

**Менейлюк А.И.**  
**Петровский А.Ф.**  
**Борисов А.А.**



# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНЪЕКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА



**Одесса 2017**

УДК 699.82

М 50

*Печатается по решению Ученого Совета  
Одесской государственной академии строительства и архитектуры  
(протокол № 3 от 3 ноября 2016 г.)*

**М 50 Менейлюк Александр Иванович**

Современные технологии создания противофильтрационных экранов и завес [Монография]/ А.И. Менейлюк, А.Ф. Петровский, А.А. Борисов. – Одесса: ОГАСА, 2016. – 126с. **ISBN 978-617-7195-35-0**

Монография посвящена решению проблемы защиты подземного пространства от загрязнений при наличии в грунте твердых включений.

В монографии представлены результаты её решения. Это – теоретические исследования, разработка технологических основ устройства горизонтальных водонепроницаемых композитных экранов, эспериментально-статистическое моделирование влияния технологических факторов на исследуемые показатели, разработка технологических карт новых способов производства работ с заданными показателями качества.

Предназначена для студентов и аспирантов высших технических учебных заведений, научных и инженерно-технических работников проектных и строительных организаций.

***Рецензенты:***

**Д.Ф. Гончаренко** – доктор технических наук, профессор (Харьковский национальный университет строительства и архитектуры).

**Ю.Л. Винников** – доктор технических наук, профессор (Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка).

**УДК 699.82**

**М 50**

**© Менейлюк А.И.,  
Петровский А.Ф.,  
Борисов А.А., 2016**

**ISBN 978-617-7195-35-0**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
<b>РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>7</b>
1.1. Анализ источников подтопления и загрязнения подземного пространства...7	
1.2. Известные технологии устройства противofильтрационных экранов и завес.....	18
1.3. Обзор и анализ инъекционного закрепления грунтовых оснований.....	34
1.4. Применение метода горизонтально-направленного бурения для создания горизонтальных противofильтрационных экранов.....	41
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1.....	43
<b>РАЗДЕЛ 2 ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>45</b>
2.1. Обоснование направления работы.....	45
2.2. Общая методика исследования.....	50
2.3. Экспериментальное-статистическое моделирование.....	82
2.4. Обработка результатов экспериментов.....	84
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2.....	
<b>РАЗДЕЛ 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНЪЕКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭКРАНА В ГРУНТЕ.....</b>	<b>87</b>
3.1. Моделирование проницаемости грунта при ламинарной и турбулентной фильтрации жидкости.....	88
3.2. Выбор модели исследований и методы анализа проникающего действия струи.....	121
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3.....	136
<b>РАЗДЕЛ 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ИНЪЕКЦИОННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО ЭКРАНА .....</b>	<b>138</b>

4.1. Результаты определения технологических параметров горизонтального инъецирования грунта на основе бентонитовых глин.....	138
4.2. Результаты подбора состава инъекционного раствора.....	158
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4.....	164
<b>РАЗДЕЛ 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ИНЪЕКЦИОННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО ЭКРАНА НА ОСНОВЕ ТВЕРДЕЮЩИХ СОСТАВОВ.....</b>	<b>166</b>
5.1. Результаты определения коэффициента фильтрации по разработанной методике на лабораторном стенде.....	166
5.2. Исследование противofильтрационного экрана на основе цементного вяжущего, глиноцементные составы.....	171
5.3. Исследование противofильтрационного экрана на основе гидросиликата натрия с хлористым кальцием.....	176
5.4. Исследование противofильтрационного экрана на основе мягко-эластичной гидроизолирующей смолы MC-Injekt GL-95.....	181
5.5. Результаты определения коэффициента фильтрации по прибору СПЕЦГЕО.....	185
5.6. Результаты определения коэффициента фильтрации по разработанной методике в лабораторном стенде с учетом переходного коэффициента.....	186
5.7. Влияние рецептурно-технологических факторов на механические свойства грунтобетонного экрана на основе цемента.....	188
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 5.....	193
<b>РАЗДЕЛ 6 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ ПО РАЗРАБОТАННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ.....</b>	<b>195</b>
6.1. Разработка технологической карты по инъекционной технологии.....	195
6.2. Разработка технологической карты по струйной технологии.....	216
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 6.....	249
<b>ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....</b>	<b>250</b>
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	252

## ВВЕДЕНИЕ

Монография посвящена решению проблемы защиты подземного пространства от загрязнений при наличии в грунте твердых включений.

Анализ проблем, возникающих при захоронении последствий аварии на Чернобыльской АЭС, показал, что по масштабам воздействия и необходимым финансовым и техническим ресурсам, ведущее место занимает локализация загрязнений и снижение эмиссий радиоактивных веществ в окружающую среду. Устройство противofильтрационных экранов способом горизонтально-направленного бурения может быть использовано для защиты подземных вод от миграции загрязняющих веществ. Отмечено поступление радионуклидов в грунтовые воды из многочисленных временных могильников радиоактивных отходов в зоне Чернобыльской АЭС. Это около 800 траншей, сооруженных в большинстве случаев без достаточного обеспечения их герметичности, большая часть которых находится на территориях с глубоко расположенными или вообще отсутствующими водоупорными слоями грунта. Устройство противofильтрационных экранов позволит решить данную проблему [44].

Уже с первых моментов захоронения отходов в геологическую среду специалисты принимали во внимание необходимость решения проблемы защиты водных ресурсов от загрязнения. Акцент на защиту подземных вод делался в связи с тем, что подземные воды имеют определенную скорость фильтрации, что может со временем способствовать расширению очага загрязнения. В этой связи при выборе мест приповерхностного захоронения, например, радиоактивных материалов (РАМ) предпочтение, естественно, отдавалось участкам, где грунтовая толща, перекрывающая первый водоносный горизонт, была представлена суглинистыми отложениями с малым коэффициентом фильтрации. В районах приповерхностного захоронения, где грунтовая толща зоны аэрации была представлена отложениями с большим коэффициентом фильтрации, использовались глинистые экраны с целью снижения интенсивности инфильтрации жидкой фазы отходов, содержащих радионуклиды. Для повышения безопасности при аварийных ситуациях

аналогичным образом подходили к решению проблемы защиты подземных вод от загрязнения и в случае складирования РАМ.

