

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ**

На правах рукописи

КУДРЯШОВ Руслан Валерьевич

**РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ
ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ПРОЦЕССА ВСАСЫВАНИЯ**

**Специальность 25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и
строительная)»**

ДИССЕРТАЦИЯ

**на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор С.В. Маркелов**

Москва 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СПОСОБА СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ, ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	7
1.1 Особенности технологии скважинной гидродобычи для условий развития Курской магнитной аномалии.....	7
1.2 Опыт работ по технологии скважинной гидродобычи на руднике «Гостищевский» Курской магнитной аномалии.....	13
1.3 Особенности процесса пульпоприготовления, всасывания и постановка задачи исследования.....	32
ГЛАВА 2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ В МАССЕ ЖИДКОСТИ.....	44
2.1 Аналитическое обоснование расстояния распространения затопленных струй в массе жидкости.....	44
2.2 Развитие исследования основного расчётного выражения для распространения затопленных струй.....	52
2.3 Обоснование закономерности распространения отражённой струи.....	57
2.4 Особенности воздействия отражённой и спутной струй на горную массу в процессе всасывания.....	66
Выводы.....	74
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ОПЫТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОДЯНЫХ СТРУЙ В ВОДЕ И РАЗУПЛОТНЁННОЙ ГОРНОЙ МАССЕ.....	75
3.1 Анализ опытных исследований распространения водяных струй в водной среде и разуплотнённой горной массе (песке).....	75
3.2 Исследование аналитической закономерности перемещения затопленной струи в горной массе.....	81

Выводы.....	83
ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ГИДРОВЗВЕШИВАНИЯ ЧАСТИЦ ГОРНОЙ МАССЫ В ПЛОСКОСТИ ВСАСЫВАНИЯ.....	84
4.1 Исследование аналитической связи текущей скорости потока в струе и гидравлической крупности твёрдого.....	84
4.2 Методика расчёта процесса гидровзвешивания частиц твёрдого в плоскости всасывания.....	90
Выводы.....	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	100

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Скважинная гидродобыча является одним из перспективных скважинных способов добычи полезных ископаемых.

Освоение ресурсов богатых руд Белгородского рудного региона КМА является важной социально-экономической задачей, как для Белгородской области, так и для железорудной отрасли России в целом, что было отмечено в ряде федеральных целевых программ, учитывая общие оцененные ресурсы богатых железных руд до 40 млрд. тонн. Качество добываемой руды (практически концентрат) весьма высок, до 62-69% Fe, SiC –(1.5-2.0)% (в среднем по России Fe-30%), содержание меняющихся примесей для металлургического передела весьма незначительно.

Работы по СГД проводились Белгородской экспедицией в соответствии с приказом Мингео СССР №200 от 26.04.1982 г.

Анализ результатов выполненных работ по СГД и принятых технических и технологических решений показал отсутствие на предприятии системного подхода к освоению технологии, недостаточное научное сопровождение и, в конечном итоге, отсутствие систем инженерных расчетов процессов СГД, что является причиной низких показателей эффективности добычи и показало необходимость переоснащения эксплуатационных скважин на принципиально новую идею СГД на КМА, основанную на совершенно иных научно-практических предпосылках.

Особую актуальность вовлечения в хозяйственный оборот России ресурсов богатых руд Белгородского рудного района приобрела в силу выработки ряда крупных месторождений на Урале, выноса основных фондов действующих предприятий, невозможности строительства новых карьеров и подземных рудников из-за экологических проблем дефицита ценных земель, необходимых для сельского хозяйства, больших капитальных затрат и сроках освоения.

Цель работы – развитие процесса всасывания в технологии скважинной гидродобычи.

Идея работы – использование затопленных спутных и отраженных водяных струй для направленного гидровзвешивания горной массы в плоскости всасывания.

Задача исследования:

- обоснование условий для эффективного ведения гидроразмыва затопленными водяными струями;

- обоснование условий для рационального размещения водоводов, воздухопроводов и пульповода по длине гидродобычного агрегата;
- аналитическое обоснование текущей осевой и средней скоростей по длине затопленной струи;
- выявление гидравлической связи между гидравлической крупности твердого, составляющей всасываемую горную массу и текущей скорости затопленных струй.
- разработка методики расчёта процесса гидровзвешивания части горной массы в плоскости всасывания

Методы исследования:

- анализ и обобщение практического опыта и литературных данных по технологии скважинной гидродобычи и распространения затопленных водяных струй;
- аналитическое обоснование взаимосвязи гидравлической крупности и текущей скорости затопленной водяной струи.

Основные защищаемые научные положения

1. Формирование затопленной струи с необходимой разрушающей способностью возможно только при эксцентричном размещении рабочих коммуникаций гидродобычного агрегата.
2. Текущая средняя скорость по длине затопленной гидромониторной струи может быть связана с осевой через постоянный коэффициент, начальной скоростью струи и конечным диаметром её начального участка причём, сумма всех корректирующих коэффициентов в знаменателе расчётного выражения должна соответствовать единице при их любых сочетаниях.
3. Текущая средняя скорость отражённой затопленной гидромониторной струи должна быть взаимосвязана с закономерностью её перемещения в воде, в горной массе и отражённой при гидровзвешивании твёрдого в плоскости всасывания.
4. Гидровзвешивающая способность струи должна определяться взаимодействием текущих параметров искомой струи и гидравлической крупности взвешиваемых частиц в плоскости всасывания с учётом конкретных исходных эксплуатационных параметров эрлифта.

Научная новизна работы

1. Формирование затопленной струи с необходимой разрушающей способностью возможно только при эксцентричном расположении рабочих коммуникаций гидродобычного агрегата, как по минимуму потерь напора в водоводе, так и значительного снижения усилий, необходимых для отклонения ствола гидромонитора.

2. Текущая средняя скорость по длине затопленной гидромониторной струи аналитически связана с осевой через постоянный коэффициент, начальной скоростью и конечным диаметром её начального участка струи.

3. Текущая средняя и осевая скорость по длине затопленной гидромониторной струи соотносится как начальный диаметр к переходному, причём сумма коэффициентов в знаменателе искомого расчетного выражения должно быть равно единице при любых их сочетаниях.

4. Текущая скорость распространения затопленной струи в горной массе прямопропорциональна корню квадратному из соотношения плотностей жидкости напорной струи и окружающей среды.

5. Текущие скорости затопленной струи, распространяющейся в горной массе, структурно подобны и имеют конкретный корректирующий коэффициент для начального, переходного и основного участков.

6. Аналитически обоснован процесс гидровзвешивания горной массы затопленной гидромониторной струей, который непосредственно связан с гидравлической крупностью кусков, составляющих эту горную массу (песка).

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы основаны на использовании научных методов исследований, включающих анализ и обобщения теоретических и экспериментальных работ, проведение полевых исследований и их сходимости с расчётными и практическими данными.

Практическая ценность работы заключается в оценке эффективного процесса всасывания при СГД при использовании гидравлических струй в целях интенсификации процесса гидровзвешивания горной массы в плоскости всасывания.

ГЛАВА 1. ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СПОСОБА СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ, ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Особенности технологии скважинной гидродобычи для условий развития Курской магнитной аномалии.

Скважинная гидродобыча является одним из перспективных подземных способов добычи полезных ископаемых. Кроме того, при добыче этим способом исключено присутствие людей под землёй, что делает его безопасным. Впервые реальные данные по технологии скважинной гидродобычи были опубликованы в 1936 году инженером П. М. Тупицыным, в которых было сказано, что добыча различных твёрдых полезных ископаемых через пробуренные скважины гидромеханизированными средствами экономически выгодна, а также может осуществляться без проведения высокочрезвычайных вскрышных работ. В дальнейшем эта технология стала применяться во многих странах для добычи гравийных смесей при намыве прибрежных территорий, для добычи песка и ураносодержащих руд. [7,8,9,10,13,14,41]

Скважинная технология гидродобычи полезных ископаемых является самостоятельным способом. Глубина добычи рыхлых и цементированных руд этим способом может достигать 1000 м. Сущность способа заключается в разрушении гидромониторными струями пластов содержащих полезное ископаемое по периметру пробуренной скважины и доставки горной массы на поверхность средствами подъёма гидродобычного агрегата (эрлифта, например).

Основными процессами при скважинной гидродобычи являются:

- вскрытие продуктивного массива добычными скважинами, обсадка скважины по покрывающей породе до продуктивного горизонта с цементацией затрубного пространства;

- гидроразрыв продуктивного массива напорными струями воды с возможной смесью с воздухом (газожидкостные струи), либо с применением механических и гидромеханических устройств или их комбинацией;

- самотечное (безнапорное) или принудительное (обратным потоком воды или механическими устройствами) транспортирование разрушенного (отделенного от забоя) твердого к зумпфу эксплуатационной скважины;

- пульпоприготовление доставленной в зумпф горной массы для процесса всасывания;

- всасывание горной массы с учетом транспортирующих возможностей всасывающего потока и гидравлических характеристик кусков твердого материала в объеме горной массы;

- гидродъем гидросмеси на поверхность с учетом возможностей подъемного аппарата, работающего в стесненных условиях эксплуатационной скважины;

- поверхностный напорный гидротранспорт 3-х фазного потока (вода-твердое-воздух) с учетом соблюдения критических скоростей гидротранспортирования и возможностей последующего воздухоотделения;

- подача гидросмеси на установки разделения (через пульпопроводы, минуя цеха дробления и дезинтеграции).

Эти технологические процессы тесно взаимосвязаны между собой и в своей совокупности представляют решение уникальной задачи - совмещение разноструктурных процессов в единый технологический цикл добычи полезных ископаемых через скважины с учетом различных горно-геологических требований к процессу СГД.

Сложность и многообразие методов скважинных гидротехнологий обусловлены горно-геологическими особенностями, присущими каждому конкретному участку месторождения, поэтому копирование технологического процесса просто невозможно. Конструкция скважины и добычного агрегата, система и схемы отработки, как скважины, так и

добычного блока в целом, определяются после изучения горно-геологических особенностей месторождения, а именно эксплуатационной разведки.

Гидродобычные работы производятся без разрушения покрывающих рудную залежь пород, по замкнутому технологическому циклу водоснабжения, с использованием подземных вод рудно-кристаллического горизонта, с сохранением природного гидрогеологического режима водоносных комплексов и горизонтов покрывающей толщи.

Геотехнологические особенности способа скважинной гидродобычи определяются следующими способами.

1. Для равномерной разработки продуктивного массива во всех направлениях производится либо круговой размыв полезного ископаемого, либо размыв отдельными секторами. При гидроподъеме крупнокусковой гидросмеси (в зависимости от горногеологических условий разработки) используют гидроэлеватор (эжектор), эрлифт, либо их комбинацию.

2. Все варианты СГД разделяются на три основные технологические схемы:

- с разрушением массива полезного ископаемого свободными незатопленными струями в осушенном очистном пространстве;
- с разрушением полезного ископаемого в затопленной очистной камере;
- с использованием плавунных свойств пород за счет наличия гидравлического градиента (создаваемого или естественного) в специально пробуренных соседних скважинах.

3. Для каждой схемы должно выполняться научно-практическое обоснование всех взаимосвязанных процессов СГД с соответствующей структурой размещения:

- водоводов (их количество и специфика эксплуатации);
- воздухопроводов (при строго обоснованном допустимо-достаточном расходе подаваемого в эксплуатационную скважину воздуха);

- пульповода (при соблюдении критической скорости вертикального течения гидросмеси, заданной объемной концентрации и размера транспортируемых частиц твердого с большим удельным весом).

4. Исходя из этого, для каждой схемы характерны специфическое оборудование и технология СГД в зависимости от области применения и конкретных горногидрогеологических условий.

Освоение ресурсов богатых руд Белгородского рудного района КМА является важной социально - экономической задачей, как для Белгородской области, так и для железорудной отрасли России в целом, что было отмечено в ряде федеральных целевых программ, учитывая общие оцененные ресурсы богатых железных руд до 40 млрд. тонн. Качество добываемой руды (практически концентрат) весьма высокое, до 68 - 69 % Fe, $SiC > 2 < 1,5$ %, (в среднем по России Fe - 30%), содержание мешающих примесей для металлургического передела весьма незначительно.

Это идеальное сырье для порошковой металлургии, производства железа прямого восстановления и ряда других высоколиквидных продуктов. Незначительное количество отходов является сырьем для лакокрасочной промышленности (железный сурик). Идея применения способа скважинной гидродобычи богатых железных руд возникла в результате проведения геологоразведочных работ в Белгородском рудном районе КМА, когда в процессе бурения геологоразведочных скважин была получена в относительно больших объемах рудная масса.

В соответствии с решением секции черных металлов и нерудного сырья для металлургии НТС Мингео СССР от 16.11.1987 г. на Шемраевском участке месторождения Курской магнитной аномалии (КМА) Белгородского рудного района в марте 1988 г. была начата опытно-промышленная работа по применению скважинной гидродобычи (СГД) богатых железных руд.

Работы проводились Белгородской геологоразведочной экспедицией в соответствии с приказом Мингео СССР № 200 от 21.04. 1988 г.

Исследования 1988 г. позволили подготовить «Программу создания и освоения технологии скважинной гидродобычи богатых железных руд КМА», которая была утверждена совместным приказом Мингео СССР и Минчермета СССР № 216/314 от 29.05.1989 г.

В течение 1988 -1989 г. на Шемраевском участке месторождения был создан опытно-промышленный участок СГД. Разведочные, строительные и опытно-промышленные добычные работы на участке (из-за недостаточного финансирования) проводились с перерывами до 2000 г. и были прекращены в силу распада всех структурно-экономических связей в этот период.

Учитывая крайне важное значение освоения богатых железных руд КМА (Fe - 65-67% в недрах) при 29 - 30 % в среднем по России, метод СГД был включен в Федеральную целевую программу «Руда» на 1997 - 2005 г. (постановление Правительства РФ № 502 от 25.04. 1997 г.), затем в рамках Федеральной целевой программы «Исследования по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007 - 2013 г.»

Их реализация конкретно намечалась на базе ЗАО «Белгородский горно-обогатительный комбинат» (ЗАО «БелГОК») на участках Гостищевского месторождения. В 2000 - 2005 г. на Восточном участке Гостищевского месторождения богатых железных руд был создан опытно-промышленный участок и необходимая производственная инфраструктура для отработки технологии СГД.

В силу трудностей с финансированием, опытные работы на участке не были завершены.

ООО «Белгородская горно-добывающая компания» получила лицензии на право разведки и добычи богатых железных руд методом СГД на Большетроицком месторождении и на части Хохловского участка Гостищевского месторождения. На Большетроицком месторождении работы были начаты с 2007 г., пробурено 8 добычных скважин, 1

водозаборная и 38 геологоразведочных скважин. В 2007 г. попутно было добыто 9 тыс. тонн сырой руды, в 2008 г. 74 тыс. тонн, всего в процессе геологического изучения было попутно добыто свыше 180 тыс. тонн руды. Качество руды было весьма высокое $Fe_{общ} > 66 - 69 \%$ без какого-либо обогащения. Максимальная производительность одной скважины (январь 2009 г.) составила 26 - 30 т/час. Начиная с августа 2008 г. по причине рецессии мировой экономики (в том числе и в железорудной отрасли) опытные работы были приостановлены на 5 скважинах из 7, а также геологоразведочные работы. Анализ результатов работ и принятых технических решений показал отсутствие на предприятии системного подхода к освоению технологии, недостаточное научное сопровождение и, в конечном счете отсутствие системы инженерных расчетов процессов СГД, что явилось причиной низких показателей эффективности добычи и показало необходимость переоснащения скважин на принципиально новый комплект устьевого и внутрискважинного оборудования. До переоснащения скважин работы на добычном комплексе в настоящее время приостановлены.

Кроме Белгородского рудного района КМА рыхлые и слабосцементированные богатые железные руды на территории России обнаружены на Бакчарском месторождении в Западно-Сибирском рудном районе, там также начаты опытные работы по СГД.

Особую актуальность вовлечения в хозяйственный оборот России ресурсов богатых руд Белгородского рудного района приобрела в силу выработки ряда крупных месторождений на Урале, износа основных фондов действующих предприятий, невозможности строительства новых карьеров и подземных рудников из-за экологических проблем, дефицита ценных земель, необходимых для сельского хозяйства, больших капитальных затратах и сроках освоения.

1.2 Опыт работ по технологии скважинной гидродобычи на руднике «Гостищевский» Курской магнитной аномалии.

С 1988 года велись работы по скважинной гидродобыче железных руд Белгородской ГРЭ на Шемраевском месторождении Белгородского рудного района КМА. Гидродобычной агрегат состоял из гидромониторной секции с тремя насадками у забоя (диаметром 5 мм) и одной для размыва (диаметром 13 мм). Подвод напорной воды к насадкам осуществляется по центральной трубе диаметром 114 мм, а диаметр гидродобычного агрегата составлял 219 мм. Скважина у устья была загерметизирована, и воздух подавался по межтрубному кольцевому пространству (гидродобычной агрегат - 219 мм и скважина диаметром 324 мм) на глубину 377 м (в этом месте гидродобычной агрегат имел перфорацию для входа воздуха). Эксплуатационная скважина не была обсажена ввиду устойчивости покрывающих скальных пород. Уровень воды в скважине находился в 35-40 м от поверхности, поэтому использовался эрлифтный подъем, а процесс размыва осуществлялся свободными затопленными струями. Производительность эрлифта составляла около 180-200 м³/ч по гидросмеси, плотностью 1018 - 1020 кг/м³.

Следует заметить, что гидроразмыв затопленными гидромониторными струями практически не реален при радиусе размыва более 0,75 - 1,0 м, а ввод воздуха на глубину 377 м при общей глубине разработки 750 - 800 м крайне неэффективен, а расчет производительности эрлифта по твердому требует особого аналитического подхода при оценке движения сначала 2-х фазного потока (вода + твердое), а затем 3-х фазного (вода+твердое+ воздух).
[111]

В итоге, несмотря на продолжительный период проведения научно-внедренческих работ по технологии скважинной гидродобычи (с 1961 года в целом и с 1987 года, в частности, на КМА) и огромное количество публикаций по СГД в статьях, патентах, книгах и докладах, до сих пор способ СГД изучался не в комплексе, а лишь как

совокупность ряда отвлеченных технологических процессов. Причем в существующих работах эти процессы либо не были раскрыты совсем, либо рассматривались неверно или на недопустимо упрощенном уровне, что крайне усложнило внедрение метода СГД. [1,3,4] Кроме того, процесс скважинной гидродобычи невозможно контролировать визуально, а это значит, что необходим совершенно иной уровень научного и практического потенциала исследователей и, прежде всего, комплексный подход к этой важной востребованной практикой научной проблеме.

Непосредственно добычной участок рудника «Гостищевский» состоит из насосной станции (2 насоса ЦНС 300-710), компрессорной (3 компрессора 305ВП - 16/70), воздухоотделителя, воздушных и водяных коммуникаций, двух добычных скважин и воздухоотделителя.

Следует заметить, что воздухоотделитель установлен почти на 8 м выше устья добычной скважины 1ГД. Гидросмесь (в трех компонентах: вода-воздух-твердое) транспортируется от скважины 1ГД к воздухоотделителю по трубопроводу $D=377$ (внутренний $D_{вн}=357$ мм).

При этом критическая скорость гидротранспортирования составит

$$U_{кр} = 7\sqrt{a \cdot S_2 \cdot U_{св} \cdot g \cdot D_{вн}} + 3\sqrt{a \cdot S_3 \cdot g \cdot D_{вн}}$$

Где a – относительная плотность твёрдого в воде

$$a = \frac{p_T - p_0}{p_0} = \frac{3600 - 1000}{1000} = 2.6$$

ρ_T, ρ_0 – соответственно плотность твёрдого и воды, $\text{кг}/\text{м}^3$

S_2, S_3 – соответственно объёмная концентрация мелких и крупных классов в потоке гидросмеси ($S_2=0.02, S_3=0.02$);

$U_{св}$ – гидравлическая крупность твёрдого (для средневзвешенного диаметра мелкодисперсных фракций $d_T=3\text{мм}$, гидравлическая крупность составит $U_{св}=0.456$ м/с), м/с

$D_{вн}$ – внутренний диаметр пульповода, м

$$U_{кр} = 7\sqrt{2,6 \cdot 0,495 \cdot 9,81 \cdot 0,357} + 3\sqrt{2,6 \cdot 0,02 \cdot 9,81 \cdot 0,357} = 4,19 \text{ м/с}$$

Аналогично критические скорости для пульповодов;

$D=194$ ($D_{\text{вн}} = 174$ мм) $U_{\text{кр}} = 3,3$ м/с

$D=273$ ($D_{\text{вн}} = 253$ мм) $U_{\text{кр}} = 3,8$ м/с

Согласно данным таблицы, пульповод $D=377$ мм работает без заилиenia только тогда, когда эрлифт эксплуатируется с двумя компрессорами с расходом по $16 \text{ м}^3/\text{мин}$ воздуха каждый.

Рабочие и критические скорости гидросмеси .

Таблица 1

№ п/п	Расход смеси, $\text{м}^3/\text{ч}$		Скорость потока	
	Пульпы	Воздуха	Рабочая U_p , м/с	Критическая $U_{\text{кр}}$, м/с
1	200	0	0,555	4,19
	200	16x60	3,2	
	200	32x60	5,9	
2	300	0	0,83	4,19
	300	16x60	3,5	
	300	32x60	6,16	
3	500	0	1,39	4,19
	500	16x60	4,0	
	500	32x60	6,7	
4	700	0	1,94	4,19
	700	16x60	4,6	
	700	32x60	7,3	

Непосредственно конструктивная схема добычного агрегата выполнена в двух вариантах в зависимости от степени разуплотнения продуктивного массива:

-для водонасыщенного массива с проявлениями плавунных свойств используется гидродобычной агрегат с ведением процесса гидроразмыва встроенным гидромонитором (не выходящего за габариты агрегата) (рис. 1);

-для относительно сцементированного массива используется гидродобычной агрегат с выдвижным гидромонитором (рис. 2).

