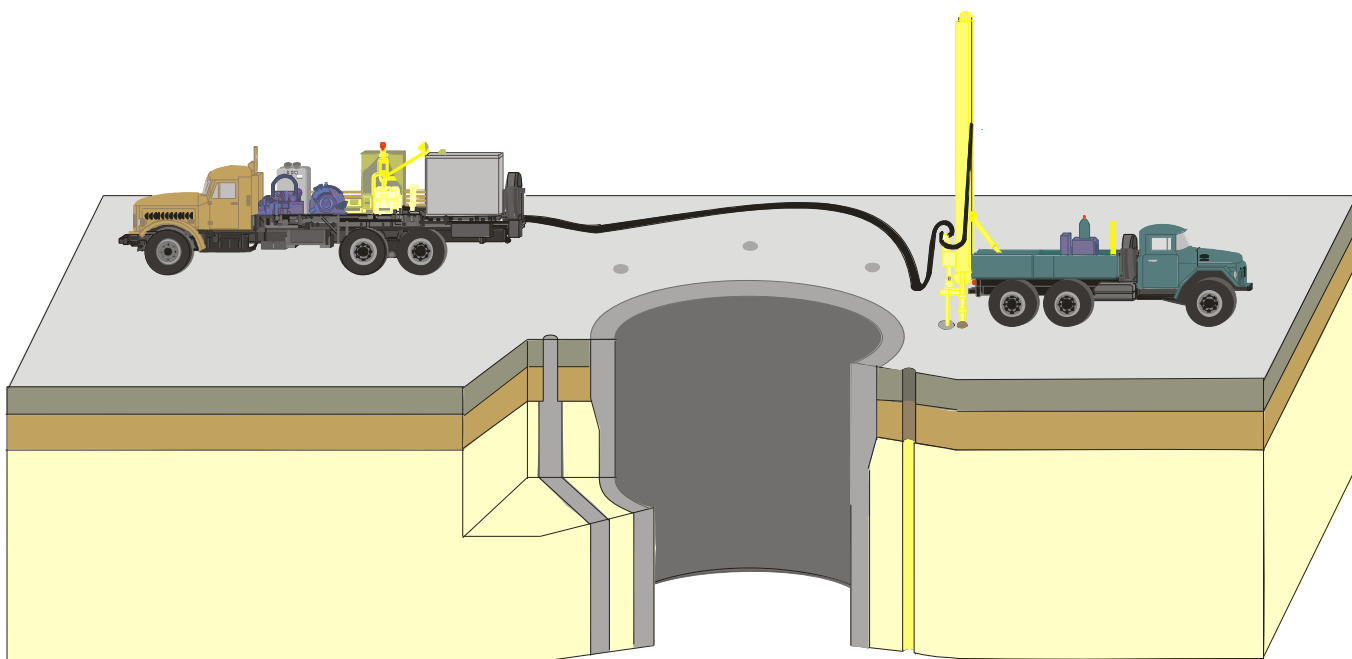


Владыко А.Б.

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАВЕС СТРУЯМИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ



Днепропетровск

2010

Министерство образования и науки Украины
Национальный горный университет

Владыко А.Б.



**ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАВЕС
СТРУЯМИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Днепропетровск

2010

УДК 622.267.023. 67: 624.138.4
ББК 38.58
В57

Рекомендовано до друку
Вченою радою Національного гірничого університету (м. Дніпропетровськ)
(протокол № 2 від 13 квітня 2010 г.)

Рецензенты:

Хапилова Н.С. – доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заведующий отделом аналитических методов механики горных
пород Института прикладной математики и механики НАН
Украины (г. Донецк)

Колесников В.Г. – доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заведующий отделом аэрогазодинамики Института геотехнической механики
НАН Украины (г. Днепропетровск)

В57 Владыко А.Б. Технология создание противofильтрационных завес
струями высокого давления: Монографія. – Д.: Національний гірничий університет,
2010. – 86 с.

ISBN 978-350-051-5

Монография посвящена вопросам создания противofильтрационных завес вокруг подземных выработок неглубокого заложения, подземных сооружений и отстойников вредных веществ. На основании теоретических и аналитических исследований обоснованы параметры создания противofильтрационных завес струями высокого давления закрепляемого раствора. Установлено, что геометрические параметры и физико-механические свойства создаваемых завес зависят от плотности закрепляющего раствора и плотности породы, ударной вязкости породы, давления струи закрепляющего раствора, диаметра сопла.

Для студентов, научно-педагогических и научно-технических сотрудников высших учебных заведений, научно-исследовательских институтов и проектных организаций, а также инженерно-технических работников строительных и горнорудных предприятий.

Монографія присвячена питанням створення протифільтраційних завіс навколо підземних виробок неглибокого закладення, підземних споруд і відстійників шкідливих речовин. На базі теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтовані технологічні параметри створення протифільтраційних завіс струменями високого тиску закріплюючого розчину. Установлено, що геометричні параметри і фізико-механічні властивості створюваної завіси залежать від густини закріплюючого розчину і щільності породи, що закріплюється, ударної в'язкості породи, тиску струменя закріплюючого розчину, діаметра сопла.

Для студентів, науково-педагогічних і науково-технічних співробітників вищих навчальних закладів, науково-дослідних інститутів та проектних організацій, а також інженерно-технічних робітників будівельних і гірничорудних підприємств.

© А.Б. Владыко, 2010

Лл. 35. Бібліогр.: 90 назв.
УДК 622.267.023. 67: 624.138.4
ББК 38.58
ISBN 978-350-051-5

ВВЕДЕНИЕ

Задача обеспечения необходимых условий эксплуатации подземных выработок в слабых обводненных породах имеет важное значение для развития народного хозяйства Украины. Наличие водопритоков усложняет эксплуатацию действующих горных выработок и подземных сооружений. Основными факторами, ухудшающими условия эксплуатации, являются высота напора подземных вод, проницаемость и мощность водовмещающих пород.

Одним из основных способов улучшения условий эксплуатации подземных сооружений является осушение. Однако во многих случаях осушение не позволяет обеспечить необходимые условия эксплуатации подземных объектов, а снижение уровня подземных вод наносит непоправимый вред экологии. Поэтому одним из основных путей ликвидации негативного влияния подземных вод на такие объекты является формирование вокруг них противofильтрационных завес.

Наибольшее распространение в 80-90 гг. как у нас, так и за рубежом получили такие способы сооружения противofильтрационных завес как химический, электрохимический и струйное закрепление пород. В условиях фильтрации напорных вод для сооружения противofильтрационных завес наиболее эффективным способом является использование высоконапорных струй закрепляющих растворов. Однако до настоящего времени исследователями не были установлены закономерности формирования таких завес в слабых обводненных породах.

В этой связи возникла необходимость в обосновании рациональных технологических параметров создания противofильтрационных завес с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов. Для этого нужно было выполнить комплекс исследований, включающих оценку влияния различных технологических параметров на толщину противofильтрационной завесы и глубину проникания закрепляющего раствора в дисперсные породы, установление фofильтрационных и прочностных свойств противofильтрационных завес в зависимости от количества закрепляющих растворов в единице объема, а также разработать технологию формирования противofильтрационных завес, обеспечивающую эксплуатацию объектов в слабых дисперсных породах.

Автор считает своим долгом выразить благодарность научному руководителю, доктору технических наук, профессору, Власову Сергею Федоровичу за помощь и ценные советы при выполнении работы. А также сотрудникам кафедр подземной разработки месторождений Национального горного университета, Государственного проектного института «Днепрометропроект», Института геотехнической механики Национальной академии наук Украины и инженерно-техническим работникам шахт, оказавшим помощь в проведении исследований.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ влияния различных факторов на эффективность формирования противодиффузионных завес

Для многих крупных городов Украины (Киев, Харьков, Днепропетровск и др.) характерны сложные гидрогеологические условия. Значительные водопритоки усложняют эксплуатацию подземных сооружений, таких как метрополитены, коллекторы и другие горные выработки.

В связи с этим одним из основных путей повышения эффективности освоения подземного пространства является предупреждение и ликвидация водопритоков путем формирования в дисперсных породах противодиффузионных завес.

По определению В.С. Бабушкина [1], противодиффузионные завесы – это водонепроницаемые и маловодопроницаемые сооружения, создаваемые вокруг подземных и гидротехнических сооружений с целью резкого сокращения притока воды в них.

Существует большое количество способов сооружения противодиффузионных завес. Наиболее часто используются такие способы, как "стена в грунте", химическое, физико-химическое и струйное закрепление пород.

Рассмотрим факторы, определяющие эффективность противодиффузионных завес (рис. 1.1). К природным факторам относятся: физико-механические свойства пород, их обводненность, агрессивность подземных вод, глубину залегания водоупорного слоя, мощность водовмещающих пород, температуру воздуха и породы.



Рис. 1.1. Факторы, определяющие эффективность противодиффузионных завес

Физико-механические свойства зависят от гранулометрического и минерального состава закрепляемых пород. Наибольшей эффективностью обладают завесы, сооружаемые в галечниках и крупнозернистых песках. При этом значительно лучше сцепление закрепляющего раствора с породой в крупнозернистых песках. Большие поры позволяют использовать закрепляющие растворы большей плотности [2].

По данным В.Д. Бабушкина [1], при заглублении завесы на 99% мощности водоносного пласта отмечается двукратное сокращение притока воды. Заглубление завесы на 95% мощности пласта позволяет сократить приток только на 25%. Поэтому для эффективной защиты от притока подземных вод завеса должна быть доведена до водоупорного горизонта или в достаточной степени заглублена в грунт с низкими фильтрационными свойствами. Также с увеличением мощности водовмещающих пород увеличивается расход закрепляющих растворов, усложняется технология сооружения завесы. Поэтому мощность водоносного горизонта значительно влияет на технико-экономические показатели строительства защитных завес.

Продолжительность эксплуатации противοfiltrационных завес определяется их агрессивной стойкостью по отношению к подземным водам. На агрессивность подземных вод влияют: химический состав пород, наличие в них сульфидных и сульфатных включений, степень метаморфизма пород, время соприкосновения подземных вод с породами [3, 4].

В шахтах происходит окисление воды. Л.С Докукин и Л.С Докукина [5] доказывают, что благоприятными условиями образования кислых вод являются: наличие повышенного содержания серы в угольном пласте и его малая зольность, наличие в породах сульфидных включений (пирита), большая мощность пласта, а также небольшая глубина залегания. И. П. Соляковым [6] показано, что кислые воды могут образовываться в выработках многозольных пластов. Воды верхних горизонтов, обогащенные кислородом, окисляют сульфиды, в результате чего образуются кислые воды. В весенний период, во время обильного выпадения атмосферных осадков, кислотность подземных вод увеличивается.

Так как, в большинстве случаев, противοfiltrационные завесы состоят из цементного камня, то все виды кислот взаимодействуют с гидроксидом кальция, входящим в состав цемента. От растворимости гидроксида кальция зависит скорость разрушения цементного камня. Поэтому необходимо подбирать те цементы, которые минимально реагируют с агрессивной средой [7-9].

При строительстве противοfiltrационных завес вокруг отстойников химической промышленности, где наблюдается высокая концентрация сульфатов, рекомендуется применять сульфатостойкий или барийсодержащий цементы. Барийсодержащий цемент содержит 10-15 % окиси бария, более 15 % алита и не более 22 % трехкальциевого алюмината. Причем барийсодержащие цементы при наличии сульфатов высокой концентрации являются более стойкими, чем сульфатостойкие.

При создании завес вокруг коллекторов, котлованов довольно часто под воздействием подземных вод происходит вымывание гидроксида кальция цементного камня. Для того чтобы уменьшить растворение гидроксида кальция, необходимо использовать цементные растворы большой плотности, а также марки цементов с минимальным содержанием гидроксида кальция. У портландцементов, используя добавки жидкого стекла в пределах 30%, можно значительно повысить стойкость

цементного камня. Применение суперпластификаторов позволяет получать цементный камень высокой прочности, малопроницаемый при воздействии воды.

Непродолжительное соприкосновение подземных вод с породой приводит к метаморфизации подземных вод. Вода обогащается углекислотой и, интенсивно взаимодействуя с породами, обнаженными в выработках, вызывает углекислотную коррозию цементного камня.

Общеизвестно, что вода, насыщенная углекислотой, взаимодействуя с цементным камнем, постепенно насыщается бикарбонатом кальция. Появление ионов OH^- - переводит бикарбонат в осадок. Углекислота постепенно разрушает все растворы, в которые входит гидроксид кальция. Скорость коррозии зависит от физико-химических и технологических свойств цементных растворов. Среди них наибольшей стойкостью обладают глиноцементные растворы. Глины, используемые для приготовления растворов, должны быть умеренно – пластичными с числом пластичности 7-15. По данным исследований [10], содержание цемента в глиноцементных растворах должно находиться в пределах 25-40%. Для придания растворам тиксотропных свойств к ним следует добавлять до 5% бентонитовой глины. Использование жидкого стекла, имеющего модуль 3,0-3,4, повышает прочность структуры глиноцементных растворов в 2-2,5 раза при добавке в количестве 2 кг/м³ и в 3-4 раза - при добавке 10 кг/м³.

Сооружение защитных завес вокруг небольших объектов часто не требует особой прочности. В таких случаях предпочтительнее использовать глинистые растворы. Глина с частицами диаметром менее 0,01 мм может быть использована для заполнения наиболее мелких пустот в грунте. Однако для этого необходимо, чтобы в растворе глина была максимально дефлокулирована [11]. Наиболее эффективно применение в качестве раствора для создания противодиффузионной завесы бентонитовой глины с различными коагулирующими добавками.

На качество противодиффузионных завес значительно влияет величина температуры породы и воздуха. При повышении температуры значительно увеличивается скорость затвердевания закрепляющих растворов, увеличивается прочность и уменьшается фильтрация закрепленных пород. По данным И. Н. Ахвердова [12], оптимальная температура отвердевания цементного раствора около 85⁰С. С увеличением температуры цементных растворов начало и время схватывания резко сокращаются [12]. Так при температуре 20⁰С начало схватывания цементного камня происходит через 9 часов после затворения, а время схватывания до полного твердения - 3 часа. При повышении температуры до 100⁰С для того же раствора схватывание начинается через один час, а время затвердевания - 0,5 часа.

Завеса, созданная в обводненных породах, как правило, обладает повышенным коэффициентом фильтрации. Поэтому необходимо повышать марку цемента, используемого для закрепляющего раствора, или использовать добавки, уменьшающие коэффициент фильтрации. Следует отметить, что глубина проникания закрепляющего раствора в обводненных мелкозернистых песках на 10-15% больше, чем в необводненных породах, а толщина завесы в них меньше на 10%.

Большая мощность водовмещающих пород усложняет создание надежной стыковки секций завесы и увеличивает расход закрепляющего раствора.

Рассмотрим следующую группу факторов, определяющих эффективность завес - технологические факторы. К ним относятся: форма, глубина сооружения, схема устройства, толщина противофильтрационной завесы и давление подземных вод.

Форма завесы, сооружаемой вокруг горных выработок, подразделяется на замкнутую и незамкнутую. Замкнутые завесы, как правило, сооружаются вокруг вертикальных выработок, отдельных участков наклонных и горизонтальных выработок, отстойников вредных отходов и других подземных сооружений небольшой протяженности. Незамкнутые противофильтрационные завесы сооружаются для защиты бортов карьеров, различных плотин и других гидротехнических объектов.

Предельная глубина сооружения завесы определяется техническими характеристиками оборудования, при помощи которого создается завеса. Глубина зависит также от технологических параметров оборудования, обеспечивающих надежную стыковку крыльев противофильтрационных завес. При увеличении глубины существенно увеличиваются затраты времени и материалов на выполнение работ по сооружению завесы.

Устройство противофильтрационных завес зависит от высоты напора подземных вод. Слабопроницаемые породы, имеющие напоры подземных вод до 2 м, могут пересекаться скважинами без устройства завесы. При напоре до 15 м необходимо применять тонкие противофильтрационные завесы. При напорах подземных вод свыше 15 м толщина завесы должна быть рассчитана, исходя из фильтрационной прочности. Отрицательное воздействие напоров свыше 15 м на сооружаемую завесу заключается в вымывании закрепляющего раствора из тела завесы.

Схема создаваемой завесы подразделяется на однорядную и многорядную. Многорядная схема устройства завесы применяется в плотинах гидроэлектростанций, карьерах и других сооружениях, где получить большую толщину завесы технологически трудно или экономически неэффективно. Во всех других случаях используется однорядная схема завесы [12].

Таким образом, выполненный анализ эффективности формирования противофильтрационных завес подтверждает сложность поставленной задачи, что также обусловлено и определенными требованиями к противофильтрационным завесам:

- завесы должны обладать низким коэффициентом фильтрации;
- закрепляющие растворы должны соответствовать требуемому качеству, обеспечивая низкий коэффициент фильтрации противофильтрационной завесы;
- цементные, глино-цементные растворы в каждом конкретном случае должны подбираться с учетом агрессивности подземных вод, контактирующих с завесой.

Только выполнение этих требований может гарантировать долговечность и надежную эксплуатацию противофильтрационных завес.

1.2. Анализ специальных способов защиты подземных сооружений от подземных вод

В настоящее время разработано большое количество специальных способов создания противofiltrационных завес вокруг подземных сооружений. Одним из основных направлений является применение специальных способов, изменяющих физико-химические свойства пород.

Для защиты подземных сооружений от водопритокков в последние десятилетия чаще всего использовались: химический и электрохимический способы, "стена в грунте", смолизация и струйное закрепление пород. Большое количество способов обусловлено тем, что эффективность формирования защитных завес зависит от природных и технологических факторов, рассмотренных выше.

Рассмотрим перечисленные способы с точки зрения возможного изменения фильтрационных свойств закрепляемых пород.

В основе химического способа лежит нагнетание силикатных, органических и других закрепляющих растворов в дисперсную породу, в результате чего происходит ряд физико-химических процессов, после чего порода приобретает твердое состояние, значительно снижается коэффициент ее фильтрации.

В 30-х годах В.А. Ржаницын впервые применил способ двухрастворной силикатизации грунтов на строительстве первой очереди Московского метрополитена для закрепления оснований зданий, с целью предохранения их от деформаций при проходке тоннелей [13]. Способ двухрастворной силикатизации, как правило, используется для закрепления крупнозернистых песков с коэффициентом фильтрации от 2 до 80 м/сут.

В 40-х годах В.Е. Соколович разработал способ однорастворной силикатизации для песчаных грунтов с коэффициентом фильтрации менее 2 м/сут. В дальнейшем химические способы развивались и совершенствовались. В.Е. Соколович [14] предложил способ нагнетания силиката натрия в лессовые грунты без отвердителя, а В.А. Ржаницыным был предложен способ газовой силикатизации [15]. Были проведены исследования по применению способа однорастворной силикатизации с использованием кремнийфтористоводородистой кислоты в качестве отвердителя.

В 40-х годах также начались исследования по применению в качестве закрепляющих растворов органических полимеров. Но только в 1958 году впервые в СССР на реальном объекте был закреплен водонасыщенный пылеватый песок - в основании церкви в г. Новгороде [15].

Наиболее широкое применение получили такие синтетические смолы, как эпоксидные, полиэфирные, фенолформальдегидные, формальдегидные (крепитель М). В качестве добавок, вызывающих твердение смол, использовались соляная, щавелевая и фосфорная кислоты, метасиликат натрия, хлористый аммоний и др. [16-21].

Основные положения теории закрепления дисперсных пород смолами были изучены и всесторонне проанализированы в трудах В.М. Безрука, И.И. Черкасова, Л.А. Маркова, В.Е. Соколовича и др. [10-14; 22; 23]. Этими учеными положено начало теоретического обоснования процесса взаимодействия дисперсных пород с органическими полимерами.

Невысокая вязкость водных растворов и смол, их однородность позволили расширить область применения этого способа и использовать его при строительстве подземных сооружений для закрепления мелкотрещиноватых пород и мелких пылеватых, сухих и водонасыщенных песков с коэффициентами фильтрации более 1,5 м/сут [16].

Для создания противофильтрационных завес в 70-е годы начал широко применяться способ "стена в грунте", сущность которого состоит в следующем. С поверхности земли до проектной отметки специальным траншеекопателем роют узкую траншею. По мере отработки в траншее возводят сборные, монолитные конструкции или заполняют ее материалом с низким коэффициентом фильтрации [24-32].

Этот способ успешно был применен при сооружении противофильтрационной завесы на Актюбинском химкомбинате в Казахстане. Противофильтрационная завеса была сооружена для защиты от загрязнения подземных вод р. Илек. Длина завесы по контуру составила около 7 км, а глубина – до 50 м. Для сооружения траншеи в основном использовалась барражная машина БМ-0,5/50-3МЭ, работающая в режиме непрерывной технологии. В качестве заполнителя использовалась комовая глина, а при глубине больше 30 м - глинистая паста [33].

НИИСП и Харьковским инженерно-строительным институтом был предложен комбинированный способ сооружения противофильтрационной завесы вместе с отводом токсичных вод из грунта. Сущность его заключалась в том, что вдоль всей трассы завесы из полимерной пленки на расстоянии 5-6 метров от нее разрабатывалась траншея, на 2/3 глубины которой укладывался промытый гравий мелкой фракции. Оставшаяся часть заполнялась глиной. По всей длине трассы устанавливали вертикальные трубы-фильтры, которые подсоединяли к насосной станции [34].

Для создания противофильтрационных завес при решении различных горно-технических задач в 80-е годы широко применялся электрохимический способ закрепления грунтов. В основе электрохимического способа лежит использование постоянного электрического тока: через электроинъекторы пропускают постоянный электрический ток с одновременным нагнетанием через них закрепляющих растворов. Под действием электрического тока в породе происходит ряд физико-химических процессов, в результате чего породы приобретают твердое состояние, при этом значительно снижается коэффициент их фильтрации [35].

Первые отдельные опытно-промышленные эксперименты по электрохимическому закреплению были проведены Л. Кассазагранде при проходке тоннелей, Л.П. Загоруйко при сооружении шурфа [36], А.М. Соколовым при строительстве вертикальных дренажных выработок Криворожского цементного завода [37].

Значительный опыт электрохимического закрепления обводненных пород в горном производстве накоплен в Днепропетровском горном институте. Основываясь на научных результатах, полученных В.Ф. Калгановым, А.С. Коржуевым, В.В. Чепелевым, Г.Н. Жинкиным и др. здесь разработан и внедрен ряд новых способов электрохимического закрепления. Основная цель разработок – повышение качества и сокращение временных затрат.

Важным этапом в повышении качества закрепления является смена полярности приложенного напряжения [38-42]. Большинство авторов смена полярности использовалась при электрообработке глин без подачи закрепляющих растворов. Од-

нако для обводненных мелкодисперсных пород, содержащих менее 10% глинистой фракции, одной смены полярности недостаточно. Поэтому В.И. Бондаренко [43] предложил способ электрохимического закрепления, заключающийся в периодической смене полярности с соответствующим изменением направления подачи электролитов. Цикл закрепления состоит из трех периодов, примерно одинаковых по продолжительности, включающих подачу первого электролита с добавками, второго электролита с катализаторами и обработку массива постоянным электрическим током. Для обеспечения общих минимальных затрат времени при знакопеременном закреплении процесс в каждом периоде, между сменой полярности, В.И. Бондаренко рекомендует вести в активной части. Показателями снижения активности закрепления служат уменьшение плотности тока, скорости поглощения растворов и электроосмотического выделения воды.

Предлагаемый способ был реализован в 1978 г. на шахте № 3-5 Марганецкого ГОКа при ликвидации прорыва обводненных песков на 254 метре восточного штрека. В результате электрохимического закрепления плавун потерял свои текучие свойства по всему закрепленному объему (60 м³). Опытные-промышленные работы показали, что способ закрепления не только обеспечивает высокое качество, но и сокращает на 15-20% продолжительность работ за счет эффективного использования наиболее активной части цикла электрообработки закрепляемого массива [35].

Дальнейшему совершенствованию электрохимического закрепления были посвящены работы В.В. Захарова и А.Я. Яценко.

В.В. Захаров в своих исследованиях уделил главное внимание процессам, протекающим в массиве при обработке его постоянным электрическим током [44]. С целью повышения эффективности электрообработки и снижения влияния пассивации электродов на качество закрепления он предложил производить смену полярности при достижении коэффициента пассивности анодов до величины 70-75% и обрабатывать породу в таком режиме до момента стабилизации тока каждого электрода, после чего возвращать полярность в исходное положение. При этом инъекцию растворов необходимо выполнить с учетом параметров электрообработки. Так, инъекцию раствора силиката натрия предлагалось проводить до увеличения тока между инжекторами в 3-4 раза по сравнению с первоначальным значением, а нагнетание хлористого кальция до полной стабилизации тока каждого электрода-инжектора.

Для реализации разработанных положений и автоматизации процессов управления электрохимического закрепления была создана передвижная установка "ИОН-2" [45], которая позволяла плавно регулировать величины приложенного на электроды напряжения, управлять полярностью каждого электрода для обеспечения оперативного изменения схемы подключения, визуально контролировать и измерять основные параметры закрепления.

Установка ИОН-2 прошла успешное испытание при сооружении Красноповстанческого коллектора в г. Днепропетровске. Управляя процессами электрохимического закрепления с помощью этой установки, удалось успешно закрепить 1226 м³ обводненных пород и пройти выработку в сложных гидрогеологических условиях.

А.Я. Яценко изучил влияние неоднородного и комбинированного электрических полей на качество закрепления дисперсных пород [46]. В результате выполненных исследований он установил, что при наложении дополнительного электри-

ческого переменного поля на электроды поступление в породу закрепляющих реагентов увеличивается в 2 - 3 раза. Также было установлено, что на 40% сокращается продолжительность закрепления, в 1,5 - 2 раза возрастает прочность породы и в 2 - 2,5 раза уменьшается ее размокаемость.

Эти исследования позволили разработать новый способ закрепления пород [47], сущность которого заключается в том, что инъекцию закрепляющих растворов осуществляют в комбинированном электрическом поле, создаваемом путем одновременного приложения к электродам постоянного и переменного напряжений, причем последнее прикладывается только к одной группе электродов. Этот способ был испытан при ликвидации завала на 62-м сборном штреке шахты "Верболозовская". В выработке сечением $5,8 \text{ м}^2$ на участке длиной 6 - 7 м нагрузка на крепь превысила допустимое значение, что привело к обрушению водоупорных пород в кровле и прорыву пльвуна в выработку. Неоднократные попытки пройти завал с забивной крепью повлекли за собой дополнительный вынос породы и дальнейшее развитие зоны обрушения. Общий вынос породы составил 100 м^3 . В качестве специального способа была принята технологическая схема однорастворного закрепления в комбинированном электрическом поле. Закрепление выполнялось посредством 17-ти электродов-инъекторов длиной от 8 до 11 м. Перед инъекцией раствора силиката натрия закрепляемый объем породы обрабатывали в течение 72 часов комбинированным электрическим полем. Раствор силиката натрия подавали в течение четырех часов через анодные электроинъекторы. Затем изменили направление стационарного поля на обратное, и закрепляющий раствор начали подавать на все электроинъекторы. В результате закрепления приток воды в выработку уменьшился до $0,5...1,0 \text{ м}^3/\text{час}$.

Для закрепления неустойчивых горных пород при сооружении устья стволов группой ученых под руководством проф. Э.Я. Кипко разработана эффективная технология на основе закономерностей закрепления и водоизоляции различных по литологическому составу пород [48-52].

В результате исследований установлено, что оптимальное отношение межэлектродного расстояния к радиусу электрода равно 20, а увеличение межэлектродного расстояния возможно только при пропорциональном увеличении радиуса электрода. Была разработана классификация горных пород по степени их пригодности для электрохимического закрепления, получена эмпирическая зависимость прочности закрепленных пород от исходного удельного электрического сопротивления, а также разработан новый способ закрепления - электрохимический тампонаж неустойчивых глинистых пород вокруг устья стволов [50]. Этот способ был применен при строительстве вентиляционного ствола № 6 шахты им. 60-летия Ленинского Комсомола ПО "Гуковуголь". На участке было пробурено 90 скважин диаметром 112 мм на глубину 18 м. Электрохимический тампонаж выполняли в два этапа: вначале осуществлялась секционная коммутация электродов с использованием порядной схемы, а затем групповая коммутация по линейной схеме.

Продолжительность обработки скважин составила 9 суток. Кроме того, на первом этапе затрачено 41,8 тыс. кВт. ч., на втором - 82 тыс. кВт. ч. На обработку 2020 м^3 горных пород было израсходовано 102 м^3 раствора силиката натрия.