Настоящее исследование обладает несомненной экологической, а также социальной значимостью, так как позволит защитить население от последствий заражения загрязнённой радионуклидами водой.

Научная гипотеза работы заключается в обосновании параметров инъекционной технологии защиты подземного пространства с помощью горизонтально-направленного бурения, которое должно осуществляться на основе теоретических и экспериментальных исследований и предпосылок, указывающих на возможность создания горизонтального противодиффузионного экрана с помощью рациональных рецептур инъекционных растворов и технологических решений при их нагнетании в толщу грунта.

Достоверность результатов, полученных по новой методике в работе, предполагалось обеспечить сравнением теоретических расчетов с экспериментальными исследованиями, а также сопоставлением результатов, полученных нами с результатами отечественных и зарубежных ученых, что изучали подобные технологии.

# РАЗДЕЛ 1

## АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 1.1. Анализ источников подтопления и загрязнения подземного пространства

**Источники и виды загрязнения.** Загрязнение грунтов – это накопление в грунтах химических веществ, радиоактивных элементов и биологических организмов, которые вызывают ухудшение характеристик грунтов и являются опасными для здоровья человека при контакте с загрязненными грунтами или через среды, сопредельные с грунтами.

Загрязнение грунтов происходит различными путями: в форме атмосферных выпадений, поступления с грунтовыми водами, вследствие химизации сельского и лесного хозяйства, разливов нефти, за счет утечек со свалок промышленных и коммунальных отходов, различного рода хранилищ токсичных, в том числе радиоактивных отходов и т.д.

В настоящее время основными источниками химического загрязнения грунтов являются промышленные предприятия, на которых загрязнение идет в основном через выбросы при авариях и утечки токсичных веществ из различных магистралей, очистных сооружений, резервуаров, хранилищ и т.д. Огромные размеры иногда приобретает загрязнение рек и озер сточными водами и промышленными отходами. Через грунтовые воды эти загрязнения мигрируют в грунтовую среду. При этом, наиболее токсичными, считаются загрязнения тяжелыми металлами [22,93].

Сельскохозяйственное загрязнение связано с внесением в почву удобрений и ядохимикатов. Вследствие этого констатируется проникновение нитратов, нитритов, аммония в подземные воды на десятки метров водоносных горизонтов.

Основными источниками *радиоактивного загрязнения* грунтов являются аварии на атомных предприятиях, утечки из различных хранилищ радиоактивных отходов.

Радионуклиды – химические элементы, способные к самопроизвольному распаду с образованием новых элементов, а также к образованию изотопов любых химических элементов.

В экологическом отношении наибольшую опасность представляют радионуклиды с большим периодом полураспада (Стронций-90 – 28 лет, Цезий-137 – 33 года, Плутоний-239 –  $2,4 \cdot 10^4$  лет и т.п.) [4].

Основными источниками *биологического загрязнения* грунтов являются сточные воды практически всех видов промышленного производства, сельского хозяйства, коммунального хозяйства городов и поселков, бытовые и промышленные свалки, кладбища и др. Особую опасность представляет биологическое загрязнение возбудителями инфекционных и паразитарных болезней, уничтожение которых представляет значительные трудности [92].

Анализ источников подтопления и загрязнения, видов загрязняющих веществ показал необходимость применения и развития различных способов локализации источников и противодиффузионной защиты подземного пространства.

**Общие характеристики источников подтопления и загрязнения.** Как отмечалось выше, основные объемы отходов в Украине формируются на предприятиях добывающей, перерабатывающей, металлургической, энергетической и других отраслей промышленности, которые с разным уровнем концентрации размещены по всей территории страны. Общее количество промышленных отходов в Украине достигает 25 млрд. т, в том числе более 4,4 млрд. т. токсичных (1-го-3-го классов опасности), которые размещены на 2500 предприятиях. При этом большинство мест размещения отходов не соответствуют санитарно-гигиеническим требованиям.

Фильтрация вредных промышленных отходов и веществ из различного рода отстойников, накопителей и хранилищ также является важной народно-хозяйственной проблемой, которая требует выполнения большого объема строительных работ, направленных на защиту подземной литосферы [41].



В Украине добывается около 5% мирового объема сырьевых ресурсов. Разработкой полезных ископаемых и их переработкой занимаются около 3,5 тысяч промышленных предприятий. По предварительным данным общее количество твердых отходов этих предприятий составляет 1,3-1,5 млрд. тонн в год, а под их складирование отведено более 53 тысяч га земли, на которых расположено около 2,5 тысяч накопителей отходов. Значительная часть накопителей отходов была построена десятки лет назад, когда в полном объеме не учитывалось их негативное воздействие на окружающую среду, и поэтому не предусматривались специальные природоохранные мероприятия. [32,33].

Также следует учитывать, что в бассейне р. Днепр сконцентрирован основной объем производства с преобладанием "грязных" отраслей промышленности (металлургическая, химическая, угольная), самые большие энергетические объекты и массивы орошаемых земель, при этом хозяйственный комплекс в бассейне Днепра на протяжении десятилетий развивался без учета экономических и экологических последствий для Украины [114,115].