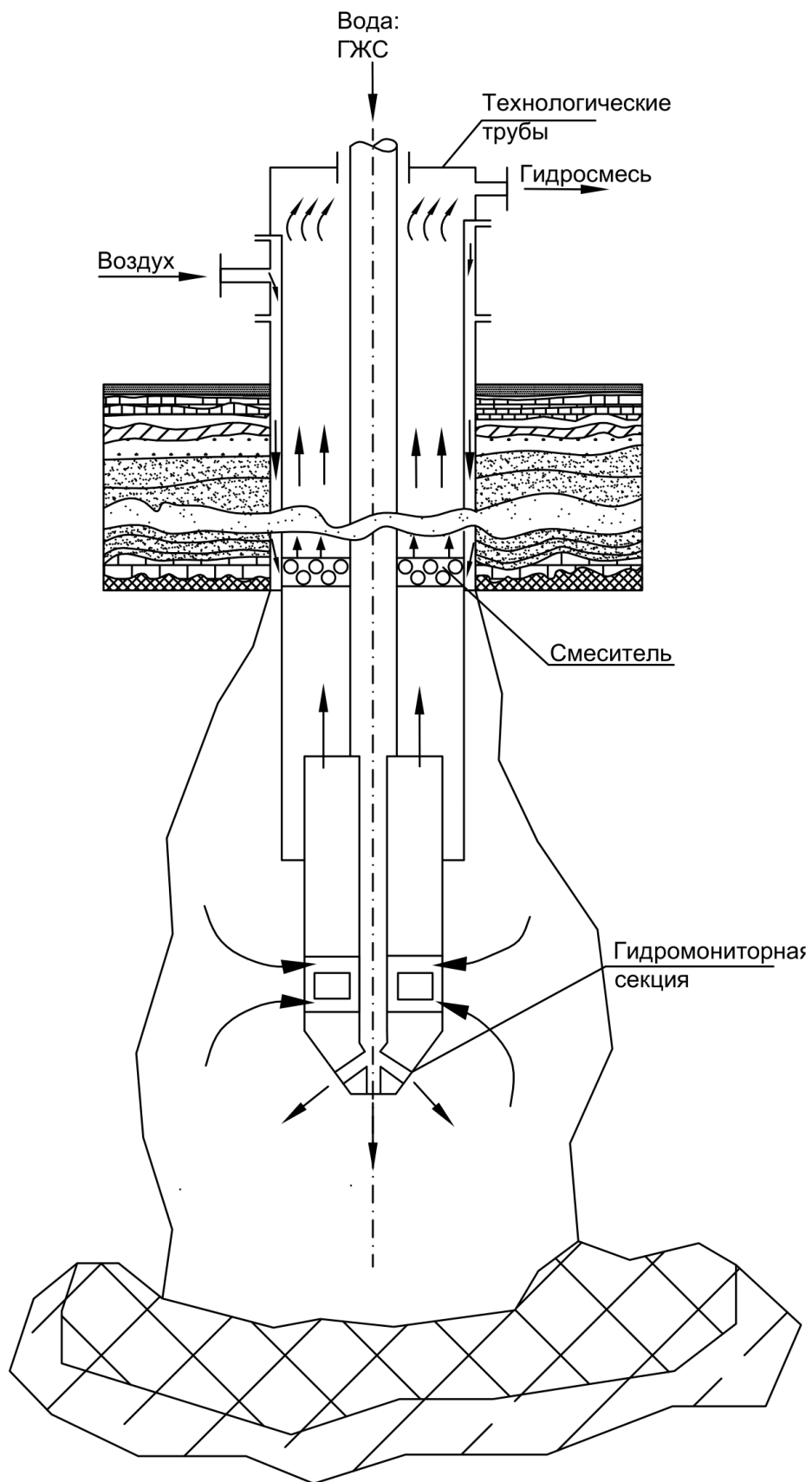
Общая конструкция эксплуатационной (технологической) скважины представлена на рис. 3 и рис. 4.

При этом предполагается эксплуатационные работы проводить при диаметре эрлифтного подъемного трубопровода 219 мм (рис. 3) и 324 мм (рис.4). В обоих случаях напорная вода под давлением насоса 71 ат. подается по трубопроводу диаметром 127 мм ($D_{вн}=109$). Причем ввод воздуха производится на глубине 550 м (над кровлей продуктивного массива). Т.е. имеет место эрлифтный подъем с вводом воздуха в промежуточную секцию подъемной трубы эрлифта, что предопределяет наличие длинной всасывающей линии ($L=260$ м) и, соответственно, значительных дополнительных потерь напора, структура которых будет показана ниже.

Очистные работы в эксплуатационной скважине проводятся в направлении «снизу-вверх». При этом периодически в течении всего периода очистных работ вся эрлифтная труба поднимается вверх по мере размыва (как полагают авторы) очередного горизонта. При этой технологии отработки продуктивного массива процесс всасывания получается свободным. Полость всасывания эрлифта всегда находится выше уровня горной массы.

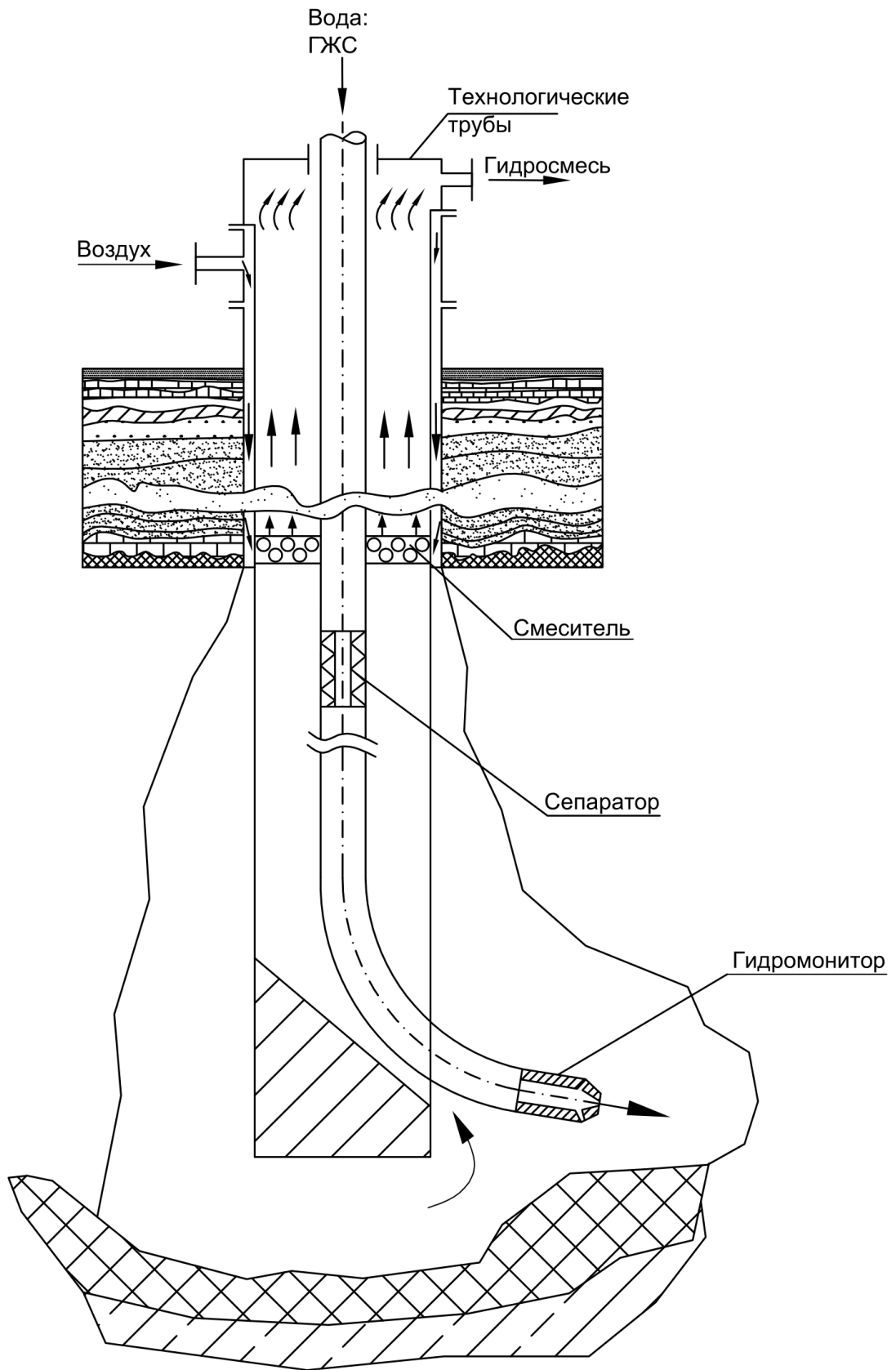
Плоскость наибольших величин всасывающих скоростей как бы «убегает» от плоскости расположения горной массы.

При этом вектор силы всасываемого скоростного потока $F_{ск}$ направлен горизонтально плоскости расположения твердого, а вектор силы тяжести частицы P направлен вертикально, т.е. под углом 90^0 к вектору силы всасываемого потока. Практика показывает, что поднять частицу (оторвать от плоскости) при таком расположении сил взаимодействия крайне сложно уже при ее диаметре $d_t > 3$ мм, т.е. при свободном всасывании можно перемещать только мелкодисперсные частицы.



Вариант I – псевдоплавунные руды

Рис 1. Схема пульпоподъёмной установки гидродобычного агрегата



Вариант II – устойчивые руды

Рис.2 Схема пульпоподъемной установки гидродобычного агрегата.

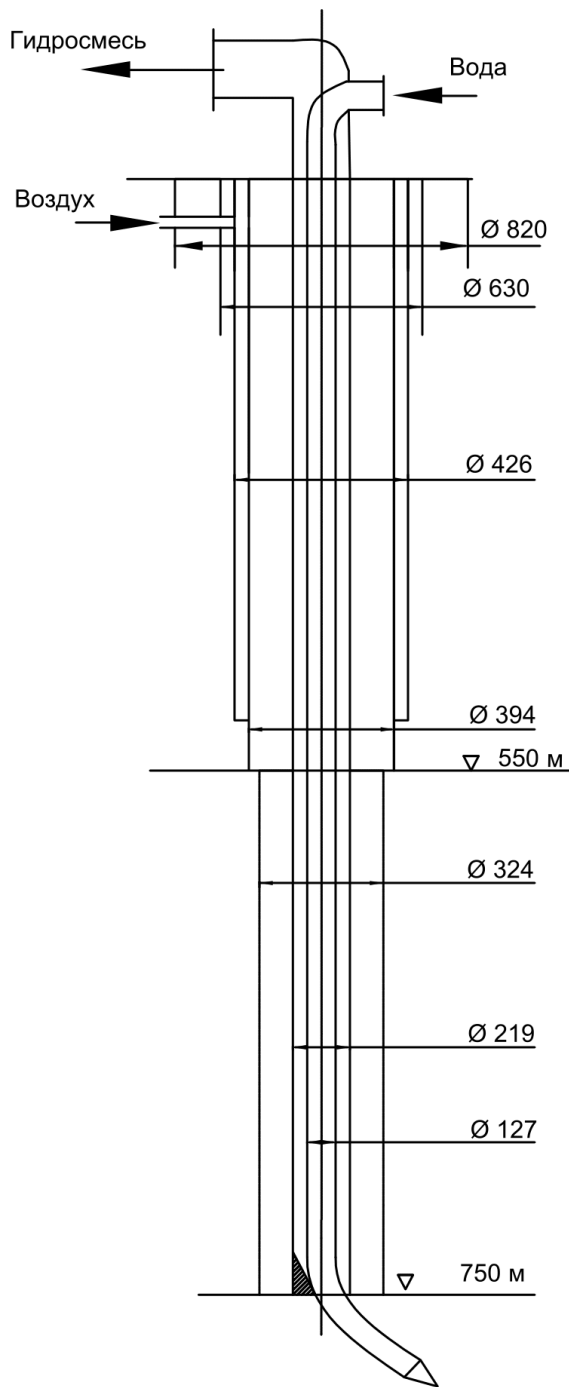


Рис. 3 Поперечные размеры эксплуатационной скважины с диаметром эрлифта 219 мм.

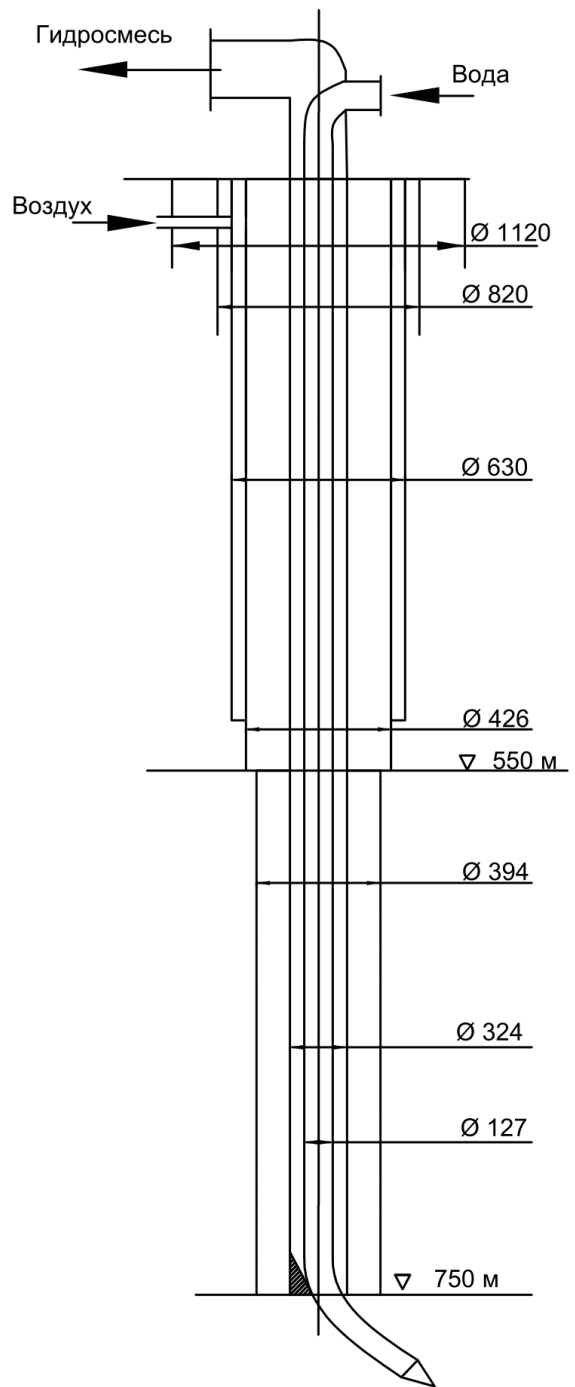


Рис. 4 Поперечные размеры эксплуатационной скважины с диаметром эрлифта 324 мм.

Это обстоятельство подтверждают и все расчетные выражения при напорном гидротранспорте по трубам [111], где также сила скоростного потока и сила тяжести частицы не имеют результирующую силу. Поэтому в расчетном выражении для критических скоростей (минимально возможная скорость трогания частицы) при горизонтальном гидротранспорте для мелкодисперсных частиц ($d_{ТВ} < 3$ мм) присутствует их диаметр

$$U_{кр} = A_1 \cdot \sqrt[3]{aS \cdot U_{св} \cdot gD} \quad (1)$$

а для грубодисперсных частиц ($d_{ТВ} > 3$ мм), диаметр отсутствует

$$U_{кр} = A_2 \sqrt{aSgD} \quad (2)$$

где: A_1 и A_2 – опытные коэффициенты

D – диаметр трубопровода, м

$U_{св} = A(d_{ТВ})$ – гидравлическая крупность при свободном падении, м/с

Это свидетельствует о том, что твердые частицы, диаметром $d_{ТВ} > 3 \div 5$ мм (в зависимости от их плотности) транспортируется по трубопроводу перекачиванием, но от дна не отрывается (такое обстоятельство подтверждено многолетней практикой гидротранспорта в России и за рубежом)[84,111].

Особенности процесса гидроразмыва.

Процесс гидроразмыва (гидроразрушения) является первым звеном всей технологической цепи технологии скважинной гидродобычи. Максимально возможную производительность добычи через скважины определяет именно процесс гидроразмыва.

Эффективность процесса гидроразмыва определяется:

а) конструктивными особенностями и геометрическими параметрами инструмента разрушения массива - гидромонитора;

б) расходно-напорными и физическими характеристиками агента разрушения - напорной жидкости;

в) гидростатической обстановкой в камере и порядком ведения очистных работ в ней;

г) взаимодействием со смежными технологическими процессами: предварительной подготовкой массива (или без нее), гидродоставкой (или под действием сил тяжести) разрушенной горной массы к зумпфу гидродобычного агрегата; возможность управления процессом пульпоприготовления при всасывании горной массы в режиме работы гидроагрегата «из-под слоя» - как наиболее эффективном.

Гидромонитор должен состоять из ствола (длиной не менее 50-ти его диаметров) и рабочей насадки. Поскольку обеспечить гидромонитор минимально необходимой длиной ствола в пределах диаметра скважины (около 300-350 мм) возможно только при использовании выводного гидромонитора или гибкого ствола.

Выводной гидромонитор, принимающий рабочее горизонтальное положение за счет управляемых сил реакции струи наиболее эффективен при ведении процесса гидроразмыва в незатопленных камерах; или в затопленных камерах, но при небольших глубинах разработки (не более 80-100 м) и малых радиусах размыва. Это связано с тем, что потери напора рабочего потока жидкости при подаче его по трубопроводам к насадке относительно невелики. Причем, диаметр напорного водовода ограничен стесненными условиями поперечного сечения эксплуатационной скважины.

Так, гидромониторная струя характеризуется своей мощностью, как функцией производительности гидроразмыва

$$W = \rho QH \quad (3)$$

где: W – мощность струи, кгм/с;

ρ – плотность рабочей жидкости (воды), кг/м³;

Q – расход воды через рабочую насадку, м³/с;

H – напор на насадке, м.вод.ст.

Выражение можно представить в более значимом виде

Так как расход через насадку равен

$$Q = V \cdot \omega = \varphi \sqrt{2gH} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (4)$$

Откуда напор на насадке

$$H = \frac{1}{2g} \left(\frac{4}{\pi d^2 \cdot \varphi} \right) Q^2 \quad (5)$$

Подставляя (4) в выражение (2), окончательно получим

$$W = \frac{\rho}{2g} \left(\frac{4}{\pi d^2 \varphi} \right) \cdot Q^3 \quad (6)$$

где: d – диаметр насадки гидромонитора, м

φ – коэффициент скорости насадки ($\varphi = 0,95$)

Таким образом, мощность струи зависит от величины подаваемого расхода воды в кубической степени.

Доставить достаточное количество воды на насадку гидромонитора для глубоких скважин сложно, т.к. в значительной степени возрастают потери на трение.

Так, согласно существующей схеме размещения оборудования и коммуникаций рудника «Гостищевский», потери напора рабочей воды по трубопроводу диаметром $D=127$ мм (внутренний 109 мм) по поверхности от насосной эксплуатационной скважины на расстояние 250 м составят почти 109 м водяного столба. При движении напорной воды по такому же водоводу по скважине к насадке до глубины 750 м потери напора еще увеличатся на 327 м, что в сумме с поверхностными составят 437 м вод. ст. Таким образом, при подаче воды насосом на поверхности под напором

710 м, на насадке гидромонитора у забоя остается напор только 313 м ($710 - 437 = 313$ м). Изменить существующее положение при данной конструкции гидродобычного агрегата достаточно сложно. Соосная концентрическая конструкция напорного водовода в проточной части напорной трубы эрлифта крайне неудачная по следующим причинам:

-из практики работы вертикального гидроподъема твердого известно, что при размещении по оси подъемного рабочего пульповода труб, в значительной степени увеличиваются гидравлические сопротивления;

-увеличение диаметра напорного водовода (например, с диаметра 127 мм до $D=168$ мм) уменьшает эквивалентный диаметр подъемной трубы эрлифта, а, следовательно, и его производительность;

-увеличение диаметра водовода повышает усилия по изгибу ствола гидромонитора клиновым отклонителем.

На руднике был использован вариант с концентричным (рис.3 и рис. 4) размещением рабочих коммуникаций по поперечному сечению эксплуатационной скважины.

Анализ концентричного расположения воздуховода, водовода и пульповода в скважине показал следующее.

Поперечное сечение воздуховода (кольцевая площадь между подъемной трубой эрлифта и обсадной) несоизмеримо велико и в пересчете на эквивалентный диаметр соответствует величинам $D_{\text{экв}}=208-298$ мм. Вместе с тем, проходное сечение водовода ($D=127(D_{\text{вн}}=109)$), что недостаточно для пропуска 300 м³/ч воды к гидромонитору под давлением 71 ат. Увеличение диаметра водовода (с целью снижения потерь напора на трение) с одной стороны уменьшит полезное поперечное сечение подъемной трубы эрлифта, а, с другой стороны, значительно увеличатся необходимые усилия при изгибе водовода клиновым отклонителем.

Рациональное размещение рабочих трубопроводов в поперечном сечении гидродобычного агрегата.

Размывающая способность затопленной гидромониторной струи по мере ее распространения в массе окружающей жидкости, интенсивно снижается. Так при рабочих давлениях 70-100 ат. и диаметрах насадки 25- 30мм, на расстояниях 1-1,5 м от выхода из насадки, гидромониторная струя уже не может создавать разрушающих усилий на забое и процесс размыва прекращается. Ввод воздуха в водяную струю или абразивных включений, существенно увеличивает размывающую способность струи. Так, при рабочих давлениях воды на выходе из насадки около 90-100 ат. в смеси с воздухом для гидромонитора с диаметром насадки около 36 мм, американские исследователи достигли радиуса размыва при скважинной разработке фосфоритной [9] руды 9 м при глубине разработки до 100 м.

Нетрудно показать, для того, чтобы доставить такое количество энергии (воды в смеси с воздухом на глубину 750 м, даже без учета потерь напора по поверхности) на забой при скважинной отработке железосодержащих руд, необходимо преодолеть значительные гидравлические сопротивления.

Расход воды, истекающей из насадки $d=36\text{мм}$ при давлении 90 ат.

$$Q_{\text{ж}} = V \cdot \omega = \varphi \sqrt{2gH} \cdot 0.785 \cdot d^2$$

$$Q_{\text{ж}} = 0,95 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 900} \cdot 0,785 (36 \cdot 10^{-3})^2 = 0,13 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 467 \text{ м}^3/\text{ч}$$

С учётом расхода воздуха ($Q_{\text{воз}}=0,5Q_{\text{ж}}$), количество смеси, подаваемой к насадке гидромонитора равно

$$Q_{\text{см}} = Q_{\text{ж}} + Q_{\text{воз}} = 467 + \frac{0,5 \cdot 467}{75} = 470 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Скорость смеси по трубопроводу $D=127$ ($D_{\text{вн}}=109$) составит

$$V = \frac{470/3600}{0,109^2 \cdot 0,785} = 14 \text{ м/с}$$

А удельные потери составят $i=0,994$ м/м

Что для глубины 750 м равно

$$h_{\text{тр}} = 750 \cdot 0,994 = 746 \text{ м. вод. ст.}$$

Изменяя диаметр водовода ($D=127$ мм) на больший — уменьшается

производительность эрлифта, а на меньший - резко возрастают потери на трение.

Таким образом, сформировать затопленную струю с необходимой разрушающей способностью с концентрическим расположением труб (рис. 5б) на значительных расстояниях от эксплуатационной скважины при больших глубинах разработки является задачей трудной, т.к. подать по системе труб (в стесненных условиях скважины) достаточное количество гидравлической энергии практически невозможно.

Исходя из этого, изыскание наиболее рационального способа приближения насадки гидромонитора к забою является наиболее перспективным направлением.

В связи с этим предлагается использовать вариант эксцентричного (рис. 5а) размещения рабочих коммуникаций по поперечному сечению эксплуатационной скважины.

При размещении нескольких труб для водовода меньшего диаметра в межтрубном пространстве при эксцентричном расположении (рис. 5а) эрлифтной и обсадной труб, позволит не только увеличить площадь проточной части, но и значительно снизит усилия, необходимые для изгиба ствола гидромонитора.

Потери напора по поверхности можно уменьшить за счет замены водовода $D = 127$ мм на больший диаметр, например $D = 168$, то изменение (увеличение) диаметра водовода по скважине при концентричной схеме расположения труб (рис. 5б), достаточно сложно.