Проходка ствола показала, что толщина закрепленной завесы доходила до 2,5 м, наибольший радиус закрепления до 0,65 м, водоприток на глубине 18 м - 0,5 м³/ч. В результате электрохимического тампонажа породы стали прочнее в 4-5 раз, а коэффициент фильтрации уменьшился в 5-8 раз.

В условиях остаточных напоров и постоянной миграции воды эффективность использования электрохимического закрепления значительно снижается из-за интенсивного вымывания закрепляющих растворов из обрабатываемого массива. В связи с этим С.Ф.Власов на базе электрохимического закрепления разработал новые способы с применением различных физических полей, обеспечивающие высокое качество закрепления слабых пород в условиях фильтрации напорных вод [53]. С.Ф. Власов исследовал влияние вакуумирования катодной зоны и магнитной обработки закрепляющих растворов на качество закрепления при однорастворной и двухрастворной электросиликатизации. Установлено, что наилучшее качество закрепления мелкозернистых песков и лессов достигается при градиентах напора от 0,25 до 0,30 МПа/м и вакуумировании с градиентом разряжения 0,07-0,09 МПа/м. Для суглинков эти показатели составляют 0,3 МПа/м и 0,09 МПа/м соответственно.

Исследования влияния магнитной обработки силиката натрия показали, что при напряженности магнитного поля $18 \cdot 10^4$ А/м прочность закрепленных пород увеличивается в 1,7-2,1 раза, размокаемость снижается почти в 5 раз, время гелеобразования однорастворных силикатных композиций сокращается в 2,5 раза.

Проведенные исследования позволили разработать новый способ физико-химического закрепления, заключающийся в том, что в обводненную породу под определенными углами в несколько рядов погружаются электроинъекторы. Они располагаются таким образом, что верхний ряд является катодным, а нижний - анодным. Катодный ряд подключается к вакуумной установке, а анодный - к насосу для нагнетания закрепляющих растворов. Под действием создаваемого вакуумной установкой разряжения в катодных электро-вакуум-фильтрах вокруг последних формируется зона пониженного давления. За счет этого вода, фильтруемая через обрабатываемую зону, устремляется в электро-вакуум-фильтры. В свою очередь на анодные электроинъекторы начинают подаваться закрепляющие растворы, обработанные в магнитном поле. Разность давления, создаваемая вакуумированием катодной зоны, давлением нагнетания закрепляющих растворов и постоянным электрическим напряжением, обеспечивает движение электролитов от анода к катоду, равномерно насыщая ими межэлектродное пространство.

Разработанный способ прошел успешное испытание на шахте "Верболозовская" ПО "Александрияуголь" при проведении вентиляционного штрека, вскрывающего скважину диаметром 1200 мм. Эта скважина должна была обеспечить воздухом Северное крыло шахтного поля и служить запасным выходом на поверхность. В результате прорыва обводненной породы, объем которой составил около 600 м³, были затоплены вентиляционный штрек к воздушной скважине длиной 25 м - полностью и второй главный Северный откаточный штрек - частично.

Работы по физико-химическому закреплению проводились в два этапа. На первом - плавунные породы, заполнявшие выработку, на расстоянии 10 м были переведены путем вакуумирования и электрообработки из текучего состояния в твердопластическое. На втором - после зачистки породы закрепляли физико-химическим

способом с вакуумированием катодной зоны и магнитной обработкой растворов по всему сечению выработки. Результаты исследований физико-механических свойств образцов, отобранных из различных зон, подтвердили эффективность магнитной обработки закрепляющих растворов. Так, прочность закрепленных пород химическими реагентами с магнитной обработкой составила 1,0-1,5 МПа. Прочность же пород, закрепленных обычным способом, оказалась в 1,5-2 раза ниже и составила 0,5-0,7 МПа.

Дальнейшее совершенствование способа электрохимического закрепления получило в исследованиях А.Е. Трубакова [54]. Им изучено влияние теплового поля на качество закрепления дисперсных пород силикатными композициями. На основании выполненных исследований были разработаны математическая модель определения оптимальной температуры процесса закрепления с учетом гидрогеомеханических факторов, а также два новых способа и технология закрепления плавунных пород вокруг горных выработок.

Силикатно-термический способ был испытан при ликвидации прорыва харьковских песков (60 м^3) на 117 м главного Северо-западного штрека шахты "Верболовская". Закрепление выполнялось с помощью 12 электроинъекторов, установленных в кровле выработки за контуром крепи. Массив разогревали до температуры $90-95^\circ \text{C}$ путем пропускания постоянного электрического тока, после чего поочередно нагнетали в течение 24 ч растворы силиката натрия плотностью 1340 кг/м^3 и хлористого кальция плотностью 1160 кг/м^3 . По окончании инъекции производили электро- и термообработку массива, поддерживая температуру в указанных пределах. После проведения закрепления было отмечено снижение водопритока из закрепленной зоны примерно в 2 раза.

Разработанные способы электрохимического закрепления хорошо зарекомендовали себя в горном производстве. Однако, как показывает опыт, в породах с коэффициентом фильтрации более 1 м/сут эффективность постоянного электрического тока практически сводится к нулю.

В завершение анализа необходимо отметить, что за счет литологической разности пород достичь полной гидроизоляции при электрохимическом закреплении не представляется возможным, так как от свойств пород зависит радиус противofильтрационной оболочки.

Кроме того, средняя толщина этой оболочки при однорядной схеме закрепления достигает $0,5-0,7 \text{ м}$, что требует определенного расхода закрепляющего раствора и электроэнергии, трудозатрат на 1 м^3 обрабатываемой породы.

К недостаткам приведенных инъекционных способов можно также отнести нестабильность качества противofильтрационных завес по длине электроинъектора, которое значительно зависит от физико-механических и гидрогеологических свойств пород. Использование электрического тока при обработке пород усложняется в связи с невозможностью соблюдения всех правил техники безопасности при строительстве противofильтрационных завес. Эффективность противofильтрационной завесы снижается из-за вымывания закрепляющих растворов и обрабатываемого массива из-за напоров и постоянной миграции воды, а также невозможностью прямого контроля за распространением закрепляющих растворов в межэлектродном пространстве.

Все это предопределило необходимость поиска новых способов создания противofильтрационных завес, обладающих высокими технологическими показателями и низкой себестоимостью.

К одному из таких способов относится струйное закрепление пород, обеспечивающее высокое качество формирования противofильтрационных завес с низким коэффициентом фильтрации пород и соответственно позволяющее создавать необходимые условия для нормальной эксплуатации подземных и гидротехнических сооружений.

1.3. Современное состояние исследований по струйной технологии закрепления пород

Сущность струйной технологии закрепления пород заключается в гидравлическом разрушении и перемешивании закрепляющим раствором дисперсных пород или замещении их закрепляющим составом. Эта технология позволяет формировать зоны закрепленной породы строго определенных форм и размеров.

Строительство противofильтрационных завес с использованием струйной технологии закрепления возможно осуществить двумя способами: без вращения струйного монитора ($\omega = 0$) и при его вращении ($\omega > 0$).

При первом способе в результате подъема монитора образуются одно- или двухсекционные завесы. Для лучшего смыкания секций их сооружают под углом 130° - 150° друг к другу. При втором способе образуются различные свайные сооружения, которые зависят от конструкции монитора и параметров используемой технологии.

К основным технологическим параметрам струйной технологии относятся: диаметр сопел струйного монитора, глубина проникания, расход и давление подачи закрепляющего раствора, плотность раствора, скорость поднятия монитора, ударная вязкость и плотность породы. Исследования способов разрушения с помощью высоконапорных струй проводились для разных горных пород и с различными технологическими параметрами.

В 50-х годах В.К. Кули [55] определил, что глубина проникания в водопроницаемых материалах больше, чем в водонепроницаемых. Им был проведен анализ влияния на глубину проникания раствора таких параметров, как скорость струи, число Рейнольдса, плотность и пористость закрепляемых пород.

Через несколько лет Д. Артингстол и К. Модии [56] провели исследования для четырех типов пород с постоянной скоростью движения струи 0,5 м/с, в результате которых было установлено, что глубина проникания уменьшается с увеличением прочности породы независимо от давления струи.

Значительный вклад в исследования струйной технологии укрепления грунтов внесли японские ученые. Ими впервые были выполнены работы по сооружению противofильтрационных завес без вращения струйного монитора. Исследования Я. Иосиды [57] показали, что у струи, обжатой сжатым воздухом, глубина проникания больше, чем у необжатой струи. Японскими исследователями был разработан метод разрушения грунта с одновременным нагнетанием в образованную полость закреп-

ляющего раствора при устройстве противофильтрационной завесы, сущность которого заключается в следующем.

Бурится ряд скважин на расстоянии 1-1,5 м одна от другой. В первую скважину опускается струйный монитор, который разрушает породу в направлении следующей скважины струей закрепляющего раствора. Породы из скважины вымываются избыточным давлением. Диаметр сопла струйного монитора составил 1,5-2 мм.

В конце 50-х годов в Гидроспецпроекте Минэнерго СССР [58] были проведены экспериментальные работы по сооружению противофильтрационных завес с помощью струйной технологии закрепления без вращения струйного монитора, которые позволили установить рациональные параметры разрушения несвязанных грунтов. Так, диаметр сопла струйного монитора должен составлять 6 мм, а давление подачи закрепляющего раствора - 6 МПа.

Сравнение результатов японских и советских работ (рис 1.2) [58] показали, что при изменении сопротивления среды изменяется глубина проникания струи. Графики 1 и 4 показывают распределение давления по длине струи при движении в воздухе, где струя, выходящая из сопла большего диаметра, за счет отсутствия обратного потока жидкости при более низком давлении подачи проникает дальше [59; 60]. При распространении струи в воде с обжатием воздухом (двухкомпонентная технология) глубина проникания струи с большим начальным давлением больше (графики 2 и 5). Наименьшей дальностью обладает затопленная струя (график 3, однокомпонентная технология).

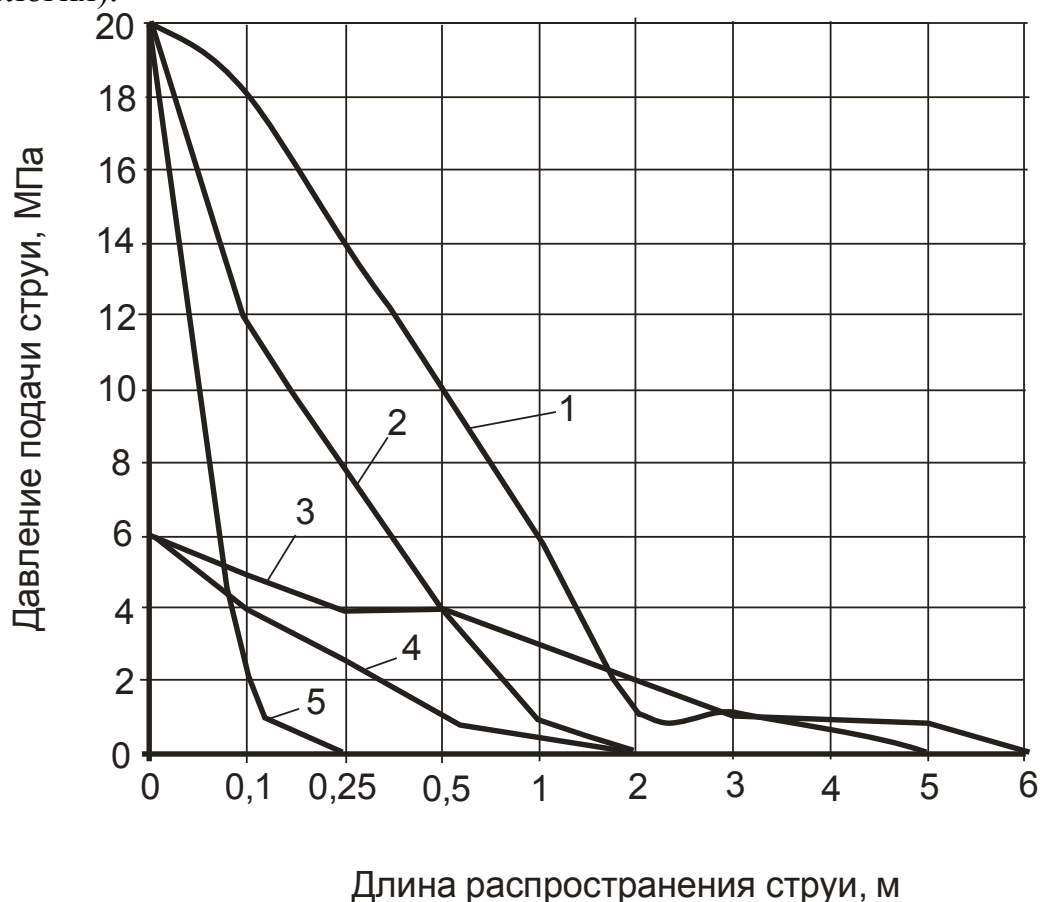


Рис. 1.2. График распределения динамического давления по длине струи:

1 - струя движущая в воздухе, диаметр сопла $d=2$ мм;

- 2 - струя движущая в воде, диаметр сопла $d=2$ мм;
- 3 - струя движущая в воздухе, диаметр сопла $d=6$ мм;
- 4 - струя движущая в воде, диаметр сопла $d=6$ мм;
- 4 - струя движущая в воде, диаметр сопла $d=6$ мм;

В 50-70-е годы практические исследования по созданию противофильтрационных завес с использованием струйной технологии носили единичный характер. Одним из примеров является сооружение противофильтрационной завесы с помощью опытной установки «Струя» на Загорской ГРЭС.

В связи с полосообразным залеганием водоносных песков завеса общей длиной 200 м и глубиной 7 м была расположена не по всему контуру котлована, а с двух его сторон. На одной стороне котлована сооружение секций завесы производили по схеме одностороннего размыва прорезей с расстояниями между скважинами 2,5-3,0 м, на другой стороне - по схеме двустороннего размыва с шагом скважин 5 м. Заполнение прорезей осуществляли бентонито-цементным раствором с содержанием в 1 м³ раствора 50 кг бентонита и 450 кг цемента. Средний расход раствора, в зависимости от мощности песчаного слоя, составил 70-100 л на 1 м² завесы [61].

В 1977 году в НИИ оснований (Г. Носовым) были проведены исследования по применению струйной технологии для резания мерзлых пород [62]. Были определены рациональные параметры и режимы резания мерзлых пород, минимальные размеры диаметра сопел струйного монитора, при котором возможно разрушения пород. Получена эмпирическая формула глубины проникания струи в мерзлую породу:

$$h_{щ} = 0,12 d_0 \sqrt{\frac{p_0 v_0}{c_0 u}} \sqrt[3]{N^2}, \quad (1.1)$$

где $h_{щ}$ - глубина щели, прорезаемая в мерзлом грунте, мм;

d_0 - диаметр сопла, мм;

p_0 - рабочее давление на выходе из насадки, МПа;

v_0 - скорость истечения рабочей жидкости из насадки, м/с;

c_0 - сцепление мерзлого грунта, МПа;

u - скорость перемещения струи, м/с;

N - число проходов струи по образцу грунта, шт.

В натуральных условиях были отработаны методы разработки защитных сооружений при использовании струйной технологии при строительстве траншей и котлованов.

Большой вклад в теоретические разработки струйной технологии закрепления внесли исследования законов течения водяных струй, проведенные Г.И. Абрамовичем [63]. Им была решена задача движения турбулентной струи в спутном потоке.

Развивая теоретические и прикладные основы закрепления дисперсных пород при ведении горных работ, С. Ф. Власов, применив теорию турбулентных струй, рассчитал технологических параметры закрепления с учетом зависимости функции C , входящую в теорию турбулентных струй, от соотношения плотностей двух перемешивающих сред [64]. Это позволило установить новые закономерности проника-

ния высоконапорной струи от скорости поднятия и вращения рабочего инструмента. Была получена следующая зависимость глубины проникания закрепляющего раствора:

$$h = \sqrt{\frac{2,73 d_0^2 u_0}{\pi d_1 \omega c \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) K}}, \quad (1.2)$$

- где h - радиус проникания струи, м;
 K - коэффициент, зависящий от скорости поднятия монитора;
 d_0 - диаметр сопла, м;
 u_0 - скорость струи закрепляющего раствора на выходе из сопла, м/с;
 d_1 - диаметр рабочего инструмента, м;
 ω - скорость вращения рабочего инструмента, м/с;
 ρ_2 - плотность закрепляемой породы, кг/м³;
 ρ_1 - плотность закрепляющего раствора, кг/м³;
 c - функция, закон изменения которой зависит от ρ_2 / ρ_1 .

На основании выполненного анализа современного уровня исследований струйной технологии можно сделать вывод, что основной объем исследований был выполнен для обоснования технологических параметров струйной технологии при создании защитных оболочек вокруг выработок или стены в грунте толщиной более 0,5 м. Что касается создания противofильтрационных завес, то такие работы, выполненные в 50-70-х годах, носили единичный экспериментальный характер.

Выполненный анализ опыта формирования противofильтрационных завес вокруг подземных сооружений подтверждает необходимость обоснования технологических параметров создания таких завес с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов.

1.4. Цель и задачи исследования

Наличие водоносных горизонтов и обводненных дисперсных пород существенно осложняют эксплуатацию подземных и гидротехнических сооружений, и как было указано выше, наиболее эффективным способом улучшения условий эксплуатации таких сооружений является создание вокруг них противofильтрационных завес. Из всех способов наиболее перспективным является струйная технология закрепления. Это предопределило актуальность настоящей диссертационной работы, целью которой является обоснование технологических параметров формирования противofильтрационных завес с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов, обеспечивающих необходимые условия эксплуатации подземных сооружений.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе ставятся следующие задачи:

1. Определить рациональную скорость поднятия струйного монитора, при которой высоконапорная струя проникает на максимальное расстояние и не вызывает перерасхода закрепляющего раствора.

2. Установить закономерности изменения глубины проникания высоконапорной струи от плотности закрепляющих растворов, плотности и ударной вязкости обрабатываемой породы с учетом рациональной скорости поднятия монитора.

3. Установить изменение толщины противofильтрационной завесы в зависимости от физических (плотность закрепляющего раствора и обрабатываемой дисперсной породы, ударная вязкость породы) и технологических (диаметр сопла, рациональная скорость поднятия монитора, давление при подаче закрепляющего раствора) параметров.

4. Определить необходимые объемы перемешивания закрепляющего раствора с породой, позволяющие обеспечить необходимый коэффициент фильтрации сооружаемых завес.

5. Для решения различных горнотехнических задач по гидроизоляции подземных объектов разработать методику и провести экспериментальную апробацию формирования противofильтрационных завес с помощью высоконапорных струй закрепляющего раствора.

1.5. Общая методика выполнения исследований

Для достижения цели и решения задач, поставленных в данной работе, соискателем были выполнены теоретические и прикладные исследования процессов создания противofильтрационных завес с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов. Сложность рассматриваемых процессов обусловила необходимость разработки общей методики исследований, состоящей из ряда рабочих методик. Структурная схема такой методики приведена на рис. 1.3.

Аналитические исследования включают в себя определение толщины и рациональных технологических параметров создаваемой противofильтрационной завесы.

При проведении прикладных исследований устанавливались закономерности влияния объемов перемешивания закрепляющего раствора с породой и технологических параметров на прочностные и фильтрационные свойства создаваемых противofильтрационных завес. К прикладным исследованиям также относится определение толщины зоны чистого цемента в закреплённом материале.

Проведенные соискателем аналитические, прикладные и экспериментальные исследования позволили разработать методику и технологию формирования противofильтрационных завес в дисперсных породах с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов.



Рис. 1.3. Структурная схема исследований

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОЗДАНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАВЕС ВЫСОКОНАПОРНЫМИ СТРУЯМИ ЗАКРЕПЛЯЮЩИХ РАСТВОРОВ

2.1. Определение рациональной скорости поднятия монитора и глубины проникания струи

Необходимые гидроизоляционные свойства создаваемых противофильтрационных завес обеспечиваются рядом технологических параметров струйной технологии закрепления. К таким параметрам относятся: скорость поднятия монитора v_n , глубина проникания h , ударная вязкость закрепляемой породы η , плотность закрепленной породы ρ_1 , диаметр сопел струйного монитора d_0 , давление P_0 и расход Q закрепляющего раствора. Одним из основных технологических параметров при создании противофильтрационной завесы (невращающемся мониторе) являются глубина проникания h и скорость поднятия монитора v_n (м/с).

Для расчета этих технологических параметров рассмотрим теорию движения струи несжимаемой жидкости, разработанную Г.Н. Абрамовичем [65]. Принципиальная схема струи изображена на рис. 2.1. Часть струи, в которой имеется потенциальное ядро течения, называется начальным участком. На некотором расстоянии от конца начального участка струя приобретает такой же вид, как при течении из источника бесконечно малой толщины - этот участок называется основным. Между основным и начальным заключен переходной участок. Для установления закономерностей движения струи при проникании потока одной жидкости в другую рассмотрим эти участки.

Безразмерная скорость в начальном участке струи определяется как

$$\frac{u}{u_0} = 1 - (1 - m)f, \quad (2.1)$$

где u - мгновенная величина составляющей скорости на оси x , м/с;

u_0 - скорость жидкости на выходе из насадки, м/с;

$m = \frac{u_2}{u_1}$ - отношение скоростей, м/с;

u_2 - скорость разрушения породы, м/с;

u_1 - текущая скорость, м/с;

f - внутреннее трение.

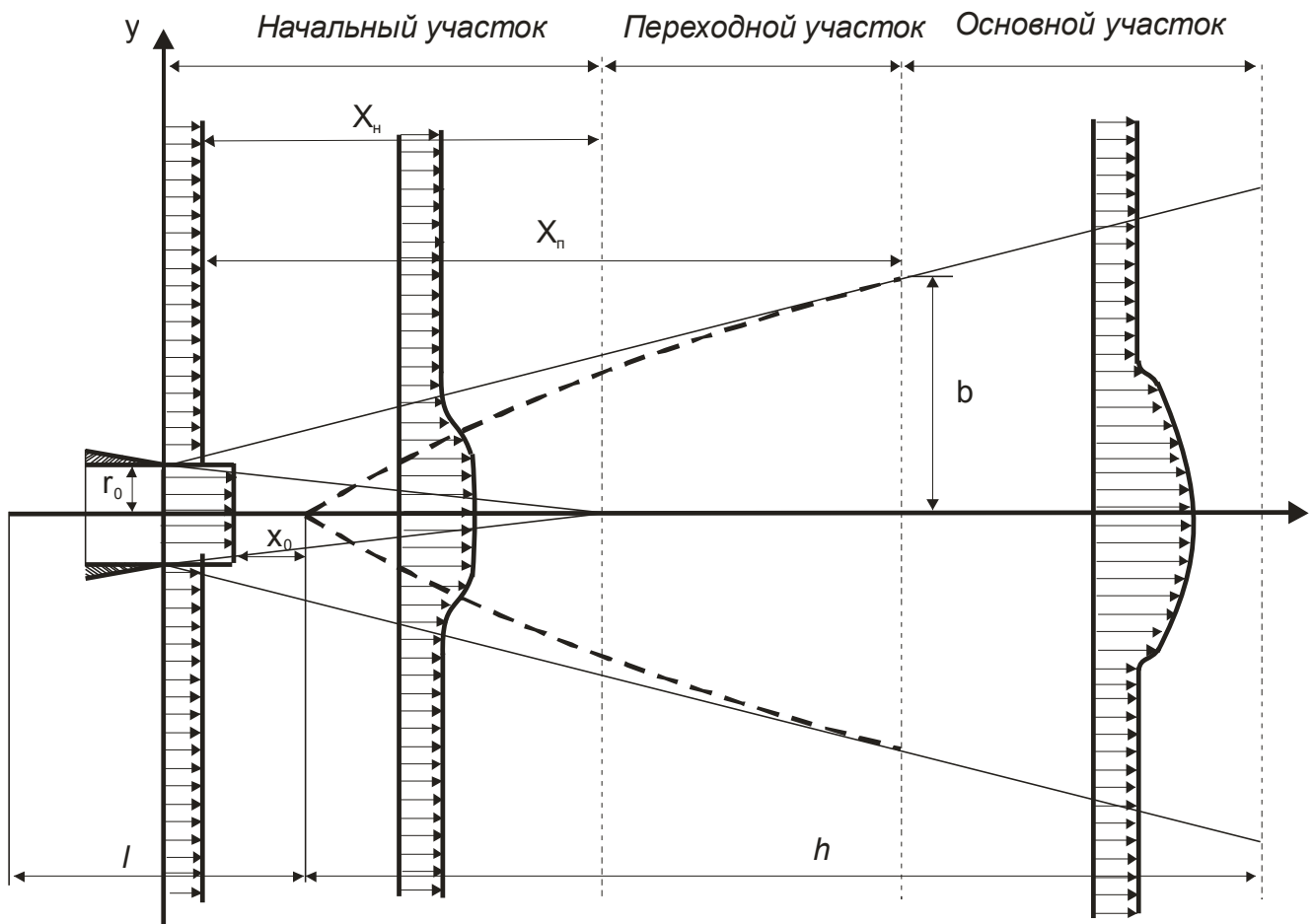


Рис. 2.1. Схема турбулентной струи

Длина начального участка струи может быть определена по формуле

$$\frac{x_H}{r_0} = \pm \frac{1+m}{c(1-m)(0,214+0,144m)} \quad (2.2)$$

где x_H - длина начального участка, м;

r_0 - радиус насадки, м;

c - эмпирическая функция турбулентности.

Между основным и начальным участком струи заключен переходной участок.

Скорость на оси переходного участка та же, что и в начале основного участка.

Длину переходного участка для осесимметричной струи при ($m = 0 \div 2$) можно с достаточной точностью считать равной

$$x_n = 1,5x_H \quad (2.3)$$

Рассмотрим основной участок струи.

Для затопленной струи ($m = 0$) имеем [65]

$$\frac{u_m}{u_0} = 2,73 \frac{\sqrt{n_{2u}}}{c(\bar{x} - \bar{x}_0)}, \quad (2.4)$$

где u_m - скорость потока на краях зоны смешения, м/с.

Если считать, что полюс струи расположен в начальном сечении струи, то $\bar{x}_0 = 0$, и принимая, что $n_{2u} = 1$, получим

$$\frac{u_m}{u_0} = 2,73 \frac{r_0}{c x}, \quad (2.5)$$

где x - координата на оси струи.

Из рассмотренных зависимостей наиболее важным является основной участок струи.

Конечная скорость проникания струи закрепляющего раствора u_k определяется по формуле [66]

$$u_k = \sqrt{\frac{8\eta}{\pi \rho_1 d_0}}, \quad (2.6)$$

где η - ударная вязкость закрепляемой породы, Дж/м² [67];

ρ_1 - плотность закрепляемой породы, кг/м³;

d_0 - диаметр сопла струйного монитора, м.

Закон проникания струи в породу в зависимости от времени определен в работе Власова С.Ф. [68] и имеет вид

$$x = \frac{2,73 d_0 u_0 t_k}{c \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)}, \quad (2.7)$$

где x - расстояние, м;

u_0 - начальная скорость струи, м/с;

ρ_2 - плотность закрепляемой породы, кг/м³;

t_k - время проникания струи, с;

c - экспериментальная функция [69]:

$$c = 0,018 \cdot \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 - 0,005 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} + 0,209.$$

За время t_k монитор закрепляет полоску высотой d_0 . Тогда

$$t_k = \frac{d_0}{v_n}, \quad (2.8)$$

где v_n - скорость поднятия монитора, м/с.

Определим зависимость между скоростью поднятия монитора v_n и конечной глубиной проникания h_k при формировании элемента противифльтрационной завесы.

