 2008. – Вип.34(75). – С. 25 – 30.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
1. Современное оборудование и технологии для гидромеханизированной переработки полезных ископаемых.....	5
1.1. Обзор и анализ технических средств для разделения кварцевых песков при гидромеханизированной добыче.....	5
1.2. Теоретические основы процесса гидравлической классификации.....	11
1.3. Применение классификаторов в составе комплексов добычи и переработки.....	18
2. Научное обоснование параметров классификатора для гравитационного разделения зернистых материалов в горизонтальном потоке.....	22
2.1. Физические основы процесса взаимодействия классификатора с горизонтальным потоком пульпы, несущим твердые частицы.....	22
2.2. Теоретические основы процесса взаимодействия проточной части классификатора с горизонтальным потоком пульпы.....	25
2.3. Теоретические основы процесса взаимодействия проточной части классификатора с горизонтальным потоком пульпы с учетом распределения скорости потока.....	33
2.4. Теоретические основы процесса взаимодействия проточной части классификатора с горизонтальным, несущим твердые частицы потоком пульпы.....	42
2.5. Траектория движения твердых частиц в классификаторе гидравлическом горизонтальном.....	46
2.6. Математическое моделирование процесса взаимодействия наклонного днища классификатора с твердыми частицами.....	56
3. Лабораторные исследования процесса взаимодействия горизонтального классификатора с зернистым материалом.....	63
3.1. Обоснование параметров лабораторной установки.....	63
3.2. Тарировка лабораторного оборудования.....	68
3.3. Методика лабораторных исследований процесса гравитационной переработки зернистых материалов.....	69
3.4. Определение параметров процесса взаимодействия проточной части горизонтального классификатора с потоком пульпы, несущим твердые частицы.....	72
4. Методика расчета параметров гидравлического классификатора.....	77
4.1. Расчет конструктивных параметров оборудования для классификации исходного сырья.....	78
4.2. Расчет конструктивных параметров классификатора гидравлического горизонтального.....	79

5 Применение новых технических решений устройств для гидравлической классификации.....	83
5.1 Проектирование и эксплуатация комплексов для добычи и переработки песков.....	83
5.2 Добычный комплекс для освоения Александровского месторождения строительных песков.....	88
5.3 Обоснование параметров комплекса «землесосный снаряд – пульпопровод – классификационная установка».....	92
5.4 Обоснование параметров систем обратного водоснабжения горных предприятий.....	95
Заключение.....	101
Список литературы.....	103

Наукове видання

Франчук Всеволод Петрович
Бондаренко Андрій Олексійович

**ГОРИЗОНТАЛЬНІ КЛАСИФІКАТОРИ.
ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТА РОЗРАХУНКУ**

Монографія
(Російською мовою)

Редактор Є.М. Ільченко

Підписано до друку 18.01.2016. Формат 30x42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 7,3.
Обл.-вид. арк. 7,3. Тираж 300 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.