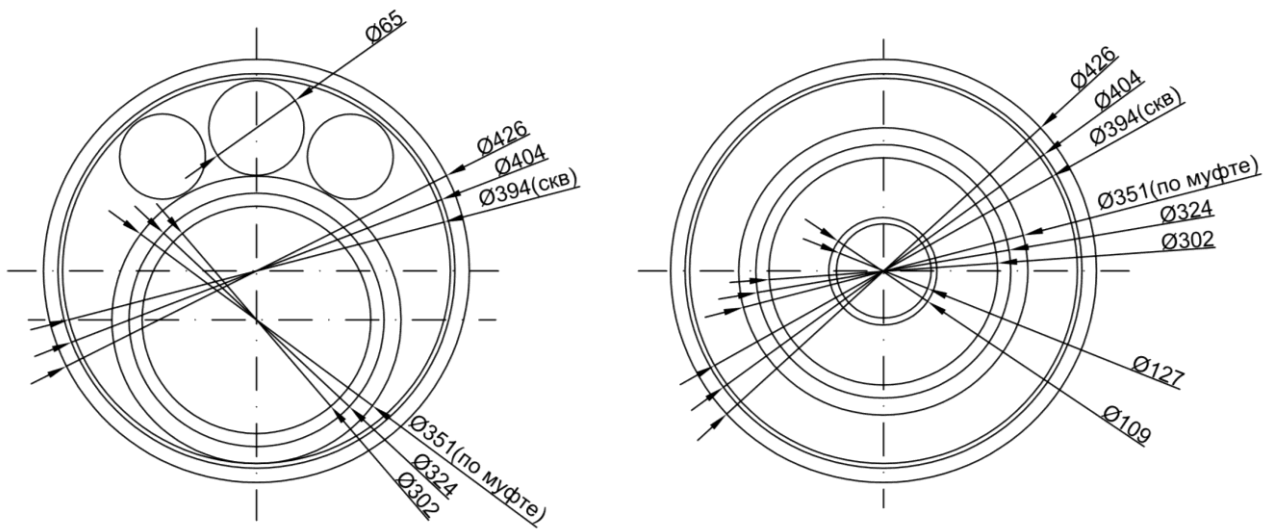


Рис.5 технологическая скважина №2 (Ø426)

а)

1. Водовод $D_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{2 \cdot 65^2} = 92$ мм
2. Эрлифтная труба $D=324(302)$ мм
3. Воздуховод $D_{\text{ЭКВ}}= 65$ мм

б)

1. Водовод $\varnothing 127(109)$ мм
2. Эрлифтная труба $\varnothing 324(D_{\text{ЭКВ}}=274)$ мм
3. Воздуховод $\varnothing 426 (D_{\text{ЭКВ}}=241)$ мм

Поскольку уменьшается поперечное сечение подъемной трубы эрлифта с одной стороны и значительно увеличиваются усилия на изгиб ствола гидромонитора.

Вместе с тем, при эксцентричном расположении труб (рис. 5б и рис 6) в скважине, проблемы как с потерями напора, так и управлением изгибом ствола гидромонитора практически не существует.

Вариантов размещения в межтрубном пространстве водовода, воздуховода и коммуникаций для управления процессом пульпоприготовления и всасывания, может быть несколько. Задача сводится к оценке издержек по бурению и оборудованию эксплуатационной скважины

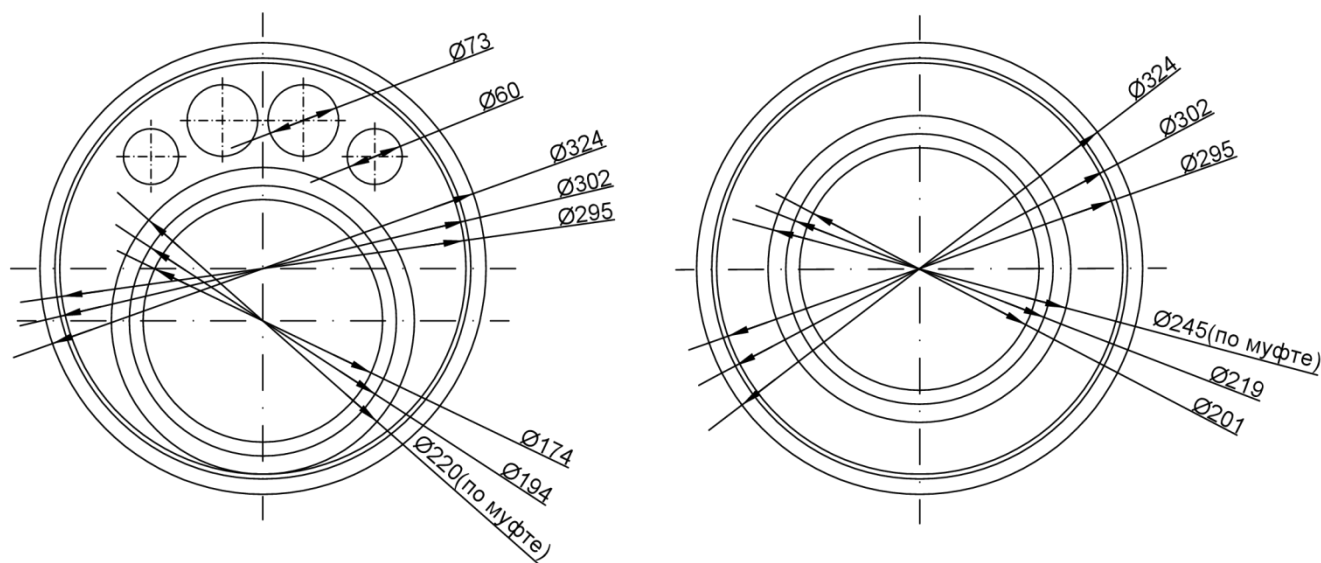


Рис.6 технологическая скважина №1
(эксцентричное расположение труб) (Ø324)

а)

1. Водовод 2x Ø 73(65); $D_{\text{ЭКВ}}=92$ мм
2. Эрлифтная труба $D=194(174)$ мм
3. Воздуховод 2x60 (50); $D_{\text{ЭКВ}}=71$ мм

б)

1. Водовод $D_{\text{ЭКВ}} = 65$ мм
2. Эрлифтная труба

$$D_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{201^2 - 65^2} = 190 \text{ мм}$$

3. Воздуховод $D_{\text{ЭКВ}} = 161$ мм

определенного диаметра, в сопоставлении с производительностью эрлифтного подъема по руде с учетом сохранившейся мощности напорного водного потока у насадки.

Исходя из данных табл. 2 диаметр эрлифтной трубы при эксцентричном расположении труб можно использовать больше, чем при концентричном.

Причем эта разница становится более значительной при увеличении начального диаметра эксплуатационной скважины. А преимущества конструктивного, технического и технологического

характера повышаются еще в большей степени по сравнению с концентричным расположением труб (рис. 5б,6,7), где основным

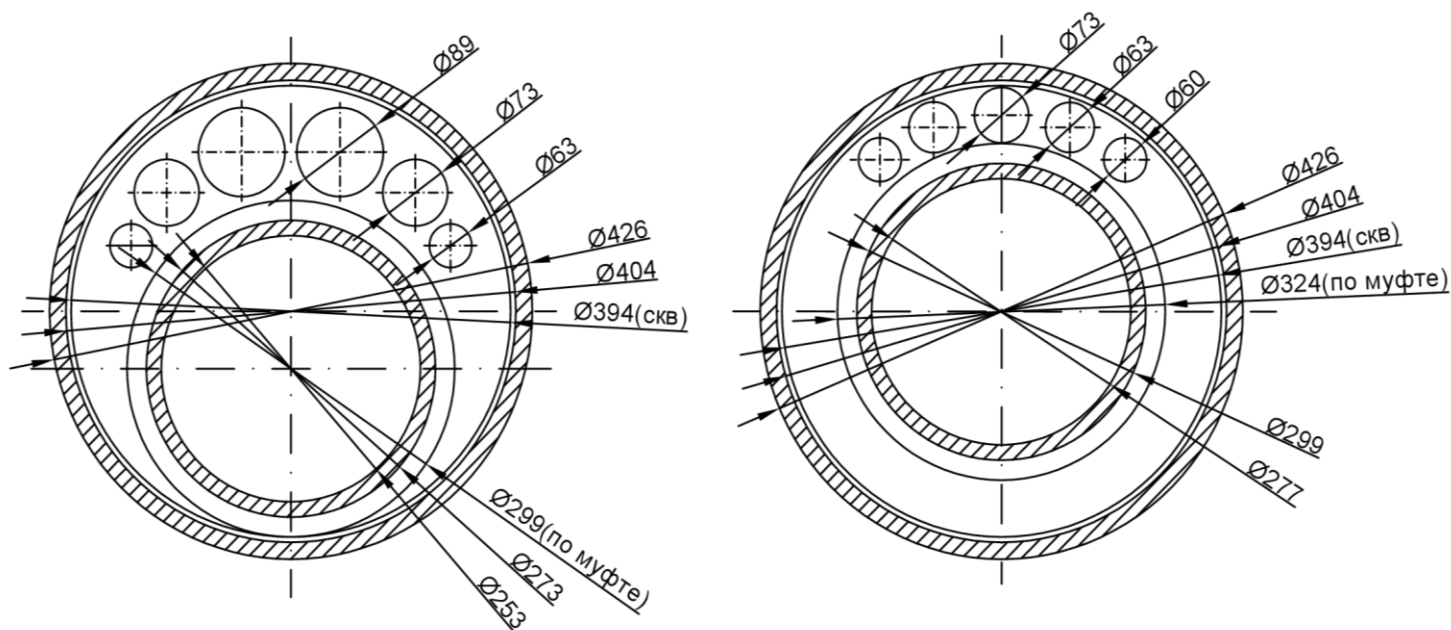


Рис.7 Технологическая скважина №2
(эксцентричное расположение труб) (Ø 426)

а)

1. Водовод 2xØ81+Ø73; $D_{\text{эКВ}}=132$ мм
2. Эрлифтная труба $D=253$ мм
3. Воздуховод 2xØ60(50)+ Ø73(65); $D_{\text{эКВ}}=96$ мм

б)

1. Водовод 4xØ60(50)+Ø73(65); $D_{\text{эКВ}}=119$ мм
2. Эрлифтная труба $D=277$ мм
3. Воздуховод $D_{\text{эКВ}} = 241$ мм

сдерживающим фактором является водовод по оси гидродобычного агрегата $D=127$ мм.

Согласно принятой на участке схемы расположения насосной станции и трассы водовода, а также порядку расчета потерь напора в водоводе как по поверхности (согласно принятого диаметра водовода), так и по скважине, проведен расчет всей трассы напорного водовода (табл. 3). Следует заметить, что если диаметр водовода по поверхности можно изменить (как для скважин с концентричным, так и эксцентричным

расположением труб), то по скважине, диаметр $D=127(D_{\text{вн}}=109)$ является неизменным для концентричного расположения трубных коммуникаций в эксплуатационной скважине.

Эквивалентный диаметр эрлифтной трубы

Таблица 2

Диаметр обсадной колонны, мм	Концентричное расположение труб	Эксцентричное расположение труб
324	$D_{\text{эрл}}=119$	$D_{\text{эрл}}=174$
	$D_{\text{эрл}}=156$	$D_{\text{эрл}}=201$
426	$D_{\text{эрл}}=219$	$D_{\text{эрл}}=253$
	$D_{\text{эрл}}=246$	$D_{\text{эрл}}=277$
	$D_{\text{эрл}}=274$	$D_{\text{эрл}}=302$

Анализ таблицы 3 показывает, что суммарные потери напора по водоводу $D=127$ мм составляет 437 м. вод. ст., а перед насадкой остается давление только 31,3 ат. Диаметр насадки гидромонитора и сила реакции струи рассчитывается следующим образом.

Диаметр насадки гидромонитора

$$d_0 = \sqrt{\frac{Q/3600}{0,785 \cdot V_0}} = \sqrt{\frac{300/3600}{0,785 \cdot 74,4}} = 0,038 \text{ м} = 38 \text{ мм}$$

А сила реакции струи

$$R = \rho_0 V_0 Q = 1000 \cdot 74,4 \cdot \frac{300}{3600} = 640 \text{ кг}$$

Таблица 3

Потери напора по трассе напорного водовода (по поверхности и по скважине) давление на насосе $P_H=71$ ат., расход на насосе $Q=300$ м³/ч

№ п/ п	Диаметр водовода, мм		Удельные потери напора, мм		Длина водовода, м		Потери напора на трение, м		Суммарные потери, м	Давление на насадке, ат.	Скорость струи, м/с	Сила реакции струи, кг	Диаметр насадки, мм
	По поверхности	По скважине	По поверхности	По скважине	По поверхности	По скважине	По поверхности	По скважине	Σh	P_0	V_0	R	D_0
1. При концентричном расположении труб													
1	127(109)	127(109)			250	750	109	327	437	31,3	74,4	640	38
2. При эксцентричном расположении труб													
2	168(152)	2x \emptyset 73(65) 92	$i_n=0,087$ 6	$i_c=0,99$	250	750	21,9	743	765	-	-	-	-
3	168(152)	2x \emptyset 89+ \emptyset 73 3 132	$i_n=0,087$ 6	$i_c=0,17$ 3	250	750	21,9	130	152	59,8	103	869	32
4	168(152)	2x \emptyset 73(65) 92	$i_n=0,036$	$i_c=0,40$ 9	250	750	9,0	307	316	39,4	83,5	437	28

Эксцентричное расположение труб позволяет значительно уменьшить гидравлическое сопротивление по скважине, т.к. поперечным сечением проточной части можно управлять. Так, согласно данным табл.3, использование для водовода 2-х труб $\varnothing 89$ (81) и одной $\varnothing 73$ (65) (согласно схемы по рис. 5), потери по скважине глубиной 750 м могут снижены до 130 м. вод.ст. При этом у насадки гидромонитора рабочее давление составляет почти 60 ат. (табл.3). А сила реакции струи почти 900 кг при диаметре насадки $d_0=32$ мм.

Водовод, состоящий из трех труб $\varnothing 89$ (81) имеет эквивалентный диаметр $D_{\text{эkv}}=140$ мм, а потери напора по скважине составят

$$(h_{\text{тр}})_{\text{скв}}=95 \text{ м вод. ст.}$$

Вместе с тем водовод из двух труб $\varnothing 89$ (81) с эквивалентным диаметром $D_{\text{эkv}}=115$ мм пропустит расход $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ к рабочей насадке на глубину скважины 750 м с потерями напора

$$(h_{\text{тр}})_{\text{скв}}=300 \text{ м вод. ст.}$$

Изменение (уменьшение, в частности) диаметра водовода приводит к существенному увеличению потерь напора на трение. А в некоторых случаях, эксплуатация скважины по технологии СГД становится неэффективной (табл.3).

1.3 Особенности процесса всасывания и постановка задачи исследования.

Одним из основных технологических процессов СГД является процесс пульпоприготовления и всасывания.

В то же время одним из слабых узлов использующихся гидродобычных агрегатов является отсутствие устройств, управляющих поступлением во всасывающее отверстие твердого и недостаточная зона захвата последнего. В результате происходит заполнение зумпфа подъемного аппарата (в частности эрлифта) твердым и аварийная обстановка при всасывании, т.к. в эрлифт поступает только вода без твердого.

Все это вызывает необходимость комплексного решения вопроса схемы отработки продуктивного массива, доставки размытого твердого к зумпфу эрлифта, создание подвижного состояния горной массы, окружающей всас (псевдооживление - пульпоприготовление), с учетом заданной (или планируемой) производительностью эрлифта по горной массе.

Рассмотрим эту сложную, но решаемую задачу поэтапно.

Процесс всасывания при СГД коренным образом отличается от всасывания из-под воды грунтонасосами, землесосами или песковыми насосами. Там, всасываемый материал сразу восполняется новым за счет перемещения земснаряда (например, добыча в водоемах песчано-гравийного материала) или постоянное подгребание твердого бульдозером, например, в зумпф всасывающего устройства (работа гидроэлеваторов при разработке россыпей). Эксплуатация морских земснарядов или эрлифтов также связана с постоянным перемещением к всасу материала специальными устройствами или технологическими приемами, связанными с горизонтальным перемещением (скреперование, волочащийся по дну всас и т.д.)

При добыче разумно использовать технологию всасывание «из-под слоя». Для того, чтобы частицу поднять необходимо зону всасывания обеспечить механическими или гидравлическими рыхлителями (взвешивающие частицу во всасывающем потоке). Гидравлическое рыхление (более правильный термин –

гидровзвешивание) горной массы (псевдооживление) вокруг всасывающего отверстия можно эффективно использовать при работе эрлифтной подъемной трубы, погруженной в слой горной массы (рис.8а) (режим всасывания «из-под слоя»). При этом всасываемый поток, прежде чем он поступит в эрлифтную трубу должен профильтроваться через слой горной массы. Скорость фильтрационного потока, значительно больше скорости потока при свободном всасывании (рис.8б), где сила потока действует на частицу с одной стороны, а сила фильтрационного потока воздействует на частицу со всех сторон, в том числе и соосно с силой веса частицы, тем самым взвешивая ее, что невозможно при свободном всасывании. Если увеличивать производительность эрлифта по воде, тем самым повышаются скорости фильтрационного потока от ламинарного режима через турбулентный до разрушающих скоростей фильтрации (фильтрационному потоку становится «тесно» в поровых каналах горной массы, которые расширяются потоком, т.е. горная масса гидровзвешивается).

Разрушающие скорости фильтрации как показывает практика, соответствуют гидравлической крупности твердого, взвешиваемого потоком:

-для взвешивания одиночной частицы

$$U_{св} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \frac{g d_T}{\psi}} \quad (7)$$

- при взвешивании частицы во всем объеме горной массы, расположенной вокруг эрлифтной трубы

$$U_{ст} = (1 - S)^{2.39} \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \frac{g d_T}{\psi}} \quad (8)$$

Где: ρ_T ρ_0 – соответственно плотность твердого ($\rho_T=2650$ кг/м³) и воды ($\rho_0= 1000$ кг/м³),

$U_{св}, U_{ст}$ – скорость свободного и стеснённого падения твёрдого,

соответственно, $\frac{M}{C}$;

d_T – диаметр твердого, м;

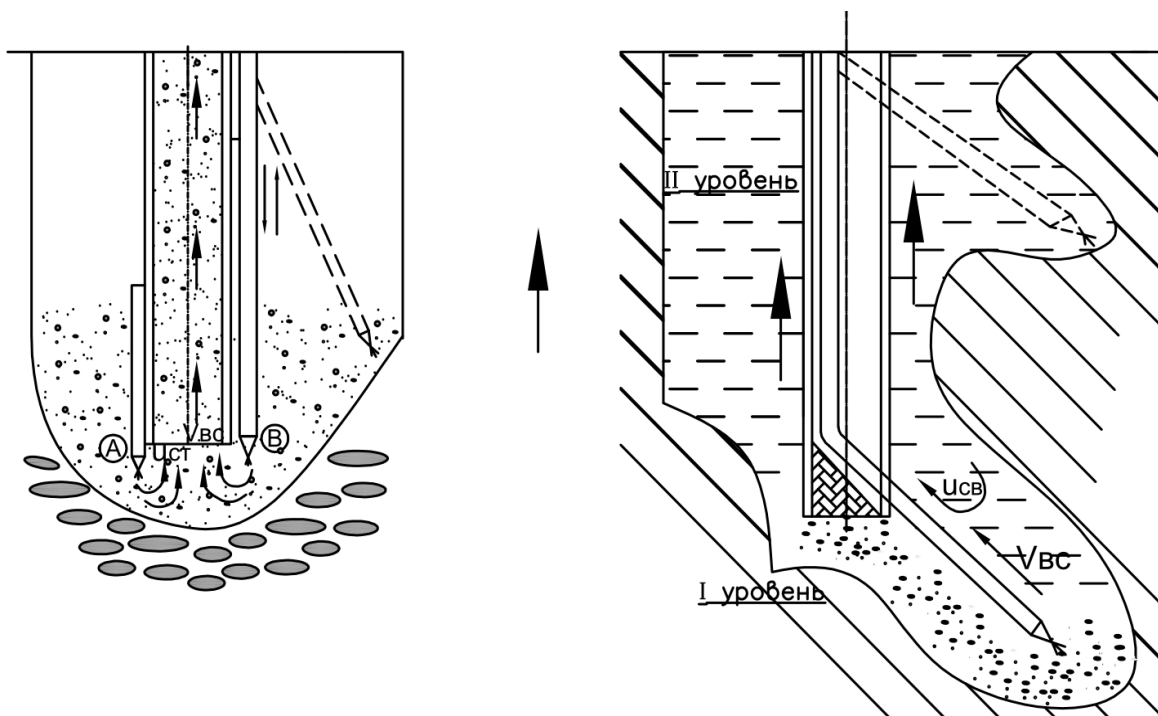
ψ – коэффициент лобового сопротивления (для $d_T > 3$ мм, $\psi = 0.44$)

$(1-S)$ – порозность горной массы

$$(1-S) = 0.38 \div 0.4$$

D – диаметр трубопровода, м;

S – содержание твердого (в долях) в объеме гидросмеси или объеме горной массы, расположенной вокруг всасывающего наконечника.



а) всасывание «из-под слоя»
при отклонении подвижного
ствола гидромонитора.

б) свободное всасывание
при изгибе ствола
гидромонитора.

Рис.8 Схема всасывания горной массы в зумпфе.

Сравнивая расчетные выражения скоростей трогания для горизонтального перемещения частиц и $U_{кр}$ и для вертикального (7) и (8) заметим, что критические скорости трогания при горизонтальном воздействии всасывающего потока на частицу повышаются с увеличением содержания горной массы S . При вертикальном движении всасываемого потока, процесс гидровзвешивания (псевдооживления) начинается при меньших скоростях с увеличением содержания горной массы вокруг всасывающего наконечника. При свободном всасывании с использованием выдвигного гидромонитора с отклонителем, процесс разрушения (размыва) продуктивных песков (горной массы) не связан с зоной всасывания, поэтому поднять эти пески до плоскости всасывания сложно.

Частица песка при взаимодействии с потоком жидкости характеризуется ее гидравлической крупностью, т.е. скоростью падения твердого в воде. Ранее было показано, что гидравлическая крупность при падении одиночной частицы, определяется по выражению (7), а при движении твердого в объеме гидросмеси – по выражению (8). На практике искомые скорости в плоскости всасывания должны составлять $3.0 \div 4.0$ м/с, т.к. при удалении от всасываемого отверстия, скорости всасывания интенсивно снижаются.

При скорости гидросмеси в эрлифтной трубе даже 4 м/с, на расстоянии от этой трубы всего в один диаметр, потенциально гидровзвешиваются и способны перемещаться только мелкие частицы.