Пусть известны свойства породы и закрепляющего раствора, а также технологические параметры рабочего инструмента. Тогда в формулу (2.5), подставляя вместо скорости u_m скорость u_k из формулы (2.6), определим конечную глубину проникания струи в породу:

$$h_k = \frac{2,73 r_0 u_0}{c u_k}. \quad (2.9)$$

Подставив формулу (2.6) в (2.9), получим

$$h_k = \frac{2,73 r_0 u_0}{c \sqrt{\frac{8\eta}{\pi \rho_1 d_0}}}. \quad (2.10)$$

Сравнивая формулы (2.10) и (2.7), определим время t_k , которое необходимо струе для достижения конечной глубины проникания h_k :

$$\frac{2,73 r_0 u_0}{c \sqrt{\frac{8\eta}{\pi \rho_1 d_0}}} = \sqrt{\frac{2,73 d_0 u_0 t_k}{c \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)}}. \quad (2.11)$$

Откуда

$$t_k = \frac{2,73 \pi \rho_1 d_0^2 u_0 \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)}{32 c \eta}. \quad (2.12)$$

Из (2.8) скорость поднятия v_n можно определить по формуле

$$v_n = \frac{d_0}{t_k}. \quad (2.13)$$

Подставляя (2.12) в (2.13) получим скорость поднятия струйного монитора v_n , при которой высоконапорная струя проникает на максимальное расстояние и не вызывает перерасхода закрепляющего раствора:

$$v_n = \frac{32 c \eta}{2,73 \pi \rho_1 d_0^2 u_0 \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)}. \quad (2.14)$$

Если в формулу (2.7) подставить (2.8), получим максимальную глубину проникания струи закрепляющего раствора в дисперсную породу:

$$h = \sqrt{\frac{2,73 d_0^3 u_0}{c v_n \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)}}. \quad (2.15)$$

Подставляя (2.14) в (2.15), получим глубину проникания, учитывающую скорость поднятия струйного монитора:

$$h = \sqrt{\frac{7,45\pi \rho_1 d_0^3 u_0^2}{32 c^2 \eta}}. \quad (2.16)$$

По формуле (2.14) построим график зависимости изменения рациональной скорости поднятия струйного монитора от глубины проникания закрепляющего раствора и давления подачи. Для расчетов использовались такие данные: диаметр сопла струйного монитора $d = 0,0045$ м и плотность закрепляющего раствора $\rho = 1600$ кг/м³. Анализируя полученный график (рис. 2.2), можно сделать вывод, что рациональная скорость поднятия монитора наиболее интенсивно изменяется при глубине проникания до 0,34 м. Из графика видно, что при уменьшении давления подачи закрепляющего раствора увеличивается рациональная скорость поднятия струйного монитора.

Построим график глубины проникания закрепляющего раствора по формуле (2.16) при давлении нагнетания $P = 150 \cdot 10^5$ Па. Анализируя график (рис. 2.3), можно сделать вывод, что глубина проникания струи раствора зависит от его плотности и ударной вязкости породы. Условно рисунок можно разделить на три зоны: первая соответствует созданию завесы в песках (глубина проникания закрепляющего раствора наибольшая и находится в пределах от 0,8 до 0,4 м); вторая - лессовых породах (глубина проникания отвечает величинам с 0,4 до 0,25 м). Наименьшая глубина проникания наблюдается в глинистых породах (третья зона), она изменяется в пределах от 0,25 до 0,2 м.

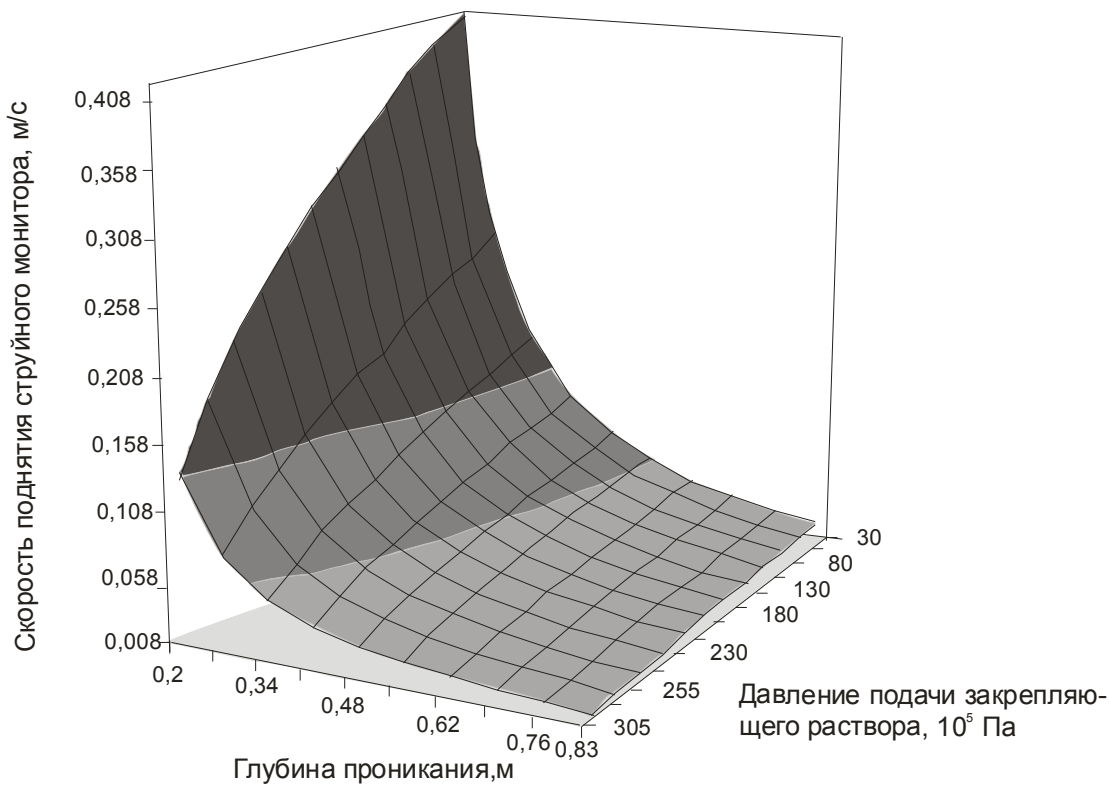
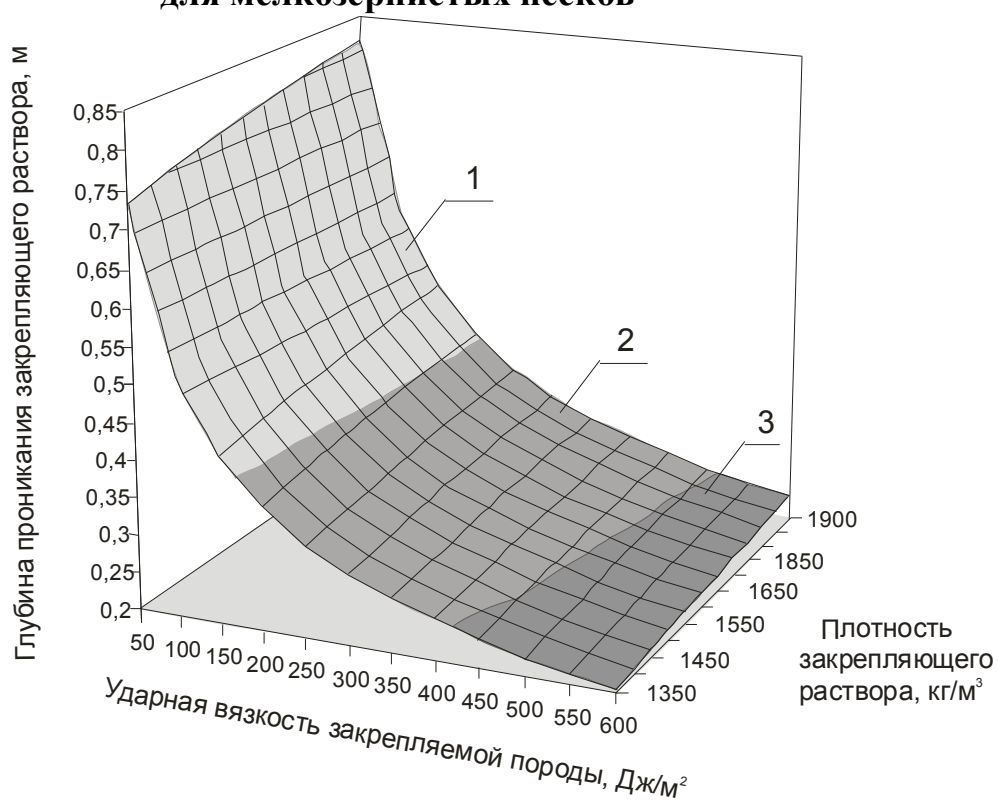


Рис. 2.2. Изменение рациональной скорости поднятия струйного монитора от глубины проникания и давления подачи закрепляющего раствора для мелкозернистых песков



**Рис. 2.3. Изменение глубины проникания от ударной вязкости породы и плотности закрепляющего раствора:
1 - песок; 2 - лесс; 3 – глина**

2.2. Определение толщины противофильтрационной завесы

В результате воздействия высоконапорной струи раствора на дисперсную породу при перемещении струйного монитора вдоль скважины будет образовываться щель, которая в процессе разрушения и перемешивания пород с цементным раствором приобретает определенную толщину (рис.2.4). Толщина щели определяет толщину всей противофильтрационной завесы, поэтому необходимо установить ее зависимость от технологических параметров закрепления.

Для определения толщины противофильтрационной завесы рассмотрим процесс расширения турбулентной струи в покоящейся среде [65; 70; 71]. В турбулентной струе компоненты скорости в любой точке можно разложить на средние по времени и пульсационные составляющие:

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad (2.17)$$

где u - продольная скорость турбулентной струи;

v - поперечная скорость турбулентной струи;

При осреднении за некоторый конечный промежуток времени пульсационные составляющие равняются нулю:

$$\bar{u}' = \bar{v}' = 0. \quad (2.18)$$

Если свободный осредненный путь жидкой частицы в турбулентном потоке равен l , то среднее значение скорости отличается от ее значения в слое на величину

$$\Delta \bar{u} = l \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}. \quad (2.19)$$

Слияние жидкой частицы с массой нового слоя должна сопровождаться скачкообразным изменением скорости на величину

$$u' = \Delta \bar{u}. \quad (2.20)$$

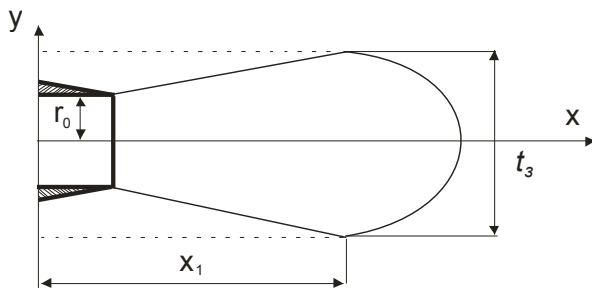
Тогда величины поперечных пульсаций скорости v' пропорциональны пульсациям главной составляющей скорости u' , но имеют противоположный знак:

$$-v' \approx u' \text{ т.е. } -v' \approx l \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}. \quad (2.21)$$

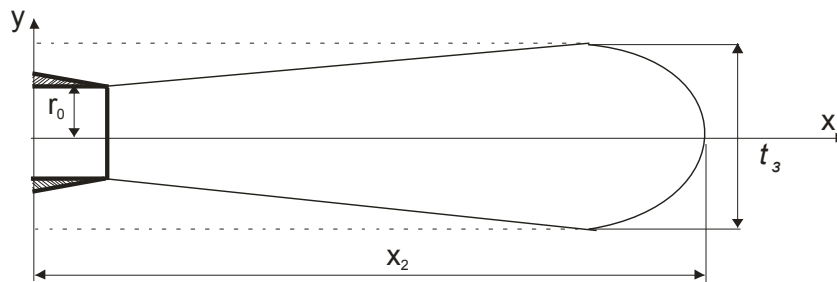
Отсутствие у свободного потока твердых границ позволило Прандтлю [72] предположить, что в случае постоянства пути смешения в поперечном сечении потока оно определяется по формуле

$$l(y) = const. \quad (2.22)$$

Закон изменения смещения вдоль оси абсцисс $l = l(x)$ может быть установлен при помощи экспериментальных данных. Достаточным основанием для этого является подобие пограничных слоев в различных поперечных сечениях свободного потока.



в) проникание на расстояние x_1



в) проникание на максимальную глубину h_k

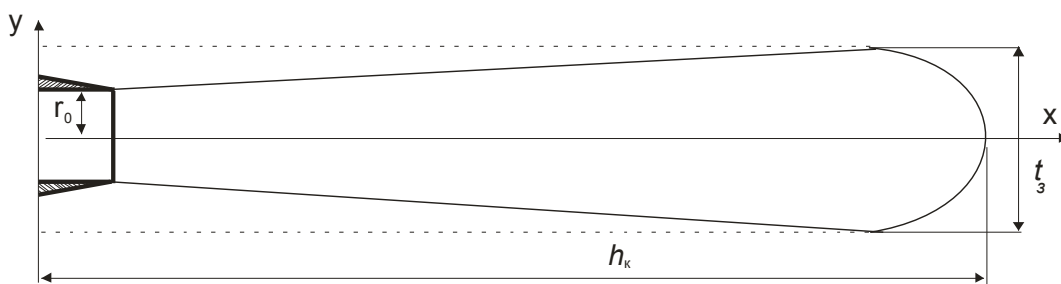


Рис. 2.4. Схема проникания струи закрепляющего раствора:

r - радиус сопла; t_3 - толщина завесы; h_k - максимальная глубина проникания струи.

Это подобие установлено в многочисленных экспериментальных работах посредством построения профилей скорости в безразмерных координатах [65]:

$$\frac{u}{u_m} = f\left(\frac{y}{b}\right), \quad (2.23)$$

где b - половина толщины (радиус) струи в данном сечении участка.

Подобие пограничных слоев в сечениях данного свободного потока включает подобие геометрических размеров:

$$\frac{l_1}{b_1} = \frac{l_2}{b_2} = \dots = const. \quad (2.24)$$

Прандтль [72] принимает, что утолщение струи обуславливается поперечной пульсационной скоростью:

$$\frac{db}{dt} \approx v' \approx -l \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}. \quad (2.25)$$

Вследствие пропорциональности скоростных профилей в различных сечениях струи можно записать, что

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \approx \frac{u_m}{b} \quad (2.26)$$

и далее, согласно (2.24), (2.25), (2.26),

$$\frac{db}{dt} \approx \frac{l}{b} u_m \approx u_m. \quad (2.27)$$

С другой стороны скорость утолщения струи [65]

$$\frac{db}{dt} = \frac{dbdx}{b} u_m \approx u_m. \quad (2.28)$$

Сравнивая выражения (2.27) и (2.28), получим зависимость возрастания толщины струи как

$$b = \frac{db}{dx} x, \quad (2.29)$$

где $\frac{db}{dx}$ - тангенс угла наклона b к x .

В нашем случае

$$\frac{db}{dt} = \frac{b - d_0/2}{h - d_1/2}, \quad (2.30)$$

где d_1 - диаметр скважины, м.

Подставляя (2.30) в (2.29), получим

$$b = \frac{b - d_0/2}{h - d_1/2}. \quad (2.31)$$

Подставляя вместо координаты x глубину проникания h и проводя преобразования, получим

$$b = \frac{d_0}{d_1} h. \quad (2.32)$$

Подставляя (2.16) в (2.32), получим

$$b = \frac{d_0}{d_1} \sqrt{\frac{7,45\pi \rho_1 d_0^3 u_0^2}{32 c^2 \eta}}. \quad (2.33)$$

Так как b - полутолщина противофильтрационной завесы, то ее толщина t_3 будет определяться как

$$t_3 = \frac{d_0}{d_1} \sqrt{\frac{7,45\pi \rho_1 d_0^3 u_0^2}{32 c^2 \eta}}. \quad (2.34)$$

На рис. 2.5 представлен график зависимости толщины противофильтрационной завесы от плотности закрепляющего раствора и ударной вязкости закрепляемой породы. График построен на основании результатов расчетов при давлении нагнета-

ния закрепляющего раствора $P=150 \cdot 10^5$ Па, диаметрах сопел струйного монитора $d=0,0045$ м и монитора $d_1=0,089$ м.

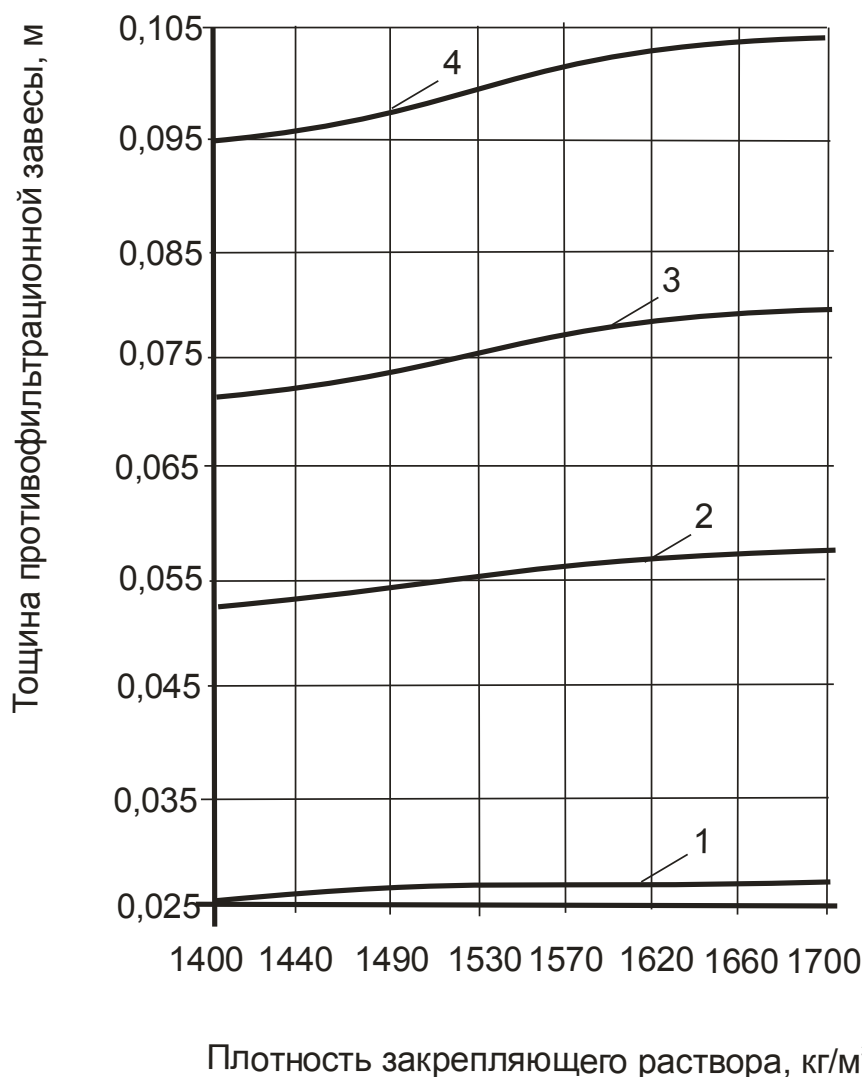


Рис. 2.5. Изменения толщины противofильтрационной завесы от плотности закрепляющего раствора для различных пород: 1- лесс; 2- мелкозернистый песок; 3- среднезернистый песок; 4- крупнозернистый песок.

Анализируя график (рис. 2.5), можно сделать вывод, что толщина противofильтрационной завесы, при увеличении плотности раствора с 1400 кг/м^3 до 1700 кг/м^3 возрастает при создании завесы в лессах - с $0,025$ м до $0,027$ м, мелкозернистых песках - с $0,053$ м до $0,057$ м, среднезернистых песках - с $0,071$ м до $0,080$ м, крупнозернистых песках - с $0,095$ м до $0,105$ м. Толщина противofильтрационной завесы, образующейся в крупнозернистых песках, в 4 раза больше, чем в лессах. На графике (рис. 2.6) представлены зависимость толщины противofильтрационной завесы от ударной вязкости породы при различной плотности закрепляющего раствора. При увеличении ударной вязкости породы с 30 Дж/м^2 до 420 Дж/м^2 толщина завесы уменьшается в 4 раза. Следует отметить, что уменьшение ударной вязкости

с 90 Дж/м^2 до 30 Дж/м^2 и изменение плотности закрепляющего раствора на толщину завесы влияет незначительно.

На основании выполненных исследований разработаны программы расчета скорости поднятия струйного монитора, глубины проникания закрепляющего раствора и толщины противofильтрационной завесы на ЭВМ (приложение А.1). Они позволяют определять технологические параметры сооружения противofильтрационных завес при решении различных горнотехнических задач.

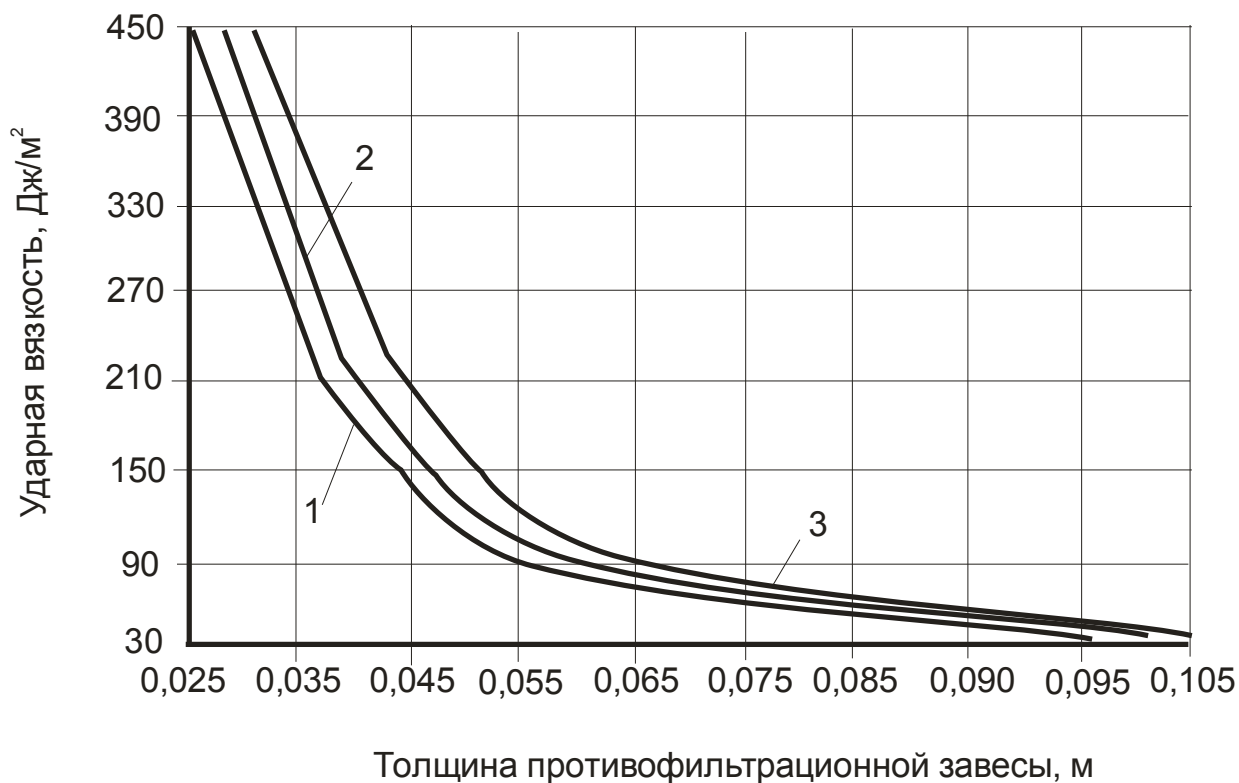


Рис. 2.6. Изменения толщины противofильтрационной завесы от ударной вязкости породы при различных плотностях закрепляющего раствора: 1- 1400 кг/м^3 ; 2- 1600 кг/м^3 ; 3- 1700 кг/м^3 .

2.3. Исследования коэффициента фильтрации для различных типов пород

В зависимости от сочетания технологических параметров, рассмотренных выше, в п.п. 2.1 и 2.2, можно изменять коэффициент фильтрации создаваемых противофильтрационных завес за счет количественного соотношения перемешивания закрепляющего раствора с дисперсной породой или замещения последней раствором.

Коэффициент фильтрации зависит от гранулометрического состава пород. Так как струйная технология используется при закреплении дисперсных пород, рассмотрим пески и лессы. К пескам относятся породы с частицами крупностью от 2 до 0,05 мм. При уменьшении размера частиц с 1 мм до 0,05 мм коэффициент фильтрации уменьшается с 72 до 0,01 м/сут [73-76] (рис. 2.7). Существенное влияние на коэффициент фильтрации горных пород оказывает форма зерен. Коэффициент фильтрации песков с увеличением угловатости зерен уменьшается в 10 раз [77].

Лессовые породы более однородны по гранулометрическому составу, так как в них преобладает пылеватая фракция (до 70-80%). При увеличении размеров частиц лесса с 0,01 до 0,05 мм коэффициент фильтрации увеличивается с 0,07 до 1,0 м/сут (рис. 2.7) [77].

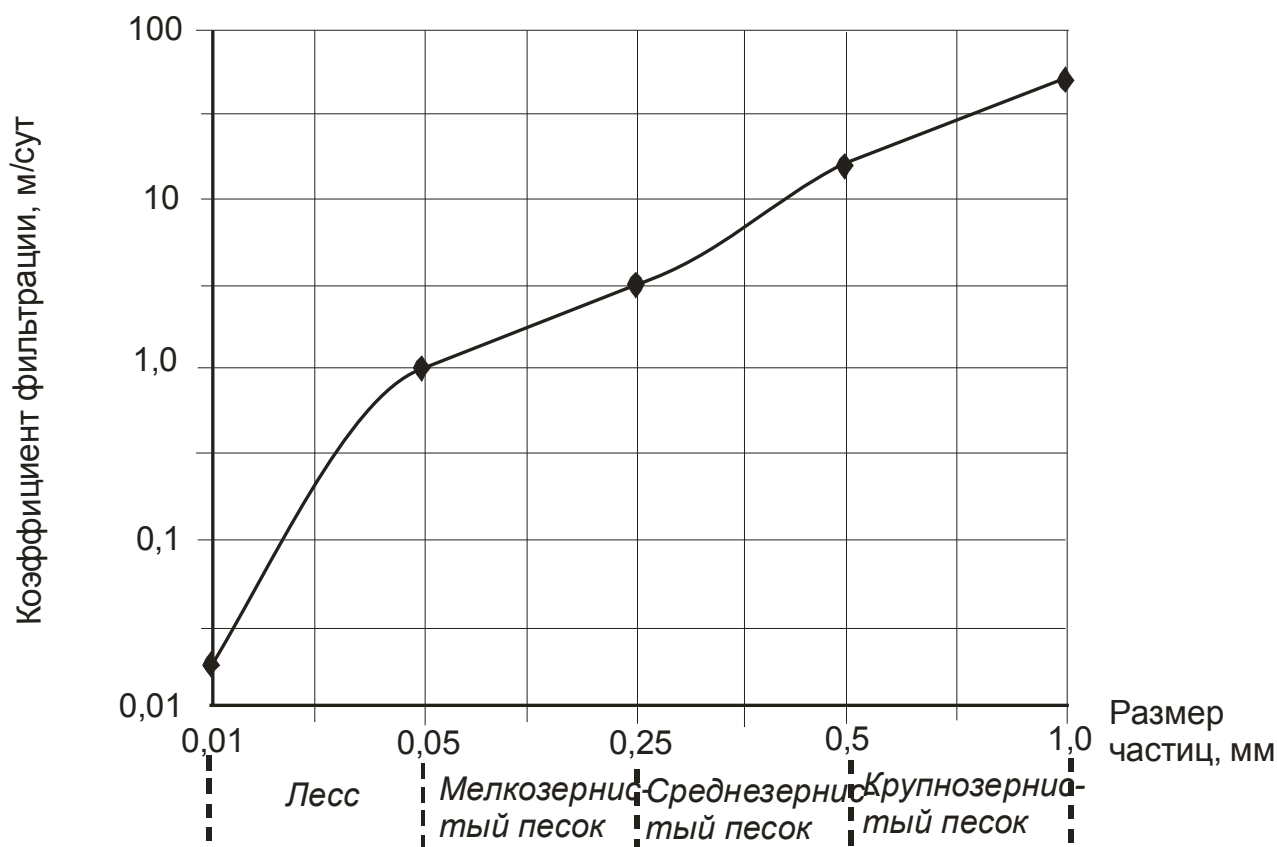


Рис. 2.7. Изменение коэффициента фильтрации от размера частиц дисперсной породы

На коэффициент фильтрации закрепленных струйной технологией пород влияние оказывают не только гранулометрический состав, но и свойства закрепляющих растворов. Рассмотрим процесс твердения цементных растворов с точки зрения проницаемости цементного камня. При смешивании цемента с водой создаются коагуляционные структуры, представляющие собой пространственный каркас из частиц вяжущего вещества, разделенных тонкими прослойками воды. При соприкосновении вяжущего с водой в образовавшейся структуре происходит процесс растворения его в воде. Образовывается перенасыщенный раствор, из которого начинают выкристаллизовываться новые фазы в виде мельчайших зародышей кристаллов. Зародыши, образующиеся на поверхности частиц вяжущего, могут отрываться от поверхности в результате ее дальнейшего растворения и переходить в объем, где продолжается их рост, и также начинается срастание с частицами вяжущего [78; 79]. В процессе срастания структура теряет свою пластичность и переходит в кристаллизационную структуру твердого тела. Образуется кристаллизационный каркас, составленный из хаотических элементов [12].