В границах бассейна расположено около 1000 фильтрующих накопителей, из которых 80 процентов сконцентрировано на юге бассейна. Суммарный объем накопленных в них высокоминерализованных вод достигает 1 куб. км, из них 77 процентов находится в Днепропетровской области. Из накопителей в подземные водоносные горизонты попадают растворы солей, нефтепродукты, ароматические вещества и тому подобное. При этом следует учитывать, что по степени опасности к опасным накопителям принадлежит 40%, а к особо опасным – 15% промышленных накопителей (приложение А) [46].

Так, например, общая площадь загрязнения подземных вод в районе Кривбасса составляет около 300 км<sup>2</sup>, максимальная минерализация их достигает 12,3 г/л. Фильтрация шахтных вод из накопителей в Западном Донбассе стала причиной повышения уровня минерализации подземных вод до 1,5 г/л, а на Самарском, Первомайском и Вербском водозаборах - до 12 г/л.

В г. Днепродзержинске на балансе государственного предприятия "Барьер", которое обслуживает радиационно-опасные объекты бывшего уранового производства "Приднепровский химический завод" находится 9 опасных хвостохранилищ радиоактивных отходов, в которых на 840 га накоплено около 42 млн.т. отходов и 13 сооружений с мощностью гамма-излучения от 6000 до 40000 мкР/час, что в 660 раз превышает допустимый уровень.

На 1,5 млн.га в бассейне р. Днепр, что составляет 10% площади бассейна, действуют 53 большие оросительные системы с соответствующими каналами. Фильтрационные и дренажные воды оросительных систем представляют собой мощный источник загрязнения водных объектов ядохимикатами и минеральными солями. Поврежденная изоляция каналов оросительных систем [105, 182,187], изношенные водопроводные и канализационные сети, часто возникающие на них аварийные ситуации и протечки, способствуют подтоплению территорий и существующих объектов [6,58,59,128].

Подтопление эксплуатируемых объектов может быть вызвано и целым рядом других техногенных или иных причин. Определить их порой весьма трудно. Кроме ликвидации причин подтопления часто возникают задачи локальной защиты эксплуатируемых объектов от подтопления.

Не менее важной народно-хозяйственной проблемой является защита существующих и вновь стоящихся полигонов захоронения твердых бытовых отходов в связи с возможной фильтрацией загрязненной воды в окружающую среду [21,158].

Сегодня в Украине количество полигонов и свалок твердых бытовых отходов достигает, по разным данным, от 4 500 до 6 000 единиц. Ежегодно собирается 12–14 млн т, при этом 96–97 % собранных отходов попадает как на организованные, так и на неорганизованные свалки. [69].

Особое место в проблеме защиты грунтов и грунтовых вод в Украине занимает ситуация, сложившаяся в результате Чернобыльской катастрофы.

Чернобыльская катастрофа сопровождалась выбросом большого количества радионуклидов в окружающую среду, площадь земель в Украине с радиоактивным загрязнением по цезию-137 превышающем  $1 \text{ Ки/км}^2$  составляет более 7 млн. гектаров.

При ликвидации последствий катастрофы были выполнены мероприятия направленные на предотвращение попадания радионуклидов в поверхностные и грунтовые воды. К ним относятся: строительство противодиффузионной завесы из комовой глины глубиной 29-32м. шириной 0,6м и длиной 2800м; строительство линейной дренажной системы скважин протяженностью 5,5 км (150 скважин); строительство сооружений дренажной системы вдоль р. Припять и пруда–охладителя (177скважин). [122, 188].

При этом, значительное количество радиоактивных отходов (РАО) было размещено в зоне отчуждения в постоянных пунктах захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) и в пунктах временной локализации радиоактивных отходов (ПВЛРО), которые создавались в процессе дезактивации зараженных территорий в 1986–1987г. Общее количество РАО в этих пунктах оценивается в 1 млн.  $\text{м}^3$ , а их активность составляет  $13\text{--}14 \cdot 10^{15}$  беккерелей []. По территориальному расположению ПВЛРО объединены в сектора [101,122]:

"Копачи" – 1250 тыс. $\text{м}^2$  ; "Припять" – 700 тыс. $\text{м}^2$ "; "Чистогаловка" – 60 тыс. $\text{м}^2$ ; "Песчаное плато" – 880 тыс. $\text{м}^2$ ; "Нефтебаза" – 420 тыс. $\text{м}^2$ ; "Старая стройбаза" – 1220 тыс. $\text{м}^2$ ; "Новая стройбаза" – 1250 тыс. $\text{м}^2$ ; "Полигон Корогод" – 1250 тыс. $\text{м}^2$ ; "Станция Янов" – 1280 тыс. $\text{м}^2$ ; "Рыжий лес" – 400 тыс. $\text{м}^2$ .

Общее количество захоронений РАО в этих секторах превышает 800. ПВЛРО представляют собой траншеи и бурты, которые содержат загрязненные металлические конструкции, железобетон, древесину, остатки жилых строений, загрязненный грунт и пр.

ПВЛРО сооружались без проектной документации, без учета гидрогеологических условий, не имеют защитных конструкций, в том числе гидроизоляции. Они не отвечают требованиям нормативных документов по

обеспечения их безопасной эксплуатации. Радиологическая опасность захоронений главным образом связана с их подтоплением и, соответственно, проникновением в грунт и грунтовые воды радионуклидов.

Вопросам защиты подземного пространства от загрязнения и подтопления уделяется большое внимание во многих Законах Украины и утвержденных общегосударственных целевых и национальных программах [52,112,113,114,115 ,116].

Среди множества мероприятий, предусмотренных законодательными актами и программами, особое внимание уделяется созданию дополнительных инженерных защитных барьеров на опасных участках распространения грунтовых вод, загрязненных токсичными стоками, в том числе, радионуклидами, а также локализации существующих источников загрязнения и подтопления.