Режим всасывания «из-под слоя» в условиях полного завала горной массы (песком) эрлифтной трубы позволяет постоянно находиться частицам песка (несвязной рудной массы) в плоскости всасывания, т.е. в зоне максимальных скоростей. Всасываемые частицы песка (руды) из плоскости всасывания замещаются новыми, интенсивно поступающими в гидровзвешенном состоянии из общего объема горной массы. Как уже было отмечено выше, состояние подвижности (гидровзвешивания) песка (несвязной горной массы) обеспечивается разрушающими скоростями фильтрации по

поровым каналам и воздействием на песок (несвязную горную массу) гидромониторной струей максимально приближенным к забою.

Основной движущей силой в процессе всасывания является разность давлений (градиент давлений) вне и внутри всасывающей трубы. За счет градиента происходит перемещение жидкости из внешнего потока внутрь всасывающей трубы. Причем, обязательным условием эффективного протекания процесса всасывания является равенство производительности гидродобычного агрегата (ГДА), расходу жидкости, подтекающей к наконечнику из окружающего его пространства. Несоответствие производительностей вне и внутри трубы ведет либо к всасыванию малонасыщенной твердым гидросмеси, либо к забутовке горной массой всасывающего наконечника из-за небольших скоростей всасывающего потока, не обладающего достаточной транспортирующей способностью.

В связи с вышеизложенным, предлагается рассмотреть возможность формирования принудительного процесса гидровзвешивания несвязной рудной массы (т.е. перевод ее в псевдооживленное состояние) в плоскости всасывания (вокруг плоскости всасывания) за счет использования гидравлических струй спутных всасывающему потоку, формируемых специальным гидромонитором от отдельного напорного водовода.

Частица твердого при взаимодействии с потоком жидкости характеризуется ее гидравлической крупностью, т.е. скоростью падения твердого в воде. Ранее было показано, что гидравлическая крупность при падении одиночной частицы, определяется по выражению (7), а при движении твердого в объеме гидросмеси - по выражению (8).

Необходимые скорости потока для подъема одиночных частиц $V_{св}$ и при их стесненном падении $V_{ст}$ рассчитаны конкретно для железосодержащей руды плотностью $\rho_T=3600 \text{ кг/м}^3$ и представлены в табл.4, по данным которой построена графическая зависимость скорости падения твердого от его диаметра. Анализ результатов показывает, что скорость

при всасывании в эрлифтной подъемной трубе должна быть не менее 2,0 м/с.

Исходя из этого можно сделать важные ограничения по возможной производительности эрлифта. Так для эрлифта с диаметром подъемной трубы $D=194$ ($D_{ВН}=174$) производительность его по гидросмеси должна быть не менее

$$Q_э = V_{св} \cdot \omega = 2,0 \cdot 0,785 \cdot 0,174^2 \cdot 3600 = 171 \text{ м}^3/\text{ч}$$

А для эрлифта $D=219(201)$

$$Q_э = 2,0 \cdot 0,785 \cdot 0,201^2 \cdot 3600 = 228 \text{ м}^3/\text{ч}$$

На практике искомые скорости в плоскости всасывания должны составлять не менее 2,5-3,0 м/с, т.к. при удалении от всасывающего отверстия скорости всасывания интенсивно снижаются.

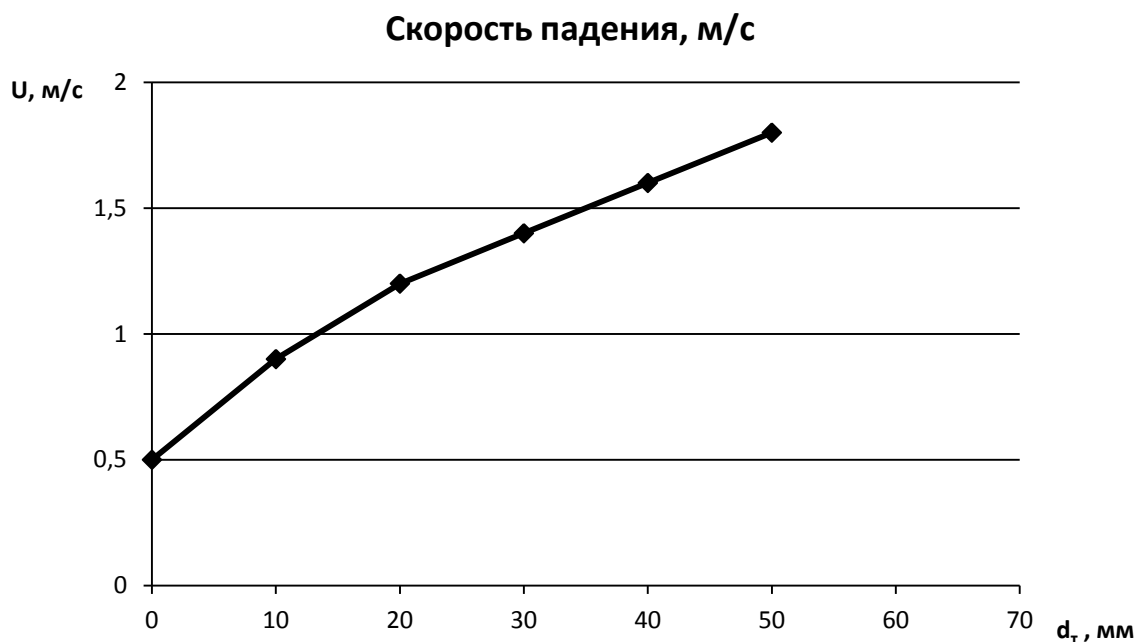


График зависимости гидравлической крупности твёрдого от его диаметра.

Диаметр твёрдого, d_T , мм	1,0	3,0	5,0	10,0	20,0	30,0	50,0	75,0
Плотность твёрдого, кг/м ³	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600
Свободное падение, V_{CB} , м/с	0,23	0,456	0,6	0,86	1,22	1,49	1,93	2,36
Стеснённое падение, $S=0,03$, V_{CT} , м/с	0,21	0,424	0,558	0,8	1,13	1,39	1,79	2,2

Принципиально, работа эрлифта заключается в искусственном уменьшении плотности жидкости в его подъемной трубе за счет ввода воздуха. Поэтому, производительность эрлифта зависит прежде всего от изначально принятых геометрических параметров эрлифта (рис. 9)

1. Высоты подъема эрлифта h_0 - расстояния от уровня воды в скважине и до излива гидросмеси.
2. Величины погружения смесителя эрлифта (глубина ввода воздуха) h .
3. Длины всасывающей линии эрлифта h_{BC} (рис. 9), если такова существует
4. Общей длины подъемной трубы эрлифта H .
5. Диаметра подъемной трубы эрлифта D .

Основным геометрическим параметром эрлифта является коэффициент погружения смесителя a , который характеризует степень погружения подъемной трубы под уровень воды:

$$a_1 = \frac{h}{H} \text{ (для рис. 9а, 11а);}$$

$$\alpha_2 = \frac{h_H - \Sigma(h_{\text{вс}})_{\text{тр}}}{H} \quad (\text{для рис. 9б, 11б}).$$

где h_H - длина погруженной части эрлифтной трубы под воду, где движется двухфазная (или трёхфазная) смесь, м;

$\Sigma(h_{\text{вс}})_{\text{тр}}$ - сумма потерь напора в линии всасывания эрлифта, $h_{\text{вс}}$, м.

Чем больше коэффициент погружения, тем изначально выше энергетические возможности эрлифта по подъему. Ясно, что для схем эрлифта на рис.11а $\alpha_1 > \alpha_2$

Для определенного, предварительно принятого диаметра подъемной трубы эрлифта D и коэффициента погружения смесителя α , производительность эрлифта ограничивается допустимым расходом воздуха, поступающим в смеситель. Рабочая характеристика эрлифта представляет собой не равнобочную перевернутую параболу (рис.10) с точкой оптимального режима работы N (при этом эрлифт имеет максимальное кпд) и максимально достижимой (исходя из начальных заданных уровней (рис.10)) производительностью M (эрлифт при этом количестве воздуха имеет максимально возможную производительность). Эксплуатационный участок рабочей характеристики эрлифта находится между режимами N (η_{max}) и M (Q_{max})

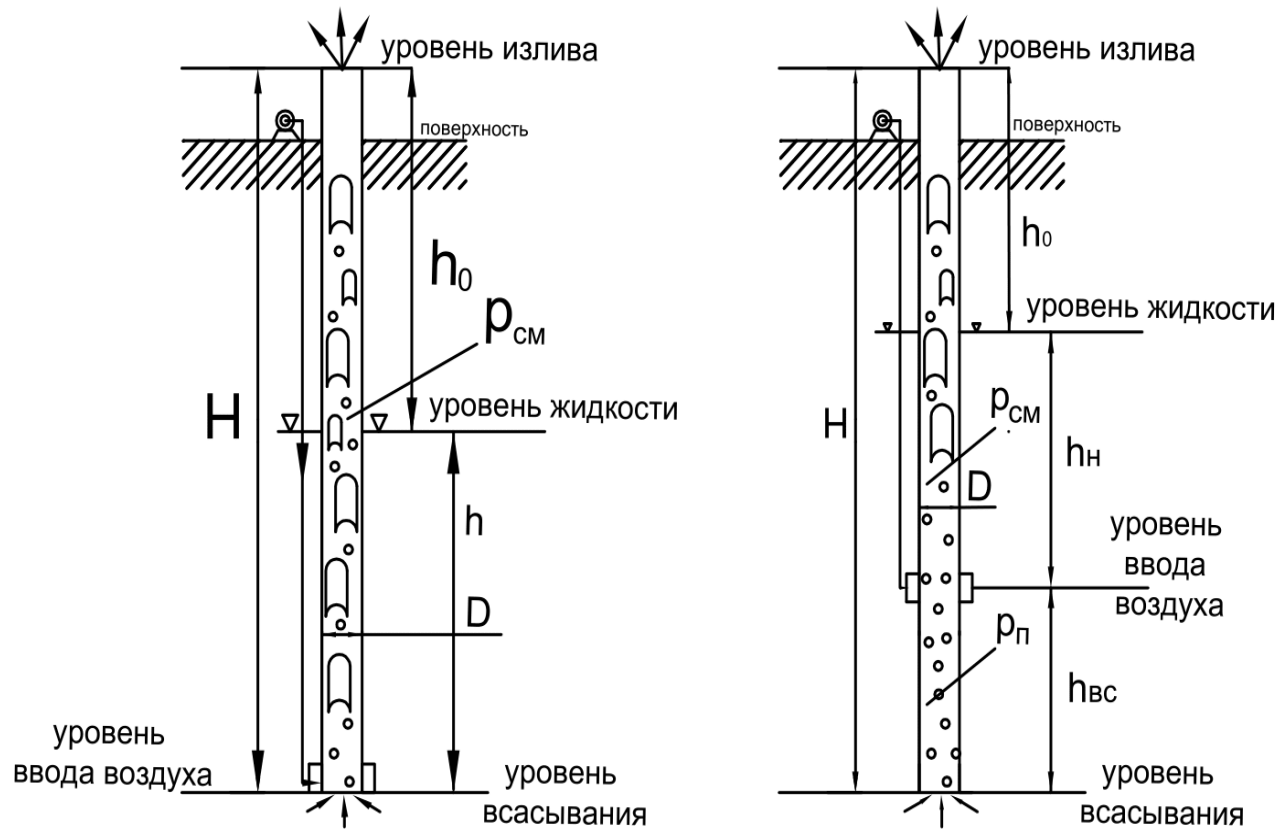


Рис. 9 Исходные статические уровни эрлифта в скважине, определяющие предельные возможности его работы.

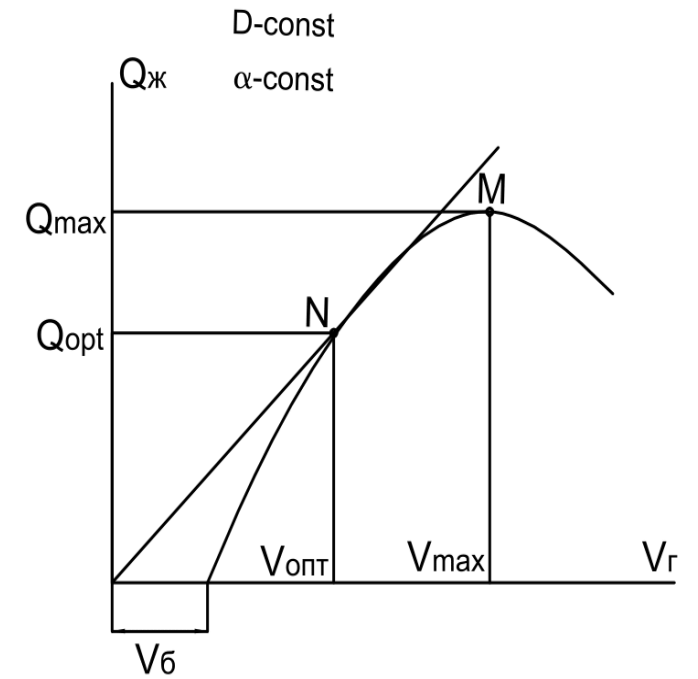
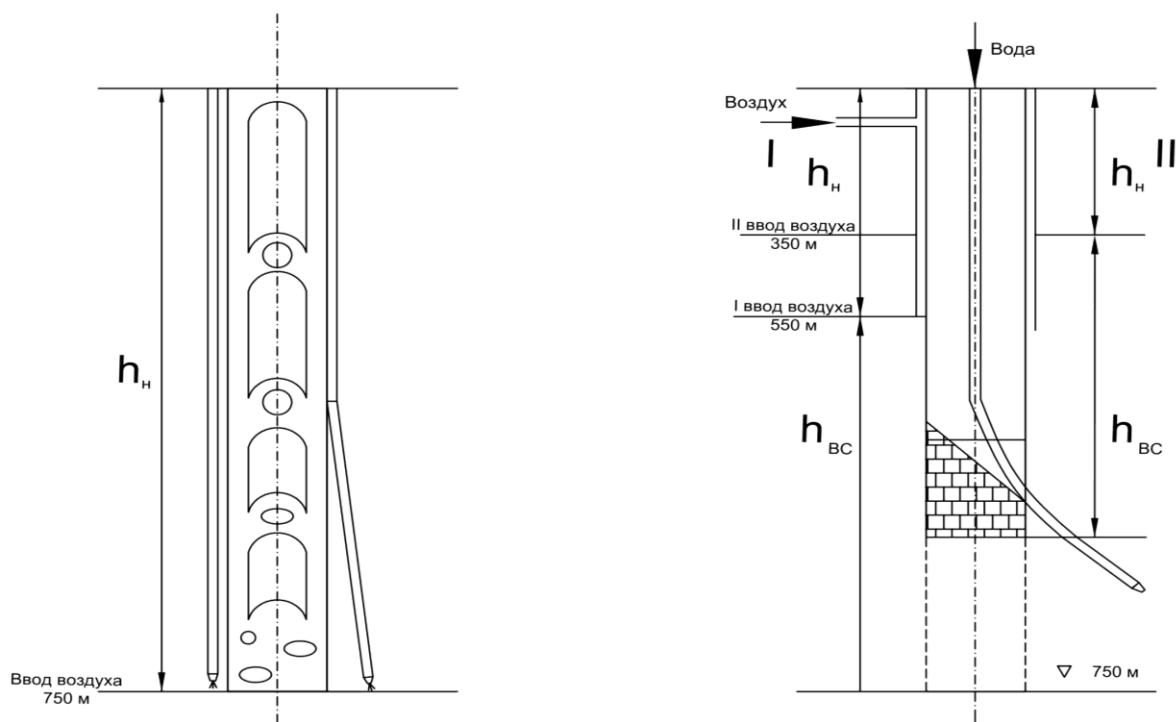


Рис. 10 Рабочая характеристика эрлифтного подъёма.

При различных величинах коэффициента погружения расходно-напорные характеристики эрлифта ограничиваются в центральной части обобщенной рабочей зоной (рис.10), которая оценивает предельные возможности эрлифта по его производительности для конкретного диаметра подъемной трубы.

Таким образом, при эксцентричном расположении труб в поперечном сечении скважины (рис.5а) ввод воздуха осуществляется почти на уровне плоскости всасывания, т.е. на глубине $h=750$ м. При этом, если учесть, что уровень воды в скважине от поверхности находится на глубине 40 м, а высотные отметки на поверхности 10 м (от устья скважины до воздухоотделителя), то коэффициент погружения смесителя эрлифта составляет достаточно значительную величину, что изначально предполагает достижение максимально возможных технологических параметров при эксплуатации эрлифтного подъема (рис.11а)

$$a = \frac{750 - 40}{750 + 10} = 0,934$$



а) с длинной всасывающей линией б) нагнетательного типа

Рис.11 Схема скважины эрлифта.

Рассматривая работу эрлифта при концентричном расположении труб в поперечном сечении подъемной трубы (рис.11б) следует отметить, что при этом не только начальные условия эксплуатации эрлифта характеризуются значительными необязательными потерями в линии всасывания (рис.11б), но и тем, что работа эрлифта в процессе отработки продуктивного массива будет непрерывно и прогрессивно ухудшаться.

Поскольку технология отработки принята «снизу вверх», то по мере подъема всего добычного агрегата вверх, глубина погружения смесителя эрлифта будет уменьшаться (с I уровня ввода воздуха до II уровня, например, согласно схеме на (рис.8, 9)), но, (что особенно важно) при сохранении всех технологических потерь в линии всасывания (длина линии всасывания в процессе подъема добычного агрегата остается постоянной).

$$\Sigma(h_{вс})_{пот} - const$$

Оценивая всю совокупность особенностей технологических процессов скважинной гидродобычи, следует признать, что процессы СГД пульпоприготовление и всасывание являются малоизученными. В связи с этим выявляется цель исследования. Исследование процесса пульпоприготовления и всасывания в технологии скважинной гидродобычи рыхлых железных руд КМА. Идея работы заключается в использовании затопленных спутных и отражённых струй для создания и поддержания процесса гидровзвешивания в технологии пульпоприготовления и всасывания.

При этом требуют решения следующие задачи исследования:

- обоснование структуры расположения технологических (рабочих) водоводов, воздухопроводов и пульповода в поперечном сечении эксплуатационной скважины;
- аналитическое обоснование закономерности перемещения водяных струй, распространения в объёме жидкости;
- аналитические обоснования структуры водяных струй, распространяющихся в объёме горной массы;
- оценка сходимости результатов аналитических и опытных исследований;
- выявление гидравлической связи текущих скоростных характеристик затопленных струй и гидравлической крупности гидровзвешиваемой горной массы;
- обоснование основных технологических приёмов перемещения гидродобычного аппарата в экспериментальной скважине с учётом безаварийности осуществления процесса всасывания.

ГЛАВА 2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ В МАССЕ ЖИДКОСТИ.

2.1 Аналитическое обоснование расстояния распространения затопленных струй в массе жидкости.

Как указывали ранее, при работе гидродобычного аппарата (с эрлифтом, в частности) при скважинной гидрообьеме, значительную роль играет процесс подготовки горной массы к процессу всасывания. Непосредственно, создание транспортирующей скорости в зоне породозабора с использованием только скоростей всасывания подъёмного аппарата крайне сложно или практически невозможно.

Это связано с тем, что вектор скорости всасываемого потока и вектор силы тяжести частицы, как правило, взаимно перпендикулярны и результирующая при этом сила не может создать достаточных транспортирующих скоростей. Даже использование механических рыхлителей эффективно только при осуществлении процесса рыхления непосредственно в плоскости всасывания. Наиболее эффективно процесс пульпоприготовления проводится с использованием водовоздушных затопленных струй.

Наиболее значимые результаты по исследованию струй публиковался с 1940-х годов[76,32,33,43]

В основном трудами Абрамовича Г.Н. и Коновалова И.М. [1,2,3,4,11,37]

Были установлены важные опытные результаты, подтверждающие закономерность распространения затопленных струй:[1]

- границы растекания затопленной струи прямолинейны;
- изменение количества движения по длине распространения затопленных струй постоянно.

Причём, эти установленные факты были справедливы как для газовых струй, распространяющихся в воздухе, так и водяных, перемещающихся в воде.

Предпримем попытку оценить закономерности распространения затопленных струй по длине их перемещения аналитически.

Схема распространения водяной струи представлена на рис. 12

Текущий диаметр струи (при условии, что образующие струи прямолинейны), составляет

$$d_x = d_0 + 2 \cdot tg \frac{\varphi}{2} \cdot l \quad (9)$$

Или диаметр переходного сечения струи (от начального к основному), равен

$$d_n = d_0 + 2l_n \cdot tg \frac{\varphi}{2} \quad (10)$$

где: d_x , d_n – соответственно, диаметр текущего и переходного сечения струи, м;

d_0 – диаметр начального сечения струи (диаметр насадки), м;

l_n, l – соответственно, длина начального участка струи и текущая длина струи, м;

φ – угол раскрытия образующей струи, град.

Примем

$$tg \frac{\varphi}{2} = \frac{d_n - d_0}{2l_n} = \left(\frac{d_n}{d_0} - 1 \right) \frac{d_0}{2l_n} \quad (11)$$

Далее, исходя из выражения (10), начальный диаметр струи соответствует

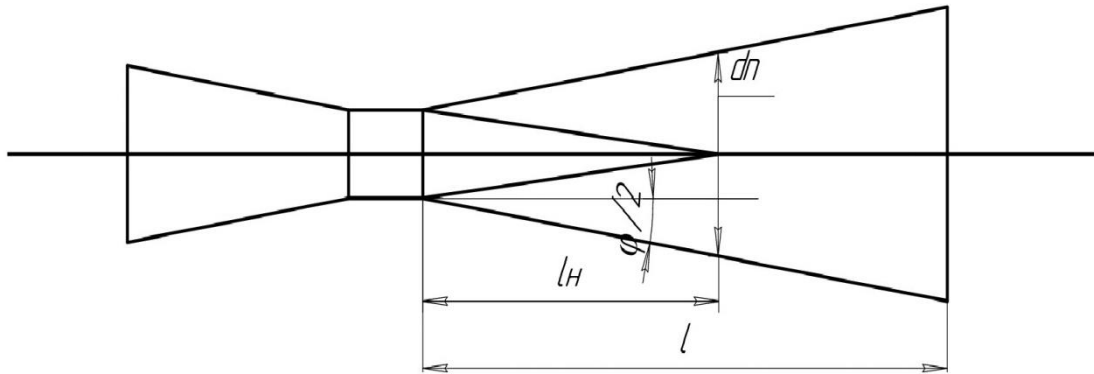


Рис. 12 Схема распространения затопленной струи.

$$d_0 = d_n - 2 \cdot l_H \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}, \quad (12)$$

Или с учётом выражений (9) и (12), имеем аналитическое значение текущего диаметра струи

$$d_x = d_n + 2(l - l_H) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (13)$$

Заменяя выражение $\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$ на выражение $\left(\frac{d_n}{d_0} - 1\right) \frac{d_0}{2l_H}$ (11), текущий диаметр струи составит

$$d_x = d_n + d_0 \left(\frac{l - l_H}{l_H}\right) \left(\frac{d_n}{d_0} - 1\right) \quad (14)$$

Далее, используя несложные алгебраические преобразования, получим

$$d_x = d_n + d_0 \left(\frac{l}{l_H} - 1\right) \left(\frac{d_n}{d_0} - 1\right) \quad (15)$$

$$d_x = d_0 \left[\frac{d_n}{d_0} + \left(\frac{l}{l_H} \cdot \frac{d_n}{d_0} - \frac{d_n}{d_0} - \frac{l}{l_H} + 1 \right) \right]$$

И, окончательно, текущий диаметр струи определяется как

$$d_x = d_0 \left[1 + \left(\frac{d_n}{d_0} - 1 \right) \frac{l}{l_H} \right] \quad (16)$$

Исходя из равенства изменения количества движения по длине струи, имеем для средней скорости струи

$$Q_{\text{ср}} \cdot V_{\text{ср}} = Q_0 \cdot V_0$$

Или

$$V_{\text{ср}} \cdot \frac{\pi d_x^2}{4} \cdot V_{\text{кр}} = V_0 \cdot \frac{\pi d_0^2}{4} \cdot V_0,$$

После сокращения и упрощения, окончательно получим

$$d_x \cdot V_{\text{ср}} = d_0 \cdot V_0, \quad (17)$$

Средняя текущая скорость по длине распространения затопленной струи соответствует

$$V_{\text{ср}} = V_0 \frac{d_0}{d_x} \quad (18)$$

Используя полученное ранее выражение текущего диаметра струи (10) и (18), получим основное аналитическое выражение текущей скорости по длине струи

$$V_{\text{ср}} = V_0 \frac{d_0}{d_0 \left[1 + \left(\frac{d_n}{d_0} - 1 \right) \frac{l}{l_H} \right]}$$

Или

$$V_{\text{ср}} = V_0 \frac{1}{1 + \left(\frac{d_n}{d_0} - 1 \right) \frac{l}{l_H}} \quad (19)$$

Особенности этого выражения падения скорости по длине распространения струи является то, что сумма коэффициентов в знаменателе постоянна и соответствует соотношению $\frac{d_n}{d_0}$

Подобное выражение было получено при аналитическом исследовании гидромониторных струй И.Г. Куклиным.