При большом количестве воды происходит раздвижение зерен цемента с водными оболочками, пространство между ними заполняется свободной водой. Продукты гидратации располагаются в большом количестве воды, поэтому образующая структура цементного камня является рыхлой и пористой [76]. Плотность цементного раствора зависит от количества воды. Чем ниже плотность раствора, тем большее количество воды присутствует при твердении и соответственно выше коэффициент фильтрации. Зависимость коэффициента фильтрации от плотности закрепляющего раствора приведена на рис. 2.8.

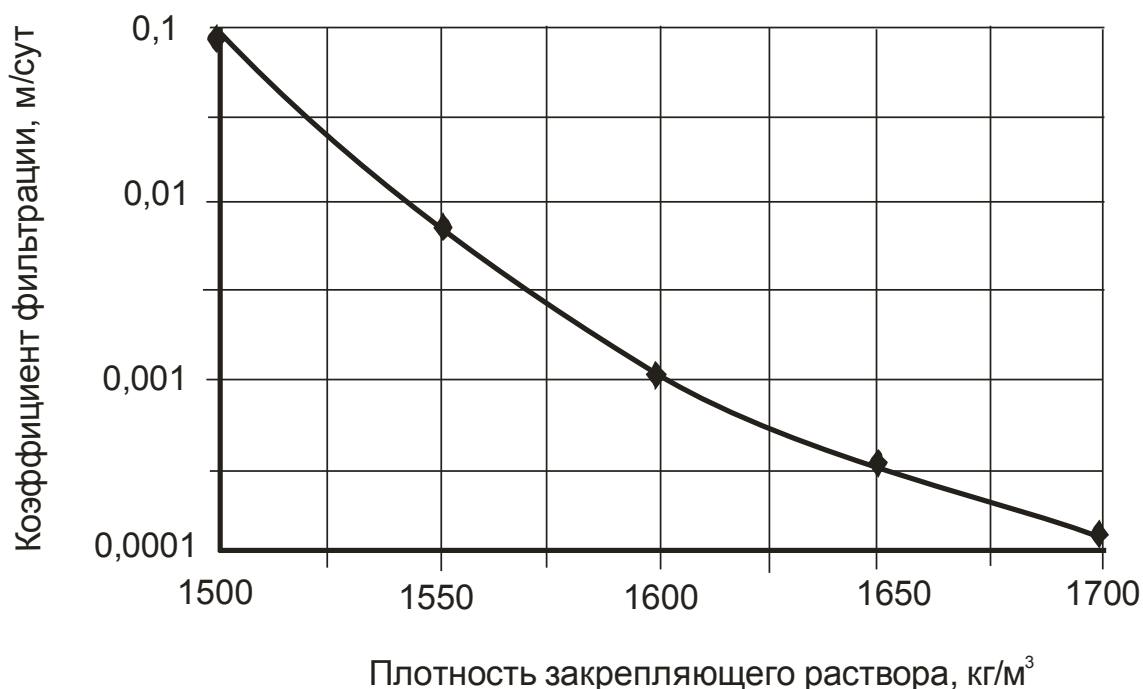


Рис. 2.8. Изменение коэффициента фильтрации цементного камня от плотности закрепляющего раствора

Одним из основных моментов, определяющих процесс твердения цементных растворов с точки зрения проницаемости, является вид закрепляемой породы в происходящих процессах. Поверхность мелкозернистого песка может служить подложкой для образования гидросиликатов и гидроалюминатов кальция с созданием хорошей адгезии между песком и гидратными новообразованиями. Появление кристаллизационных оболочек и гидратных новообразований вокруг песчинок способствуют более глубокой гидратации частиц цемента, так как они уменьшают толщину оболочек, замедляющих процесс гидратации [80].

На проницаемость закрепляемых струйной технологией породо-растворных элементов оказывает влияние внутреннее водоотделение. При внутреннем водоотделении вода скапливается под нижними поверхностями частиц песка и образует поры, которые располагаются параллельно движению струи закрепляющего раствора. Внутреннее водоотделение проявляется у частиц порядка более 0,6 мм. С уменьшением количества закрепляемой породы к объему цементного раствора внутреннее водоотделение будет уменьшаться, а наружное возрастать. При наружном водоотделении часть воды поднимается вверх располагаясь, над породно-цементной смесью. Объем пор размером 0,01-0,1 мм, возникающих в результате внутреннего водоотделения, составляет до 0,1-1% от объема закрепленной породы, а объем пор размером 0,1-1мм, возникающих в результате наружного водоотделения, составляет 1-2% от объема закрепленной породы [81].

Так как коэффициент фильтрации противofильтрационных завес зависит от плотности закрепляющего раствора и его объема в закрепленной породе, установим его связь с технологическими параметрами струйной технологии. Для этого определим объем закрепленной породы по формуле

$$V_1 = h t H, \quad (2.35)$$

где h - глубина проникания закрепляющего раствора, м;

t - толщина противofильтрационной завесы, м;

H - высота закрепления, м.

Затем определяем количество закрепляющего раствора V_2 , израсходованного на весь объем закрепленной породы V_1 , по формуле

$$V_2 = QT = \frac{\pi d_0^2}{4} \mu \sqrt{\frac{2P}{\rho_1}} \frac{H}{v_n}, \quad (2.36)$$

где Q - расход закрепляющего раствора, м³/ч;

T - время закрепления зоны высотой H , м;

d_0 - диаметр сопла, м;

μ - коэффициент расхода сопла;

P - давление подачи закрепляющего раствора, Па;

ρ_1 - плотность закрепляющего раствора, кг/м³;

v_n - рациональная скорость поднятия струйного монитора, м/с.

Тогда процентное содержание закрепляющего раствора в закрепленном образце составляет

$$V = \frac{V_2}{V_1} 100\% . \quad (2.37)$$

По результатам исследований В.П. Сизова [82; 83] была получена зависимость коэффициента фильтрации от различной плотности закрепляющего раствора (рис. 2.9, 2.10) при различных объемах закрепляющего раствора в образце. Анализируя полученные графики, можно сделать вывод, что увеличение объемов закрепляющего раствора с 50% до 75% уменьшает коэффициент фильтрации на 10% - 40%. Увеличение же плотности цементного раствора с 1400 кг/м^3 до 1700 кг/м^3 , уменьшает коэффициент фильтрации в 2-4 раза. Наименьшие коэффициенты фильтрации наблюдаются в лессовых породах.

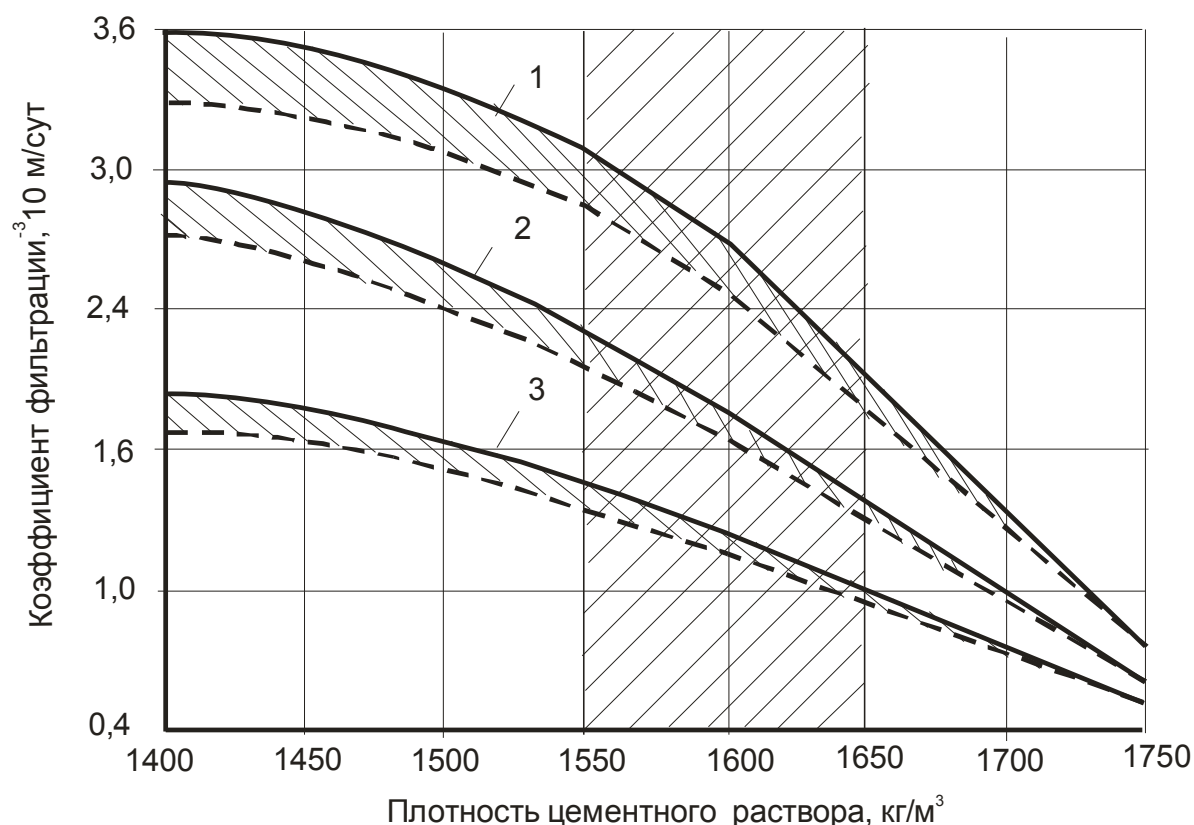


Рис. 2.9. Зависимость коэффициента фильтрации от плотности цементного раствора для различных песков:
 1- крупнозернистый песок; 2- среднезернистый песок; 3- мелкозернистый песок;
 ————— - 50% закрепляющего раствора в образце;
 - - - - - 75% закрепляющего раствора в образце.

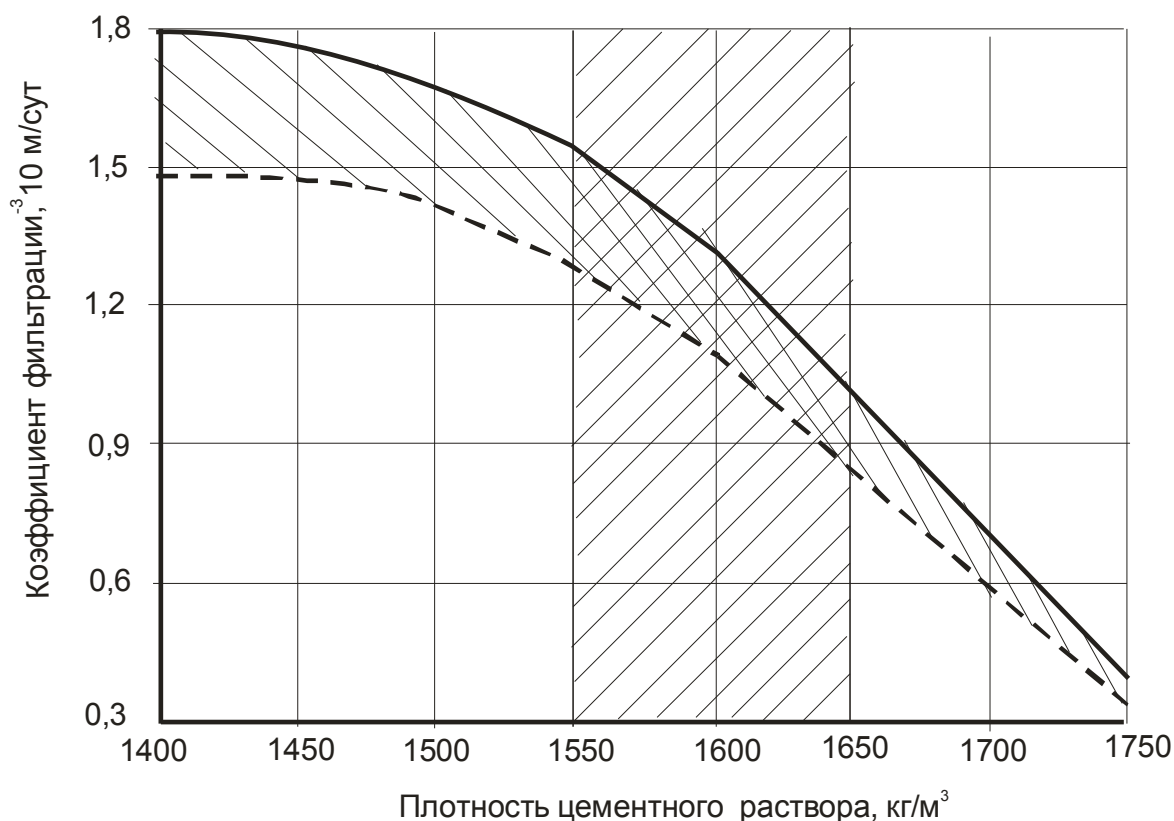


Рис. 2.10. Зависимость коэффициента фильтрации от плотности цементного раствора для лессов:

- - 50% закрепляющего раствора в образце;
- - - - 75% закрепляющего раствора в образце.

2.4. Определение толщины зоны чистого закрепляющего раствора

При создании противofильтрационных завес с помощью струйной технологии закрепления дисперсных пород струя цементного раствора проникает в породу и перемешивается с ней. При определенном диаметре сопла и технологических параметрах закрепления в мелкозернистых песках в конце основного участка движения струи образуется зона чистого цементного раствора. Это связано с малой скоростью частичек закрепляющего раствора.

Так как коэффициент фильтрации у зоны чистого раствора ниже, чем у зоны, содержащей закрепляющий раствор и породу, то это явление может быть использовано для повышения эффективности создаваемой противofильтрационной завесы. Поэтому определенным интересом представляет величина толщины этой зоны и ее зависимость от различных технологических параметров [84].

При проникании закрепляющего раствора в породу струя выходит из сопла и движется с начальной скоростью u_0 .

Согласно [69], скорость на оси струи в начале зоны чистого закрепляющего раствора

$$u_z = \frac{1,365 d_0 u_0}{l_x c}, \quad (2.38)$$

где u_z - скорость в начале зоны чистого закрепляющего раствора, м/с;

u_0 - начальная скорость закрепляющего раствора, м/с;

d_0 - диаметр сопла струйного монитора, м;

c - экспериментальная функция [69];

l_x - расстояния до зоны чистого закрепляющего раствора, м.

Отсюда

$$l_x = \frac{1,365 d_0 u_0}{u_z c}, \quad (2.39)$$

Скорость в конце зоны чистого закрепляющего раствора определяем по формуле 2.6. Тогда скорость в начале зоны чистого закрепляющего раствора можно записать так:

$$u_z = \chi u_k, \quad (2.40)$$

где χ - коэффициент, определяемый экспериментально.

Тогда толщину зоны чистого закрепляющего раствора можно определить как

$$T_z = h - l_x, \quad (2.50)$$

где h - глубина проникания раствора, м.

Дальнейшей задачей исследований будет определение в лабораторных условиях толщины зоны чистого закрепляющего раствора и коэффициента χ при технологических параметрах струйного закрепления.

ВЫВОДЫ

1. Получена зависимость скорости поднятия струйного монитора v_n , при которой глубина проникания будет максимальной и не вызовет перерасхода закрепляющего раствора:

$$v_n = \frac{32 c \eta}{2,73 \pi \rho_1 d_0^2 u_0 \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)},$$

где η - ударная вязкость закрепляемой породы, Дж/м²;

ρ_1 - плотность закрепляемой породы, кг/м³;

ρ_2 - плотность закрепляемой породы, кг/м³;

d_0 - диаметр сопла струйного монитора, м;

u_0 - начальная скорость струи, м/с;

c - экспериментальная функция .

2. На основании теоретических исследований установлена зависимость глубины проникания h высоконапорных струй закрепляющего вещества в дисперсную породу:

$$h = \sqrt{\frac{7,45\pi \rho_1 d_0^3 u_0^2}{32 c^2 \eta}}.$$

3. Установлена зависимость толщины противofильтрационной завесы t_3 от плотностей закрепляющего раствора и породы, давления нагнетания раствора, диаметра сопла и скорости поднятия монитора. Она позволяет теоретически рассчитать толщину противofильтрационной завесы при проникании высоконапорных струй закрепляющих растворов в дисперсные породы:

$$t_3 = \frac{d_0}{d_1} \sqrt{\frac{7,45\pi \rho_1 d_0^3 u_0^2}{32 c^2 \eta}}.$$

4. Построены графики зависимости коэффициента фильтрации от объема закрепляющего раствора в образце для различных пород. Также получены графики зависимости объемов закрепляющего раствора в породе от технологических параметров струйной технологии, которые позволяют определить коэффициент фильтрации закрепляемых пород.

5. В результате теоретических исследований обоснована толщина зоны чистого цемента в мелкозернистых песках.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД СТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

3.1. Методика экспериментальных исследований формирования противofильтрационной завесы с помощью струйного закрепления

Исследования проводились на трех типах пород, наиболее часто встречающихся в Украине: среднезернистые и мелкозернистые пески с $K_{\phi} = 9 - 12$ м/сут, $K_{\phi} = 1,8 - 2$ м/сут соответственно и лесс с $K_{\phi} = 0,1 - 0,3$ м/сут.

Они выполнялись в такой последовательности:

- на первом этапе определялась плотность, ударная вязкость и коэффициент фильтрации исследуемых пород;
- на втором - плотность закрепляющего раствора;
- на третьем - с помощью формул, приведенных в разделе 2, определялась рациональная скорость поднятия струйного монитора, глубина проникания и давление закрепляющего раствора;
- на четвертом этапе с помощью экспериментальной установки выполнялся сам процесс формирования противofильтрационных завес при различных значениях скоростей поднятия и давления нагнетания раствора;
- на пятом этапе определяли фильтрационные и прочностные свойства закрепленных пород.

Анализ и обобщение результатов на всех стадиях исследования позволял совершенствовать способ формирования противofильтрационных завес с помощью высоконапорных струй закрепляющего раствора.

Исследования проводились на модернизированной буровой установке УКБ 12/25С (рис.3.1), состоящей из направляющей стойки 1, электродвигателя 16 с редуктором 15, соединенного с лебедкой и цепным механизмом подачи вращателя 2, электродвигателя 3, соединительной муфты 4, буровой штанги 5 со струйным монитором 6. Верхний патрубок вращателя 2 соединялся с помощью резинового шланга 9 через вентиль 10 с емкостью 12. В емкость 12 заливался исследуемый раствор. Для предотвращения седиментации раствора он перемешивался с помощью смесителя 13. Нагнетания раствора производились компрессором 14. Величина давления контролировалась манометром 11. Для моделирования породного массива использовалась разборная емкость 7. Укладка породы в емкость производилась несколькими способами в зависимости от типа породы и необходимой ее влажности. При моделировании закрепленных песков с влажностью менее 14 % укладка производилась послойно. Для избежания различной плотности укладываемой породы она трамбовалась деревянным пестиком, после чего сверху устанавливалась крышка с отверстием для прохождения струйного монитора. При работе с водонасыщенным песком укладка осуществлялась следующим образом. После сборки емкости исследуемая порода засыпалась небольшими порциями и заливалась водой. Уровень воды поддерживался на 3-5 см выше уровня песка. Таким образом, достигалась наиболее близкая к природной плотности исследуемой породы.



Рис.3.1. Экспериментальная установка для моделирования формирования противофильтрационной завесы с помощью высоконапорных струй закрепляющего раствора:

- 1 - направляющая стойка; 2 - вращатель; 3 - электродвигатель; 4 - соединительная муфта; 5 - буровая штанга; 6 - струйный монитор; 7 - емкость для закрепляемой породы; 8 - редуктор подъема и опускания; 9 - резиновый шланг; 10 - вентиль; 11 - манометр; 12 - емкость закрепляющего раствора; 13 - смеситель; 14 - компрессор; 15 - переключатель подъема и опускания монитора; 16 - электродвигатель подъема и опускания струйного монитора.

Процесс загрузки лессовых пород выполнялся следующим образом. Из монолитов исследуемого грунта вырезались кубики $10 \times 10 \times 10$ см, которые помещались в емкость послойно. Это связано с тем, что лессы имеют определенную пористую структуру, причем поры в грунте расположены вертикально. Исследования лессовых грунтов с влажностью 30% проводились на образцах с искусственной структурой, так как при такой влажности образцы с ненарушенной структурой приготовить не удалось.

Для формирования противофильтрационных завес использовались цементные растворы, химический состав которых приведен в табл. 3.1

Таблица 3.1

Содержание клинкерных минералов в цементе

Содержание клинкерных минералов, %			
C_3S	C_2S	C_3A	C_4AT
46	36	4	9

После подготовки установки к эксперименту приготавливался раствор для закрепления. Цемент смешивался с водой в заданных объемах. После смешивания проверялась плотность и вязкость раствора. Раствор перед опытом выстаивался около 15 минут для более полного затворения водой и заливали в емкость 12. Расход за-

крепляющего раствора определяли по оставшемуся после закрепления объему в емкости 12.

Следующий этап - непосредственно формирование противофильтрационной завесы. В емкости 12 смесителем 13 перемешивали раствор. Затем компрессором 14 создавали давление, контролируемое манометром 11. После этого при помощи лебедки 8 опускали струйный монитор на дно емкости 7. Включали электродвигатель 16, который через редуктор 15 и лебедку 8 поднимал струйный монитор с заданной скоростью, и одновременно открывали вентиль 10. Подъем осуществляли на 0,5 м. После окончания опыта систему промывали чистой водой.

Через трое суток закрепленные образцы извлекали из емкости 7 и определяли их геометрические размеры и физико-механические свойства.

После установления геометрических размеров лабораторным методом определялось количество породы в закрепленном образце. Физико-механические свойства закрепленных образцов породы определялись через 3, 7 и 28 суток. Прочность на сжатие определялась на приборе ПР-120, а коэффициент фильтрации - по известной методике [74-75]. После этого определялся расход воды и рассчитывался коэффициент фильтрации по формуле

$$K_{\phi} = A \frac{QL}{SH}, \quad (3.1)$$

где K_{ϕ} - коэффициент фильтрации, м/с;

$A=864$ - переводной коэффициент из см/с в м/с;

Q - расход воды, см³/с;

L - длина образца, см;

S - площадь образца, см²;

H - давление воздуха, см. вод. ст.

Экспериментальные исследования проводилась при различных плотностях закрепляющего раствора и влажности пород, $w=14\%$ и $w=30\%$. Компрессор позволял создавать давление до $6 \cdot 10^5$ Па.

3.2. Результаты исследования изменения толщины и длины элемента завесы от технологических параметров

Для проведения исследований изменения толщины и длины элемента противофильтрационной завесы от технологических параметров струйной технологии использовались:

- в качестве закрепляющего раствора - цементный раствор различной плотности;

- в качестве закрепляемой породы – пески и лессы.

Эксперименты проводились на установке для струйного закрепления пород (рис.3.1) и по методике, приведенной в п.п. 3.1. Результаты исследований для определения толщины завесы приведены в табл. 3.2.

Толщина элемента завесы при различных давлениях
в мелкозернистых песках

d_0 , м	ρ_1 , М	t_3
0,0030	1400	0,014
0,0030	1550	0,027
0,0030	1700	0,030
0,0045	1400	0,023
0,0045	1600	0,037
0,0045	1700	0,058
0,0060	1400	0,032
0,0060	1600	0,055
0,0060	1700	0,080

Зависимость толщины завесы от диаметра сопла струйного монитора приведена на рис.3.2. Из приведенного графика можно сделать выводы, что зависимость между толщиной противофильтрационной завесы и диаметром сопла изменяется по степенному закону. При увеличении диаметра сопла с 0,003 до 0,006 м толщина завесы увеличилась с 0,03 м до 0,08 м. Коэффициент корреляции при объеме выборки $n = 15$ составил $r = -0,3$.

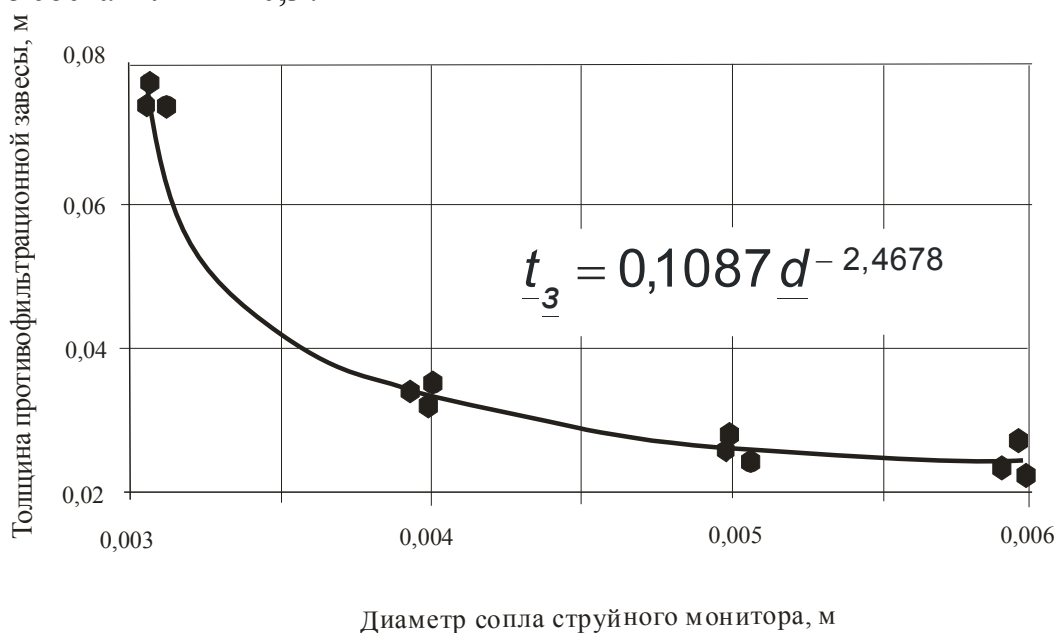


Рис. 3.2. Изменения толщины противофильтрационной завесы от диаметра сопла струйного монитора

При увеличении плотности закрепляющего раствора толщина противофильтрационной завесы возрастает. Из графика (рис. 3.3) видно, что чем больше плотность закрепляющего раствора, тем больше толщина завесы. Изменение плотности с 1425 кг/м^3 до 1750 кг/м^3 Па увеличивает толщину завесы в мелкозернистых песках с

0,01 м до 0,07 м. Коэффициент корреляции при объеме выборки $n = 15$ составляет $r = 0,8$ [85].