Это связано с тем, что перенос большинства существующих неорганизованных свалок твердых бытовых отходов, перезахоронение токсичных и/или радиоактивных отходов, находящихся в поврежденных или не соответствующих нормативам хранилищах может повлечь за собой вторичное загрязнение окружающей среды, а также значительные финансовые затраты [122, 188].

Конструктивно-технологические решения защитных противодиффузионных барьеров в значительной степени зависят от инженерно-геологических и гидрогеологических условий площадок, на которых находятся источники подтопления и/или загрязнения, или же потенциально подтопляемые сооружения.

В тех случаях, когда в геологическом строении площадок на практически достигаемой глубине присутствуют водоупорные слои грунта, задача предотвращения распространения загрязненных грунтовых вод или подтопления сооружений решается путем устройства вертикальных противодиффузионных барьеров (экранов), заглубленных в водоупор.

При отсутствии водоупора на практически достигаемой глубине решение задачи локализации источника загрязнения или потенциально подтопленного сооружения вызывает значительные трудности и, зачастую, существующие технологии не всегда позволяют устроить эффективную и не дорогую защиту подземного пространства или сооружения.

***Состояние проблемы загрязнения подземного пространства в Украине.*** Водные запасы Украины крайне невелики. Среднегодовая водообеспеченность одного жителя Украины сегодня составляет приблизительно 1 тыс. м<sup>3</sup>, что в 15 раз ниже нормы, которая определена Европейской экономической комиссией ООН [15]. Кроме того, имея ограниченные запасы пресной воды, Украина, практически не имеет поверхностных вод, которые отвечали бы требованиям стандартов, предъявляемым к источникам питьевого водоснабжения. Основная часть водных ресурсов приходится на речной сток (92,6%) [39]. На территории Украины насчитывается более 71 тыс. рек и источников общей протяженностью 248 тыс. км. Из них более 67 тыс. (94,4%) водостоков - короткие (менее 10 км), общей протяженностью 131 тыс. км.

Водные ресурсы Украины загрязнены радионуклидами. Наблюдается интенсивная миграция радионуклидов с севера на юг. В Кременчугском водохранилище накопление радионуклидов ежегодно растет на 40%.

Накопление распространенного цезия - 137 в водах Киевского водохранилища оценивается в 7200 Ки, Каневского - 2200 Ки. Всего аварийный выброс техногенных радионуклидов на Чернобыльской АЭС составил более 50 млн. Ки, в т.ч. долгоживущих цезия-137, стронция-90, плутония-270. Около 120 тыс. км<sup>2</sup> территории Украины подвергается загрязнению малыми дозами радиации и 40 тыс. км<sup>2</sup> - средними и крупными [46].

Особое место в стране принадлежит подземным водам. Они чистые и поэтому обычно используются для удовлетворения потребностей населения.

Несомненно, одним из важнейших загрязнителей подземных вод является также радиоактивное заражение. Рассмотрим состояние данной проблемы, а

также причины, по которым радионуклиды попадают в систему водных ресурсов Украины.

Территория с сильным радиоактивным загрязнением грунта составляет 8,4 млн. га и охватывает 32 районов шести областей Украины рисунок 1. Большая часть этих почв приходится на сельскохозяйственные угодья.