Следует заметить, что И.Г. Куклин [104,105] представил закономерность напоров по длине струи в воздухе

$$\frac{H_m}{H_0} = \left[\frac{C}{1 + (C - 1) \frac{l}{l_H}} \right]^2 \quad (20)$$

где: H_m, H_0 – соответственно , напор на насадке и на расстоянии l от насадки, м;

C - коэффициент соотношения текущего радиуса струи и радиуса насадки

$$C = \frac{R_n}{R_0};$$

R_n, R_0 - соответственно, текущий радиус струи и радиус выходного сечения насадки, м

Выразив напоры в струе в выражении (20) через скорости в струе, получим выражение изменения осевой скорости по длине струи, подобные ранее нам полученному (19)

Так как $V = \sqrt{2gH}$,выражение И.Г. Куклина (20) структурно будет подобно выражению (19)

$$V_{oc} = V_0 \frac{d_n/d_0}{1 + \left(\frac{d_n}{d_0} - 1\right) \frac{l}{l_H}} \quad (21)$$

где:

$$C = \frac{d_n}{d_0}$$

V_{oc} - осевая скорость струи в воде, м/с

Оценивая полученные выражения (19) и (21) заключим:

- границы гидромониторных струй также являются прямолинейны, т.к. предложенная И. С. Куклиным [104] структура зависимости (20) для струй возможна только при условии прямолинейности границ;

- темп падения средней скорости струи (19) и осевой скорости (21) идентичны соотношению:

$$k = \frac{V_{oc}}{V_{cp}} = \frac{d_n}{d_0} = const \quad (22)$$

Анализ многочисленных опытов исследования струй различными авторами подтверждает зависимость (22). Опыты представлены в Таблице 5, которая показывает, что искомое соотношение равно

$$\frac{V_{oc}}{V_{cp}} = \frac{d_n}{d_0} = 2,41 \quad (23)$$

Вернёмся к выражению (19) и продолжим аналитические исследования.

Умножив числитель и знаменатель на величину $\frac{d_0}{d_n}$, получим

$$V_{cp} = V_0 \frac{d_0/d_n}{\frac{d_0}{d_n} + \left(1 - \frac{d_0}{d_n}\right) \cdot \frac{l}{l_H}} \quad (24)$$

Особенностью полученного выражения по закономерности падения скорости (средней или осевой) является то, что сумма коэффициентов в знаменателе формулы должна быть равна 1

$$\frac{d_0}{d_n} + \left(1 - \frac{d_0}{d_n}\right) = 1 \quad (25)$$

Так как установлено, что соотношение $\frac{d_0}{d_n} = \frac{1}{2,41} = 0,415$, то выражение (24) будет соответствовать:

- для расчёта изменение по длине струи осевой скорости

$$V_{oc} = V_0 \frac{1}{0,415 + 0,585 \frac{l}{l_H}} \quad (26)$$

- для расчёта изменения по длине струи средней скорости

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,415}{0,415 + 0,585 \frac{l}{l_H}} \quad (27)$$

Или

$$V_{cp} = V_0 \frac{1}{1 + 1,41 \frac{l}{l_H}} \quad (28)$$

Таблица 5

Соотношение между осевой и средней скоростью в затопленной струе

№	Автор	Значение $k = \frac{V_{oc}}{V_{cp}}$	Условие опыта
Затопленные струи			
1	Абрамович Г. Н. [1]	2,56	Струя воздуха в воздухе
2	Гиневский А.С. [25]	2,5	Струя воздуха в воздухе
3	Шлихтинг Г.Э. [99]	2,22	Струя воды в воде
4	Идельчик И.Е. [106]	2,42	Струя воды в воде
5	Жученко В.А. [107]	2,42	Струя воды в воде
6	Козодой А.К. [105]	2,35	Струя воды в воде
7	Мирцхулава И.Е. [60]	2,0	Струя воды в воде
8	Сизов Г.Н. [81]	2,0÷3,0	Струя воды в воде

Гидромониторные струи			
9	Куклин И.С. [104]	1,68	Струя воды в воздухе
10	Аренс В.Ж. [9]	1,923	Струя воды в воздухе

2.2 Развитие исследования основного расчётного выражения для распространения затопленных струй.

Как показали опытные исследования затопленных струй Жученко В.А. [107], полуугол раскрытия струи на трёх участках струи, распространяющейся в массе жидкости соответствует (рис.13)

- на начальном участке $\frac{\varphi}{2} = 7^\circ 35'$;

- на переходном участке $\frac{\varphi}{2} = 8^\circ 35'$;

- на основном участке $\frac{\varphi}{2} = 10^\circ 35'$;

Длина начального участка струи составит ориентировочно $l_n = (4 \div 7)d_0$, т.е. например при $d_0 = 20$ мм, $l_n = 10 \div 12$ см, Длина переходного участка затопленной струи составляет $l_{пер} = (7 \div 10)d_0$, т.е. при $d_0 = 20$ мм, $l_{пер} = 15 \div 20$ см. Исходя из этого, взаимодействие затопленных струй с отражателем происходит на длине переходного участка $l_{пер}$, где полуугол раскрытия струи составляет $\frac{\varphi}{2} = 8^\circ 35'$.

Используя ранее полученное выражение средней скорости падения потока по длине струи текущий диаметр струи соответствует

$$d_x = d_0 + 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$$

Текущая скорость по длине струи

$$V_x = V_0 \frac{d_0}{d_x}$$

Или

$$V_x = V_0 \frac{1}{1 + 2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{l}{d_0}} \quad (29)$$

Или согласно структуре И.М. Коновалова

$$V_x = V_0 \frac{0,145}{0,145 + 0,05 \frac{l}{d_0}} \quad (30)$$

$$V_x = V_0 \frac{0,145}{0,145 + 2 \cdot 0,45 \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{l}{d_0}} \quad (31)$$

Сравнивая выражение Коновалова И.М. (30) и полученное нами (31), заметим ,что

$$2 \cdot 0,145 \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{l}{d_0} = 0,05 \quad (32)$$

Так как $\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{d_n - d_0}{2l_n}$, Выражение (32) примет вид

$$2 \cdot 0,145 \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{d_n}{d_0} - 1 \right) \frac{d_0}{l_n} = 0,05$$

Поскольку

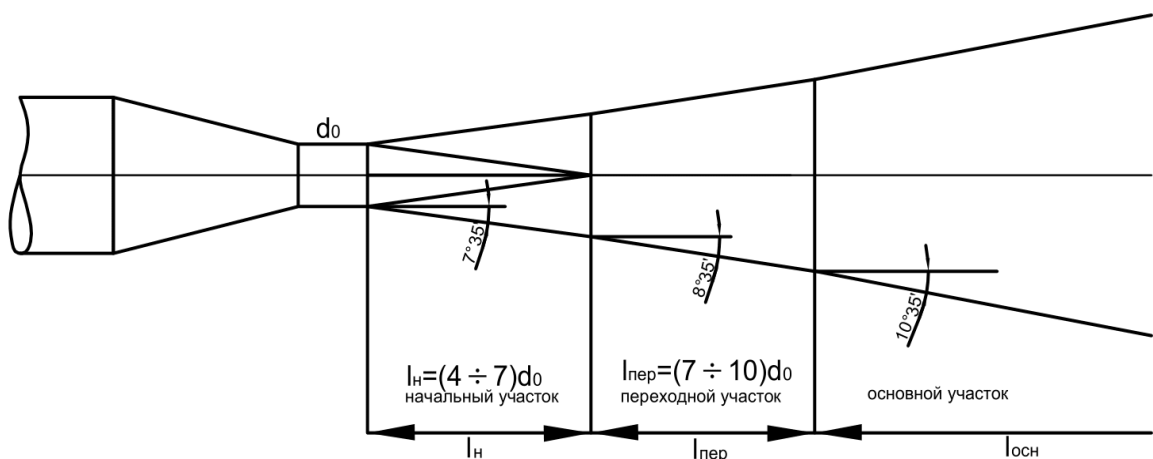


Рис. 13 Углы раскрытия затопленной струи на всех участках её распространения.

$$\frac{d_n}{d_0} = 2,41, \text{ то } \frac{l_n}{d_0} = \frac{0,145 \cdot 1,41}{0,05} = 4,09 \quad (33)$$

Или

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{\left(\frac{d_n}{d_0} - 1\right) d_0}{2 \cdot l_n}; \frac{l_n}{d_0} = \frac{\left(\frac{d_n}{d_0} - 1\right)}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} \quad (34)$$

Поскольку И.М. Коновалов получил угол раскрытия струи постоянным и равным $\frac{\varphi}{2} = \frac{19,5}{2}$, то

$$\frac{l_n}{d_0} = \frac{(2,41 - 1)}{\operatorname{tg}\left(\frac{19,5}{2}\right)} = 4,09 \quad (35)$$

Т.е. то, что и в выражении (34)

Но поскольку выражение (29) для переходного участка примет вид

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,145}{0,145 + 2 \cdot 0,145 \cdot \operatorname{tg} 8^\circ 35' \cdot \frac{l}{d_0}} \quad (35a)$$

Или

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,145}{0,145 + 0,0426 \cdot \frac{l}{d_0}} \quad (36)$$

Или

$$V_{cp} = V_0 \frac{1}{1 + 0,294 \cdot \frac{l}{d_0}} \quad (37)$$

Таким образом полученное уравнение является основным расчётным выражением расходно-напорных параметров струи, распространяющейся в массе жидкости. При распространении струи в массе твёрдого материала плотностью ρ_T , закономерность снижения скорости по длине затопленной струи будет другой (Рис13).

Плотность окружающей среды, в которой распространяется струя

$$\rho_{\text{окр}} = \rho_{\text{т}} \cdot S_0 + \rho_0(1 - S_0) \quad (38)$$

ГДЕ: $\rho_{\text{окр}}$ – плотность окружающей среды, кг/м³

ρ_0 – плотность струи (плотность воды), кг/м³

S_0 – объёмное содержание твёрдого материала (например песка). При плотной упаковке твёрдого (песка), объёмное содержание составляет $S_0 = 0,6$

Следовательно, при плотности горной массы $\rho_0 = 2650$ кг/м³, плотность окружающей среды, в которой распространяется струя равна

$$\rho_{\text{окр}} = 2650 \cdot 0,6 + 1000(1 - 0,6) = 1990 \text{ кг/м}^3$$

Изменение количества движения для струи, распространяющейся в массе твёрдого материала

$$m_0 V_0 = m_x V_{\text{окр}} \quad \text{или} \quad \rho_0 \cdot Q_0 \cdot V_0 = \rho_{\text{окр}} \cdot Q_x \cdot V_x$$

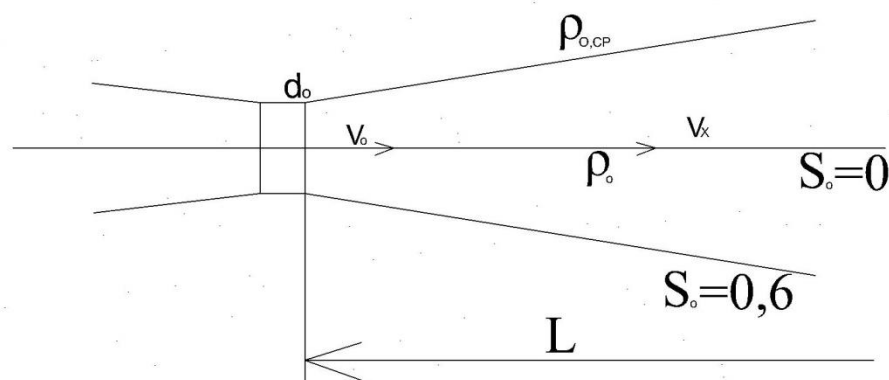


Рис. 13 Схема распространения затопленной струи в объёме твёрдого материала.

Или

$$\rho_0 \cdot d_0^2 \cdot V_0 \cdot \mathcal{V}_0 = \rho_{\text{окр}} \cdot d_x^2 \cdot V_x \cdot V_0$$

Или текущая скорость по длине распространения струи в объёме твёрдого равна

$$V_{\text{кр}} = V_0 \frac{d_0}{d_x} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{\text{окр}}}} \quad (39)$$

В конечном итоге, выражение для расчёта скорости струи, распространяющейся в горной массе равна (с учётом выражений (37) и (39))

$$V_{\text{ср}} = V_0 \frac{1}{1 + 0,294 \frac{l}{d_0}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{\text{окр}}}} \quad (40)$$

Для струи, распространяющейся в песке (для переходного участка струи), выражение (40) примет вид

$$V_{\text{ср}} = V_0 \frac{0,71}{1 + 0,294 \frac{l}{d_0}} \quad (41)$$

2.3 Обоснование закономерности распространения отражённой струи.

Ранее была установлена закономерность распространения затопленных струй в массе твёрдого (песка) (40)

Для струи, распространяющейся в воде закономерность изменение текущей скорости по длине начального участка струи, имеем исходя из (36) (при полуугле раскрытия $\frac{\varphi}{2} = 7^\circ 35'$)

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,145}{0,145 + 2 \cdot 0,145 \cdot tg 7^\circ 35' \cdot \frac{l}{d_0}}$$

Или

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,145}{0,145 + 0,037 \cdot \frac{l}{d_0}}$$

Или

$$V_{cp} = V_0 \frac{1}{1 + 0,258 \cdot \frac{l}{d_0}} \quad (42)$$

Для затопленной струи, перемещающейся в массе твёрдого (подобно переходному участку), согласно выражениям (39) и (40)

$$V_{cp} = V_0 \frac{1}{1 + 0,258 \frac{l}{d_0}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{окр}}} \quad (43)$$

Или при распространении в песке ($\rho_T = 2650 \text{ кг/м}^3$)

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,71}{1 + 0,258 \frac{l}{d_0}} \quad (44)$$

Для струи, распространяющиеся в воде, закономерность изменения текущей скорости по длине основного участка, имеем исходя из (36) (при полуугле раскрытия $\frac{\varphi}{2} = 10^\circ 35'$)

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,145}{0,145 + 2 \cdot 0,145 \cdot \operatorname{tg} 10^\circ 35' \cdot \frac{l}{d_0}}$$

Или

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,145}{0,145 + 0,053 \cdot \frac{l}{d_0}}$$

Или

$$V_{cp} = V_0 \frac{1}{1 + 0,365 \cdot \frac{l}{d_0}} \quad (45)$$

Или при распространении в песке

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,71}{1 + 0,365 \cdot \frac{l}{d_0}} \quad (46)$$

Сравнительный анализ аналитических расчётных выражений, полученных нами [33],[29] и [35] и исследований многочисленных учёных в различных отраслях промышленности:

- при прокладке струёй дюкеров (Сизов С.Н.) [80,81]
- для разработки судовых струйных движителей (Коновалов И.М.) [37],
- при струйной разработке песка (Жученко В.А.) [107],
- для ракетных струйных двигателей (Абрамович Г.Н.) [2,3],
- при струйном подмыве плотин (Мирцхулава И.Е.) [60],

- при струйной очистке каналов (Осипов Б.В.) [108],

показал, что результаты расчётов достаточно удовлетворительно совпадают с аналитическими исследованиями (таблица 6). Причём, выражения для расчёта текущей скорости струи получены автором аналитически и для трёх участков струи: начального, переходного и основного.

Количество исследователей, занимающихся закономерностями распространения струи в массе твёрдого материала (песка) значительно меньше [80,107,60]

В диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук, [107], Жученко В.А. предложил эмпирическое выражение снижения средней скорости по длине распространения водяной струи в массе твёрдого

$$V_{cp} = V_0 \cdot 0,41 \frac{7,08}{(1 + S_b) \frac{l}{d_0}} \quad (47)$$

Где S_b – весовое содержание твёрдого в горной массе.

Для того, чтобы использовать выражение В. А. Жученко (47) для проведения расчётов, использовать весовое содержание S_b твёрдого достаточно сложно, т.к. для жидкой конкретной горной массы необходимо знание плотности твёрдого ρ_T . Поэтому преобразуем формулу В.А. Жученко, вводом объёмного содержания твёрдого S_0 .

Весовое содержание твёрдого определяется как

$$S_b = \frac{T \cdot \rho_T}{T \cdot \rho_T + Ж \cdot \rho_0} \quad (48)$$

Где Т,Ж – соответственно, объёмная доля содержания твёрдого и жидкого в горной массе (песке);

ρ_T, ρ_0 – соответственно, плотность твёрдого и жидкости (воды), кг/м³

Сравнительный анализ опытных и аналитических исследований при распространении затопленных струй.

Движение струи в воде

Таблица 6

№	Формула	Относительное расстояние, $\frac{l}{d_0}$							
		3	4	6	10	12	15	20	40
1	Сизов Г.Н. $u_{cp} = u_0 \cdot \frac{1}{1 + 0,09 \left(\frac{l}{d_0}\right)^{1,32}}$	19,1	17	13,6	9,2	7,8	6,3	4,7	2,1
2	Коновалов И.М. $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1 + 0,345 \left(\frac{l}{d_0}\right)}$	13	11,2	8,8	5,9	5,18	4,3	3,37	1,79
3	Жученко В.А. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \cdot \frac{7,08}{l/d_0}$	25,6	19,3	12,7	7,7	6,4	5,2	3,8	1,9

Продолжение Таблицы 6

4	Абрамович Г.Н. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \frac{0,48}{0,145 + 0,064 \frac{l}{d_0}}$	15,5	13,06	9,9	6,6	5,7	4,7	3,6	1,9
5	Жученко В.А. $u_{cp} = u_0 \frac{7,3}{7,3 + \left(\frac{l}{d_0}\right)^{1,25}}$	17,3	19,9	11,7	7,7	6,5	5,2	3,9	1,8
6	Мирцхулава И.Е. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \cdot \frac{1}{0,9 + 0,09 \frac{l}{d_0}}$	9,29	8,6	7,5	6	5,5	4,8	4	2,4
7	Осипов В.Б. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \cdot 2,65 \left(\frac{d_0}{l}\right)^{0,84}$	11,4	9	6,4	4,2	3,6	2,97	2,3	1,3

Продолжение Таблицы 6

8	<p>Михалёв М.А.</p> $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \frac{1}{\sqrt{0,316 + 0,208 \frac{l}{d_0}}}$	11,2	10,2	8,7	7	6,5	5,9	5,2	3,7
9	<p>Автор</p> $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1 + 0,258 \frac{l}{d_0}}$	14,9	13	10,4	7,4	5,6	5,4	4,3	2,3
10	<p>Автор</p> $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1 + 0,294 \frac{l}{d_0}}$	14	12,2	9,6	6,7	5,8	4,9	3,8	2
11	<p>Автор</p> $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1 + 0,365 \frac{l}{d_0}}$	12,8	10,8	8,3	5,7	4,9	4,1	3,8	1,7

Движение струи в массе твёрдого

Таблица 7

№	Формула	Относительное расстояние, $\frac{l}{d_0}$							
		3	4	6	10	12	15	20	40
1	Жученко В.А. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \cdot \frac{7,08}{(1+S_B) \frac{l}{d_0}}$	16,0	10,7	7,1	4,2	3,5	2,8	2,14	1,07
2	Мирцхулава И.Е. $u_{cp} = u_0 \cdot 0,41 \cdot \frac{1}{0,9+0,12 \frac{l}{d_0}}$	8,6	7,9	6,7	5,2	4,6	4,0	3,3	1,9
3	Автор $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1+0,294 \frac{l}{d_0}} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{окр}}}$	9,9	8,6	6,8	4,8	4,2	3,4	2,7	1,45
4	Автор $u_{cp} = u_0 \frac{1}{1+0,365 \frac{l}{d_0}} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{окр}}}$	9,0	7,6	5,9	4,0	3,5	2,8	2,3	1,2

Объёмное содержание твёрдого определяется как

$$S_0 = \frac{T}{T + Ж} \quad (49)$$

Проведём алгебраические преобразования следующим образом

$$S_B = \frac{1}{1 + \frac{T}{Ж} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_T}}$$

И

$$S_0 = \frac{1}{1 + \frac{T}{Ж}} \quad (50)$$

Или

$$\frac{T}{Ж} = \frac{1 - S_0}{S_0} = \left(\frac{1}{S_0} - 1 \right) \quad (51)$$

Подставив выражение (51) в форму (50), получим значение весовой концентрации твёрдого в горной массе (песке), где распространяется затопленная струя

$$S_B = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{S_0} - 1 \right) \frac{\rho_0}{\rho_T}} \quad (52)$$

Поскольку известно, что при плотной упаковке твердого, объёмная доля его в горной массе будет составлять $S_0 = 0,6$, а весовая доля согласно соотношению (52) при плотности твёрдого

$$\rho_T = 2650 \text{ кг/м}^3$$

$$S_B = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,6} - 1 \right) \frac{1000}{2650}} = 0,8 \quad (53)$$

Поэтому в Таблице 7, объёмное содержания твёрдого в горной массе $S_0 = 0,6$, весовое содержание составит $S_v = 0,8$ (при плотности твёрдого $\rho_T = 2650 \text{ кг/м}^3$)

Анализ Таблицы 7 показывает, что предложенное выражение снижения средней скорости струи, распространяющейся в массе твёрдого (песке) показывает достаточно удовлетворительное схождение с результатами расчёта по сравнению с эмпирическими исследованиями В.А. Жученко и И.Е. Мирцхулавы [60,104]

2.4 Особенности воздействия отражённой и спутной струи в процессе всасывания.