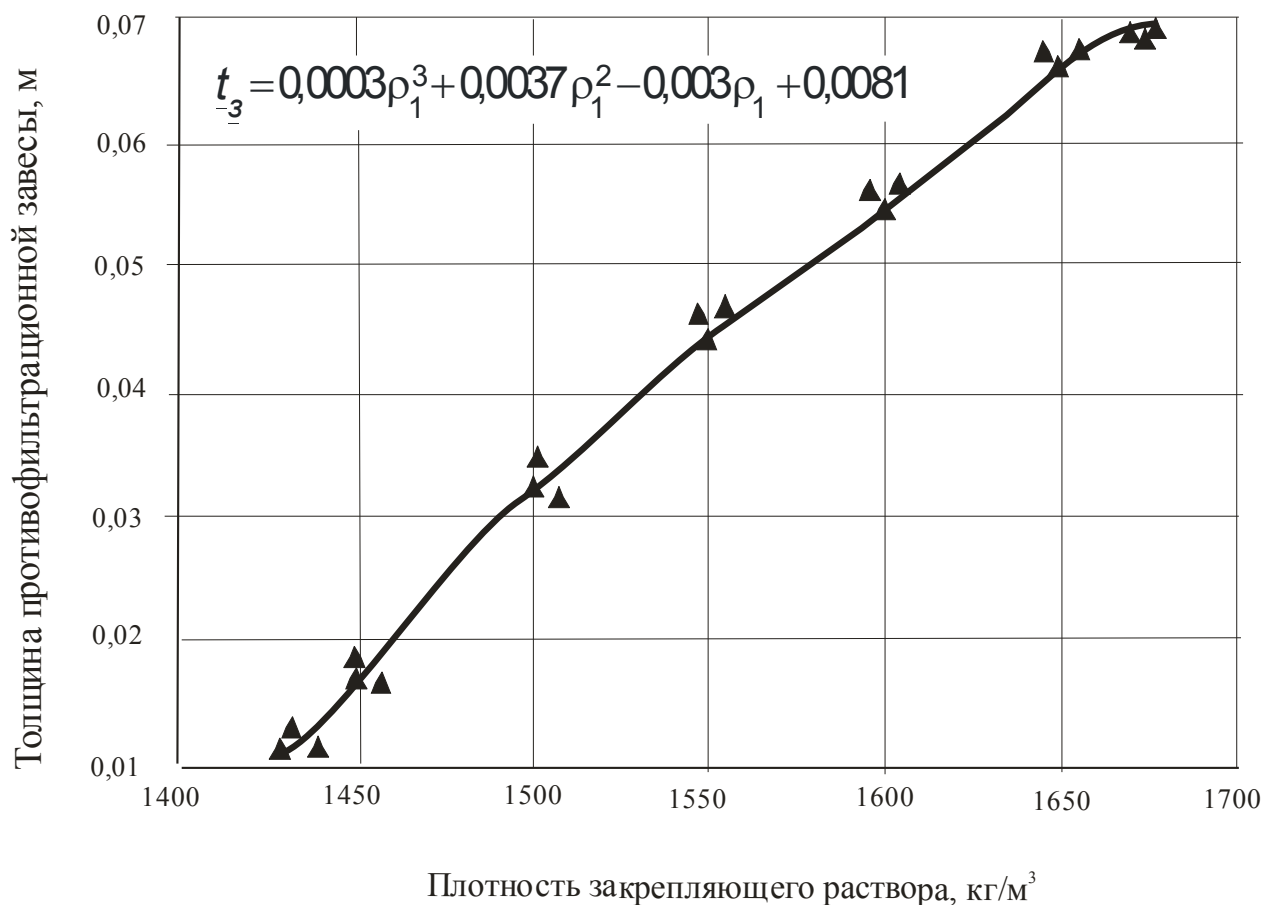


Рис. 3.3. Изменения толщины противofiltrационной завесы от давления закрепляющего раствора

Результаты экспериментальных исследований по определению длины элемента завесы приведены в таблице 3.3. Анализируя данные результаты, можно сделать вывод, что при уменьшении ударной вязкости породы длина элемента завесы увеличивается, а при увеличении плотности закрепляющего раствора уменьшается.

На рис. 3.4 показано изменение длины элемента завесы с изменением давления закрепляющего раствора в трех типах пород. Увеличение давления подачи раствора с $2 \cdot 10^5$ Па до $6 \cdot 10^5$ Па приводит к увеличению длины элемента завесы в 1,5 – 2 раза во всех исследуемых породах. Коэффициент корреляции при объеме выборки для трех типов пород составляет $r = 0,6 - 0,7$.

Таким образом, в результате исследований установлено, что толщина и длина элемента противofiltrационной завесы зависит от плотности и давления закрепляющего раствора, скорости поднятия струйного монитора и ударной вязкости дисперсных пород.

Длина элемента завесы при различных плотностях закрепляющего раствора и ударной вязкости пород.

№ п/п	η , Дж/м ²	ρ_1 , М	h , м
1	30	1400	0,095
2	30	1600	0,092
3	30	1710	0,090
4	90	1400	0,054
5	90	1600	0,053
6	90	1710	0,052
7	470	1400	0,040
8	470	1600	0,035
9	470	1710	0,025

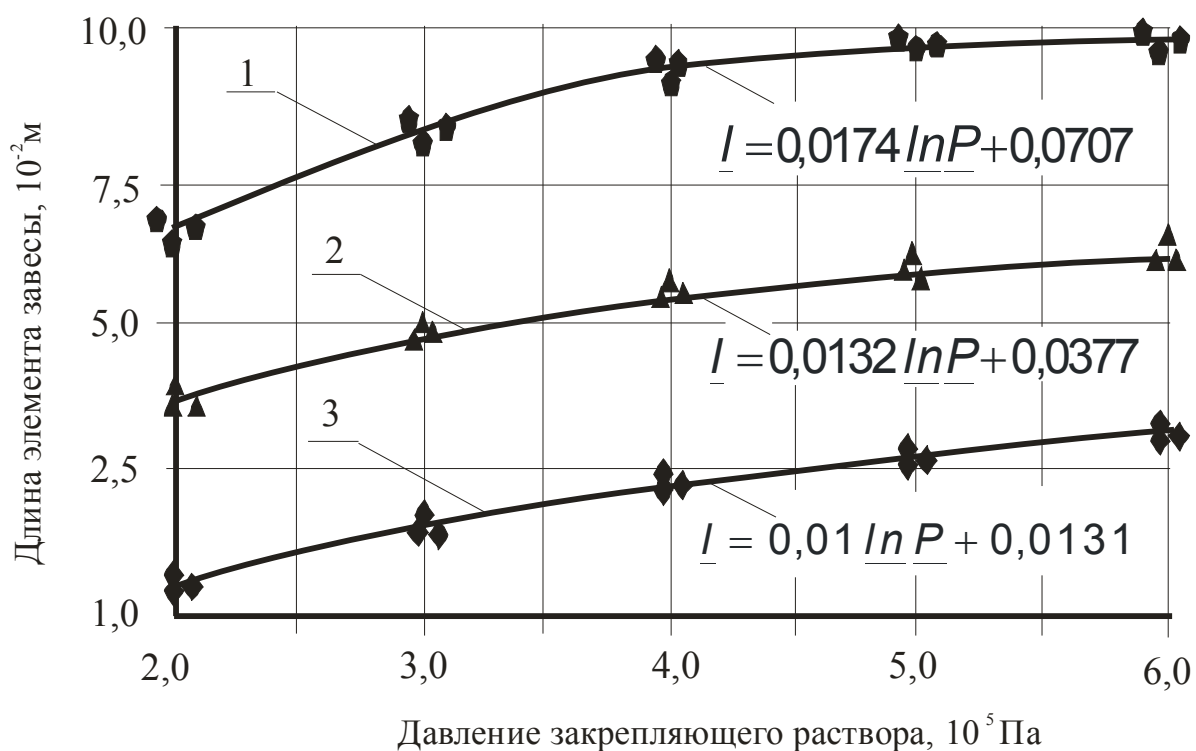


Рис. 3.4. Изменения длины элемента противифльтрационной завесы от давления закрепляющего раствора для различных пород:

1- крупнозернистый песок; 2- мелкозернистый песок; 3- лесс;

3.3. Обоснования критериальной зависимости процесса изменения толщины противofильтрационной завесы

Геометрические размеры и физико-механические свойства противofильтрационных завес, создаваемых с использованием струйной технологии, зависят от физических и технологических параметров закрепления [86].

Процесс разрушения струей закрепляющего раствора дисперсной породы можно описать параметрами:

t_s - толщина противofильтрационной завесы, м;

d_0 - диаметр сопла, м;

ρ_1 - плотность закрепляющего раствора, кг/м³;

P_0 - давление закрепляющего раствора, Па;

v_n - скорость поднятия монитора, м/с;

u_0 - скорость струи на выходе из сопла, м/с;

μ - динамическая вязкость жидкости;

h - глубина проникания струи, м;

Q - расход закрепляющего раствора, м³/с;

ρ_2 - плотность закрепляемой породы, кг/м³;

η - ударная вязкость породы, Дж/м²;

w - влажность породы, %.

В качестве параметров, характеризующих породу; следует принять плотность закрепляемой породы ρ_2 и коэффициент ударной вязкости η , полученный в работе [67]. Ударная вязкость характеризует соотношение энергии, необходимой для разрушения образца к площади его сечения. Увеличение плотности и ударной вязкости закрепляемой породы приводит к уменьшению толщины завесы, глубины проникания закрепляющего раствора. В породах с большой ударной вязкостью, как правило, коэффициент фильтрации ниже. При увеличении влажности w закрепляемой породы увеличивается длина элемента и толщина завесы, но мы этот параметр учитывать не будем, так как он учитывается в плотности и ударной вязкости закрепляемой породы.

При увеличении диаметра сопла d_0 и повышении давления подачи закрепляющего раствора P_0 длина элемента и толщина противofильтрационной завесы увеличивается. Такие параметры, как скорость струи на выходе из сопла u_0 и расход закрепляющего раствора Q связаны зависимостями с диаметром сопла d_0 и давлением P_0 следующими формулами [53]:

$$u_0 = \mu \sqrt{\frac{2 \cdot P_0}{\rho_1}}; \quad Q = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \mu \sqrt{\frac{2 \cdot P_0}{\rho_1}} .$$

Таким образом, для установления зависимости толщины завесы от технологических параметров достаточно рассматривать лишь два параметра. Коэффициент

динамической вязкости жидкости μ входит в формулу расхода закрепляющего раствора, поэтому его учитывать не будем. При увеличении скорости поднятия струйного монитора v_n уменьшается глубина проникания и толщина завесы.

В результате анализа различных технологических параметров струйного закрепления пород установлено их влияние на геометрические параметры завесы. В качестве определяющих параметров были выбраны следующие:

t_3 - толщина противofiltrационной завесы, м;

ρ_1 - плотность закрепляющего раствора, кг/м³;

ρ_2 - плотность закрепляемой породы, кг/м³;

η - ударная вязкость породы, Дж/м²;

d_0 - диаметр сопла, м;

P_0 - давление закрепляющего раствора, Па;

v_n - скорость поднятия монитора, м/с.

Таким образом, изменение толщины противofiltrационной завесы можно описать следующей параметрической зависимостью:

$$t_3 = f(\rho_1, \rho_2, \eta, d_0, P_0, v_n). \quad (3.2)$$

На основании теории размерностей и подобия можно получить из (3.2) критериальную зависимость этого процесса. В качестве независимых параметров примем следующие: диаметр сопла - d_0 , скорость поднятия монитора - v_n , плотность закрепляющего раствора - ρ_1 . Тогда критериальная зависимость примет вид

$$t_3 = K_1 f_1(v_n) f_2(d_0) f_3(P_0). \quad (3.3)$$

После преобразований получим функциональную зависимость

$$\frac{t_3}{d_0} = F\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}; \frac{\eta}{P_0 d_0}; \frac{P_0}{\rho_1 v_n^2}\right). \quad (3.4)$$

Критерий $\frac{\rho_1}{\rho_2}$ показывает соотношение плотностей разрушаемой дисперсной

породы и вещества струи. Критерий $\frac{\eta}{P_0 d_0}$ - описывает соотношение сил сопротивления

породы к силам инерции. Критерий $\frac{P_0}{\rho_1 v_n^2}$ описывает соотношение сил давления к кинетической энергии струи.

Тогда толщина противofiltrационной завесы будет описываться формулой

$$t_3 = c_1 d_0 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{K_1} \left(\frac{\eta}{P_0 d_0}\right)^{K_2} \left(\frac{P_0}{\rho_1 v_n^2}\right)^{K_3} \quad (3.5)$$

где c_1, K_1, K_2, K_3 - коэффициенты, которые определяются экспериментально;

v_n - скорость поднятия струйного монитора.

По результатам исследований, представленных в п.п. 3.2, используя программу MATHCAD-7, можно рассчитать требуемые коэффициенты. Тогда окончательная формула примет вид

$$t_z = 15,923 d_0 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{-4,774} \left(\frac{\eta}{P_0 d_0} \right)^{0,086} \left(\frac{P_0}{\rho_1 v_n^2} \right)^{0,164} \quad (3.6)$$

На основании формулы (3.6) можно построить график зависимости толщины завесы от плотности закрепляющего раствора и ударной вязкости породы (рис. 3.5).

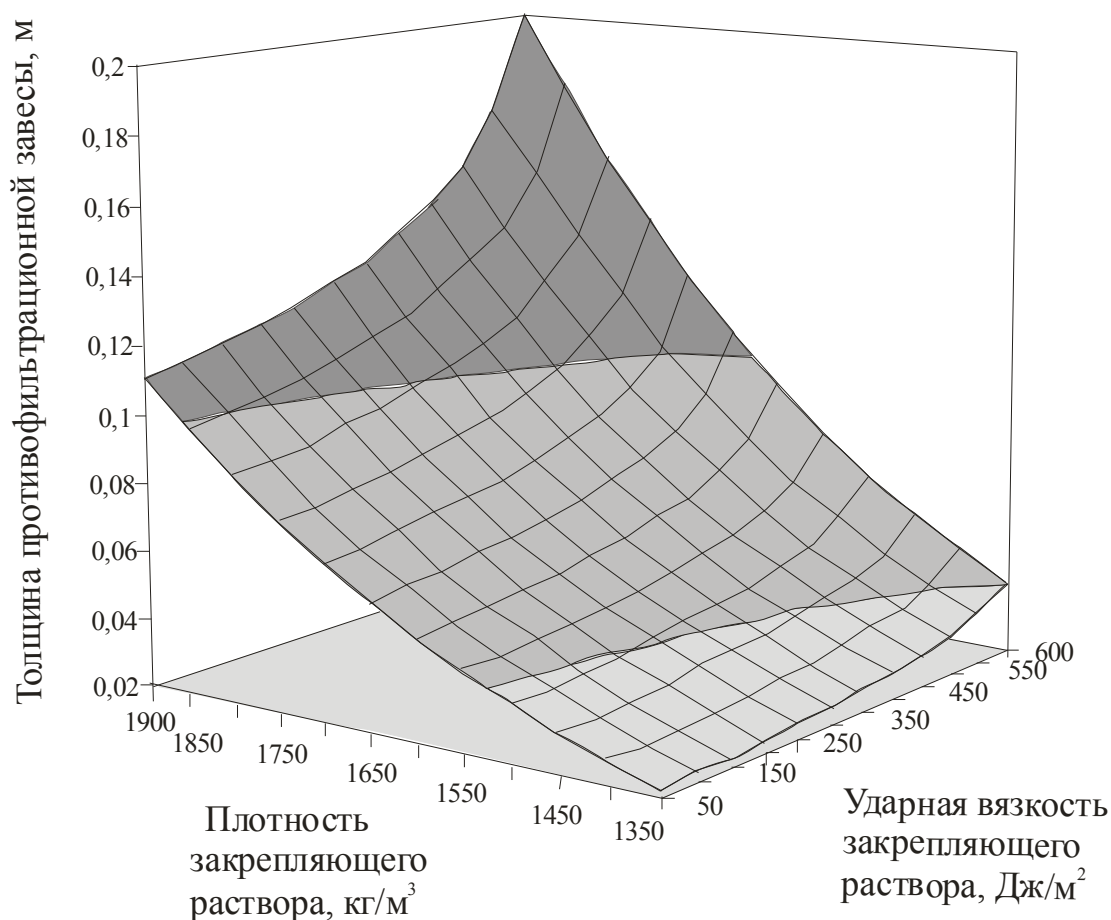


Рис.3.5. Изменение толщины противofiltrационной завесы от ударной вязкости и плотности закрепляющего раствора

На этом рисунке представлены результаты расчетов по закреплению песка плотностью 2400 кг/м^3 при давлении подачи закрепляющего раствора $150 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и диаметре сопла струйного монитора, равным $0,045 \text{ м}$.

Анализируя данный график, можно сделать вывод, что толщина противofiltrационной завесы значительно зависит от плотности закрепляющего раствора. Условно рисунок можно разделить на три зоны. В первой зоне плотность закрепляющего раствора соответствует $1850 - 1900 \text{ кг/м}^3$. Толщина противofiltrационной завесы здесь наибольшая - от $0,126 - 0,205 \text{ м}$, но закреплять раствора такой плотности технически очень сложно.

Во второй зоне плотность закрепляющего раствора - от 1550 до 1850 кг/м³. Толщина противofильтрационной завесы здесь составляет от 0,065 до 0,126 м.

Третья зона соответствует случаю подачи закрепляющего раствора плотностью от 1350 до 1550 кг/м³, здесь толщина противofильтрационной завесы - 0,025-0,065 м.

3.4. Результаты исследований зависимости объемов закрепляющего раствора в породе от технологических параметров закрепления

Для подтверждения взаимосвязи объемов закрепляющего раствора и технологических параметров струйного закрепления в закрепленном объеме были проведены исследования с использованием обводненных мелкозернистых песков с ударной вязкостью $\eta=90$ Дж/м² и лессов с ударной вязкостью $\eta=447$ Дж/м², при влажности $w=14\%$. При использовании струйного монитора с диаметром сопла $d=0,003$ м давление закрепляющего раствора составило $P=0,4$ МПа и скорость поднятия струйного монитора - $v=0,01$.

Результаты исследований (рис. 3.6) показывают, что в песках при увеличении плотности закрепляющего раствора с 1400 до 1800 кг/м³ увеличивается содержание закрепляющего раствора в объеме закрепленной породы с 47 до 80%. Для песков с влажностью 30% содержание закрепляющего раствора увеличилось с 20 до 60%. При увеличении влажности песка с 14 до 30% происходит уменьшение объема закрепляющего раствора в исследуемом образце в 1,5-2 раза. Коэффициенты корреляции при объеме выборки для разной влажности песков $n=15$ составил $r=0,6-0,65$.

Интересные результаты были получены при закреплении элементов завес с породами, имеющими различный гранулометрический состав. Исследования проводились на установке струйного закрепления (рис.3.1) для лессов, мелко- и крупнозернистых песков при влажности $w=15\%$.

Для лессовых пород с размером зерен 0,01 - 0,1 мм объем закрепляющего раствора составлял более 70%, для мелкозернистых песков с крупностью зерен от 0,1-0,25 мм - более 60% и среднезернистых песков с размерами зерен 0,25-0,5 мм - более 50% (рис 3.7). Коэффициент корреляции при объеме выборки $n=15$, составил $r=-0,6$.

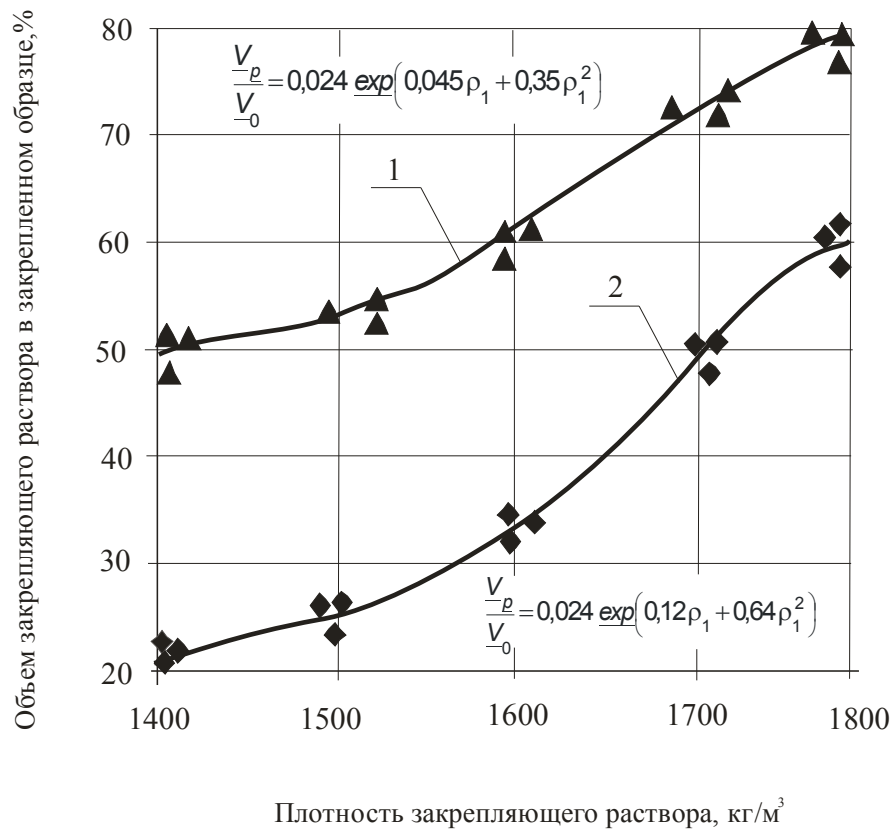


Рис. 3.6. Зависимость объема закрепляющего раствора в закрепленном образце мелкозернистых песков от плотности раствора:
1 -15% -влажность породы; 2 -30% -влажность породы;

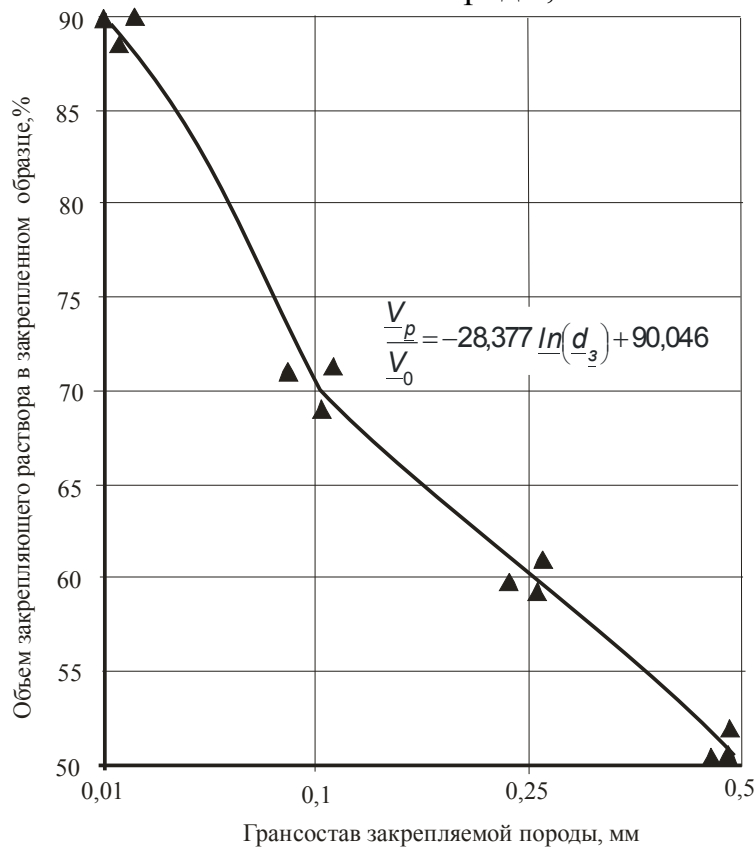


Рис. 3.7. Зависимость объема перемешиваемого грунта от гранулометрического состава пород

3.5. Экспериментальная проверка образования зоны чистого цемента

В лабораторных экспериментах использовался струйный монитор с диаметром сопла $d = 0,003$ м, давление закрепляющего раствора составляло $P = 0,4$ МПа. В качестве раствора использовалась цементная суспензия различной плотности.

Сначала измерялось расстояние l_x (2.39), а после этого из образцов изготавливались шлифы для установления ширины T_z зоны чистого закрепляющего раствора.

На рис. 3.8 и 3.9 представлены фотографии шлифов зоны перемешивания с цементом и чистого закрепляющего раствора. При рассмотрении их под микроскопом видно, как струя закрепляющего раствора, проникая в породу, движется в продольном и поперечном направлении, при этом поворачивая песчинки закрепленной породы (рис. 3.8). При достижении конечной глубины проникания струя движется в обратном направлении и образует зону чистого закрепляющего раствора (рис.3.9).

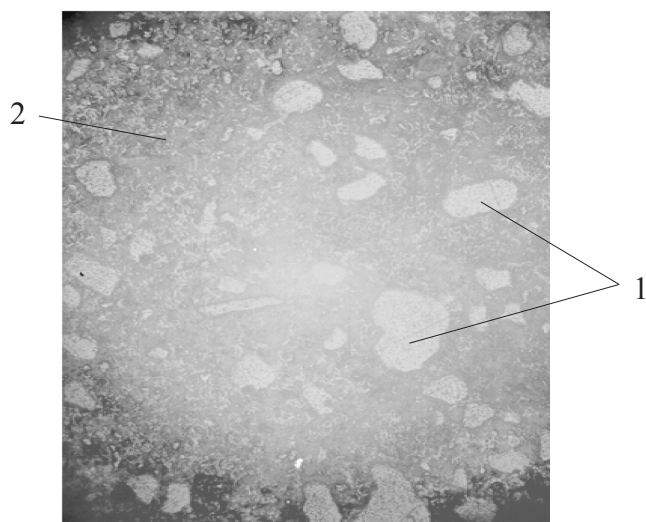


Рис. 3.8. Снимок из шлифа закрепленной породы (объектив 3,6х(-)):
1- песчинки породы; 2- закрепляющий раствор

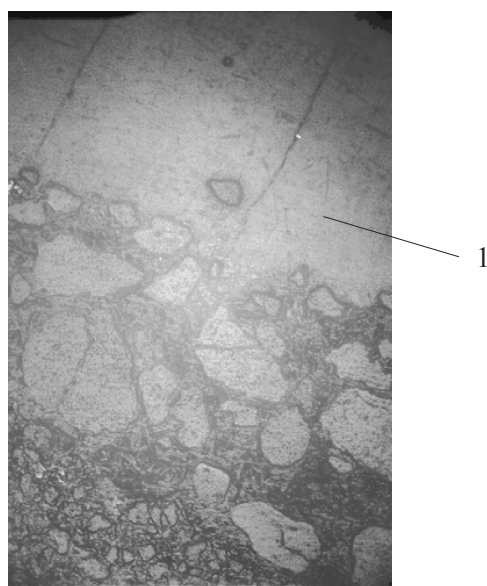


Рис. 3.9. Снимок из шлифа закрепленной породы (объектив 3,6х(-)):

Полученные результаты исследований представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Расстояния в начале и в конце зоны чистого закрепляющего раствора для мелкозернистых песков

№ п/п	ρ_1 , кг/м ³	l_x , м	T_z , м	h , м
1	1750	0,121	0,0048	0,126
2	1650	0,119	0,0048	0,124
3	1550	0,117	0,0047	0,122
4	1450	0,115	0,0046	0,120
5	1350	0,113	0,0046	0,118

По формулам 2.10, 2.6, 2.38 определялась начальная скорость u_0 , конечная скорость u_k и скорость в начале зоны чистого закрепляющего раствора u_z . Данные расчетов приведены в таблице 3.5.

Как видно из таблицы 3.5, соотношение скорости в начале и в конце зоны чистого закрепляющего раствора χ приблизительно равно 1,04. Тогда из формулы 2.40 будем иметь

$$u_z = 1,04u_k . \quad (3.7)$$

Таблица 3.5

Скорость в начале и в конце зоны чистого закрепляющего раствора для мелкозернистых песков

№ п/п	u_0 , м/с	u_k , м/с	u_z , м/с	$\chi = \frac{u_z}{u_k}$	$\bar{\chi}$
1	24,7	5,35	5,36	1,05	1,04
2	25,5	5,48	5,47	1,045	
3	26,2	5,40	5,64	1,043	
4	27,1	5,58	5,79	1,037	
5	28,1	5,79	5,95	1,030	

Подставляя (2.39) в (2.40), получим выражения для расстояния до зоны чистого закрепляющего раствора:

$$l_x = \frac{1,365 d_0 u_0}{1,04 c u_k} . \quad (3.8)$$

Тогда из формулы (2.50) имеем

$$T_z = \frac{1,365 d_0 u_0}{c u_k} - \frac{1,365 d_0 u_0}{1,04 c u_k}.$$

Выполнив определенные преобразования, получим

$$T_z = \frac{0,525 d_0 u_0}{c u_k}. \quad (3.9)$$

По данным лабораторных исследований был построен график зависимости толщины зоны чистого цемента для мелкозернистых песков при различных давлениях закрепляющего раствора (рис.3.10).

Анализируя данный график (рис. 3.10), можно сделать вывод, что толщина зоны чистого закрепляющего раствора при увеличении давления подачи раствора в 3 раза увеличивается в 1,4-1,5 раза.