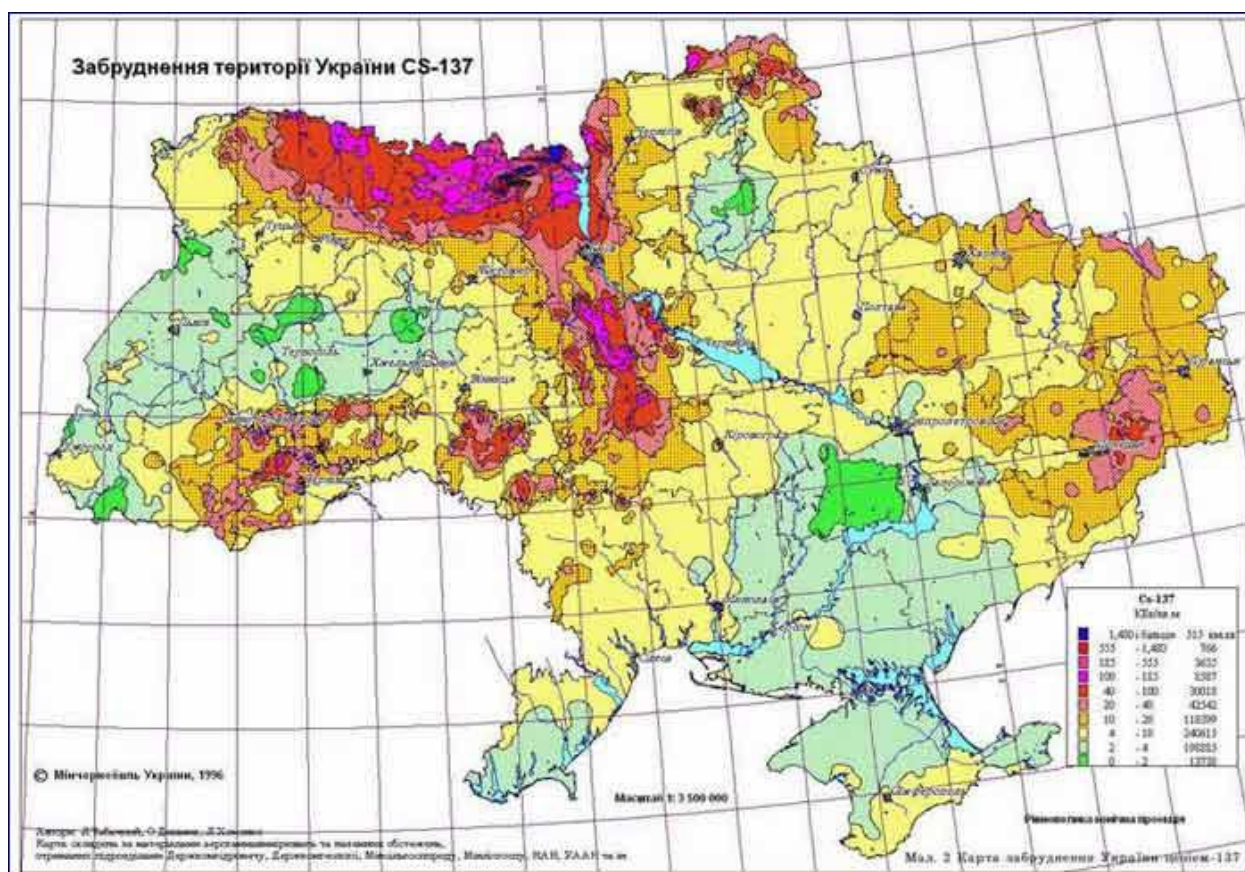


Рис. 1.1 Регионы, наиболее поражённые радионуклидами.

Радионуклидами загрязнено также 3 млн. га леса. На территориях с загрязнением цезием-137 более 45 Ки на 1 км<sup>2</sup> проживает более 15 тыс. человек, 15-45 Ки - около 46 тыс, 5-15 Ки - еще 150 тыс. Около 1,5 млн. человек проживает на территории, где радиоактивный фон превышает допустимые нормы (Киевская, Житомирская, Черниговская, Ровенская, Черкасская, Винницкая, Черновицкая, Кировоградская, Ивано-Франковская области).

Дезактивационные работы, на которые в 1986-1989 гг. были потрачены миллионы, желаемых результатов не дали [40].

Особое место в проблеме защиты грунтов и грунтовых вод в Украине занимает ситуация, сложившаяся в результате Чернобыльской катастрофы.

В водах Припяти, Днепра и его водохранилищ (особенно в Киевском) резко возросла концентрация радионуклидов. Даже спустя 6 лет после аварии она была в 10-100 раз выше, чем до нее, а в донных осадках, особенно илах, богатых на органику, накопилось огромное количество радиоактивных отходов. В Киевском водохранилище на дне накопилось уже более 60 млн. т радиоактивного ила [46].

Особого внимания, из проблем радиационной опасности территории зоны отчуждения, заслуживают пункты временной локализации радиоактивных отходов (ПВЛРО), которые представляют собой места захоронения радиоактивных материалов (преимущественно высокоактивного верхнего слоя почвы). Захоронения проводились в крайне сжатые строки, что привело к тому, что не было создано надежной изоляции материалов содержащих радионуклиды от окружающей среды (почвенных вод и др.). На территории Чернобыльской зоны отчуждения насчитывается около 800 таких пунктов, в которых содержится 40 млн. м<sup>3</sup> твердых отходов общей радиоактивностью более чем 200 000 Ки. Не менее опасен и «саркофаг» над сгоревшим четвертым энергоблоком ЧАЭС. Там еще осталось огромное количество радиоактивных веществ. Надежность изоляции этих веществ отнюдь не гарантирована. Могильники уже сегодня протекают, «саркофаг» с годами становится все более радиоактивным, конструкции его проседают и деформируются [3].

В 1986 г. в качестве первоочередных работ по защите водных объектов от радиоактивного загрязнения были осуществлены следующие мероприятия [41]:

а) Создана противоточная стена вокруг АЭС (планируемая длина - 8 - 8,5 км, фактическая - 2,8 км) - глиняная перемычка в грунте глубиной 30 м, которая была предназначена для предотвращения попадания

радиоактивности в подземные воды из зоны технических аварийных объектов станции.

b) Для регулирования уровня загрязнения подземных вод в ближней зоне ЧАЭС сооружена линейная дренажная система скважин протяженностью 5,5 км, в том числе вертикального дренажа: южный отсекающий дренаж - 54 скважины, береговой вертикальный дренаж г. Припять - 96 скважин.

c) Осуществлено сооружение дренажной системы вдоль р. Припять и пруда-охладителя для перехвата естественного потока фильтрационных загрязненных вод из пруда в р. Припять - 177 скважин.

d) Выполнено обвалование берегов р. Припять для предотвращения поверхностного смыва с дождевыми водами и др.

Эти сооружения предназначались, в первую очередь, для защиты вод р. Припять от поступления радионуклидов с промплощадки и непосредственно примыкающих к станции территорий, где наблюдались самые высокие плотности радиоактивных выпадений.

Для ограничения смыва радионуклидов в Киевское водохранилище и расположенные ниже водохранилища Днепровского каскада в 1986 г. были выполнены работы по перекрытию существующих каналов и малых рек фильтрующими и глухими плотинами. Всего было построено 131 временное перегораживающее гидротехническое сооружение, в том числе на территории Украины 96 с использованием сорбирующих материалов на основе природных цеолитов. Общая протяженность глухих дамб составила 17670 м и фильтрующих перемычек - 4908 м. Стоимость прямых затрат на сооружение дамб на территории Украины составляла около 7 млн. руб. (в ценах 1984 г.) [3].

Эти сооружения, в основном, выполнили свою водоохранную роль летом-осенью 1986 г. Однако во время паводка 1987 г. эффективность большинства сооружений оказалась малой. Эффект снижения концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в водах малых рек, пропускаемых через плотины, не превышал в среднем 1,3 - 1,5 раза. Заложённые в них сорбенты после полугодовой эксплуатации поглотили лишь несколько кюри активности. Кроме того,



фильтрующие плотины быстро заиливались и превращались в глухие. Это приводило к подтапливанию значительных по площади прилегающих территорий с высоким содержанием радиоактивных веществ в почвах, способствовало повышению растворимости и переходу обменных форм изотопов цезия, стронция и частично рутения в воду, и последующему выносу их в речную сеть.