Ранее нами было рассмотрено и проанализировано распространение затопленных струй в воде:

- на начальном участке струи (42)
- на переходном участке струи (37)
- на основном участке струи (44)

Кроме того представлены расчётные выражения для оценки текущей скорости потока струй, распространяющихся в объеме горной массы(песке):

- на начальном участке струи (43)
- на переходном участке струи (42)

Таким образом, рассмотрены и предложены расчётные зависимости для участков струи, распространяющихся до отражения:

- для схемы всасывание с встречным струйным гидровзвешиванием твёрдого (рис. 14)
- для схемы всасывание с отклонением струйного гидровзвешиваемого потока (рис 15);
- для схемы всасывания с обратным поворотом струйного гидровзвешиваемого потока (рис 16).

Для оценки возможности всасывания с использованием процесса гидровзвешивание отражённым струйным потоком, необходимо провести исследование отражённых струй, распространяющихся в горной массе (песке).

Анализ многочисленной научной литературы по этому вопросу показал, что искомые исследования имеют только повествовательный, характер [78,82]. Если в гидротехнологии таких исследований вообще не проводилось, то в

гидромелиорации предпринимались попытки дать общие направления по методу расчёта местного размыва оснований нижнего бьефа [61].

Так, А.И.Камнев [21] словесно оценивает размыв русла реки свободно падающим потоком, М.А. Михалёв [23] объясняет гидравлику струи, сбрасываемой (отражённой) консольным перепадом. Исследователь А.Г. Соловьёва [80] поясняет, как происходит размыв русла струёй, отбрасываемой трамплином.

Следует обратить внимание на исследования в Грузинском НИИ гидротехники и мелиорации под руководством профессора И.Ц. Мирцхулавы и его учеников [60]

Установлено, что методы расчёта, рекомендуемые другими исследователями неточны для проведения инженерных расчётов, зачастую дают то преуменьшение, то преувеличение значения параметров местного разрыва грунта нисходяще-отражённой струёй. Причина, как указывают авторы, заключается в недостаточно точной оценке скоростного поля отражённой струи, сопротивляемость грунтов (песка) размыву, их неоднородность и т.д.

Кроме постоянных исследований, И.Е. Мирцхулавой и его сотрудниками была создана специальная установка. Первая установка со сменной насадкой размещалась в гидравлическом остеклённом лотке длиной 450 см, шириной 16 см. и высотой 75 см, пропускной расход до 50 л/с. Вторая установка, в виде вращающейся вокруг горизонтальной оси, с удельным расходом 150 л/с помещалась в гидравлическом лотке длиной 60 м, шириной 2 м и высотой 1,5 м. Третье установка представляла собой консоль длиной 4,5 м, высотой 0,35 м и шириной 0,5 м. Нижний бьеф имеет ширину 2 м и длину 60 м, высота перепада достигла 3 м удельный расход составляет л/с, т.е. почти $1070 \text{ м}^3/\text{ч}$. [60]

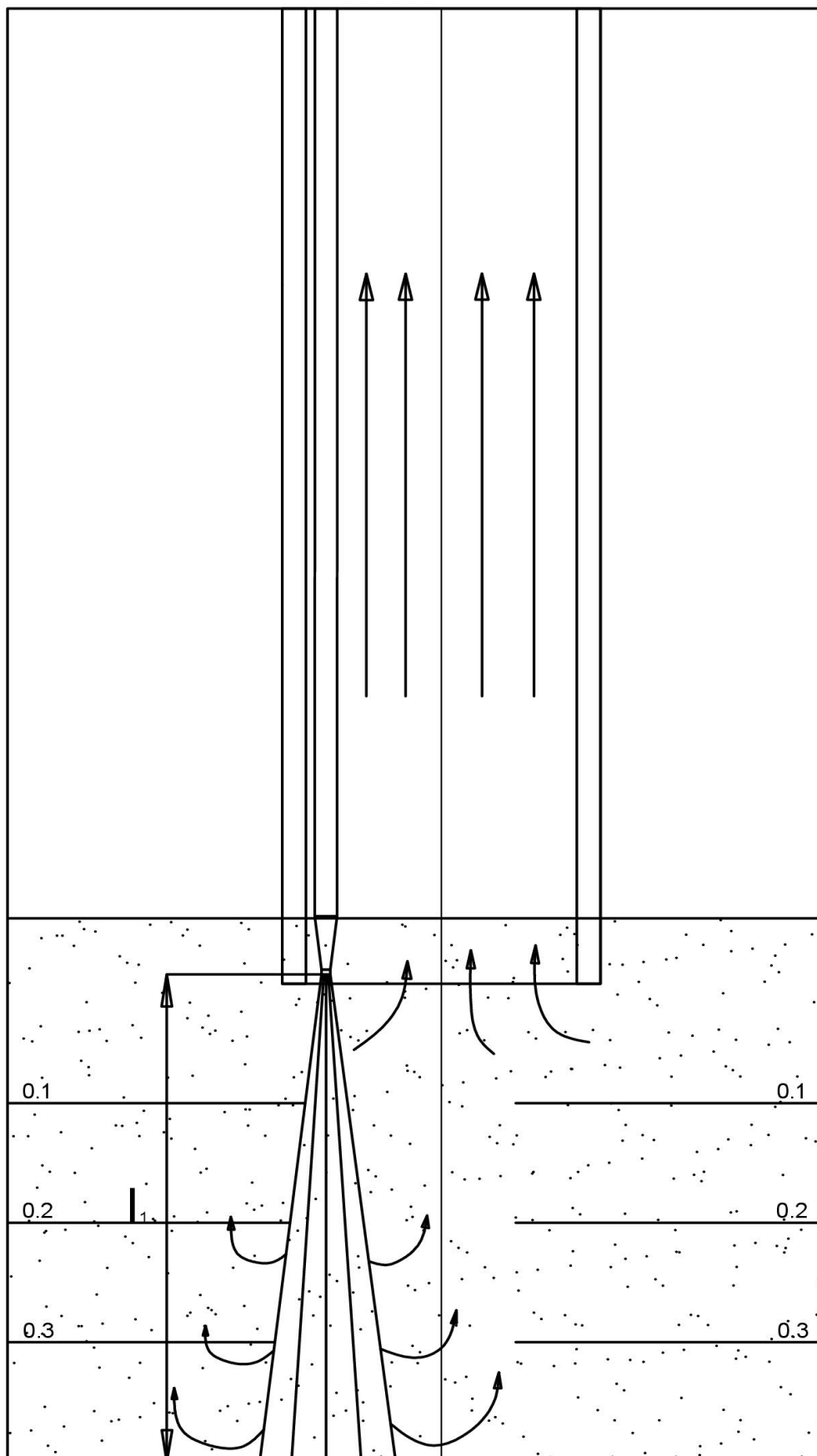


Рис. 14 Схема струйного гидровзвешивания встречным потоком.

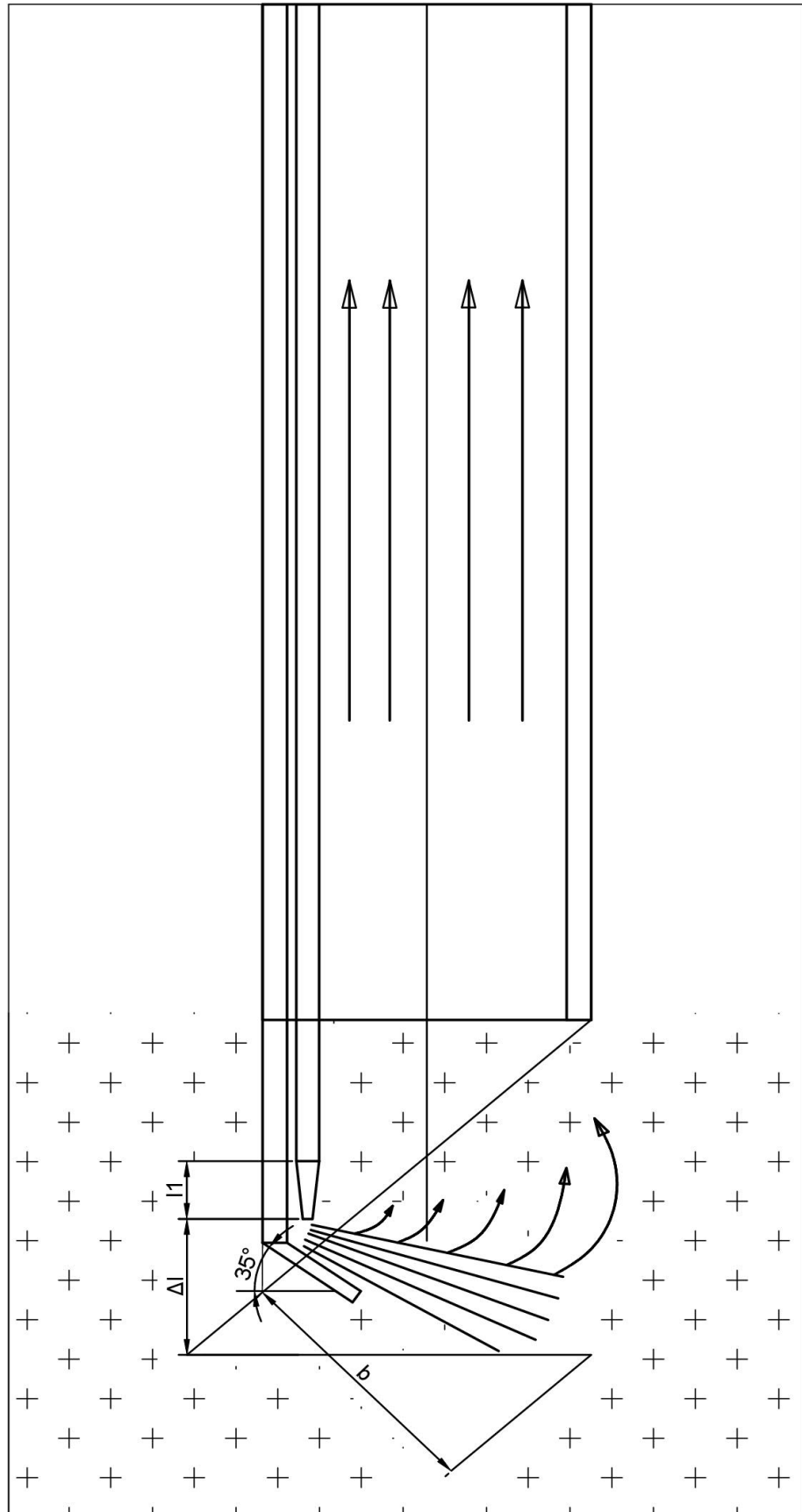


Рис. 15 Схема всасывания с отклонением струйного гидровзвешивающего потока.

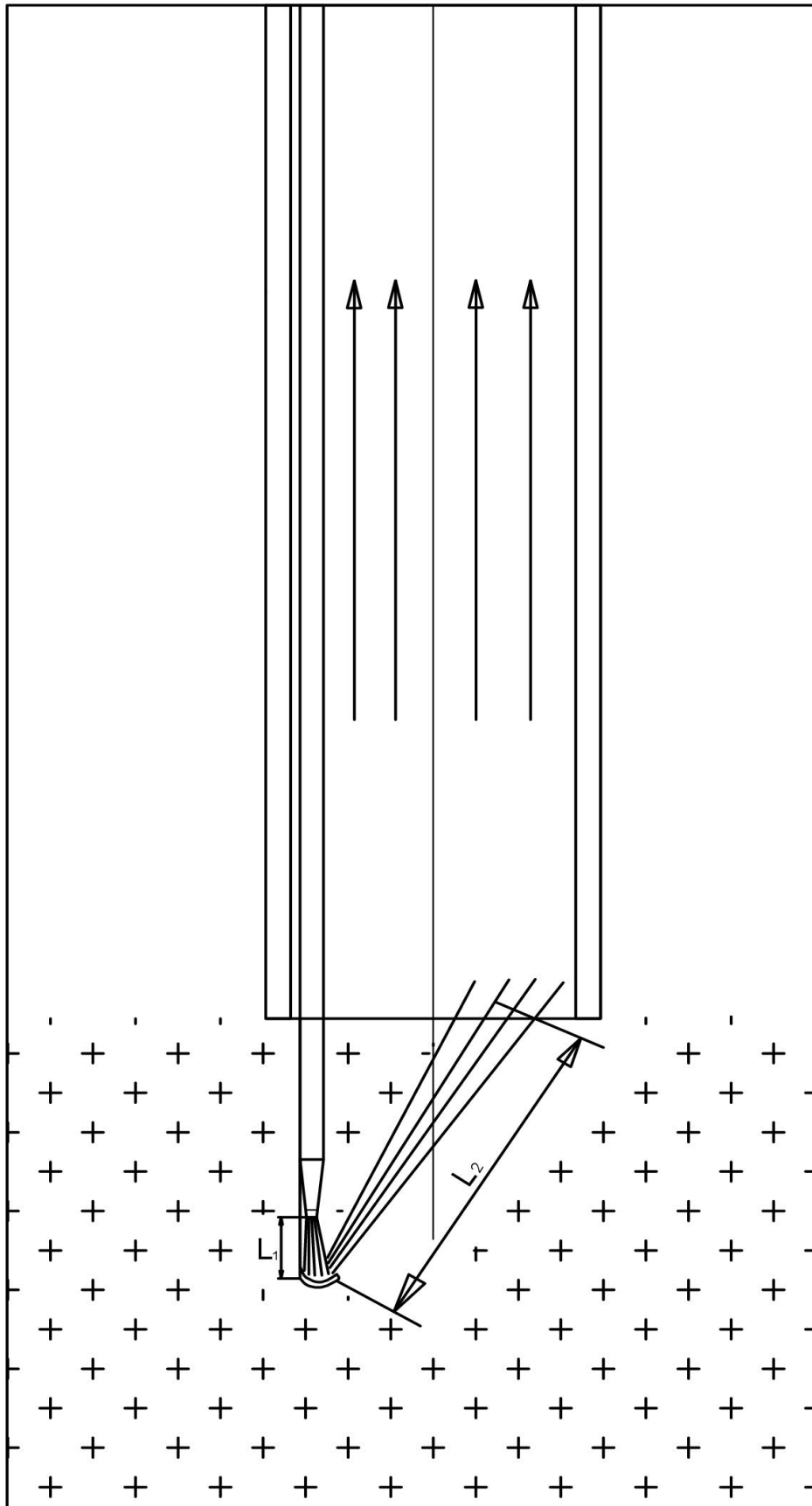


Рис. 16 Схема всасывания с обратным поворотом струйного гидровзвешивающего потока.

Как видно, установка по своим расходно-геометрическим характеристикам соответствовала натурной, при сопряжении бьефов по отброшенной (отражённой) струи под динамическим воздействием струи размывается основание нижнего бьефа с образованием воронки размыва.

Ударяясь о дно воронки струя отклоняется вверх приблизительно под тем углом, под которым падающая струя наклонена к горизонту и из ниспадающей превращается в восходящую (рис.17)

Для установления закономерностей изменение ниспадающих струй, а также струй, восходящих от дна до горизонта воды в нижнем бьефе, были замерены скорости как по оси, так и в поперечном сечении при помощи многоканальных, дублирующих друг друга приборов: измерительных батарей, динамических трубок и скоростной киносъёмки.

Автором, в условиях крупномасштабного эксперимента удалось уточнить ранее предложенные зависимости [60] и установить новые закономерности растекания ниспадающих и восходящих струй с достаточно удовлетворительным совпадением с опытом.

Так, зависимость изменения максимальной осевой скорости ниспадающей струи определяется как

$$V_{oc} = \frac{V_0}{0.9 + 0.09 \frac{l_1}{d_0} + 0.12 \frac{l_2}{d_0}} \quad (54)$$

Для восходящей (отражённой) струи, зависимость изменения максимальных осевых скоростей определяется следующим образом

$$V_{восх} = \frac{V_{oc}}{0,9 + 0,4 \left(\frac{Z}{D}\right)^2} \quad (55)$$

Где $V_0, V_{oc}, V_{восх}$ – соответственно начальная скорость истечения из насадки, скорость по оси нисходящей струи, а также по оси восходящей (отражённой) струи, м/с;

d_0 – начальный диаметр истечения струи, м;

D – диаметр струи при её отражении от дна воронки размыва, м;

l_1, l_2 – соответственно, длина струи от выходного сечения струи до уровня песчаного дна и от уровня искомого дна до дна воронки размыва, м;

Z – текущая координата по оси восходящей (отражённой) струи от дна воронки размыва до выхода струи из водоёма.

Как указывают авторы, зависимость (54) и (55) хорошо согласуется с экспериментальными данными. Если, например, после завершения размыва, воронку заровнять на уровне её дна, основание вновь начнёт размываться (углубляться) до размеров той же воронки.

Проведёнными опытами также подтверждено, что осевые скорости V_{oc} существенно отличаются от отражённых V_{cp}

$$\frac{V_{oc}}{V_{cp}} = \eta = 1,5 \div 2,0 \quad (56)$$

Нижний предел этого получен при лабораторных опытах ($\eta = 1,5$), верхний ($\eta = 2,0$) – для полевых.

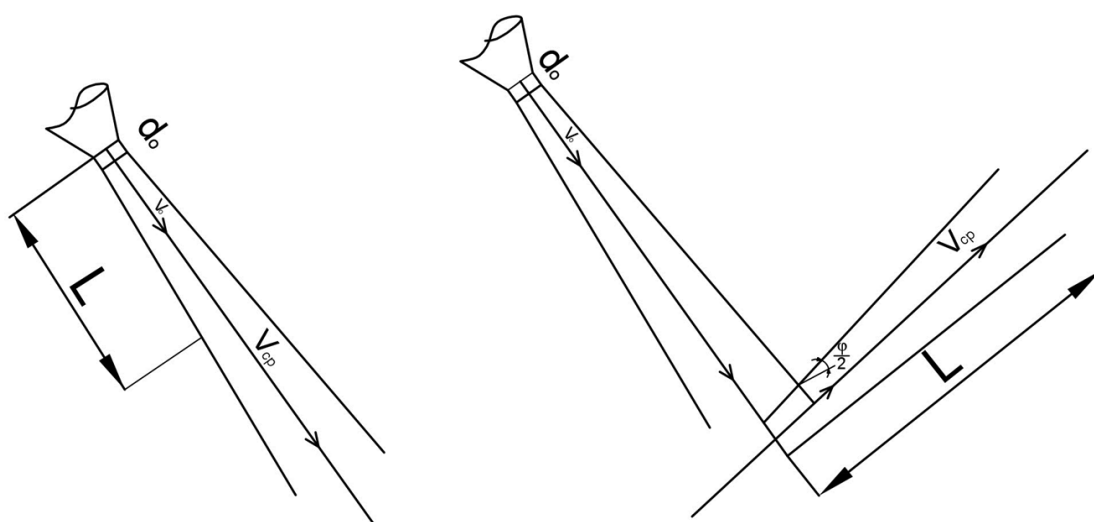


Рис. 17 Схемы распространения нисходящей и отражённой струй.

Полученные И. Е. Мирцхулавой и его учениками соотношение (56), подтверждает установленное нами ранее (таблица 5) выражение (23)

$$\frac{V_{oc}}{V_{cp}} = \frac{d_n}{d_0} = 2,41$$

Выводы.

1. Обосновано, что процесс гидророзлива затопленными струями при действующей технологии СГД на участках КМА практически не возможен при радиусе размыва более $0,5 \div 1,0$ м
2. Ввод воздуха в промежуточную секцию гидродобычного агрегата крайне неэффективен.
3. Выявлено, что формирование затопленной струи с приемлемой разрушающей способностью, возможно только при эксцентричном расположении рабочих коммуникаций гидродобычного агрегата, как по минимуму потерь напора в водоводе и увеличения производительности эрлифта, так и значительного снижения усилий необходимых для отклонения ствола гидромонитора.
4. Текущая средняя скорость по длине затопленной гидромониторной струи аналитически связана с осевой через постоянный коэффициент, начальной скоростью и конечным диаметром её начального участка струи.
5. Гидравлическое рыхление (гидровзвешивание) горной массы вокруг всасывающего отверстия эффективно осуществлять через отдельный напорный водовод, механически не связанный с эрлифтным пульповодом. что возможно только при эксцентричном независимым расположением рабочих трубопроводов.
6. Текущая средняя и осевая скорость по длине затопленной гидромониторной струи соотносится как начальный диаметр к переходному, причем сумма коэффициентов в знаменателе искомого расчетного выражения должна быть равна единице.

ГЛАВА 3 АНАЛИЗ ОПЫТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОДЯНЫХ СТРУЙ В ВОДЕ И РАЗУПЛОТНЁННОЙ ГОРНОЙ МАССЕ.

3.1 Анализ опытных исследований распространения плоских струй в водной и разуплотнённой горной массе (песке).

Опытно-аналитические исследования учёных НИИ гидротехники и мелиорации аналитически преобразуем для условий гидровзвешивания горной массы при всасывании при СГД.

Полученные аналитические зависимости (54) и (55) преобразуем следующим образом. Зависимость изменения средней скорости:

- при перемещении в воде (преобразуя осевую скорость в среднюю через установленный нами коэффициент 0.41)

$$V_{cp} = V_0 \frac{1/2.41}{0.9 + 0.09 \frac{l_1}{d_0}} = V_0 \frac{0.41}{0.9 + 0.09 \frac{l_1}{d_0}} \quad (57)$$

- при перемещении в горной массе (песке)

$$V_{cp} = V_0 \frac{0.41}{0.9 + 0.12 \frac{l_2}{d_0}} \quad (58)$$

- при перемещении восходящей (отражённой) струи в горной массе

$$V_{cp} = V_0 \frac{0.41}{0.9 + 0.4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot (l_1 + l_2)}{d_0 + 0.43(l_1 + l_2)} \right)^2} \quad (59)$$

где: α – угол восхождения отражённой струи, град.

Примем

$$l_1 + l_2 = l_3 \quad (60)$$

Заметим, что выражение $d_0 + 0,43 \cdot l_3 = D$ соответствует диаметру струи у дна воронки размыва (в месте отражения струи), а по структуре выражению (9) для затопленной струи

$$d_x = D = d_0 + 2 \cdot tg \frac{\varphi}{2} \cdot l$$

Где $2 \cdot tg \frac{\varphi}{2} = 0,43$, а угол раскрытия струи $\varphi = 24^\circ 26'$, что соответствует исследованиям затопленных воздушных струй в воздухе (по Г.Н. Абрамовичу) [4]

Вернёмся к выражению (59) и преобразуем его следующим образом

$$V_{cp} = V_0 \frac{0.41}{0.9 + 0.4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot l_3}{d_0 + 0.43 \cdot l_3} \right)^2}$$

Или

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{0,9 + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l_3}{d_0}}{1 + 0,43 \frac{l_3}{d_0}} \right)^2} \quad (61)$$

Изменение средней скорости по длине отражённой струи (по И.Е. Мерцхулаве [60])

С учётом выражений (58)и (61)

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{\left[0,9 + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l_3}{d_0}}{1 + 0,43 \frac{l_3}{d_0}} \right)^2 \left(0,9 + 0,12 \frac{l}{d_0} \right) \right]} \quad (62)$$

Поскольку общее расчётное выражение И.Е. Мерцхулавы [60] структурно представлено в следующем виде:

$$V_{oc} = V_0 \frac{1}{0,9 + 0,09 \frac{l_1}{d_0} + 0,12 \frac{l_2}{d_0}} \quad (63)$$

где коэффициенты (в знаменателе) соответствуют; 0,9 – при движении струи в воздухе; 0,09 – при движении струи в воде; 0,12 – при движении струи в массе разуплотнённого твердого материала. В целом, выражение (63) соответствует закономерности изменения осевой скорости при распространении струи в воздушной среде, в водной и в горной массе.