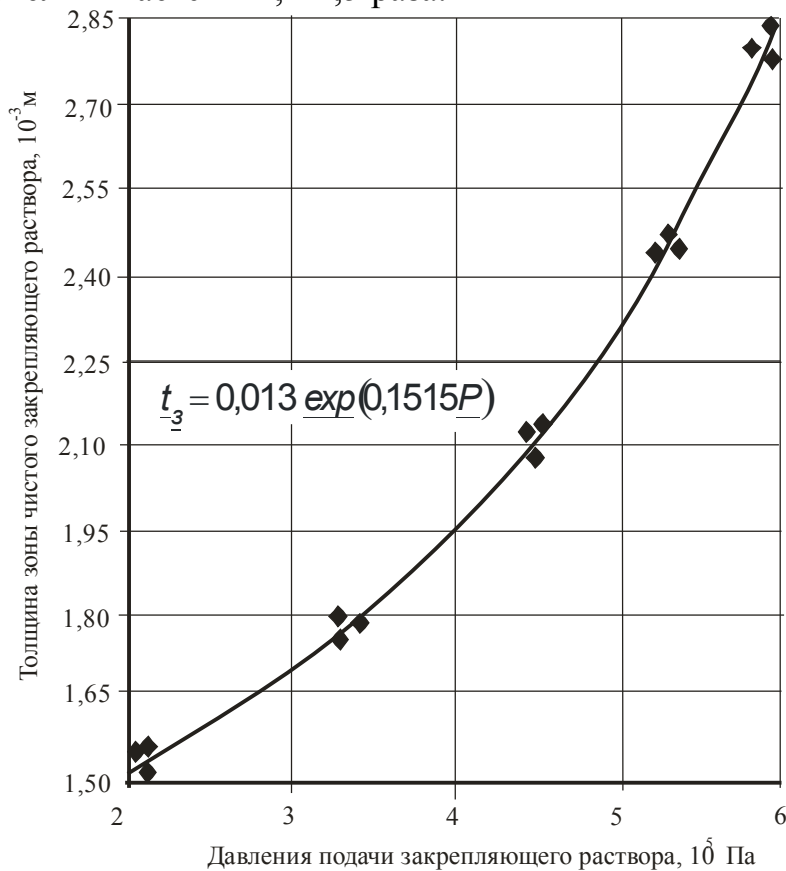


Рис. 3.10. Зависимость толщины зоны чистого цемента от давления подачи закрепляющего раствора

3.6 Исследования фильтрационных и прочностных свойств элементов противofильтрационных завес

Исследования проводились с породами влажностью 15% и 30%, так как чаще всего в них необходимо создавать противofильтрационные завесы. Моделирование закрепления проводили по методике, описанной в параграфе 3.1, что позволило получить качественную и количественную оценку закрепленных пород. Исследования проводили с лессами, крупнозернистыми и мелкозернистыми песками.

По данным исследований [67; 87], наиболее важными параметрами являются глубина проникания раствора, фильтрационные и прочностные свойства пород.

Фильтрационные и прочностные свойства пород в значительной степени связаны с плотностью закрепляющего раствора.

По данным [12], при малом количестве воды в цементном растворе новообразования формируются в стесненных условиях в виде субмикрористаллических комплексов, которые обладают повышенной прочностью. При большом количестве воды формируются игловидные и палочкообразные формы в пространстве, ранее заполненном водой, и образуется цементный камень, который имеет высокую проницаемость и не имеет высокой прочности.

На рис. 3.11 показаны изменения коэффициента фильтрации для трех типов пород при влажности закрепленной породы $w=14\%$, с использованием цементного раствора различной плотности. При увеличении плотности закрепляющего раствора с 1350 до 1750 кг/м^3 коэффициент фильтрации уменьшился для среднезернистых песков в 2,5 раза, мелкозернистых песков - в 3 раза и лессов - в 6 раз. Коэффициент корреляции при объеме выборки $n=15$ составил $r=-0,7$.

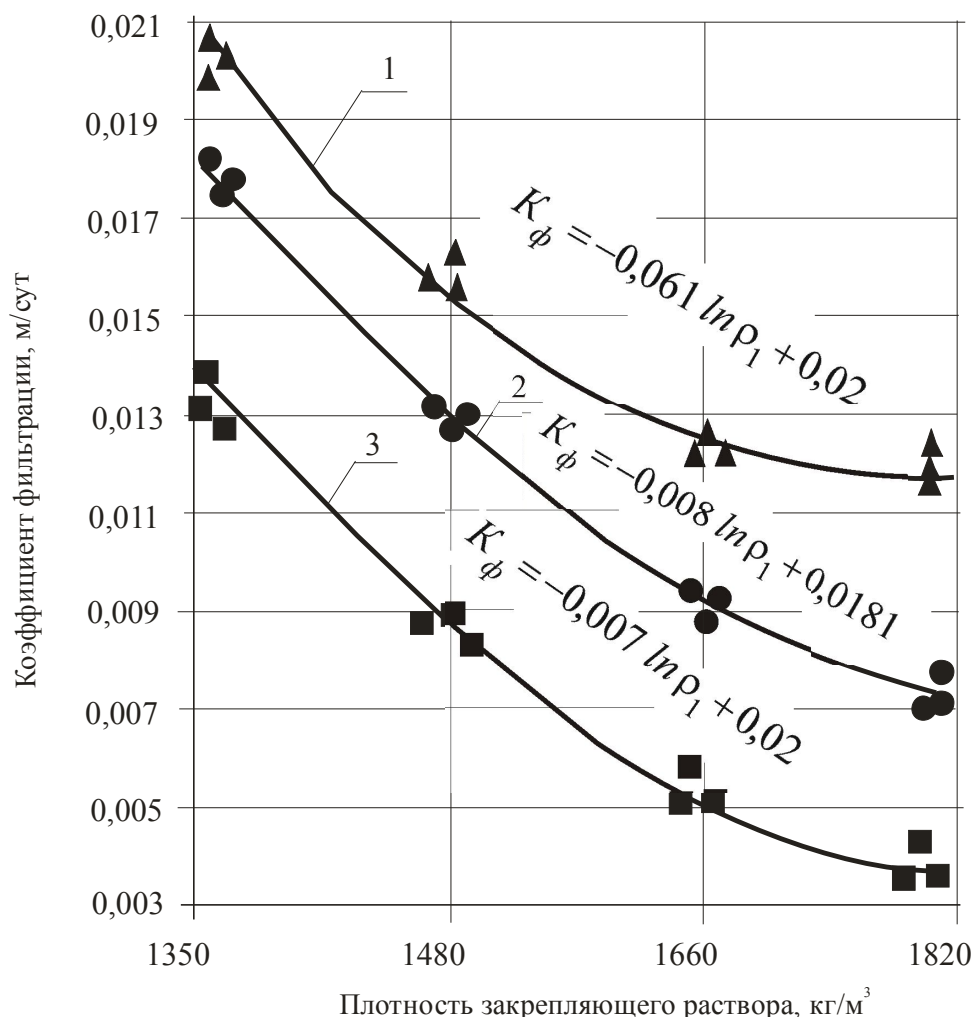


Рис. 3.11. Изменения коэффициента фильтрации от различной плотности закрепляющего раствора при влажности $W=14\%$:

На рис. 3.12 показаны изменения коэффициента фильтрации элемента противофильтрационной завесы в мелкозернистых песках при влажности 30%, с использованием цементного раствора различной плотности. По сравнению с исходной

фильтрацией мелкозернистых песков при плотности закрепляющего раствора 1350 кг/м³ коэффициент фильтрации уменьшился с 5 м/сут до 0,012 м/сут. При увеличении плотности до 1820 кг/м³ коэффициент фильтрации уменьшился с 5 м/сут до 0,043 м/сут. Коэффициент корреляции при объеме выборки $n = 15$ составил $r = -0,8$.

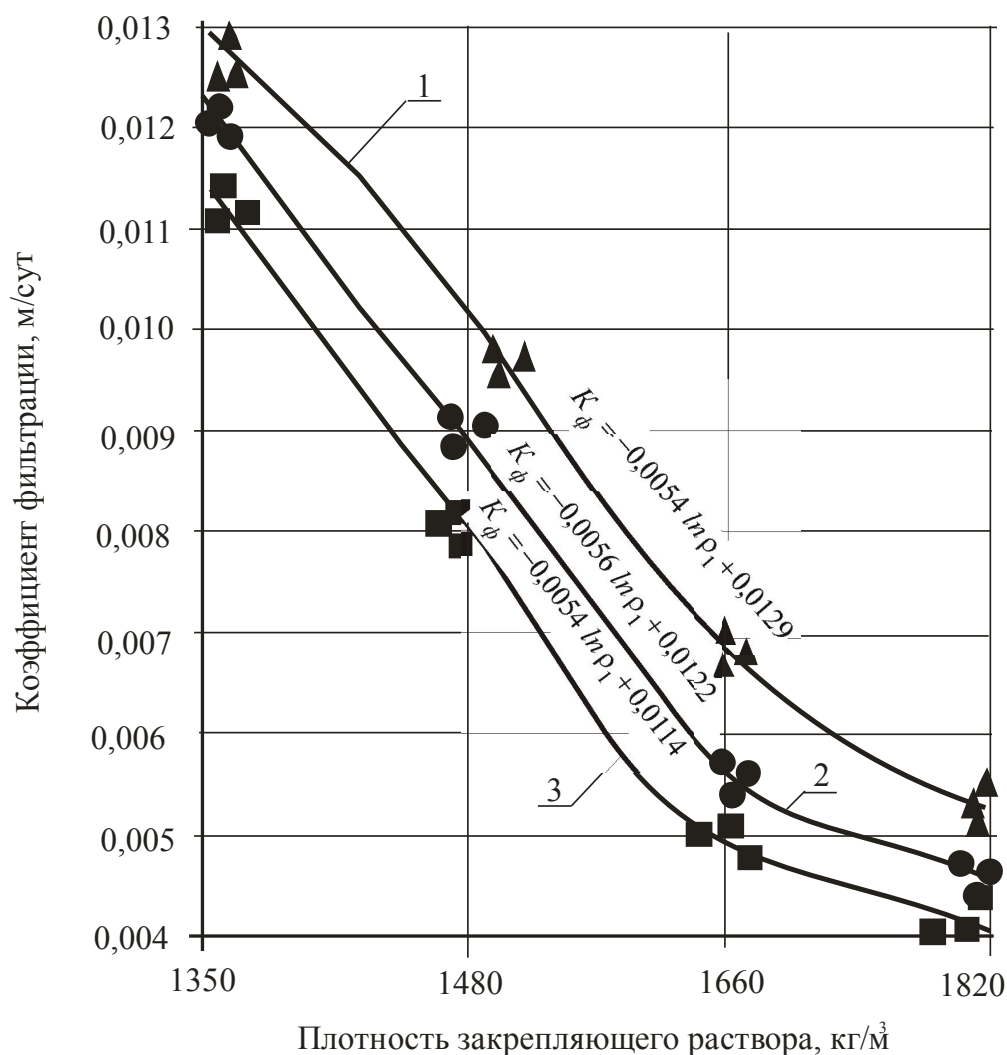


Рис. 3.12. Изменения коэффициента фильтрации от различной плотности закрепляющего раствора при влажности $W=30\%$:
1 - среднезернистый песок; 2 - мелкозернистый песок; 3 - лесс.

Для мелкозернистого песка при влажности 14% по сравнению с 30% при плотности закрепляющего раствора 1350 кг/м³ коэффициент фильтрации уменьшился на 76%, а при 1820 кг/м³ - на 91,3% соответственно. Понижение фильтрующей способности закрепленных мелкозернистых песков происходит за счет изменения строуобразования цементного камня. Новообразования цемента более прочно сцепляются друг с другом. Уменьшается в закрепленном пространстве количество свободной воды, вследствие чего уменьшается количество пор в закрепленном образце.

Влажность закрепляемых пород также влияет на прочность противофильтрационной завесы. Это объясняется тем [12], что на границе, контакта частиц породы с цементом находятся молекулы воды, которые уменьшает прочность их сцепления в несколько раз. Результаты исследований влияния плотности закрепляющего

раствора на прочность мелкозернистых песков при влажности $W=14\%$ приведены в таблице 3.6. Как видим из таблицы, при плотности закрепляющего раствора 1750 кг/м^3 прочность завесы с течением времени от 3 до 28 суток увеличилась в 4 раза, а при плотности 1350 кг/м^3 - в 12 раз.

Результаты исследований влияния плотности закрепляющего раствора на прочность мелкозернистых песков при влажности $W=30\%$ приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.6

Результаты исследований прочностных свойств мелкозернистых песков, закрепленных цементными растворами при влажности 14%

№ п/п	Плотность закрепляющего раствора, кг/м^3	Прочность на одноосное сжатие, МПа		
		3 сут	7 сут	28 сут
1	1820	0,08	0,16	0,32
2	1660	0,04	0,07	0,14
3	1480	0,02	0,04	0,11
4	1350	0,01	0,06	0,12

Таблица 3.7

Результаты исследований прочностных свойств мелкозернистых Песков, закрепленных цементными растворами при влажности 30%

№ п/п	Плотность закрепляющего раствора, кг/м^3	Прочность на одноосное сжатие, МПа		
		3 сут	7 сут	28 сут
1	1750	0,008	0,016	0,032
2	1660	0,004	0,007	0,014
3	1480	0,002	0,004	0,011
4	1350	0,001	0,006	0,012

Как видим из таблицы 3.7, прочность элемента завесы через 28 суток при плотности закрепляющего раствора 1350 кг/м^3 возросла в 12 раз, при плотности 1480 кг/м^3 - в 5,5 раз, при плотности 1600 кг/м^3 - в 3,5 раза и при плотности 1750 кг/м^3 - в 4 раза. По сравнению с породами влажностью 14% прочность элемента завесы уменьшилась в 10-12 раз.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика моделирования формирования противofильтрационных завес с помощью струйной технологии, позволяющая определять объемы за-

крепляющего раствора в дисперсной породе, от которого зависят прочностные и фильтрационные свойства завес.

2. В результате проведения экспериментальных исследований изменения длины и толщины элемента от технологических параметров закрепления установлено:

- при увеличении давления увеличивается толщина завесы;
- увеличения плотности приводит к увеличению длины элемента завесы.

3. Выполнен анализ различных параметров, описывающих процесс проникания высоконапорных струй в дисперсную породу. С помощью анализа теории размерностей и подобия получена критериальная зависимость, описывающая процесс проникания при невращающемся мониторе установленная зависимость имеет вид

$$\frac{t_s}{d_0} = F \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}; \frac{\eta}{P_0 d_0}; \frac{P_0}{\rho_1 v_n^2} \right).$$

4. В результате экспериментальных исследований установлены новые зависимости объемов породы в закрепленном образце от плотности закрепляющего раствора для различных пород.

5. В результате экспериментальных исследований установлена закономерность образования зоны чистого цемента в мелкозернистых песках, обеспечивающий низкий коэффициент фильтрации формируемой завесы.

6. Установлены закономерности изменения коэффициента фильтрации и прочности с изменениями плотности закрепляющих растворов для различных пород, что позволяет прогнозировать физико-механические свойства создаваемых завес.

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАВЕС С ПОМОЩЬЮ СТРУЙНОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ

4.1. Натурные испытания формирования элементов противофильтрационной завесы

Целью натурных испытаний формирования элемента завесы явилось подтверждение достоверности результатов теоретических и лабораторных исследований. Исследования проводились в полевых условиях по созданию элементов противофильтрационных завес в мелкозернистых песках, имеющих физико-механические свойства, приведенные в табл. 4.1.

При этом предполагалось решить следующие задачи:

- определить глубину проникания высоконапорной струи закрепляющего раствора и толщину элемента противофильтрационной завесы при заданной скорости поднятия монитора;
- определить количество цементного раствора и песка, находящихся в единице объема завесы;
- установить толщину зоны чистого цемента, образующегося при создании противофильтрационной завесы.

Испытания проводились на площадке предполагаемой станции «набережная им. Ленина» открытого заложения днепропетровского метрополитена. Для этого на площадке было размещено оборудование (рис.4.1.), состоящее из стандартной установки разведочного бурения урб-2а2 -1, снабженной специальным комплектом оборудования для закрепления пород 6 и емкости с закрепляющим раствором 5.

Работы выполнялись в такой последовательности: цемент для закрепляющего раствора засыпался в емкость 5 и заливался водой в количестве 50% от общего объема. Перед закачиванием смесь перемешивалась в течение 15 мин. С поверхности земли с помощью буровой установки урб-2а2 с помощью шнеков диаметром 192 мм была пробурена скважина 3 на глубину до двух метров (см. Рис. 4.1). Затем была установлена во вращатель урб-2а-2 буровая труба со струйным монитором.

Таблица 4.1

Физико-механические свойства закрепляемой породы

наименования показателей	Величина
естественная влажность, %	15,8
плотность, кг/м ³	2400
ударная вязкость, дж/м ²	32
пористость, %	40
коэффициент фильтрации, м/сут	10
прочность на одноосное сжатие, мпа	1,2
угол внутреннего трения, град.	2,2

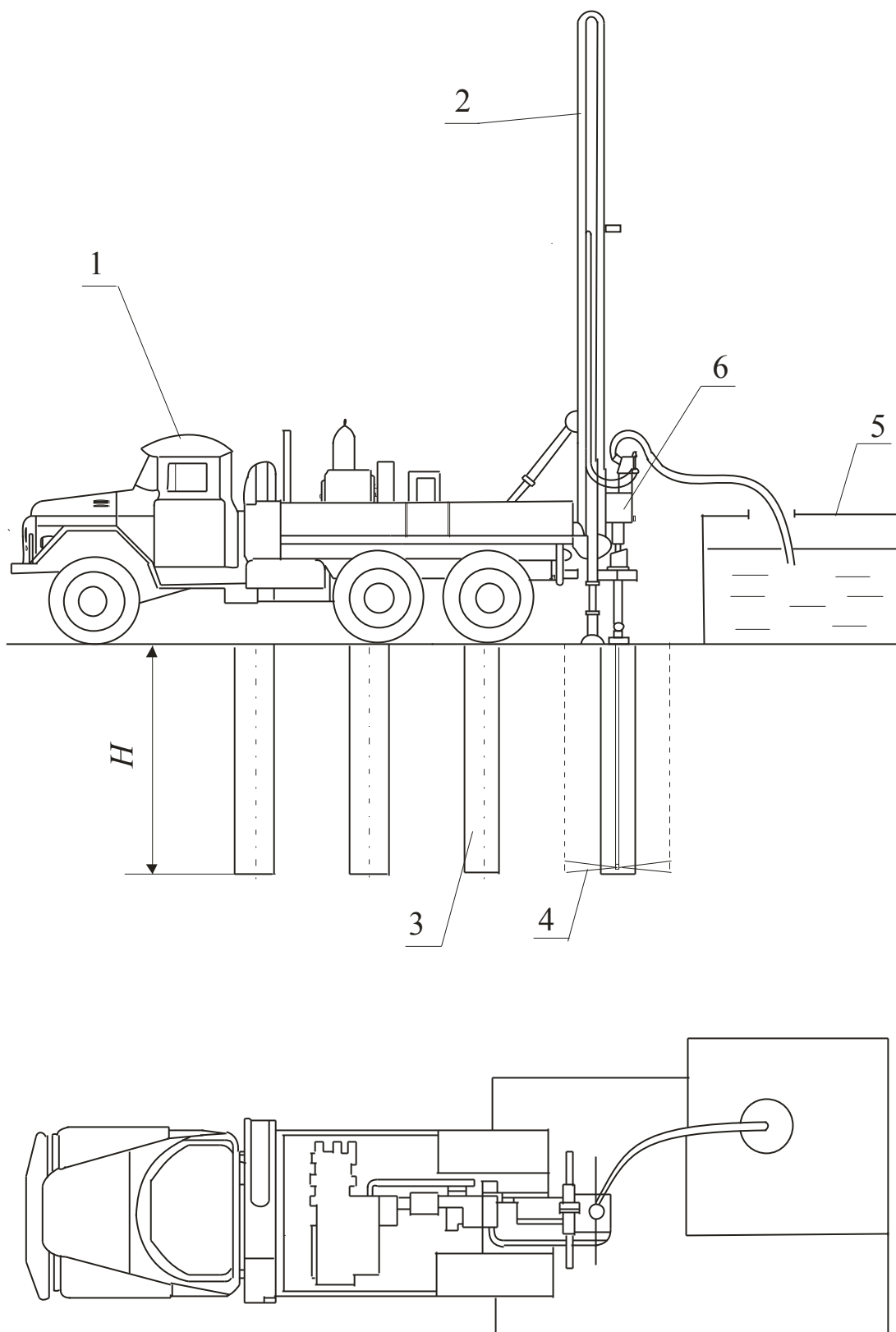


Рис. 4.1. Установка для формирования противофильтрационных завес

После опускания монитора в скважину начали подавать через вращатель по внутренней трубе на сопла монитора приготовленный в емкости 5 цементный раствор (плотностью $\rho=1500 \text{ кг/м}^3$) с помощью насоса, находящегося на установке УРБ-2а-2.

Трубный став с помощью подъемного устройства 2 установки поднимали вверх вдоль оси скважины со скоростью 0,025 м/с. Нагнетание раствора в скважину производили под давлением 2,5 Мпа.

Для оценки полученных результатов испытаний через 7 суток произвели вскрытие массива на глубину до двух метров. Вскрытие позволило установить глубину проникания высоконапорной струи закрепляющего раствора и толщину элемента противofильтрационной завесы. Глубина проникания составила 0,75 м, а толщина - 0,05 м (рис.4.2).

Из элемента противofильтрационной завесы были отобраны монолиты закрепленных пород. Физико-механические свойства части образцов пород определялись сразу после извлечения. Часть образцов выдерживалась во влажно-воздушной среде, и через 28 суток определяли их прочностные свойства. Технологические параметры и результаты исследований приведены в табл. 4.2-4.3.

Таблица 4.2

Технологические параметры установки струйного закрепления
При создании противofильтрационной завесы

Давления подачи закрепляющего раствора, Мпа	Скорость Подъема м/с	Время Закачки, с
2,5	0,01	100

С целью проверки сходимости результатов теоретических расчетов, экспериментальных исследований и испытаний теоретически определили глубину проникания закрепляющего раствора (2.12) и толщину создаваемой завесы (2.38), а также длину зоны чистого цемента (2.49).



Рис. 4.2 Длина и толщина элемента завес

Таблица 4.3

Результаты исследований образцов элемента завесы

Объем Цемента в образце, %	Объем Песка в образце, %	Плотность, кг/м ³	Коэффициент фильтрации, м/сут	Прочность на одноосное Сжатие, мпа	
				7 Суток	28 Суток
40	60	2300	0,005	12	20,4

Результаты сравнения приведены в табл. 4.4-4.5.

Таблица. 4.4.

Результаты сравнительного анализа.

Наименования Параметров	Результаты		
	Теоретического расчета	Испытаний	Расхождение, %
Глубина проникания, м	0,65	0,75	-14
Толщина завесы, м	0,055	0,05	+10
Толщина зоны, м	0,017	0,02	-15

Таблица. 4.5.

Результаты сравнительного анализа

Наименования Параметров	Результаты		
	Лабораторных исследований	Промышленных испытаний	Расхождение, %
Коэффициент фильтрации, м/сут	0,004	0,005	-20
Прочность, мпа	12,4	12	+3.8
Объем песка в образце, %	50	60	-16,4
Объем цемента в образце, %	50	40	+25

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. расхождения значений технологических параметров закрепления полученных в результате теоретических расчетов, лабораторных и промышленных исследований не превышают 25%.

2. Теоретическое значения глубины проникания меньше, чем выявленное при натурном испытании, на 14%, расчетная толщина завесы превышает натурные данные на 10%.

4.2. Методика проектирования противofильтрационных завес, создаваемых с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов

Результаты аналитических и экспериментальных исследований, опытной апробации создания элементов противofильтрационных завес легли в основу общей методики проектирования таких завес.

На рис 4.3 приведена блок-схема проектирования тонких противofильтрационных завес, создаваемых при помощи струйной технологии закрепления.

Суть методики проектирования заключается в следующем.

Сначала проводится анализ горно- и гидрогеологических условий: определяются мощность залегающих слоев горных пород и их коэффициент фильтрации. Ударная вязкость закрепляемых пород определяется согласно методике [67].

По методике п. 3.1 на лабораторной установке создается элемент противofильтрационной завесы при различных плотностях закрепляющего раствора и давлении нагнетания. Через 28 суток проверяется коэффициент фильтрации и прочность образцов завесы. При сравнении их с проектными показателями принимаются плотность закрепляющего раствора, обеспечивающая необходимый коэффициент фильтрации, и прочность.

На следующем этапе рассчитываются технологические параметры сооружения завесы:

1. Скорость закрепляющего раствора при выходе из сопла -

$$u_0 = \mu \sqrt{\frac{2P}{\rho_1}} . \quad (4.1)$$

2. Определяем функцию C [69]:

$$c = 0,018 \cdot \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 - 0,005 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} + 0,209 .$$

3. Скорость поднятия струйного монитора - по формуле (2.14)

$$v_n = \frac{32c\eta}{2,73\pi \rho_1 d_0 u_0 \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)} . \quad (4.2)$$

4. Глубина проникания закрепляющего раствора (2.16)

$$h = \sqrt{\frac{7,45 \rho_1 d_0^3 u_0}{32c\eta}} . \quad (4.3)$$

На основании рассчитанных параметров предполагаемая толщина завесы будет определяться по формуле (2.34)

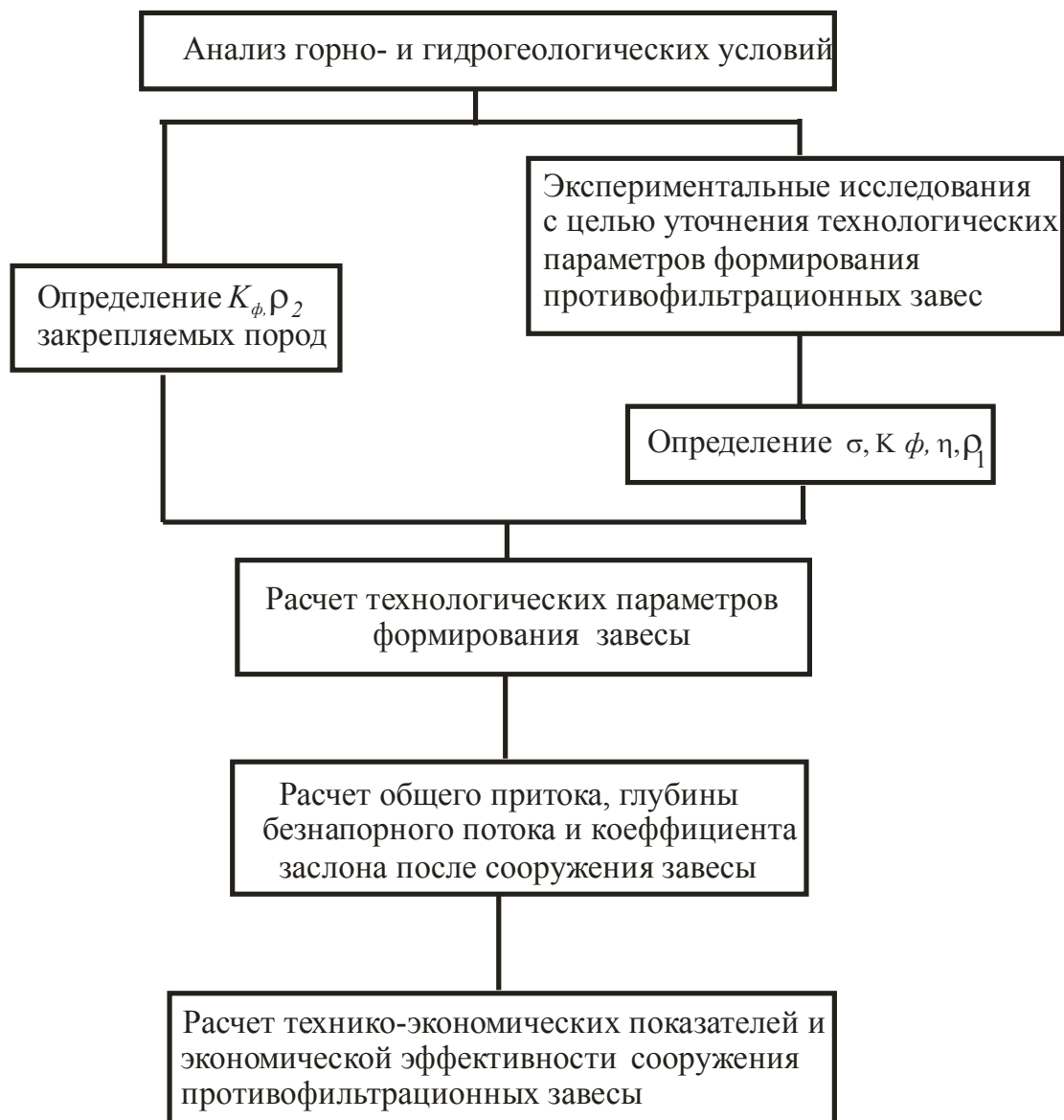


Рис. 4.3. Блок-схема проектирования противодиффузионных завес

$$t_3 = \frac{2d_0}{d_1} \sqrt{\frac{7,45 \rho_1 d_0^3 u_0}{32 c^2 \eta}}. \quad (4.4)$$

Следующим этапом является расчет высоты грунтовых вод и общего водопритока после постройки завесы.