Для предотвращения миграции радионуклидов с твердым стоком были построены четыре насосоуправляющие донные ловушки на р. Припять у г. Чернобыля, сел Ивановка, Оташев, а также на Киевском водохранилище у с. Стахолесье. Однако и их эффективность в силу преимущественного радиоактивного загрязнения в виде тонких фракций наносов реки и высокой транспортирующей способности потоков оказалась очень низкой (в 1988 г. в этих русловых карьерах было перехвачено не более 7 %  $^{137}\text{Cs}$ , вынесенного рекой за год в Киевское водохранилище). В этой связи естественные плесовые участки реки и застойные зоны верхней части Киевского водохранилища перехватывали несравненно большее количество радиоактивных веществ из речного потока за счет естественной седиментации. Общая стоимость прямых строительных затрат на сооружение четырех донных ловушек составила около 10 млн. руб. (в ценах 1984 г.) [5].

Особое беспокойство доставили проблемы фильтрации загрязненных вод из водоема-охладителя ЧАЭС. Только за счет проектной фильтрации ежегодно в р. Припять и подстилающие водоносные горизонты разгружается до 200 млн. м<sup>3</sup> загрязненной воды. Предполагалось, что с ними в р. Припять поступят растворимые формы радиоактивных веществ, первично локализованных в донных отложениях водоема, в основном  $^{90}\text{Sr}$ . Для уменьшения выноса  $^{90}\text{Sr}$  с фильтрующимися водами между водоемом-охладителем и рекой была построена дренажная "завеса", которая так и не была введена в эксплуатацию ввиду необоснованных до настоящего времени последствий от ее включения. Она находится в так называемом "режиме ожидания", хотя прямые - около 22 млн. руб. - и эксплуатационные затраты на

ее содержание - до 5 млн. руб. (в ценах 1989 г.) остаются велики. Таким образом, вышеперечисленные основные мероприятия по снижению радиоактивного загрязнения водно-эрозионных потоков в сторону подземных и поверхностных вод на первом этапе водоохранной деятельности в зоне ЧАЭС (1986 - 1989 гг.) не дали значимого эффекта в улучшении радиационной обстановки в водных системах зоны влияния аварии [3,5,46].

Разработан план, которым предусмотрено сооружение «саркофага-2», имеющий целью накрыть весь четвертый энергоблок со старым «саркофагом». После окончания строительства планируется постепенные разборки разрушенного четвертого энергоблока, и извлечение ядерного топлива осталось. Этот проект рассчитан на 7 лет. На сегодня выполнено лишь некоторые работы по укреплению старого «саркофага» [46].

Таким образом, особого, самого оперативного внимания заслуживают места захоронения, называемые могильниками. Именно они никак не защищены от проникновения радиоактивных элементов в систему подземных вод, и требуют наискорейшего устройства противofiltrационных защитных экранов.

## **1.2. Известные технологии устройства противofiltrационных экранов и завес**

Современное состояние технологии и организация строительства, в том числе и при решении задач защиты подземного пространства от загрязнения и подтопления базируется на основополагающих системных теоретических и экспериментальных исследованиях, проведенных известными учеными: С.С. Атаевым [159], В.С. Балицким [10], Ю.И. Беляковым [160], М.С. Будниковым [18], Н.Н. Даниловым [161], О.О. Литвиновым [160], В.И. Теличенко [153], В.И. Рыбальским [135], В.К. Черненко [158] и другими учеными.

Системные исследования в области защиты подземного пространства от загрязнения и подтопления позволили создать многообразие конструктивно-технологических решений и соответствующих средств механизации устройства

противофильтрационных экранов и завес, которые применяются для предотвращения движения грунтовых вод к защищаемым от подтопления сооружениям и площадкам (завесы), а также для перехвата инфильтрационных вод, поступающих из водовмещающих наземных и подземных сооружений (экраны)

Противофильтрационные устройства (экраны и завесы) применяются для предотвращения движения грунтовых вод к защищаемым от подтопления сооружениям и площадкам (противофильтрационные завесы), а также для перехвата инфильтрационных вод, поступающих из водовмещающих наземных и подземных емкостей и сооружений-резервуаров, отстойников, шламохранилищ, накопителей стоков (противофильтрационные экраны) [14]. Выбор завесы или экрана решается технико-экономическими расчетами [17].

Противофильтрационные экраны (ПФЭ) рекомендуется применять при устройстве шламохранилищ, наземных и подземных резервуаров и т.п. Такие экраны представляют собой площадные устройства, выполненные из одного или нескольких слоев непроницаемых материалов, которые могут сочетаться с дренирующими устройствами типа фильтрующих постелей и др. [14].

Глубина противофильтрационной завесы является одним из основных параметров, определяющих эффективность воздействия завесы на фильтрационный поток. В зависимости от назначения завесы ее эффективность может выражаться в сокращении расхода фильтрационного потока или уменьшении его напоров. По обоим этим признакам наиболее эффективна совершенная завеса, полностью пересекающая водоносный слой. При очень малой водопроницаемости тела завесы (коэффициент фильтрации материала заполнения порядка  $10^{-3} - 10^{-4}$  м/сут и менее) совершенная завеса практически полностью останавливает фильтрационный поток и принимает на себя полный его напор.

Несовершенная завеса “висячая”, пересекающая водоносный слой не на полную его глубину, имеет значительно меньшую эффективность, чем совершенная, как по сокращению расхода фильтрационного потока, так и по

уменьшению напоров. Тем не менее, в определенных гидрогеологических условиях устройство несовершенной завесы может быть целесообразным [8].