Исходя из этого изменения средней скорости в массе твёрдого для отражённой струи представим в виде

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{0,9 + 0,12 \frac{l}{d_0} + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l}{d_0}}{\left(1 + 0,43 \frac{l}{d_0} \right)} \right)^2} \quad (64)$$

Где коэффициент 0,41 определяется из соотношения

$$\frac{V_0}{V_{cp}} = 2,41, \text{ а } V_{cp} = \frac{V_0}{2,41} = 0,41$$

Расчёт по предлагаемой профессором Мирцхулавой И.Е. формуле (64) представлен в Таблице 8 и, по утверждению исследователей, соответствует опытным данным.

Таким образом, предлагаемая формула (57) для расчёта затопленной струи в воде (Таблица 8) проф. Мирцхулава И.Е. достаточно удовлетворительно соответствует значениям средней скорости падение по длине струи других исследователей (таблица 6, строка 6 и данным И.М. Коновалова – строка 2, В.А. Жученко - строка 3 и 5). Также удовлетворительное совпадение и с нашим расчётным выражением для переходного участка струи (строка 10 таблица 6).

Перемещение затопленной струи в горной массе (песка) с использованием расчётного выражения проф. Мирцхулавы И.Е. (58), также хорошо совпадает с данными В.А. Жученко (таблица 7, строка 1) и нашей формулой (Таблица 7, строка 3).

Исследование проф. Мирцхулавы И.Е. и его учеников по распространению отражённой струи в объёме горной массы по предлагаемому выражению (64) представлено в (таблице 8, строка 1).

Согласно структуре выражение (64), коэффициент 0,9 учитывающий движение струи в воде используется дважды в знаменателе формулы (64), 0,9 и $\left(0,9 + 0,12 \frac{l}{d_0}\right)$, что представлено в уточнённом виде

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{0,9 + 0,12 \frac{l}{d_0} + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l}{d_0}}{\left(1 + 0,43 \frac{l}{d_0}\right)} \right)^2} \quad (65)$$

Или выражение проф. Мирцхулавы И.Е. можно преобразовать по структуре

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{0,9 + 0,12 \frac{l}{d_0} + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot 2 \frac{l}{d_0}}{\left(1 + 0,43 \frac{l}{d_0}\right)} \right)^2} \quad (66)$$

Или по следующей структуре

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{1 + 0,12 \frac{l}{d_0} + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot 2 \frac{l}{d_0}}{\left(1 + 0,43 \frac{l}{d_0}\right)} \right)^2} \quad (67)$$

Сравнение выражений (66) и (67) с основной формулой проф. Мирцхулавы (62) (таблица 8) показывает, что искомая формула является только эмпирической, описывающая только опытные данные.

Выражения текущей скорости по длине отражённой струи

Таблица 8

№	Формула	Относительное расстояние $\frac{l}{d_0}$				Примечания
		5	10	15	20	
1	Мирцхулава И.Е. [60] $V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{\left[0,9 + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l}{d_0}}{1 + 0,43 \frac{l}{d_0}} \right)^2 \left(0,9 + 0,12 \frac{l}{d_0} \right) \right]}$	0,202	0,13	0,098	0,079	$\alpha = 60^\circ$
2	Автор $V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{\left[0,9 + 0,12 \frac{l}{d_0} + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l}{d_0}}{\left(1 + 0,43 \frac{l}{d_0} \right)} \right)^2 \right]}$	0,182	0,129	0,1047	0,089	$\alpha = 60^\circ$
3	Автор $V_{cp} = V_0 \frac{0,57}{1 + 0,365 \frac{l}{d_0}}$	0,202	0,129	0,088	0,0696	

Продолжение Таблицы 8

4	<p>Автор</p> $V_{cp} = V_0 \frac{0,41}{1 + 0,12 \frac{l}{d_0} + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l}{d_0}}{1 + 0,043 \frac{l}{d_0}} \right)^2}$	0,174	0,125	0,102	0,087	$\alpha = 60^\circ$
---	--	-------	-------	-------	-------	---------------------

3.2 Исследование аналитической закономерности перемещения затопленной струи в горной массе.

Рассмотрим струю, как поток с постоянным углом раскрытия, прямолинейными образующими и постоянным моментом количества движения по длине распространения струи. Автору удалось создать и структурно обосновать выражения для расчёта затопленной струи:

- в воде (выражение (24))

$$V_{\text{ср}} = V_0 \frac{1}{1 + 0,294 \cdot \frac{l}{d_0}}$$

- в массе твёрдого (выражение (39))

$$V_{\text{ср}} = V_0 \frac{1}{1 + 0,294 \frac{l}{d_0}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{\text{окр}}}}$$

Можно предположить, что отражённая струя является прямотекущая, но на основном участке под определённым углом изменяет своё направление (рис. 9)

$$V_{\text{ср}} = V_0 \frac{1}{1 + 2tg \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{l}{d_0}}$$

И с учётом полуугла раскрытия основного участка, а также распространение отражённой струи в твёрдой разуплотнённой массе (песке) получим

$$V_{cp} = V_0 \frac{1}{1 + 2tg10^{\circ}35' \frac{l}{d_0}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{окр}}}$$

Или при распространении в песке будем иметь

$$V_{cp} = V_0 \frac{0,57}{1 + 0,365 \cdot \frac{l}{d_0}} \quad (68)$$

Сравнение опытно-аналитических данных проф. И.Е. Мирцхулавы и его учеников (выражение (62)) и выражение автора (63) показывает достаточно хорошую сходимость (таблица 8 строки 1 и 3) при относительном расстоянии до $\frac{l}{d_0} = (5 \div 20)$.

Таким образом для расчёта текущих скоростей отражённой струи можно рекомендовать формулу (68) как аналитически обоснованную и значительно более простую, чем эмпирическое выражение Мирцхулавы И. Е. (62)

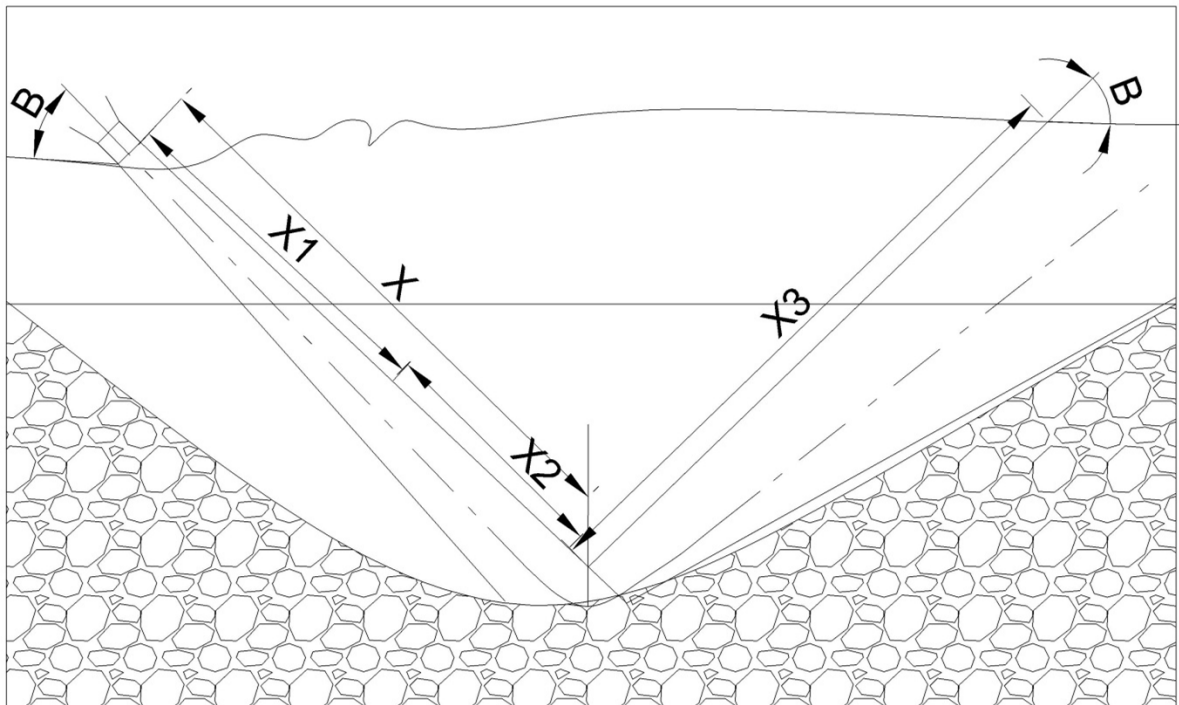


Рис. 18 Схема развития отражённой струи.

Выводы.

1. Текущая скорость распространения затопленной струи в горной массе пропорциональна корню квадратному из соотношения плотностей жидкости напорной струи и окружающей среды.
2. Аналитически расчетные выражения текущей скорости затопленной струи, распространяющейся в горной массе структурно подобны, и имеют конкретный корректирующий коэффициент для начального, переходного и основного участков.

ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ГИДРОВЗВЕШИВАНИЯ ЧАСТИЦ ГОРНОЙ МАССЫ В ПЛОСКОСТИ ВСАСЫВАНИЯ.

4.1 Исследование аналитической связи текущей скорости гидравлического потока в струе и гидравлической крупности твёрдого.

Как указывалось ранее, затопленные струи, распространяющиеся в объёме горной массы создают различную степень разуплотнения этой горной массы, связанную с размером кусков и плотностью твёрдого. Т.е. скорость потока в струе непосредственно связана с гидравлической крупностью кусков, составляющих эту горную массу (песка).

Если исходить из общеизвестного выражения Реттингера Р.С. [109]

$$u_{св} = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \frac{g d_T}{\psi}} \quad (69)$$

то эта формула справедлива только для крупных частиц ($d_T = 1 \div 2$ мм) и значительных скоростей падения. Исходя из этого, параметр режима падения частиц, число Рейнольдса должно составлять $R_0 = 2000$, при котором коэффициент лобового сопротивления постоянен и равен $\psi = 0,45$. Для частиц диаметром менее $d_T \leq 1 \div 2$ мм формулу (69) использовать нельзя.

Таким образом, если известна скорость струи по длине её распространения, то можно оценить гидровзвешиваемую скорость струи. Т.е. оценивается необходимая степень разжижения горной массы, таким образом, необходимое расстояние до плоскости всасывания эрлифта (в частности) в соответствии с его производительностью по твёрдому.

В связи с этим, выражение (69) представим с учётом гидравлической крупности в стеснённых условиях распространение струи и формы кусков горной массы.

$$u_{ст} = (1 - S)^n * K \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_r - \rho_0}{\rho_0} \frac{gd}{\psi}} \quad (70)$$

Где S – объемное содержание твердого в горной массе;

K – коэффициент, учитывающий форму части;

n – показатель стеснённости.

Альтшуль А.Д. [6] установил аналитическое выражение для расчета коэффициента лобового сопротивления как сумму коэффициентов падения частиц при ламинарном режиме и турбулентном.

$$\psi = \frac{24}{Re} + 0.67\sqrt{\psi} \quad (71)$$

Приведём это выражение к квадратному уравнению и решим его

$$\psi - 0,67\sqrt{\psi} - \frac{24}{Re} = 0$$

$$\sqrt{\psi} = 0.335 \pm \sqrt{0.112 + \frac{24}{Re}}$$

Подходит только положительный корень

$$\psi = 0,112 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{24}{Re}} \right)^2 \quad (72)$$

Возвратимся к выражению (70) и алгебраически преобразуем из выражения (72) в выражение (70)

$$0,29 \frac{U}{\sqrt{gda}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{214}{Re}} \right)^2 = (1 - S)^n \cdot K$$

Или

$$0,29 \frac{U}{\sqrt{\frac{agd \cdot d^2}{V^2 \cdot d^2} \cdot U^2}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{214}{Re}} \right)^2 = (1 - S)^n \cdot K$$

Или

$$0,29 \frac{Re}{\sqrt{Ar}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{214}{Re}} \right) = (1 - S)^n \cdot K \quad (73)$$

где Ar – параметр Архимеда

$$Ar = \frac{gd^3}{\nu^2} a$$

Re – число Рейнольдса $Re = \frac{Ud}{\nu}$

a – относительный объемный вес

твердого $a = \frac{\rho_r - \rho_0}{\rho_0}$

Далее выражение(73) преобразуется следующим образом

$$\frac{Re}{\sqrt{Ar}} + \frac{Re}{\sqrt{Ar}} \sqrt{1 + \frac{214}{Re}} = 3,45 (1 - S)^n \cdot K \quad (74)$$

$$\frac{Re}{\sqrt{Ar}} + \sqrt{\frac{Re^2}{Ar} + \frac{214 \cdot Re}{Ar}} = 3,45 m^n \cdot K$$

$$\frac{Re^2}{Ar} + \frac{214Re}{Ar} = 11,9 \cdot (1 - S)^n \cdot K - 6,9 \cdot (1 - S)^n \cdot K \frac{Re}{\sqrt{Ar}} - \frac{Re^2}{Ar}$$

После упрощения и сокращения, получим

$$Re \left(\frac{214}{A_r} + \frac{6.9 \cdot (1 - S)^n \cdot K}{\sqrt{A_r}} \right) = 11.9 \cdot [(1 - S)^n \cdot K]^2 \quad (75)$$

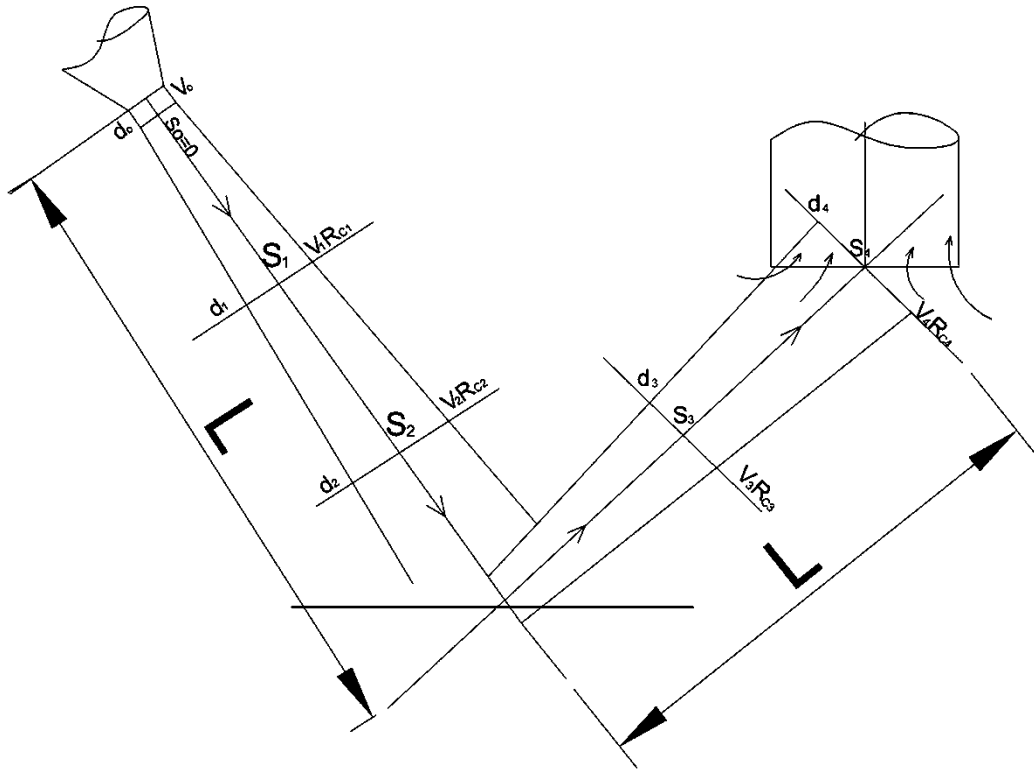


Рис. 19 Схема изменения объёмной концентрации гидровзвешиваемого твёрдого по длине струи.

Или

$$Re = \frac{11.9 \cdot [(1 - S)^n \cdot K]^2 \cdot A_r}{214 + 6.9 \cdot (1 - S)^n \cdot K \sqrt{A_r}}$$

Или, после группировки членов, получим следующую структуру выражения для числа Рейнольдса Re

$$R_e = \frac{A_r[(1 - S)^n \cdot K]^2}{18 + 0.581 \sqrt{A_r[(1 - S)^n \cdot K]^2}} \quad (76)$$

Получено выражение расчета числа Рейнольдса (а в последующем, расчета скорости падения частиц твердого в стесненных условиях), которая достаточна подобна известному выражению Розенбаум-Годес-Горошко [109]

$$R_e = \frac{A_r(1 - S)^{4.75}}{18 + 0.61 \sqrt{A_r \cdot (1 - S)^{4.75}}} \quad (77)$$

Сравнивая выражения (76), полученное автором и выражение Годеса (77) отметим:

- выражение (77) не учитывает форму частиц;
- фактически, выражение (77) может использоваться только при расчете скорости падения крупных частиц ($d_T > (2 \div 3)$), т.к. показатель степени (показатель стеснённости) можно определить следующим образом. Сравнивая выражения (76) и (77) отметим, что

$$[(1 - S)^n]^2 = (1 - S)^{4.75}$$

Или

$$(1 - S)^{2n} = (1 - S)^{4.75}$$

Поэтому

$2n=4.75$ и $n=2,375$ (этот показатель степени относится к расчету скорости падения только крупных частиц)

- коэффициент 0,61 не соответствует уточнённому коэффициенту 0,581

Расчет процесса гидровзвешивания водяной затопленной струи заключается в следующем

1. Определяется производительность эрлифта (с учетом крупности, скорости всасывания кусков твёрдого d_T и объёмной концентрации твёрдого во всасываемой гидросмеси S_0)
2. Определяется скорость падения частиц твердого заданного диаметра d_T в стесненных условиях несущей среды, объёмной концентрацией S_0 .
3. Оценивается объёмная концентрация горной массы по длине распространения затопленной струи.

При распространении затопленной струи (как соосной, так и отраженной) в горной массе, объёмная концентрация твердого в струе увеличивается: от нулевой – на выходе струи из насадки, до скорости струи, соответствующей плотной упаковки твердого. Дальнейшее состояние горной массы по длине струи соответствует режиму фильтрации при неподвижном состоянии горной массы.

4.2 Методика расчёта процесса гидровзвешивания частиц твёрдого в плоскости всасывания.

Изменение текущей средней скорости по длине затопленной струи, распространяющейся в воде и объёме разуплотнённого материала, как было установлено ранее определяется согласно выражению (78)

$$V_{oc} = V_0 \frac{0,41}{1 + 0,12 \frac{l}{d_0} + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l}{d_0}}{\left(1 + 0,43 \frac{l}{d_0}\right)} \right)^2} \quad (78)$$

Где $0,12 \frac{l}{d_0}$ – составляющая потерь средней скорости струи при спутном перемещении в объёме горной массы;

$$0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l}{d_0}}{\left(1 + 0,43 \frac{l}{d_0}\right)} \right)^2 -$$

составляющая потерь средней скорости струи при её отражении в объёме горной массы;

$\left(1 + 0,43 \frac{l}{d_0}\right)$ – относительный диаметр струи при её отражении;

$\frac{l}{d_0}$ – относительная общая длина струи (спутная и отражённая);

α – угол отражения струи (равен около $\alpha = 60^\circ$)

0,41 – коэффициент перевода осевой скорости струи в среднюю;

l – длина струи, м;

d_0 – диаметр насадки, м;

Для создания режима гидровзвешивания горной массы в плоскости всасывания средняя скорость отражённой струи должна соответствовать гидравлической крупности средневзвешенного куска, способного вертикальным потоком транспортироваться эрлифтом

$$V_{cp} = u_{ст} \quad (79)$$

где $u_{ст}$ – гидравлическая крупность в условиях стеснённого падения частиц, м/с

Стеснённое падение рассматривается по выражению (70), с учётом того, что объёмная концентрация твёрдого в объёме всасываемой эрлифтом гидросмеси составляет $S=0,1$.

$$V_{cp} = u_{ст} = (1 - S)^n \cdot K \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_r - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{gd}{\psi}} \quad (80)$$

Откуда средневзвешенный диаметр твёрдого, взвешиваемого струёй в плоскости всасывания эрлифта (при значении коэффициента формы частиц $k=0,8$)

$$d_T = \frac{(k \cdot V_{cp})^2}{(1 - S)^{2 \cdot n} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{g}{\psi}} \quad (81)$$

Порядок расчёта процесса гидровзвешивания горной массы при всасывании эрлифтом “из-под слоя” (при полном завале горной массой гидродобычного агрегата).

1. Скорость струи из насадки

$$V_0 = \varphi \sqrt{2gH_0} = 0,95 \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 40} = 26,6 \text{ м/с} \quad (82)$$

Где φ – коэффициент скорости струи ($\varphi=0,95$);

H_0 – рабочий напор на насадке (при принятом давлении $P_0=4$ ат., $H_0=40$ м. вод. ст.), м.вод.ст

2. Расход воды через рабочую насадку

$$Q_0 = V_0 \cdot \omega_0 = 26,6 \cdot 0,765 \cdot d_0^2 \cdot 3600 = 120,3 \text{ м}^3/\text{с}$$

3. Относительное расстояние отражённой струи до плоскости всасывания эрлифта

$$\frac{l}{d_0} = 5$$

4. Абсолютное расстояние отражённой струи до плоскости всасывания эрлифта (при диаметре рабочей насадки $d_0=40$ мм)

$$l = 5 \cdot d_0 = 5 \cdot 40 = 200 \text{ мм}$$

5. Угол отражения струи составляет $\alpha = 60^\circ$

6. Средняя скорость отражённой струи в плоскости всасывания (по выражению 67)

$$V_{\text{cp}} = V_0 \cdot k_n \frac{0,41}{1 + 0,12 \frac{l}{d_0} + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot \frac{l}{d_0}}{\left(1 + 0,43 \frac{l}{d_0}\right)} \right)^2}$$

Или в числовых единицах

$$V_{\text{cp}} = 26,6 \cdot 0,8 \frac{0,41}{1 + 0,12 \cdot 5 + 0,4 \left(\frac{\sin 60^\circ \cdot 5}{(1 + 0,43 \cdot 5)} \right)^2} = 1,34 \text{ м/с}$$

7. Скорость стеснённого падения средневзвешенной частицы твёрдого (по выражению 65)

$$V_{\text{cp}} = u_{\text{ст}} = (1 - 0,1)^{2,39} \cdot \sqrt{\frac{4}{3} \frac{3600 - 1000}{1000} \cdot \frac{9,8 \cdot d_{\text{T}}}{0,45}}$$

8. Максимальный диаметр частицы твёрдого, взвешиваемый струёй в плоскости всасывания эрлифта (при объёмной концентрации твёрдого во всасываемой гидросмеси $S=0.1$, плотности руды $\rho_{\text{T}}=3600$ кг/м³,

показателе стеснённости $n=2,39$ и коэффициенте лобового сопротивления для частиц $d_T > 2$ мм, $\psi = 0,45$)

$$d_T = \frac{V_{cp}^2}{(1 - S)^{2 \cdot n} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{g}{\psi}}$$

Или в числовых единицах

$$d_T = \frac{1,34^2}{(0,9)^{2 \cdot 2,39} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{3600 - 1000}{1000} \cdot \frac{9,8}{0,45}} = 0,0393 \text{ м} = 39,3 \text{ мм}$$

В прилагаемой Таблице 9 представлены результаты расчётов гидровзвешивающей способности спутной и отражённой струи для следующих условий:

- рабочее давление на насадке $P_0 = 2$ ат; 4 ат; 5 ат; 7 ат.
- длина отражённой струи изменяется $l = 150 \div 800$ мм;
- расход струи $U_0 = 48 \div 247$ м³/с (строка 6, таблица 9)
- скорость струи $V_0 = 18,8 \div 35$ м/с

Анализ результатов расчётов показывает, что гидровзвешивающая способность отражённой струи зависит как от диаметра насадки, так и от подаваемого давления (строки 1, 2 и 10). Причём на скорость проникновения в объём твёрдого материала влияет давление воды на насадке (строка 5, 15 и 23), а на величину внедрения струи связана с диаметром насадки: чем больше диаметр насадки тем глубже внедряется струя в разуплотнённую массу (строка 2,12,10 и 23).