Расчет общего притока, глубины безнапорного потока и коэффициента заслона после постройки противодиффузионной завесы проводится по методике С. К. Абрамова [88]:

1. Величина общего притока

$$Q = \frac{\pi k_1 (h_e^2 - h_0^2 - 2I_0 h_{cp} \delta)}{\ln \frac{R_0}{r_0} + \frac{k_1 \delta}{k_3 r_2}}, \quad (4.5)$$

где Q - величина общего притока воды через проектируемую завесу, м³/сут;
 k_1 - коэффициент фильтрации водоносного горизонта м/сут;
 k_3 - коэффициент фильтрации закрепленной породы, м/сут;
 R_0 - расстояние от центра выработки до контура питания, м;
 h_e, h_0 - глубина потока подземных вод соответственно на контуре питания и в выработке, м;
 I_0 - начальный градиент фильтрации;
 h_{cp} - средняя мощность подземного потока, м;
 δ - ширина противofильтрационной завесы, м;
 r_0 - радиус выработки, м;
 r_2 - расстояние от центра выработки до внутренней стенки завесы, м.

2. Глубина безнапорного потока в I и III зоне (рис. 4.4)

$$h_1 = \sqrt{h_e^2 - \frac{h_e^2 - h_0^2 - 2I_0 h_{cp} \delta}{\ln \frac{R_0}{r_0} + \frac{k_1 \delta}{k_3 r_2}} \ln \frac{R_0}{r_0}}, \quad (4.6)$$

$$h_3 = \sqrt{h_0^2 - \frac{h_e^2 - h_0^2 - 2I_0 h_{cp} \delta}{\ln \frac{R_0}{r_0} + \frac{k_1 \delta}{k_3 r_2}} \ln \frac{r_2}{r_0}}. \quad (4.7)$$

Так как предполагаемая противofильтрационная завеса будет сооружаться в двух пластах с различной проницаемостью, определим средний коэффициент фильтрации для двух пластов:

$$k_{cp} = \frac{k_1 m_1 + k_2 m_2}{m_1 + m_2}. \quad (4.8)$$

Приведенный радиус от центра выработки до контура питания составляет [1]

$$\ln R_{np} = \ln R_0 + \left(\frac{k_1 m_1 + k_2 m_2}{m_1 + m_2} - 1 \right) \ln \frac{r_1}{r_2}, \quad (4.9)$$

где r_1 - расстояние от центра выработки до внешней стенки завесы, м.

Рассчитаем общий водоприток через противofильтрационную завесу:

$$Q = \frac{\pi k_{cp} (h_e^2 - h_0^2 - 2I_0 h_{cp} \delta)}{\ln \frac{R_{np}}{r_0} + \frac{k_{cp} \delta}{k_3 r_2}}. \quad (4.10)$$

Рассчитаем также глубину безнапорного потока в I и III зоне:

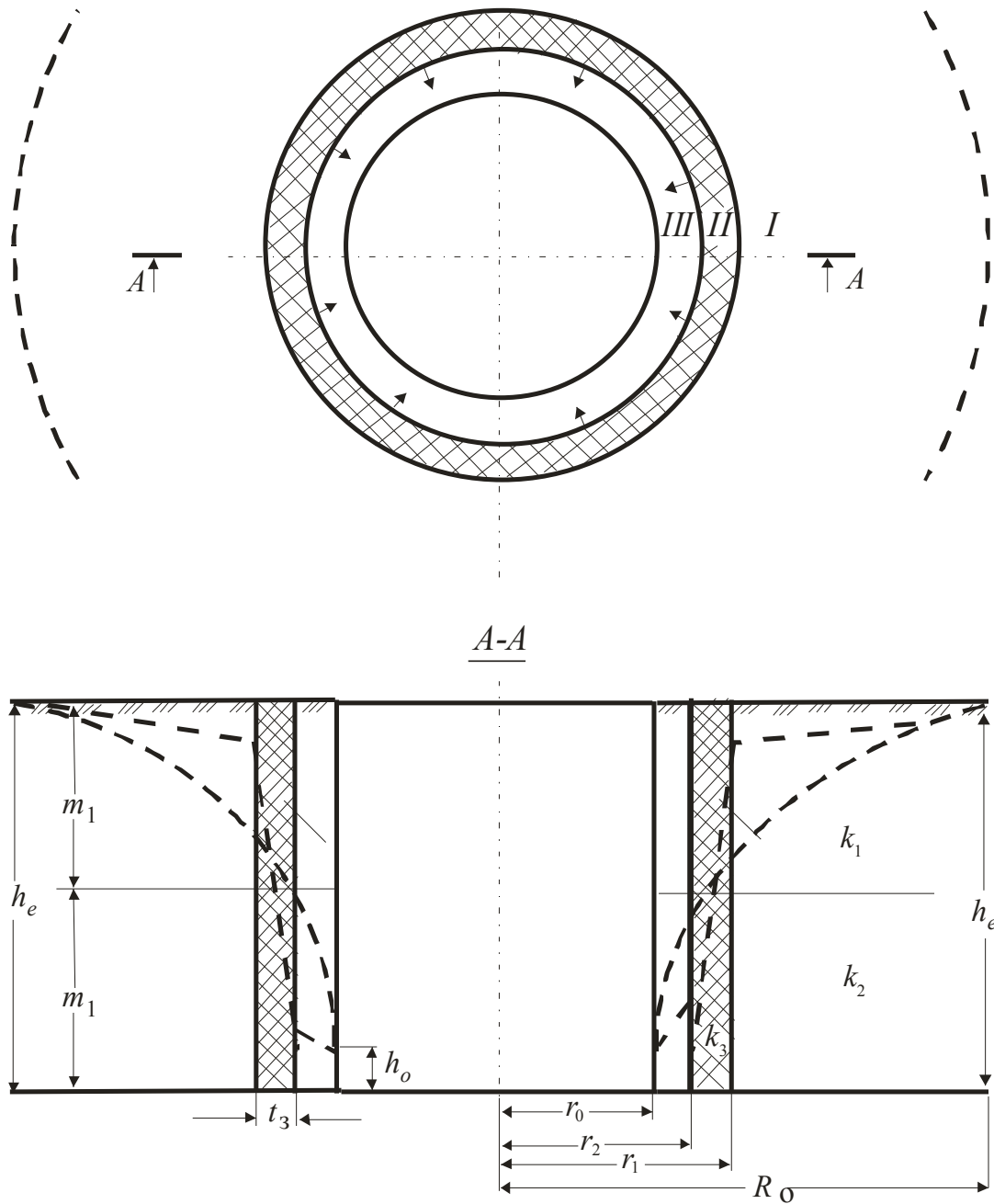


Рис. 4.4 Схема противофильтрационной завесы вокруг ствола

$$h_1 = \sqrt{h_e^2 - \frac{h_0^2 - h_0^2 - 2I h_0 \delta_{cp}}{R} \ln \frac{R}{r_0} \frac{np}{r_0}}, \quad (4.11)$$

$$h_3 = \sqrt{h_0^2 - \frac{h_e^2 - h_0^2 - 2I h_0 \delta_{cp}}{R} \ln \frac{r_2}{r_0} \frac{r_2}{r_0}}. \quad (4.12)$$

С использованием данной методики были проведены расчеты вокруг ствола типового сечения для установления водопритока после постройки завесы.

Исходные данные: водоприток в выработку $Q = 200 \text{ м}^3/\text{сут}$; диаметр шахтного ствола $d = 7,5 \text{ м}$; расстояние от оси шахтного ствола до оси скважины $r = 5,5 \text{ м}$; общая мощность водопроницаемого слоя $m = 20 \text{ м}$; плотность закрепляемой породы $\rho_2 = 2400 \text{ кг/м}^3$; ударная вязкость закрепляемой породы $\eta = 70 \text{ Дж/м}^2$; плотность закрепляющего раствора $\rho_1 = 1600 \text{ кг/м}^3$; давление подачи закрепляющего раствора $P = 150 \cdot 10^5 \text{ Па}$; диаметр сопла струйного монитора $d_0 = 0,0045 \text{ м}$.

По данным расчетов, глубина безнапорного потока в I и III зоне составит $h_1 = 19,9 \text{ м}$ и $h_3 = 1,9 \text{ м}$. Водоприток после постройки завесы составит $Q_1 = 24,7 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Анализируя полученные значения, можно сделать вывод, что после сооружения противofiltrационной завесы водоприток уменьшится в 8 раз. Рациональные технико-экономические параметры с помощью экономико-математической модели и экономическую эффективность данного варианта рассчитаем в пункте 4.5.

На основании выполненных исследований разработана программа расчета на ЭВМ глубины безнапорного потока в I и III зоне и водопритока после постройки завесы (приложение А.2).

4.3. Технология создания противofiltrационных завес с помощью высоконапорных струй закрепляющего раствора

Противofiltrационные завесы могут сооружаться вокруг вертикальных и горизонтальных выработок, котлованов и различных гидротехнических сооружений для уменьшения притока воды.

Последовательность выполнения работ заключается в следующем.

На месте сооружения противofiltrационной завесы размечают точки для бурения скважин. Скважины могут быть размещены вокруг ствола по одной или несколькими концентрическими окружностями на расстоянии 0,5-0,8 м от контура выработки [89; 90].

Для строительства противofiltrационной завесы можно применять следующее оборудование (рис.4.5):

- установку разведочного бурения УРБ-2А-2, снабженную специальным комплектом оборудования для закрепления;
- цементировочный агрегат ЦА-320М, расположенный на шасси автомобиля КРАЗ-256;
- контрольную аппаратуру - ареометры.

Все вышеперечисленное оборудование изготавливается серийно на заводах Украины. Нестандартное оборудование (оснастка) серийно не выпускается. Оно может быть изготовлено силами заводов, в соответствии с технической документацией, разработанной Национальной горной академией Украины совместно с ВНИПИОКЕАНМАШ.

Скважины диаметром 100-130 мм необходимо бурить до твердых или водупорных пород. В песках для бурения используют зубчатые шарошки с промывкой

глинистыми растворами для укрепления стенок скважины. В лессовых породах бурение скважины осуществляется шнеками. Глубина скважин должна превышать на 0,5-1 м глубину противофильтрационной завесы.

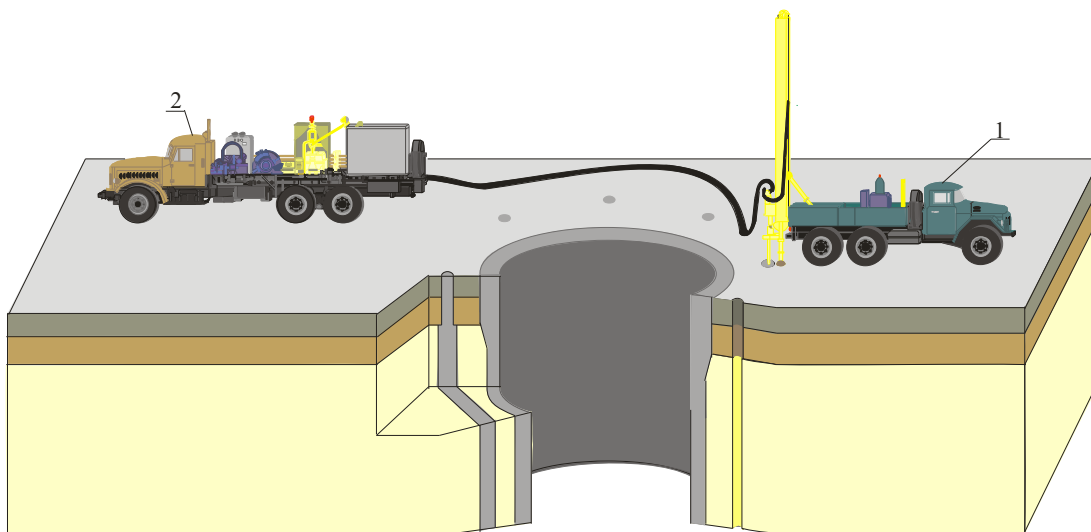


Рис. 4.5 Расположения оборудования при сооружении противофильтрационных завес с использованием струйной технологии закрепления

- 1- Установка разведочного бурения УРБ-2А-2;
2- Цементировочный агрегат ЦА-320 М.

После бурения осуществляют струйное закрепление. Если струйный монитор совмещен с буровым инструментом, закрепление производится непосредственно после окончания бурения. Если не совмещен, то из скважины извлекается буровой инструмент, навинчивается секция струйного монитора и промежуточные секции, затем производятся работы по формированию элементов противофильтрационных завес. Во избежание засорения сопел монитора их необходимо предохранять от попадания крупных частиц породы. Спуск монитора в скважину производится с подачей раствора под небольшим давлением с целью предохранения сопел от засорения. Затем увеличивают давление рабочих величин и осуществляют подъем монитора с заданной скоростью до проектной отметки скважины.

При подъеме без вращения струйного монитора образуются тонкие противофильтрационные завесы небольшой мощности (рис. 4.6, а). Если завесу надо сооружать в водонапорном слое значительной мощности, 1,5-2,5 м, то ее создание производится с вращением струйного монитора (рис. 4.6, б).

Расстояние между скважинами при невращающемся струйном мониторе зависит от глубины проникания закрепляющего раствора, длины перекрытия двух секций и от угла поворота секций - γ (рис. 4.7.).

Расстояния между скважинами для прямолинейных секций определяется по формуле

$$l = (2 \cdot h - l_1) + \frac{l_1}{2}, \quad (4.13)$$

где h - глубина проникания, м;

l_1 - длина перекрытия двух секций, м;
для зигзаобразных секций – по формуле

$$l = (2 \cdot h - l_1) \cdot \cos \gamma, \quad (4.14)$$

где γ - угол поворота секций, градус.

Подъем монитора производится плавно и непрерывно. Закрепление заканчивают, как правило, в 1-1,5 м от устья скважины. Делается это с целью уменьшения выхода закрепляющего раствора на поверхность. Затем монитор поднимают на поверхность и скважину тампонируют. Время технологического цикла определяется по формуле

$$T = t_0 + t_с, \quad (4.15)$$

где t_0 - продолжительность времени основных процессов, ч;

$t_с$ - продолжительность времени вспомогательных процессов, ч;

Продолжительность времени основных процессов определяется как

$$t_0 = t_n + t_{n.p} + t_б + t_{nep} + t_{p.c} + t_l, \quad (4.16)$$

где t_n - время, необходимое на подготовку для бурения скважины, мин;

$t_{n.p}$ - время, необходимое на приготовление растворов, мин;

$t_б$ - время на бурение скважины, мин;

t_{nep} - время на переоборудование установки для работы струйного монитора, мин;

$t_{p.c}$ - время работы струйного монитора, мин;

t_l - время на ликвидацию скважины, мин.

Время, необходимое для бурения скважины, зависит от производительности и эффективности применяемого для этих целей оборудования.

Время, необходимое на приготовление закрепляющих растворов, зависит от производительности смесительного оборудования, величины противотрационной завесы, вида и условий приготовления закрепляющего раствора.

Время на бурение зависит от технической характеристики буровой установки, типа пород, диаметра скважины, способа бурения и вида бурового инструмента.

Время на переоборудование установки зависит от конструкции струйного монитора.

Время на ликвидацию скважины зависит от диаметра скважины и отметки на которой заканчивают закрепление.

Продолжительность времени вспомогательных процессов складывается из времени заключительных операций и мероприятий по технике безопасности:

$$t_с = t_{з.о} + t_{м.б}, \quad (4.17)$$

где $t_{з.о}$ - время заключительных операций;

$t_{м.б}$ - время для мероприятий по технике безопасности.

Работы по струйному закреплению целесообразно выполнять бригадой из 3-х человек посменно, с длительностью смены 8 часов

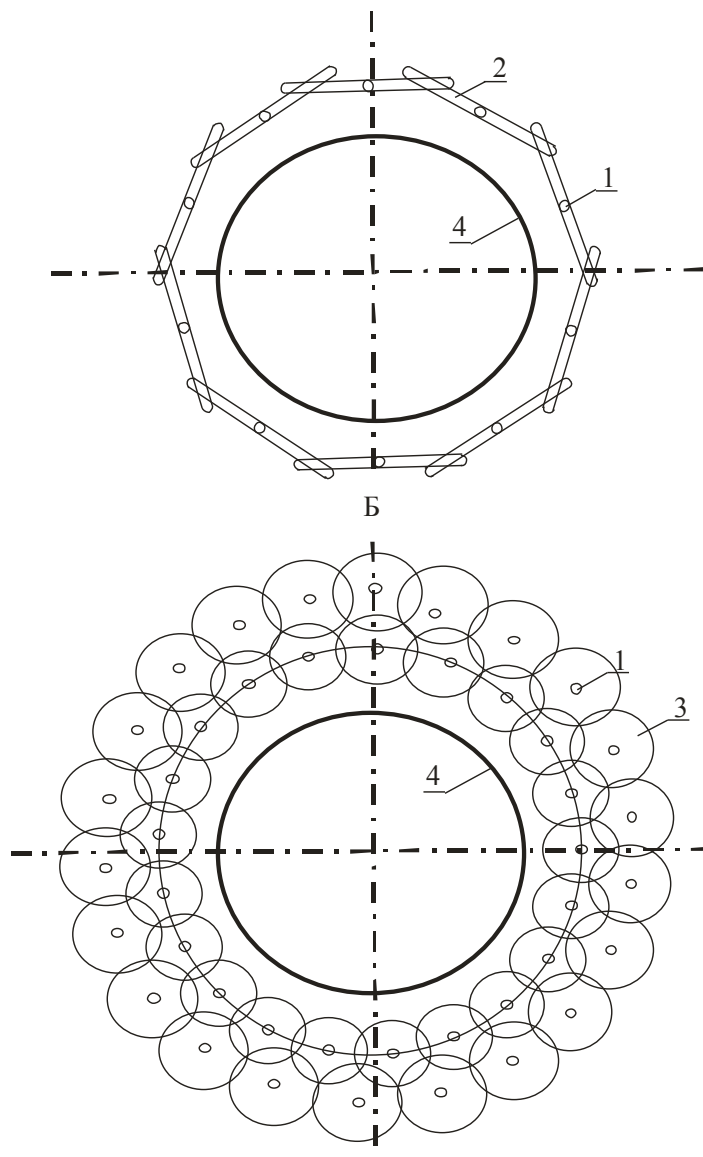


Рис. 4.6 Схемы противофильтрационных завес:
 А - без вращения струйного монитора; Б - с вращения струйного монитора;
 1 - скважина; 2 - крылья секции; 3 - закрепленная колонна; 4 - ствол.

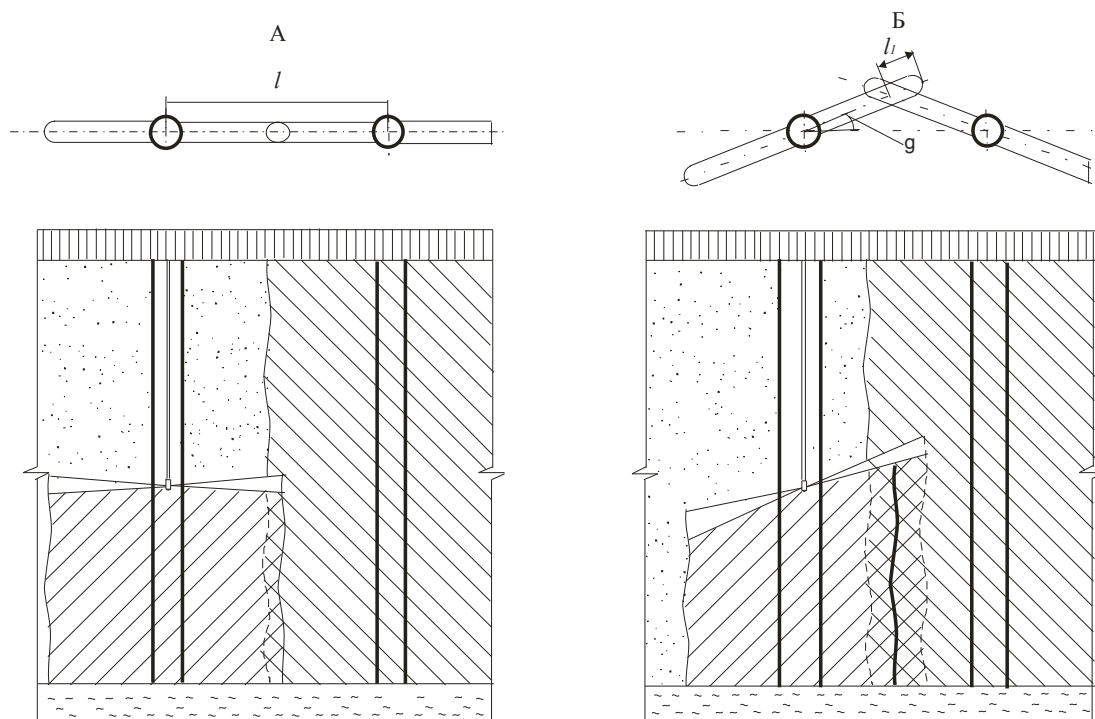


Рис. 4.7 - Схемы сооружения завес:

А - прямолинейные секции; Б - зигзагообразные секции; l - расстояния между скважинами;
 l_1 - длина перекрытия двух секций; g - угол поворота секций.

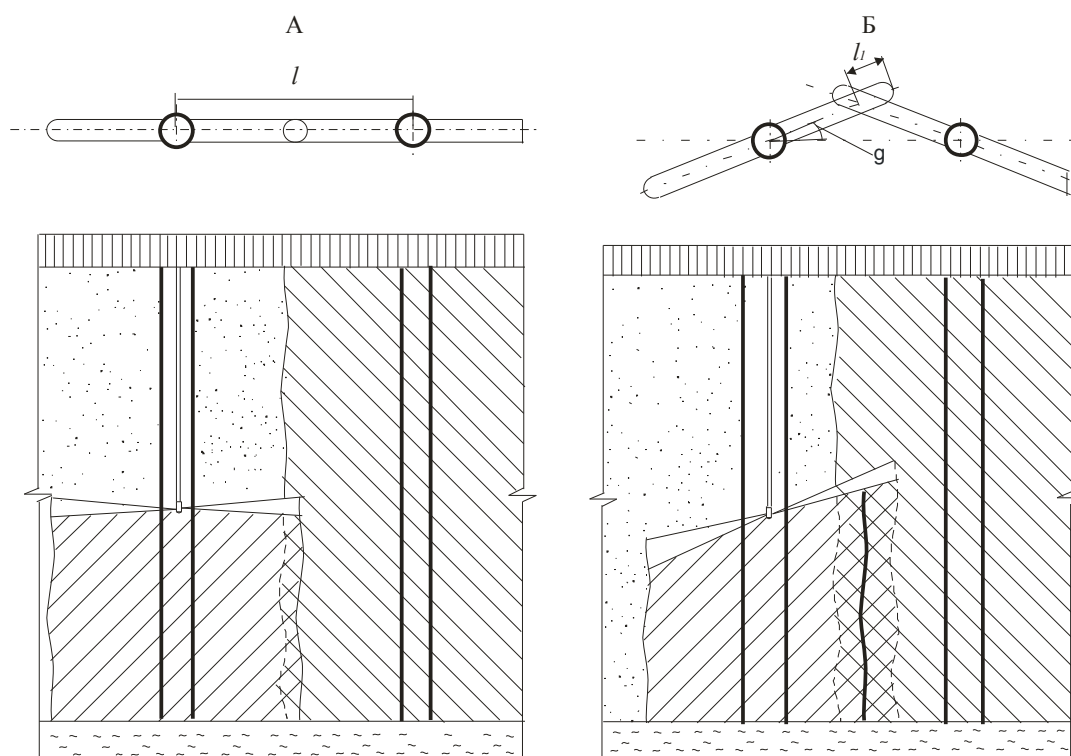


Рис. 4.7 - Схемы сооружения завес:

А - прямолинейные секции; Б - зигзагообразные секции;
 l - расстояния между скважинами; l_1 - длина перекрытия двух секций;
 g - угол поворота секций..

4.4 Контроль качества создания противofильтрационных завес с помощью струйной технологии

Обеспечение качества создания завес с использованием струйной технологии предусматривает проведение текущего и заключительного контроля после окончания формирования завесы. Также предусматривается контроль противofильтрационной завесы в процессе ее эксплуатации.

Текущий контроль при струйном закреплении включает:

- проверку качества приготовления закрепляющего раствора;
- контроль расположения скважин и их глубину в соответствии с проектом производства работ;
- контроль давления подачи и расхода закрепляющего раствора;
- контроль скорости поднятия струйного монитора (определяют с помощью прибора).

При производстве заключительного контроля качества струйного закреплении при закреплении обводненных дисперсных пород выполняют:

- бурение контрольных скважин с отбором керна обработанных пород и инженерно-геологические исследования свойств этих пород;
- измерение уровня грунтовых вод в скважинах до и после строительства противofильтрационной завесы;
- анализ устойчивости сооруженной противofильтрационной завесы.

Приемка противofильтрационных завес должна вестись на основании проекта производства работ, актов лабораторных испытаний и актов проведения контрольных работ.

Контроль качества противofильтрационной завесы производится путем измерения водопритока в подземную выработку и наблюдений за уровнями подземных вод в пьезометрических скважинах.

4.5 Определение оптимальных технико-экономических параметров создания противofильтрационных завес

Для определения экономической эффективности создания противofильтрационной завесы с использованием струйной технологии необходимо установить объем закрепляющего вещества и его рациональное количество, а также длину скважин. Для оптимизации данных параметров выбрана функция стоимости выполнения этих работ по глубине проникания закрепляющего раствора. Рассматривались варианты от минимальной глубины $h = 0,5$ м до максимальной $h = 1,0$ м.

Определение необходимого количества закрепляющего раствора, расходуемого на создание противofильтрационной завесы, можно произвести по формуле [69]

$$Q = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \mu_p \sqrt{\frac{2p_0}{\rho_1}} \quad (4.18)$$

где Q - расход раствора, м³/с;

d_0 - диаметр сопла, м;
 μ_p - коэффициент, показывающий расход закрепляющего раствора через сопло;
 p_0 - давление струи на выходе из сопла, Па;
 ρ_1 - плотность дисперсной породы, кг/м³.

Время на сооружение завесы

$$Q = \frac{L}{v_n}, \quad (4.19)$$

где L - общая длина всех скважин, м;

v_n - скорость поднятия струйного монитора, м/с.

Тогда общий объем закрепляющего раствора

$$V_o = QT. \quad (4.20)$$

Оптимальное значение глубины проникания можно определить путем минимизации функции стоимости. Суммарная стоимость работ по струйному закреплению при создании противofильтрационной завесы складывается из стоимости износа долот, бурения скважин и дополнительных затрат на промывку, а также себестоимости 1 погонного метра противofильтрационной завесы.

Следовательно, критерий оптимальности представляет собой функцию

$$f(h) = (c_1 + c_2 + c_3 + c_4)L + c_5 V, \quad (4.21)$$

где c_1 - себестоимость износа долот на 1м бурения, грн/м;

c_2 - стоимость бурения 1м скважины, грн/м;

c_3 - дополнительные затраты на промывку при бурении 1м скважины, грн/м;

c_4 - стоимость создания 1 п.м. завесы, грн;

c_5 - себестоимость 1 м³ закрепляющего раствора, грн/м³.

Износ долот зависит от физико-механических свойств породы, а также от общей длины бурения. Длина бурения всех скважин определяется глубиной проникания закрепляющего раствора. От глубины проникания h зависит количество закрепляющего вещества. Следовательно, критерием оптимальности является функция параметра h . Поэтому для получения минимального значения функции (4.21) глубина проникания изменялась с заданным шагом для соответствующих технических параметров установки и горно-геологических условий.

Для каждого из заданных значений h в формулах (3.47, 3.36) и в формуле (3.8) из [66] подсчитывалось давление подачи закрепляющего раствора, а также определялось необходимое число скважин по формуле

$$n = \frac{L}{l_p}, \quad \text{шт}, \quad (4.22)$$

где l - расстояние между скважинами, определяемое по формуле (4.16).

Затем по формуле (2.34) для постоянной толщины завесы и рассчитанного давления определялась скорость поднятия монитора. Результаты расчетов сравнивались между собой, и выбирался вариант, соответствующий наименьшей функции стоимости $f(h)$.