На основании анализа известных способов устройства противofильтрационных экранов и завес была предложена их классификация. На рисунке 1.2. – горизонтальные противofильтрационные экраны и завесы, а на рисунке 1.3. – вертикальных противofильтрационных экранов и завес.

В каждом конкретном случае эффективность того или иного сооружения определяется технико-экономическим расчетом. Ввиду того, что в нашей работе разрабатывается технология горизонтальной защиты подземного пространства, решено в дальнейшем проводить анализ технологий связанных со строительством экранов и завес в горизонтальной плоскости.

### **Виды противofильтрационных экранов.**

Противofильтрационные экраны различают по видам их устройства. Бывают экраны, построенные открытым и закрытым способами.

Экраны, выполняемые открытым способом, представляют собой площадные устройства, выполненные из одного или нескольких слоев непроницаемых материалов, которые могут сочетаться с дренирующими устройствами типа фильтрующих постелей. [2,58,119].

Противofильтрационные экраны применяются при устройстве полигонов твердых бытовых и промышленных отходов, шламохранилищ, золоотвалов, наземных и подземных резервуаров, сооружений для очистки воды и стоков, водоемов, каналов и других гидротехнических сооружений.

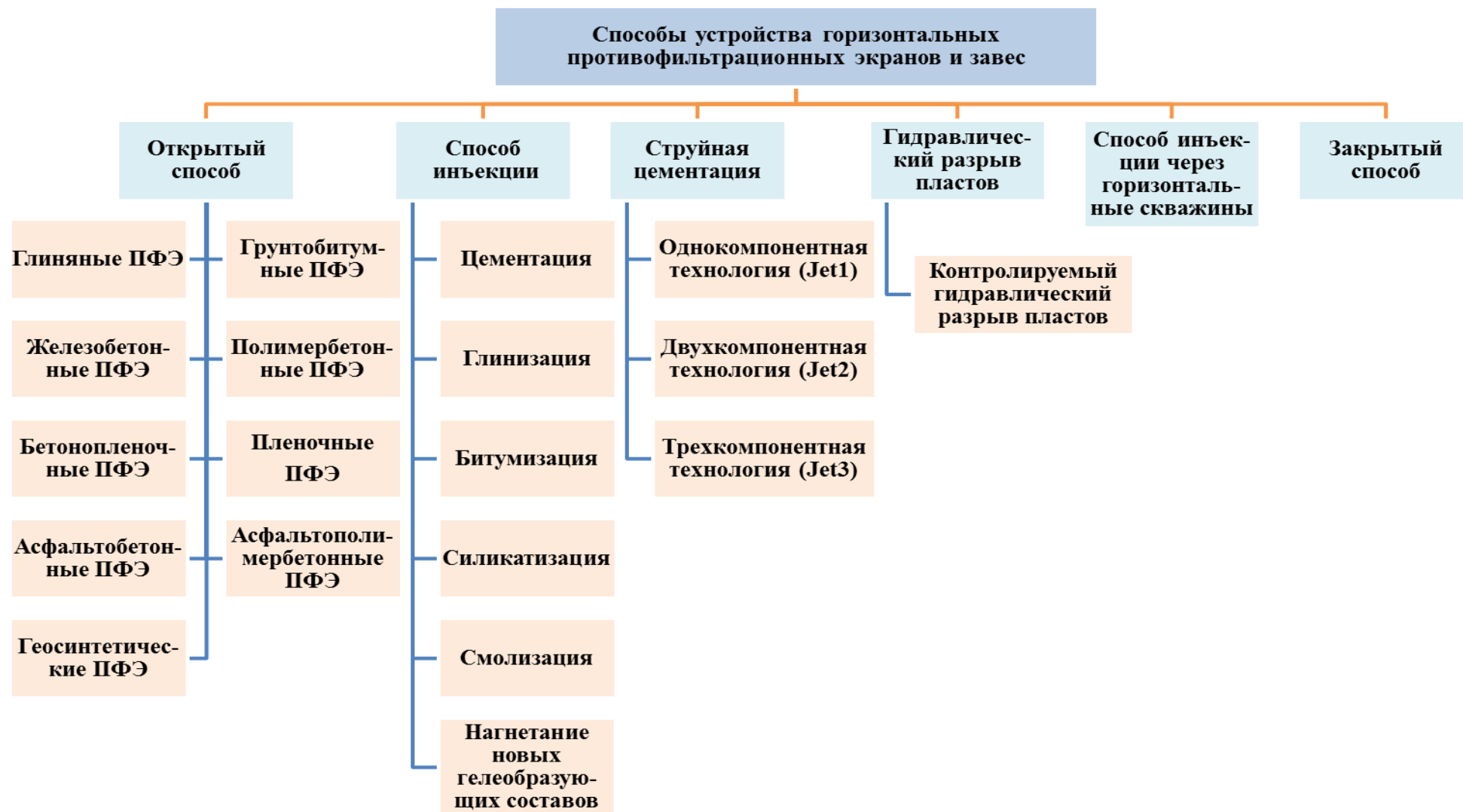


Рис. 1.2 Классификация горизонтальных противofiltrационных экранов и завес

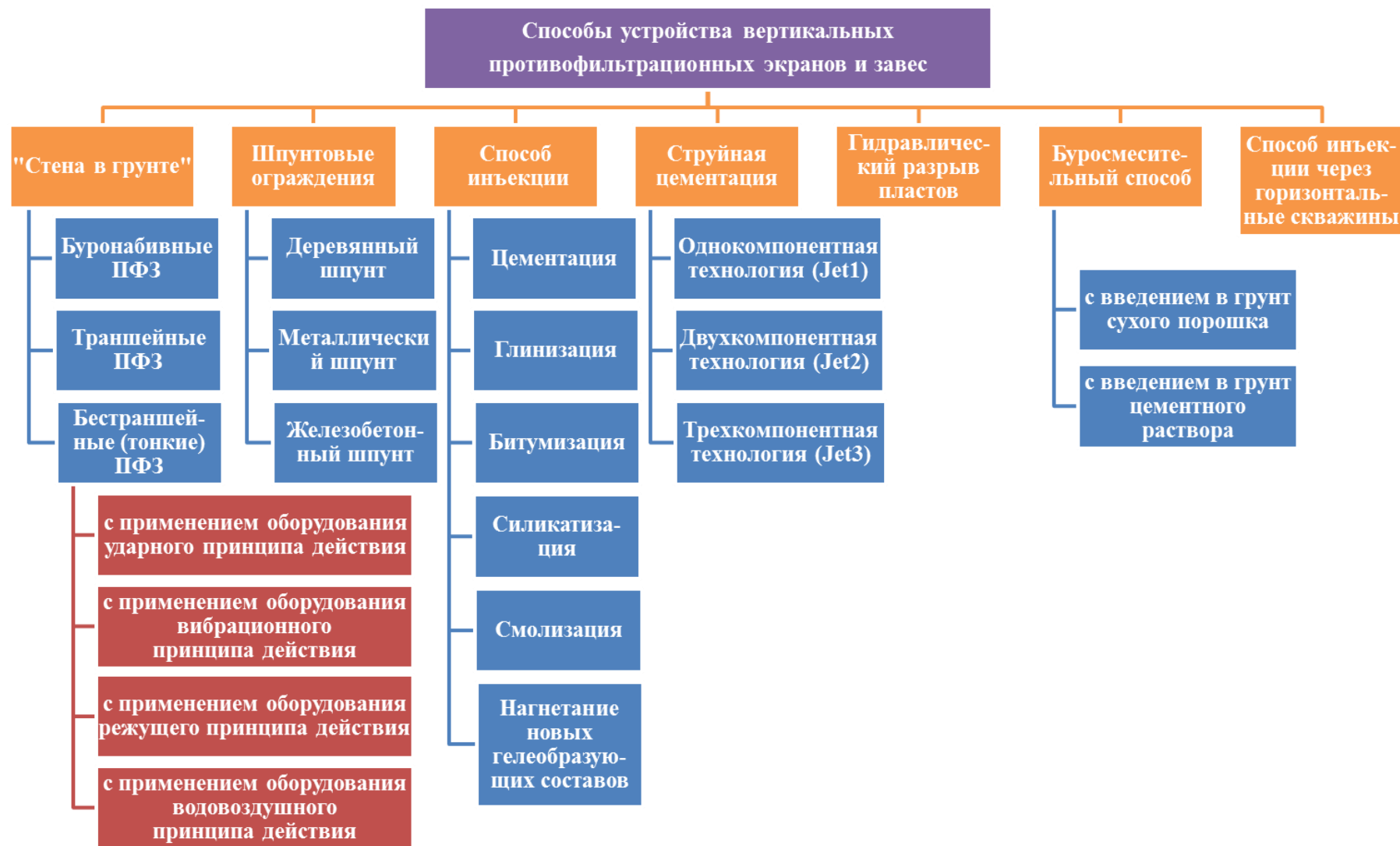


Рис. 1.3 Классификация вертикальных противофильтрационных экранов и завес

Как пример, рассмотрим более подробно способ открытого устройства противofильтрационного экрана с использованием геосинтетических материалов.

В последнее время для устройства открытых противofильтрационных экранов все чаще применяются *геосинтетические* материалы. Геосинтетики – это специальные полимерные материалы: геомембраны, тканый и нетканый геотекстиль, георешетки, геокомпозит. Благодаря уникальному сочетанию своих характеристик геосинтетические материалы широко применяются для армирования грунтов, укрепления откосов, устройства дренажных систем, изоляции источников загрязнения окружающей среды, для инженерной подготовки территорий, гидроизоляции подземных и заглубленных сооружений [18].