Следует заметить, что средневзвешенный диаметр твёрдого, взвешиваемый струёй, может иметь достаточно широкий диапазон значений – от 12,2 мм (при $d_0 = 30$ мм и $P_0 = 2$ ат) до 134 мм (при $d_0 = 60$ мм и $P_0 = 7$ ат). А по выражению проф. Мирцхулавы И.Е., гидровзвешиваемый кусок

твёрдого может быть более 600 мм в диаметре что, по нашему мнению, маловероятно.

С другой стороны (согласно данным таблицы 9), чем большего размера гидровзвешиваемые куски твёрдого, тем большую энергию струйного потока необходимо затратить, т.е. тем больший расход потока поступает к плоскости всасывания (от 48 м³/ч до 332 м³/ч). При этом, возникает ряд технологических вопросов: рассчитан ли эрлифтный подъём на такую производительность с одной стороны и на сколько велики потери напора, чтобы по конкретному размеру (диаметру) водовода доставить искомый расход воды к плоскости всасывания.

Таким образом, возникает необходимость решения гидравлической связи процесса гидровзвешивания со смежным технологическими процессами скважинной гидродобычи: возможность подачи напорной воды к насадкам (определённого диаметра и под необходимым давлением) и максимальной производительностью эрлифта по расходу гидросмеси.

Взвешивающая способность отражённой затопленной струи.

Таблица 9

1	Давление P, ат	2,0				3,0				5,0				5,0	
2	Диаметр d ₀ , мм	45				40				35					35
3	Относительное расстояние, $\frac{l}{d_0}$	3	5	10	15	3	5	10	15	3	5	10	15		7,5
4	Длина струи l, мм	135	225	450	675	120	200	400	600	105	175	350	525		263
5	Начальная скорость струи V ₀ , м/с	18,8	18,8	18,8	18,8	23	23	23	23	30	30	30	30		30
6	Расход струи Q ₀ , м ³ /с	107,7	107,7	107,7	107,7	104,2	104,2	104,2	104,2	103	103	103	103		1,3
7	$V_{cp} = V_0 0,8 \frac{0,41}{1 + 0,12 \frac{l}{d_0} + 0,4 \left(\frac{\sin \alpha \cdot 2 \frac{l}{d_0}}{1 + 0,43 \frac{l}{d_0}} \right)^2}$	0,11	0,083	0,059	0,0496	0,11	0,083	0,059	0,0496	0,11	0,083	0,059	0,0496	$\alpha=50^0$	0,0675
		0,096	0,0709	0,0507	0,0428	0,096	0,0709	0,0502	0,0428	0,096	0,0709	0,0507	0,0428	$\alpha=60^0$	0,0577
8	Средняя скорость струи, м/с	2,07	1,56	1,11	0,932	2,53	1,91	1,36	1,14	3,3	2,49	1,57	1,49	$\alpha=50^0$	2,03
		1,8	1,33	0,95	0,8	2,21	1,63	1,17	0,97	2,68	2,13	1,52	1,28	$\alpha=60^0$	1,73

Продолжение таблицы 9

9	Диаметр твёрдого d_T $= \frac{V_{cp}^2}{(1 - 0,1)^{2 \cdot 2,39} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{3600 - 1000}{1000} \cdot \frac{9,8}{0,45}} \cdot 10^3$	94	53	27	19	140	80	40	28,5	238	136	54	48,6	$\alpha=50^0$	44,4
		71	39	19,8	14	107	58	30	20,6	182	99	51	35,9	$\alpha=60^0$	37,9
10	Мощность струи $W = \frac{Q \cdot H}{102 \cdot 0,65}$	32					47							78	

Выводы.

1. Процесс гидровзвешивания горной массы затопленной гидромониторной струей непосредственно связан с гидравлической крупностью кусков, составляющих эту горную массу (песка).
2. Установление закономерности изменения текущей скорости по длине гидромониторной струи позволяет оценить её гидровзвешиваемую способность.
3. Получено аналитическое выражения расчёта гидравлической крупности для всего диапазона чисел Рейнольдса, т.е. для ламинарного и турбулентного режимов движения.
4. Разработана методика расчёта процесса гидровзвешивания частиц горной массы в плоскости всасывания с учётом производительности подъемного аппарата (эрлифта), объёмной концентрации всасываемого потока и гидравлической крупности горной массы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований, содержится новое решение задачи, заключающейся в усовершенствовании технологии скважинной гидродобычи, включающей опытные зависимости при эксплуатации технологических скважин, в обосновании и оптимизации работы затопленных спутных и отраженных струй при гидровзвешивании горной массы в плоскости всасывания, что имеет существенное значение для развития физико-химической геотехнологии в горной и строительных отраслях промышленности.

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Обосновано, что процесс гидроразмыва затопленными струями при действующей технологии СГД на участках КМА практически не возможен при радиусе размыва более $0,5 \div 1,0$ м.

2. Ввод воздуха в промежуточную секцию гидродобычного агрегата крайне неэффективен.

3. Выявлено, что формирование затопленной струи с приемлемой разрушающей способностью, возможно только при эксцентричном расположении рабочих коммуникаций гидродобычного агрегата, как по минимуму потерь напора в водоводе и увеличения производительности эрлифта, так и значительного снижения усилий необходимых для отклонения ствола гидромонитора.

4. Текущая средняя скорость по длине затопленной гидромониторной струи аналитически связана с осевой через постоянный коэффициент, начальной скоростью и конечным диаметром её начального участка струи.

5. Гидравлическое рыхление (гидровзвешивание) горной массы вокруг всасывающего отверстия эффективно осуществлять через отдельный напорный водовод, механически не связанный с эрлифтным пульповодом, что возможно только при эксцентричном независимом расположении рабочих трубопроводов.

6. Текущая средняя и осевая скорость по длине затопленной гидромониторной струи соотносится как начальный диаметр к переходному, причем сумма коэффициентов в знаменателе искомого расчетного выражения должна быть равна единице.

7. Текущая скорость распространения затопленной струи в горной массе пропорциональна корню квадратному из соотношения плотностей жидкости напорной струи и окружающей среды.

8. Аналитически расчетные выражения текущей скорости затопленной струи, распространяющейся в горной массе структурно подобны, и имеют конкретный корректирующий коэффициент для начального, переходного и основного участков.

9. Процесс гидровзвешивания горной массы затопленной гидромониторной струей непосредственно связан с гидравлической крупностью кусков, составляющих эту горную массу (песка).

10. Установление закономерности изменения текущей скорости по длине гидромониторной струи позволяет оценить её гидровзвешиваемую способность.

11. Получено аналитическое выражения расчёта гидравлической крупности для всего диапазона чисел Рейнольдса, т.е. для ламинарного и турбулентного режимов движения.

12. Разработана методика расчёта процесса гидровзвешивания частиц горной массы в плоскости всасывания с учётом производительности подъемного аппарата (эрлифта), объёмной концентрации всасываемого потока и гидравлической крупности горной массы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов., Госэнергоиздат, 1948, с.282
2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй., М. Наука, 1986.
3. Абрамович Г.Н. Аэродинамика потока в открытой рабочей части аэродинамической трубы. Тр. ЦАГИ, 1935, №223, с.187
4. Абрамович Г.Н. Теория свободной струи и её приложения. Тр. ЦАГИ, 1936, №293, с.104.
5. Антонычев М. Я., Нагирняк Ф. И. Аналитические и экспериментальные исследования поведения минеральных зерен в процессах классификации в водной среде, Тр. Ин-та Уралмеханобр. Вып. 15. -1969, с. 118-211.
6. Альтшуль А.Д., Киселёв П.Г. Гидравлика и аэродинамика М.: Стройиздат, 1975. с.326
7. Аренс В.Ж., Исмагилов Б.В., Шпакин Д.Н. Скважинная гидродобыча твёрдых полезных ископаемых М.: Недра, 1980, с.228
8. Аренс В.Ж. Геотехнология М.: Недра, 1970, с.284
9. Аренс В.Ж. и др. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых М.: "Горная книга", 2007,с.291
10. Аренс В.Ж. и др. Физико-химическая геотехнология. М.: МГГУ, 2010. с.703
11. Абрамович Г.Н. и др. Турбулентное смещение газовых струй. М.: Наука, 1972, с.272
12. Аренс В.Ж., Брюховецкий О.С., Хчеян Г.Х. Скважинная гидродобыча угла. М.: 1993, с.139.
13. Бабичев Н.И. Проектирование геотехнологических комплексов. Учебное пособие М.: МГРИ, 1985,с.77
14. Бабичев Н.И. Технология скважиной гидродобычи полезных ископаемых. МГРИ, М.: 1981, с. 89.
15. Бай-Ши-И Теория струй. М.: Физматиз, 1960, с.326.

16. Бай-Ши-И Теория струй М.: Физмат, 1960, с.143
17. Биркгоф Г. Сарантонелло Э. Струи, следы, каверны. М.: Мир, 1964, с.466.
18. Батурин В.В. Основы промышленной вентиляции М.: Профиздат, 1990, с.448.
19. Винда Е.В. Всасывающее устройство эрлифтных гидроподъемов. Сб. Разработка месторождений полезных ископаемых. Киев, вып. V, 1965, с. 48-56.
20. Верещагин Л.Ф., Семерчан А.А., Секоян С.С. К вопросу о распаде высокоскоростной водяной струи ЖТФ, 1959, XXIX, № 1, с. 45-50
21. Воропаев С.И. Теория автомодельного развития струи в однородной по плотности жидкости. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. т. 21 №12, 1985, с.1290-1294.
22. Вулис Л.А. Кашкаров В.А. Теория струй вязкой жидкости. М.: Наука, 1965, с.431
23. Великанов М.А. Русловой процесс (основы теории) М.: Физматиздат, 1958, с.394.
24. Гарбуз Г.Л. Исследование взаимодействия высоконапорной струи воды с угольным массивом при целевой схеме разрушения. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. М.: 1975
25. Гиневский М.А. Теория турбулентных струй и следов. М.: Машиностроение, 1969, с.400.
26. Гейер В.Г., Груба В.И. Расчёты нефилтрованных потоков при разбутовке всасывающего устройства эрлифта, углесоса и выемка твердого материала из питателя . Сб. Разработка месторождений полезных ископаемых., Киев вып. V, 1965, с.6-12.
27. Гейер В.Г., Груба В.И., Акрамов А.А. Условия подобия движения материала в камерных питателях. Сб. Гидравлическая добыча угля., 1964, вып. 17(5), с.64-69.
28. Груба В.И. Всасывающие устройства гидротранспортных установок. Тр. ДПИ, вып.62, 1961, с.40-59.

29. Груба В.И. Исследование всасывающей системы гидротранспортных установок. Тр. ДПИ, вып. 62, 1961, с.40-59.
30. Гольдштик М.А., Яворский Н.И. О затопленных струях. Прикладная математика и механика., вып. 4, 1984, с. 950-956.
31. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости М.: Наука, 1979, с.536
32. Дидебулидзе В.М. Теория и практика дождевальных струй Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Тбилиси, 1940
33. Журавский А.М. Основные задачи теории разрушения угля струёй воды Записки ЛГИ, т. XVI, вып. I, М.: Госгоптехиздат, 1959, с.89-96
34. Исмагилов Б.В. Исследование технологии гидравлического разрушения фосфорной руды при подземной разработке через скважины. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук М.: 1974
35. Ищук И.Б. Исследование способа ослабления угольного массива нагнетанием воды в пласт. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук М.: 1962
36. Казанцев Е.И. Исследование свободных затопленных струй. Тр. Днепропетровского горного института, т.31, 1954, с.18-24.
37. Коновалов И.М. Гидромониторные суда. Речиздат, 1941, с.254.
38. Кочергина А.В. Зависимость производительности гидромонитора и удельного расхода воды от класса пород, высоты забоя, напора воды и уклона плотика. Тр. ЦНИГРИ, вып. 36, 1960, с.56-62.
39. Кузьмин И.А., Гарбуз Г.Д., Брунс С.А. О взаимодействии струи воды и горного массива. Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского, вып. 81, 1971, с.43-51.
40. Кузьмин И.А., Брунс С.А., Гарбуз Г.П. О разрушении угля и горных пород струёй воды. Доклад АН СССР, т.204 №5 с.51-48
41. Курылёв А.И. Исследование размыва и качества очистной выемки при скважинной гидродобыче золота из мёрзлых россыпей месторождений. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук М.: 1978

- 42.Кравченко А.А. Экспериментальные исследования гидродобычи угля на гидрошахтах Донбасса. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, Донецк, 1962.
- 43.Кашкаров В.П. Некоторые точные решения в теории струй несжимаемой жидкости. Издательство АН Каз ССР, Алма-Ата, 1957
- 44.Коробко В.И. Теория неавтономных струй вязкой жидкости. Издательство Саратовского университета, Саратов, 1977, с.221.
- 45.Коровкин В.И., Соковишин Ю.А. Некоторые задачи теории вязких струй. Журнал прикладной механики и технической физики. №2, 1984, с.27-34.
- 46.Климентов А.Н. Всасывающая способность и оптимальный расход грунтового насоса. Путевые работы на реках. М.: 1956, с.17-25.
- 47.Климентов А.Н. К вопросу о выборе оптимального режима работы земснаряда. Гидротехническое строительство. 1952, №12, с.12-18.
- 48.Лахтин В.И. К расчету объемного веса гидросмеси при всасывании несвязных грунтов. Тр. ВНИИНеруд, вып. 31, 1971, с.66-76.
- 49.Лахтин В.И. Расчёт некоторых параметров гидросмеси при погружении всасывающей трубы в грунт. Гидротехническое строительство. 1972, №5, с.29-31.
- 50.Левин Б.М. Зависимость консистенции гидросмеси от параметров всасывания. Тр. МИИЖТ, вып. 107, 1960, с. 40-45.
- 51.Лезгинцев Г.М. Гидромеханизация разработки россыпей. М.: Наука, 1968, с.220.
- 52.Лобанов Д.П., Смолдырев А.Е. Гидромеханизация геологоразведочных и горных работ. М.: Недра, 1982, с.341
- 53.Лезгинцев Г.М. Гидромеханизированная разработка россыпей. М.: Наука, 1968, с.304
- 54.Ладыженская О.А. Математические вопросы динамики вязкой жидкости. М.: Наука, 1970, с.288
- 55.Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: 1987, с.840.

56. Лойцянский Л.Г. Радиально-щелевая струя в пространстве, затопленной той же жидкостью. Тр. ЛПИ Техническая гидромеханика №5, 1953, с.5-14.
57. Мадорский Л.С. Об оптимальности насыщения пульпы и устойчивости режима землесосной гидротранспортной установки. Новое на объектах предприятий гидро механизации. ч. 2, 1964, с.1241-1249.
58. Малухин Г.Н. Обоснование эффективных режимов приготовления всасывания пульпы. Геология и разведка. 1997, №5, с.126-131.
59. Методика расчёта гидромониторной выемки угля. ВНИИ Гидроуголь, 1969, с.86
60. Мирцхулава И.Е. Определение глубины размыва нисходящей струи. Работа нижних бьефов гидротехнических сооружений., 1969, с.52-66.
61. Мирцхулава И.Е. Основы физики и механики эрозии русел. М.: Сельхозиздат, с.234.
62. Мучник В.Г. Опыт подземной добычи угля гидравлическим способом и пути его совершенствования. М.: Углетехиздат, 1956, с.344.
63. Мартыненко О.Г., Коровкин В.Н., Сокохвишин Ю.О. Теория ламинарных вязких струй. Минск, Наука и техника, 1972, с.272.
64. Нурок Г.А. Гидромеханизация открытых разработок М.: Недра, 1970, с.583
65. Никонов Г.П. и др. Исследование гидравлического разрушения угля. М.: Наука, 1973, с.144.
66. Никонов Г.П. и др. Научные основы гидравлического разрушения угля. М.: Наука, 1973, с.144.
67. Нурок Г.А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ. М.: 1979, с.549.
68. Охрименко В.А., Куприн А.И., Ищук И.Г. Подземная гидродобыча угля. М.: Недра, 1974, с.312.
69. Петров Г.А. О растекании полностью затопленной осесимметричной струи. Электрические станции, 1962, №10, с.36-40.

- 70.Раздольный В.А. Исследование процессов всасывания и грунтозабора крупнозернистых несвязных грунтов земснарядами. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук М.: 1973
- 71.Разрушение углицементных блоков гидромеханическим способом. Сб. Технология добычи угля подземным способом, №8, 1974, с.206.
- 72.Роер Г.И. Методика расчёта экономических параметров струи при гидромониторных работах, Сб. материалов по технологической информации и обмену опытом ОБПИ, Главзолото, М.: вни. 52 , 1957, с.34-41.
- 73.Рощупкин Д.М. Разработка грунтов земснарядами на строительстве железных дорог Сибири. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. М.: 1967
- 74.Рощупкин Д.В. Разработка грунтов земснарядами Тр. ВНИИ транспортного строительства, вып. 68, 1969, с.124
- 75.Раздольный В.А. Исследование процессов всасывания и грунтозабора крупнозернистых несвязных грунтов земснарядами. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук М.: 1973
- 76.Румер Ю.О. Задача о затопленной струе. Прикладная математика и механика. т. 16, вып. 2, 1952, с.255-256.
- 77.Раздольный В.А. Некоторые данные исследования процесса всасывания гравийных грунтов. ВНИИНеруд. Добыча и переработка строительных материалов. вып.1, 1962, с.126-136.
- 78.Раздольный В.А. Лабораторные исследования всасывания крупнозернистого сыпучего грунта. НТС, ВНИИНеруд, 1960, №1, с.114-122.
- 79.Романенко Б.Э. Эффективные режимы и способы работы землесоса. Л.: Речной транспорт, 1954, с.189
- 80.Сизов Г.Н. Гидравлические расчёты специальных систем речных танкеров. Л.: Судостроение, 1976, с.214.

81. Сизов Г.Н. Судовые насосы и вспомогательные механизмы. М.: Транспорт, 1982, с. 232.
82. Сизов Г.Н. Струйные установки. М.: Энергоиздат, 1967, с.212.
83. Сизов Г.Н. Гидравлический массообмен. М.: Энергоиздат, 1968, с.221.
84. Силин Н.А., Коберник Г.Г. Режимы работы крупных землесосных снарядов. АН УССР, 1962, с.184.
85. Стариков А.С. Технологические процессы земснарядов. М.: Транспорт, 1989, с.223.
86. Тарыкин В.В. Исследование процессов грунтозабора песчано-гравийных пород эжекторно-землесосными снарядами. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Тольятти, 1977.
87. Теперин Н.И. Движение струи в массе жидкости. Тр.СНИИИР, вып.10, 1933, с 26-31.
88. Ухчин Б.В., Генвановский В.Г. Влияние экрана на гидравлические сопротивления всасывающих наконечников и распределения скоростей в них. Тр. ВНИИНеруд, вып.33, 1972, с. 75-83.
89. Фридман Б.Э. Транспортирование камней гидроэлеватором. Золотая промышленность, 1939, №10, с.15
90. Фридман Б.Э. Всасывание песка под водой / Гидротехническое строительство.- 1951.- №8.-С. 32-36.
91. Хрулёв А.С. Методика расчёта параметров выемки песков из маломощных погребённых россыпей способом СГД. Горный информационный бюллетень №9. М.: МГГУ, 2003. с.149-150
92. Хрулёв А.С. Технология отработки мощных многолетних россыпей способом СГД. Горный информационный аналитический бюллетень №22 . М.: МГГУ, 2002. с.125-127
93. Харин А.И. Разработка грунтов плавучими землесосными снарядами. М.: Стройиздат, 1966, с.236
94. Хныкин В.Ф. Разрушение горных пород гидромониторными струями на открытых разработках. М.: Наука, 1969, с.149.

95. Цяпко Н.Ф. Чапко А.М. Гидроотбойка угля на подземных работах. М.: Гостехиздат, 1960, с.241.
96. Цяпко Н.Ф. Современное состояние гидроотбойки угля в Кузбассе. Тр. ВНИИ Гидроугля, вып. XI, 1967, с.76-83.
97. Шепелев И.В. Основы расчёта воздушных завес, проточных струй и пористых фильтров. М.: Стройиздат, 1950, с.137.
98. Штукатуров К.М. Исследование гидромониторных струй при разработке угольных месторождений. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Свердловск, 1962.
99. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974, с.711.
100. Шамов Г.И. Речные наносы. Гидрометеиздат, 1984, с.234.
101. Юфин А.Л. Гидромеханика. М.: Стройиздат, 1974, с.223.
102. Яворский Н.И. Теория затопленных струй и следов. Новосибирск, 1998, с.342.
103. Ялтанец И.М. Гидромеханизированные и подводные горные работы, Москва, 2012, с.716
104. Куклин И.С., Штукатуров К.М. Исследование закономерности изменения истинной скорости и плотности гидромониторной струи по её длине. Горный журнал. 1962, №5.
105. Козодой А.К., Зубов А.В., Федоров К.Г. Промывка скважин при бурении. М.: Недра, 1963, с.141
106. Идельчик Е.И. Справочник по гидравлическим сопротивлениям М.: Машиностроение, 1975, с.559
107. Жученко В.А. Интенсификация выемки морских и континентальных отложений земснарядами при спутном взаимодействии разрыхляющих струй со всасывающим потоком. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Москва, 1990.
108. Шамов Б.И. Речные насосы. Гидрометеиздат 1954, с.294
109. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных методов обогащения. М.: Недра, 1975, с 295

110. Дробаденко В.П. Малухин Н.Г Освоение подводных континентальных, шельфовых и глубоководных месторождений. Москва, 2008, с.270
111. Смолдырев А.Е. Исследование и метод расчёта рудничного трубопроводного транспорта. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. М. 1961.