Расчеты по поиску оптимальной глубины проникания выполнены на компьютере в программе MATHCAD 7.0 для противофильтрационной завесы на примере по сооружению противофильтрационной завесы вокруг ствола типового сечения (Приложения А3). Исходные данные для расчетов и технологические параметры взяты из п. 4.2 данной работы. Поиск оптимальных значений глубины проникания h осуществлялся в диапазоне 0,5-1,0 м (рис 4.8). Стоимостные показатели закрепления определялись в соответствии с "Едиными нормам и расценкам", 1997 г. ($C_1 = 0,403$ грн./м, $C_2 = 3,371$ грн./м, $C_3 = 0,221$ грн./м, $C_4 = 3,01$ грн, $C_5 = 386,01$ грн./м³). Результаты расчетов сведены в табл. 4.6. Жирным шрифтом обозначен оптимальный вариант при глубине проникания $h = 0,8$ м.

Оптимальный вариант создания противофильтрационной завесы методом струйной технологии по экономической эффективности сравнивался с методом электрохимического закрепления.

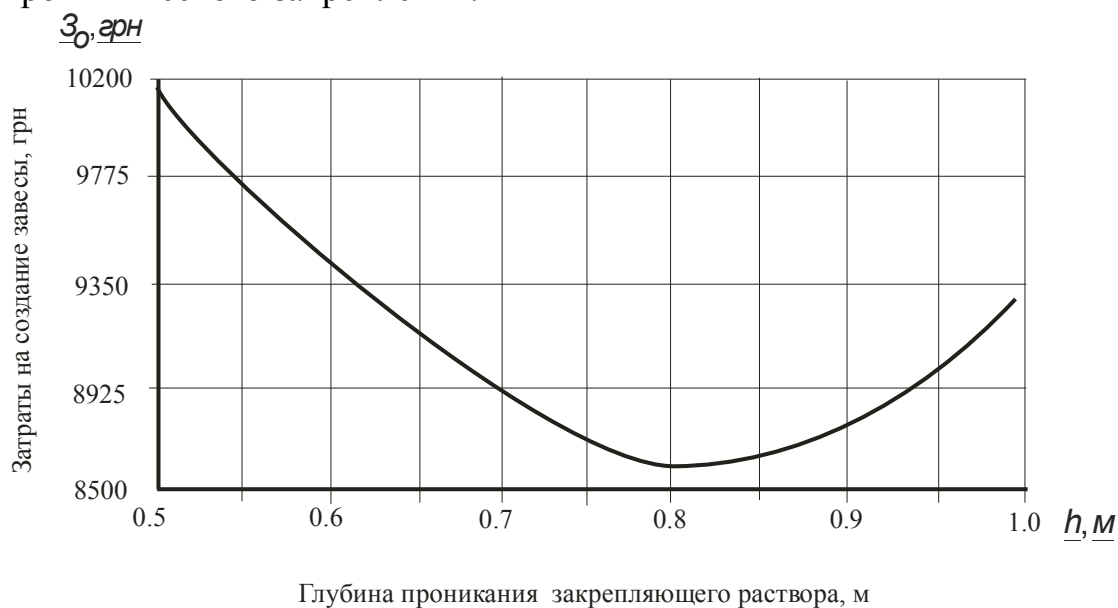


Рис. 4.8. Зависимость затрат от глубины проникания.

4.6 Результаты использования научных разработок создания противофильтрационных завес высоконапорными струями закрепляющих растворов

По просьбе руководства Днепрометропроекта были разработаны проектные предложения по сооружению противофильтрационной завесы вокруг ствола ст. Чкалова Днепропетровского метрополитена. Ситуация на этом объекте осложнена высокими притоками воды в ствол. Уровень грунтовых вод находится на высоте 4 метров. Стратиграфический разрез представлен следующими породами: от поверх-

ности до глубины, 2 м – насыпные породы; 2 м – торф; 4 м – суглинки лессовидные; 2 м – супесь; 3 м – глина; 5 м – мелкозернистый песок; 3 м – гравий.

Основные характеристики противofильтрационной завесы:

- толщина – 0,07 м;
- глубина завесы – 21 м;
- расстояние от центра выработки – 7,5 м.

Учитывая то, что необходимо закреплять семь типов пород с различными физико-механическими свойствами, целесообразно расстояния между скважинами определять на основании глубины проникания закрепляющего раствора в мелкозернистые пески. С помощью лабораторных исследований определяем ударную вязкость $\eta = 70 \text{ Дж/м}^2$ и плотность закрепляемой породы $\rho_2 = 2400 \text{ кг/м}^3$, находим глубину проникания, которая равна 0,5 м при $\rho_1 = 1600 \text{ кг/м}^3$, $P = 150 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $d_0 = 0,0045 \text{ м}$, $\nu = 0,027 \text{ м/с}$. Зная глубину проникания, определяем расстояния между скважинами, учитывая, что пресечение крыльев завесы должно составить 0,05 – 0,1 м. Тогда можно определить основные технологические параметры закрепления (табл. 4.7) по формулам (2.14), (2.16), (2.34), (4.13), (4.18).

Проектные положения утверждены Днепрометропроектом.

Указанные методические рекомендации и проектные положения содержат основные положения по проектированию и производству работ с помощью струйной технологии закрепления и используются специалистами "Днепрометропроект", "Днепрогипрошахт". Проектные предложения переданы и утверждены в Днепрогипрошахте.

Таким образом, использование проектных положений и рекомендаций расширяет область использования технологии создания противofильтрационных завес, обеспечивающей оптимальное ведение производственно-хозяйственной деятельности проектных и строительных организаций.

ВЫВОДЫ

1. Проведены натурные испытания экспериментальной модернизированной установки УРБ-2А-21 для струйного закрепления пород, подтвердившие возможность создания противofильтрационных завес в дисперсных породах.

2. Отличие экспериментальных и теоретических значений глубины проникания и толщины завесы не превышает 25%, что подтверждает достоверность выполненных в данной работе теоретических и прикладных исследований.

3. Разработана методика расчета технологических параметров тонких противofильтрационных завес, создаваемых с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов.

4. Разработана технология создания противofильтрационных завес в слабых дисперсных породах с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов, позволяющая обеспечить гарантированное качество гидроизоляции вокруг различных горных объектов.

5. Разработана экономико-математическая модель определения рациональной глубины проникания высоконапорных струй закрепляющих растворов при формировании противofильтрационных завес.

Таблица 4.7

Технико-экономические показатели при создании завесы

Наименование показателей	Ед. измер	Величина показателей
Радиус закрепления	м	0,5
Расстояние между скважинами	м	0,8
Необходимое количество скважин	шт	35
Расход цемента, необходимого для закрепления одной скважины	кг	792
Расход воды на 1 скважину	л	792
Расход бентонита на 1 скважину	кг	15
Ширина защитной оболочки	м	0,07
Скорость бурения	м/час	15 - 16
Время, необходимое для закрепления одной скважины	мин	60
Давление нагнетания раствора	атм	150
Общий расход:		
цемента;	т	27,750
воды;	т	27,750
бентонита	т	0,55

6. Разработана программа расчета на ЭВМ в системе МАТНСАD-7 основных технологических параметров формирования противofильтрационных завес.

7. Результаты научных исследований использованы при разработке предложений по созданию защитных оболочек вокруг горных выработок, которые внедрены в проекты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Монография – новое решение актуальной научной задачи по обоснованию и разработке технологических параметров формирования противofильтрационных завес с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов. Оно состоит в установлении закономерностей влияния скорости поднятия струйного монитора и плотности закрепляющих растворов на глубину проникания раствора, толщину завесы, ее прочностные и фofильтрационные свойства, что позволяет обеспечить уменьшение материальных затрат и повысить эффективность эксплуатации горных выработок, снизить фofильтрацию из отстойников вредных веществ.

Наиболее важные научные и практические результаты исследования, выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. Обоснованы технологические параметры формирования противofильтрационных завес в слабых дисперсных породах с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов, позволяющие управлять прочностными и фofильтрационными свойствами создаваемых противofильтрационных завес.

2. Впервые установлены закономерности глубины проникания высоконапорных струй закрепляющих растворов от плотности закрепляющего раствора, ударной вязкости породы, экспериментальной функции C , диаметра сопла и начальной скорости струи при невращающемся струйном мониторе.

3. Установлена новая зависимость максимальной глубины проникания высоконапорной струи от скорости поднятия монитора, что обеспечивает эффективный расход раствора.

4. Установлены новые зависимости изменения толщины противofильтрационных завес от плотности закрепляющего раствора и породы, давления нагнетания закрепляющих растворов, диаметра сопла и ударной вязкости породы.

5. Впервые в результате экспериментальных и аналитических исследований установлена закономерность образования зоны чистого цемента при проникании струй закрепляющих растворов в мелкозернистые пески, обеспечивающая низкий коэффициент фofильтрации формируемой завесы.

6. Получены зависимости коэффициента фofильтрации от объема закрепляющего раствора в образце для различных пород. Также получена зависимость объемов закрепляющего раствора в породе от технологических параметров струйной технологии.

7. Впервые получены новые зависимости влияния коэффициента фofильтрации и прочности от количества закрепляющего раствора в породе-цементных элементах, позволяющие определять рациональные параметры формирования толщины противofильтрационных завес при решении различных горно-технических задач.

8. Выполнен анализ различных параметров, описывающих процесс проникания высоконапорных струй в дисперсную породу. С помощью анализа теории размерностей и подобия получена критериальная зависимость, описывающая процесс проникания при невращающемся мониторе.

9. Разработаны компьютерные программы по определению технологических параметров формирования противofильтрационных завес при проведении вертикальных стволов и горизонтальных выработок неглубокого заложения, создании

гидроизоляционных завес вокруг подземных камер и отстойников вредных веществ.

10. Результаты исследований в виде рекомендаций внедрены в проекты Днепрогипрошахт, Днепрометропроект.

11. Проведены экспериментальные работы по созданию элементов завесы на трассе ст. открытого заложения "Набережная им. Ленина" Днепропетровского метрополитена, которые подтверждают обоснованность и достоверность результатов выводов и рекомендаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Осушение выработок в неоднородных водоносных системах./ В. Д. Бабушкин, А.Д. Бунтман, Л.И. Малышев, М.Ф. Хасин. - М.: Недра, 1977. – 208 с.
2. Владыко А.Б. Коррозионная устойчивость гидроизоляционных защитных сооружений при освоении подземного пространства. // Сб. науч. тр. Национальной горной академии Украины. – Д.: НГА Украины. - 1999. - № 6. - Т. 4. - С. 13 - 15.
3. Гидрогеология СССР: В 6 т. Под ред. А.В. Сидоренко - М.: Недра, 1971. - т. 6: Донбасс – 480 с.
4. Ксенда И.М. Исследования условий строительства и эксплуатации глубоких шахт Донбасса: Дис... канд. техн. наук - Д. 1972. - 168 с.
5. Докукин А.В., Докукина Л.С. Возникновение кислотных рудничных вод и борьба с ними. - М.: Углетехиздат, 1950. - 295 с.
6. Соляков И. П. Отчет по теме «Исследования агрессивности подземных шахтных вод в Чистяковском и Донецко-Макеевском районах».- Фонды треста Артемгеология, 1968.- 200 с.
7. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.И. Алексеев, Е.А. Гузеев; Под общ. ред. В.М. Москвина - М.: Стройиздат, 1980. - 536 с.
8. Прогнозирование долговечности бетона с добавками. / Г. Л. Добролюбов, В.Б. Ратинов, Т.И. Розейберг; Под общ. ред. В.Б. Ратинова - М.: Стройиздат, 1983. - 213 с.
9. Кенке Рольф. Защита поверхности бетона. / Под общ. ред. В.А. Соколова; Пер. с нем. Л. П Смирновой; - М.: Стройиздат, 1981. - 103 с.
10. Улучшение свойств грунтов поверхностно - активными и структурообразующими веществами / Под ред. проф. И.И. Черкасова. - М.: Автотрансиздат, 1963.-176 с.
11. Камбефор Б. Инъекция грунтов. - М.: Энергия, 1971. - 135 с.
12. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона.- М.: Стройиздат, 1981 - 464с.
13. Ржаницын В.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. - М.: Стройиздат, 1986.-264 с.
14. Соколович В.Е. Химическое закрепление грунтов. - М.: Стройиздат, 1980.-119 с.
15. А.с. 313921, СССР. Способ закрепления грунтов / В.Е. Соколович, М.Н. Ибрагимов, В.А. Губкин. Заявл. 15.07.69; 1971; Бюл. № 26.
16. Соколович В.Е. , Чувелев В.К. Вебер И.Р. Уплотнения фильтрующего бетона карбамидной смолой. // Бетон и железобетон.-1971.- №4.-С. 10-12.
17. Блескина Н.А., Федоров Б.С. Глубинное закрепление грунтов синтетическими смолами.-М.: Стройиздат,1980.- 148 с.
18. Давыдов В.В., Белоусов Ю.И. Химический способ закрепления горных пород.- М.: Недра, 1977.- 228 с.
19. Гальченко П.П., Кобляков В.М., Ельков А.В. Химическое укрепление водоносных песков при строительстве Харьковского метрополитена. // Мате-

- риалы VIII Всесоюз. совещ. «Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве». – К., 1974.- С 19 – 22.
20. Применение карбамидных смол при проходке шахтных стволов в Кривбассе/ Н.Т. Фатеев, Ю.А. Лаухин, В.С. Дубровин и др. // Шахт. стр-во. – 1977 - №1. – С. 13-16.
 21. Темкина Р.З. Синтетические клеи в деревообработке. М., Недра, 1974.- 240 с.
 22. Безрук В.М., Князюк К.А. Устройство цементно-грунтовых оснований и покрытий. - М.: Дориздат, 1951.-188 с.
 23. Марков Л.А., Парфенов А.Л., Петрашев А.Д. Улучшение свойств грунтов поверхностно-активными и структурообразующими веществами - М., Автотрансиздат, 1963. – 176 с.
 24. Барановский М.П. Опыт сооружения подземного гаража методом "стена в грунте" в г. Москве / Сб. докл. семинара. - К., 1975. – С. 15-20
 25. Филатов А.И., Ткаченко Р.Н., Сопрыкин М.Д. Строительство методом "стена в грунте" // Городское хозяйство Украины. - 1974, - №3. – С. 7 – 8.
 26. Возведение сооружений методом "стенка в грунте"// Под ред. А.Л. Филатова - К.: Будівельник, 1976. - 204 с.
 27. Коньков Н.К. Применение способа "стенка в грунте" при строительстве производственных зданий // Промышленное стр-во.-1975. - № 2. – С. 11 - 12.
 28. Хейфец В.Б. Сборные несущие стенки в грунте // Энергетическое стр-во за рубежом. - 1974.- №3.- С 3 – 5.
 29. Копейко В.Я. Опыт строительства подземных помещений способом "стенка в грунте" // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1973. - № 3. – С. 10 – 12.
 30. Зега С.О., Маковский Л.В. Эффективная технология возведения "стен в грунте" при строительстве подземных сооружений // Подземное пространство мира. – 1996. - № 5. – С. 13 - 15.
 31. Мещеряков А.Н., Хейфец В.Б. Противофильтрационные и несущие стенки в грунте. - М.: Энергия, 1969. - 158 с.
 32. Смородинов М.И., Федоров Б.С. Устройство сооружений и фундаментов способом "стенка в грунте". - М.: Стройиздат, 1986. - 144 с.
 33. Шаповалов И. И. Опыт организации строительства противофильтрационных завес и горизонтальных экранов. // Тез. докл. Междунар. симпоз. «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». - Белгород: ВИОГЕМ, 1993. - С. 189.
 34. Болотских Н.С., Тиховидов Б.Д., Пасечник Н.А. Создание противофильтрационной завесы для охраны подземных вод от загрязнения сточными водами. // Тез. докл. Междунар. симпоз. «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». - Белгород: ВИОГЕМ, 1993. - С. 175.

35. Бондаренко В.И., Власов С.Ф., Захаров В.В. Электрохимическое закрепление пород в горном деле. – Д.: Изд-во ДГУ, 1993. - 212 с.
36. Загоруйко Л.П. Применения электрохимического закрепления обводненных глинистых пород в шахтном строительстве.// Уголь Украины.-1958.- №11.- С. 13-17
37. Соколов А.М. Исследования и выбор рациональных параметров электрохимического метода закрепления слабых дисперсных пород в условиях подземных горных выработок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- Кривой Рог: КГРИ, 1971. - 22 с.
38. Зайцева Л.Г. Интенсификация электрохимического закрепления слабых водонасыщенных грунтов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук, - М.: НИИ оснований, 1972.- 22с.
39. А.с. 692933, СССР. Способ электрохимического укрепления грунта / Н.В. Маклашевский, В.В. Чепелев, С.В. Тордуа, Н.Е. Лаптин. Заявл. 09.08.77; Опубл. 25.10.79; Бюл. № 39.
40. А.с. 536283, СССР. Способ электрохимического закрепления глинистого грунта / В.В. Чепелев, С.В. Тордуа. Заявл. 14.10.74; Опубл. 25.11.76; Бюл. № 43.
41. А.с. № 195974, СССР. Способ электрохимического закрепления илистых или глинистых грунтов / В.В. Чепелев. Заявл. 19.08.65; Опубл. 13.10.67; Бюл. № 43.
42. Пат. 1811726 АЗ, МКИ Е 02 Д 3/12. Способ закрепления слабых водонасыщенных пород / В.И. Бондаренко, В.В. Захаров, С.Ф. Власов, А.Е. Трубаков. Заявл. 4.09.90; Опубл. 10.11.92. Бюл. № 6.
43. А.с. № 717933, СССР. Способ электрохимического закрепления грунта/ А.М. Зильберман, Ю.Н. Бабец, В.И. Бондаренко, Э.Г. Кабат (СССР). Заявлено 15.12.77. Заявл. 14.10.74; Опубл. 15.09.79; Бюл. № 17.
44. Захаров В.В. Обоснования принципов управления процессом электрохимического закрепления водонасыщенных пород в подземных условиях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Д., ДГИ, 1987.- 21с.
45. А.с. №1329229, СССР. Установка для электрохимического упрочнения грунта / Ю.Н. Бабец, В.И. Бондаренко, В.В. Захаров. Заявл. 14.09.86; Опубл. 20.11.87; Бюл. № 29.
46. Ященко А.Я. Исследования электрохимического закрепления в неоднородном электрическом поле./Материалы VIII Всесоюз. науч. конф. вузов СССР с участием научно-исследовательских институтов "Комплексное исследование физических свойств горных пород и процессов". - М.: Изд-во Недр, 1984.- С.22.
47. А.с. №1297528, СССР. Способ электрохимического закрепления водоносных грунтов / Ю.Н. Бабец В.И. Бондаренко, В.В. Захаров. Заявл. 14. 03. 85; Опубл. 20.10.86; Бюл. № 25.
48. Кипко Э.Я., Полозов Ю.А., Смородин Г.М. Тампонаж зон разрывов при их пересечении выработками // Уголь Украины. – 1985 - №9. - С. 41-42.
49. Определения основных параметров зоны закрепления неустойчивых обводненных пород при сооружении горизонтальных выработок / Э.Я.

- Кипко, Ю.Н. Спичак, Ю.А. Полозов, И.В. Музюкина // Шахт. стр-во. - 1983. - №11. - С. 7-8.
50. Тампонаж обводненных горных пород. Справ. пособ. /Э.Я. Кипко, Ю.А. Полозов, О.Ю. Лушникова и др. - М.: Недра, 1989. - 318 с.
51. Кипко Э.Я., Полозов Ю.А., Должиков П.Н. Электрохимический тампонаж неустойчивых обводненных пород при сооружении устья стволов // Шахт. стр-во. - 1989. - №1. - С 13-15.
52. Кипко Э.Я., Полозов Ю.А. и др. Электрохимический тампонаж обводненных пористых пород // Шахт. стр-во. - 1988. - №9. - С 9-13.
53. Власов С.Ф. Обоснование и разработка технологии закрепления дисперсных пород вокруг выработок физико-химическими способами. Дис... канд. техн. наук: – Д., 1988. - 226 с.
54. Трубаков А.Е. Обоснование разработки технологии силикатно-термического закрепления плавунных пород. Дис... канд. техн. наук: – Д., 1992. - 240 с.
55. Coolejn W.C. Correlation of data on jet cutting bu Water jets using dimensionless parameters // Proceeding international symposium on Jet Cutting Technology 2nd-3th April 1974. Cambridge, v-p. - Н 4-39 - Н4-38.
56. Artingstal G., Moodie K. The Cutting and Fracturing of Rocks bu Hing - Pressure Water gets // The Mining Engineer. - 1973. - V. 132. VII. - N 154.
57. Yahiro T. Yoshida H. On the characteristics speed water jet in the liquid and its utilization on induction grouting method // Proceeding of the Second International Symposium on jet Cutting Technology, 2-4th April 1974, Cambridge. - P. G 4-41- G4-62.
58. Хасин М.Ф., Малышев Л.И., Бройд И.И. Струйная технология укрепления грунтов. // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1984. - № 5. - С. 10-12.
59. Broid I. J., Khassin M. F. Jet grouting comes to Britain // Ground engineering, V.15. - №2. – 1982. - P. 31-32.
60. Broid I. J., Khassin M. F., Malyshev L. I. et.al. Jet ground method and cut-off walls stability// Proc. X Intern. Conf. On Soil Mech. And Found. Eng. 3/5. Stockholm, 1981. - P. 339-397.
61. Струйная технология сооружения противодиффузионных завес. Н.В. Дмитриев, А. В. Попов, Л.И. Малышев, М.Ф. Хасин. // Гидротех. стр-во, 1980, №3. - С 5-9.
62. Федоров Б.С. Применение высоконапорных струй при устройстве фундаментов на Севере. // Основания, фундаменты и механика грунтов – 1983. - №2. - С.19-21.
63. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. - М.: Госэнергоиздат, 1948. - 288 с.
64. Власов С.Ф. Теоретические и прикладные основы струйного закрепления слабых дисперсных пород при ведении горных работ Дис... докт. техн. наук: 05.15.09. – Д., 1999. - 375 с.
65. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. - М.: Физматгиз, 1960. - 715 с.

66. Результаты моделирования струйной технологии закрепления пород. В.И. Бондаренко, С.Ф. Власов, С.В. Ткачук, В.И. Почепов // Гидротех. стр-во. - 1994. - № 1. - С. 35 - 37.
67. Бондаренко В.И., Власов С.Ф., Ткачук С.В. Выбор определяющих параметров струйного закрепления грунтов // Гидротехн. стр-во. - 1993. - № 11. - С. 8 - 10.
68. Власов С.Ф. Влияние скорости вращения и поднятия монитора на основные технологические параметры струйных технологий закрепления слабых пород // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Д., НГА України, 1999. - № 2. - С. 263 - 268.
69. Бондаренко В.И., Власов С.Ф., Ткачук С.В. Обоснование моделирования процессов струйной технологии закрепления пород // Гидротехн. стр-во. - 1993. - № 9. - С. 35 - 37.
70. Бай Шин. Теория струй. - М.: Физматгиз, 1961. - 326 с.
71. Хапилова Н.С. Теория внезапного отжима угольного пласта. - Киев: Наук.думка, 1992. - 232с..
72. Prandtl L., Bericht uber Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz. ZAMM. Bd. V, 1925.- s. 136.
73. Солодухин М. А., Архангельский И.В. Справочник техника-геолога по инженерно-геологическим и гидрогеологическим работам. - М.: Недра, 1982.- 288с.
74. Справочное руководство гидрогеолога: В 2 т. /Под ред. В.М. Максимова. - Л.: Недра, 1967. - Т.1. - 592 с.
75. Справочное руководство гидрогеолога В 2 т. /Под ред. В.М. Максимова. - Л.: Недра, 1967. - Т.2. - 360 с.
76. Ребиндер П.А. Вязкость дисперсных систем и структурообразование // Вязкость жидкостей и коллоидных растворов. – М., Изд-во АН СССР, 1941. – 150 с.
77. Лысенко М. П. Состав и физико-механические свойства грунтов. Изд. 2-е, перераб. и доп.- М.: Недра, 1980.- 272 с.
78. Полак А.Ф., Элементарные процессы твердения мономинеральных вяжущих веществ // Труды Баш НИИСтроя. - Вып. 3 - 1963. – 230 с.
79. Сегалова Е.Е., Ребиндер П.А. Современное физико-химическое представления о процессах твердения минеральных вяжущих веществ // Строительные материалы. – 1960. - №1. С. 5-10.
80. Чеховский Ю.В. Понижение проницаемости бетона. - М.: Энергия, 1968. - 192 с.
81. Стольников В.В., Лавринович Е.В., Сидементационные процессы в бетонной смеси и их влияние на формирование структуры бетона и его водопроницаемость// Известия ВНИИГ, - 1952. - т. 47.
82. Сизов В. П. Рациональный подбор составов тяжелого бетона.- М.: Стройиздат, 1995. – 350 с.
83. Сизов В. П. К вопросу прогнозирования водопроницаемости бетона //Бетон и железобетон. - №4 -1994. – С. 23-24.

84. Власов С.Ф., Ткачук С.В., Владыко А.Б. Экспериментальные исследования и теоретический расчет процесса насыщения дисперсных пород закрепляющим раствором при струйной технологии. // Проблемы и перспективы освоения подземного пространства крупных городов. – Д.: НГА Украины, 1998. – С. 137-142.
85. Теорія ймовірностей і математична статистика: Навч. посіб. /Л.В. Новікова, Б.Д. Котляр, В.І. Бичков. – К.: Техніка, 1996. – 184 с.
86. Власов С.Ф., Владыко А.Б. Определение толщины противодиффузионной завесы, создаваемой с помощью струйной технологии закрепления. // Наук. вісн. НГАУ. – Д., НГА Украины, 2000. - №1. - С. 8-10.
87. Бондаренко В.И., Власов С.Ф., Владыко А.Б. Определение технологических параметров струйного закрепления пород при сооружении противодиффузионных завес // Наук. вісн. НГАУ.- Д., НГА України. – 1999.- № 6.- С.11-12.
88. Защита карьеров от воды / С.К. Абрамов, М.С. Газизов, В.И. Костенко. – М.: Недра, 1976. – 230 с.
89. Бондаренко В. И. Научные основы физико-химического закрепления слабых водонасыщенных пород вокруг горных выработок. Дис... докт. техн. наук: 05.15.04. - 05.15.11. - Днепропетровск. - 1989. - 396 с.
90. Власов С.Ф., Владыко А.Б., Устивицкий О.А. Технология струйного закрепления дисперсных пород при сооружении шахтных стволов // XXI столетие – проблемы и перспективы освоения месторождений полезных ископаемых. – Д., НГА Украины, - 1998. – С. 108-112.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ОПЫТА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАВЕС ВОКРУГ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....	5
1.1. Анализ влияния различных факторов на эффективность формирования противофильтрационных завес.....	5
1.2. Анализ специальных способов защиты подземных сооружений от подземных вод.....	9
1.3. Современное состояние исследований по струйной технологии закрепления пород.....	15
1.4. Цель и задачи исследований	18
1.5. Общая методика выполнения исследований.....	19
РАЗДЕЛ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОЗДАНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАВЕС ВЫСОКОНАПОРНЫМИ СТРУЯМИ ЗАКРЕПЛЯЮЩИХ РАСТВОРОВ	21
2.1. Определение рациональной скорости поднятия монитора и глубины проникания струи	21
2.2. Определение толщины противофильтрационной завесы	27
2.3. Исследование коэффициента фильтрации для различных типов пород.....	32
2.4. Определение толщины зоны чистого закрепляющего раствора.....	36
ВЫВОДЫ	38
РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД СТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ.....	39
3.1. Методика экспериментальных исследований формирования противофильтрационной завесы с помощью струйного закрепления.....	39
3.2. Результаты исследований изменения толщины и длины элемента завесы от технологических параметров	42
3.3. Обоснования критериальной зависимости процесса изменения толщины противофильтрационной завесы	45
3.4. Результаты исследований зависимости объемов закрепляющего раствора в породе от технологических параметров закрепления.....	49
3.5. Экспериментальная проверка образования зоны чистого цемента	51
3.6. Исследования фильтрационных и прочностных свойств элементов противофильтрационных завес	53
ВЫВОДЫ	55

РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАВЕС С ПОМОЩЬЮ СТРУЙНОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ.....	56
4.1. Натурные испытания формирования элементов противофильтрационной завесы	56
4.2. Методика проектирования противофильтрационных завес, создаваемых с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов	62
4.3. Технология создания противофильтрационных завес с помощью высоконапорных струй закрепляющего раствора	66
4.4. Контроль качества создания противофильтрационных завес с помощью струйной технологии	71
4.5. Определения оптимальных технико-экономических параметров создания противофильтрационных завес	71
4.6. Результаты использования научных разработок создания противофильтрационных завес высоконапорными струями закрепляющих растворов	74
ВЫВОДЫ.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	78