Геомембраны – это рулонные полимерные листовые материалы толщиной более 1 мм и шириной более 5 метров, основной рабочей характеристикой которых является полная водонепроницаемость. Геомембраны изготавливаются на основе различных полимеров: полиэтилена, ПВХ, полипропилена. Для устройства противofильтрационных экранов применяются геомембраны из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП, HDPE) или полиэтилена низкой плотности (ПЭНП, LDPE). Строгая стандартизация – исключительная особенность данного класса материалов. Любой из производителей полиэтиленовых геомембран вынужден следовать единой разработанной Международным институтом геосинтетики спецификации – GRI GM13 для геомембран ПЭВП (ПНД, HDPE) и GM17 для геомембран ПЭНП (ПВД, LDPE, VFPE). Поэтому, когда говорят о геомембранах – говорят не просто о полиэтиленовой пленке, а о продукте, обладающем комплексом конкретных инженерных характеристик.

Геокомпозиты – это комбинация нескольких геосинтетических продуктов, соединенных друг с другом в заводских условиях. Отдельного упоминания заслуживает бентонитовый мат (GCL – Geo Clay Liner) – композит, имеющий в своем составе слой бентонитовой глины, и применяемый в

комплексе с полиэтиленовой геомембраной, при строительстве полигонов бытовых и промышленных отходов [19]. Бентомат состоит из натурального натриевого бентонита, в качестве водонепроницаемой прослойки, и двух слоев полипропиленового геотекстильного материала, в качестве армирующей оболочки, которая удерживают слой бентонита. Тканое геотекстильное полотно соединено с нетканым иглопробивным способом (поперечными волокнами), что обеспечивает равномерное распределение и фиксацию бентонитового порошка внутри каркаса.

Обычно в комплексе с геомембранами используются нетканые термически скрепленные или иглопробивные геотекстили. Геотекстиль может выступать в качестве подстилающего, дренажного и/или защитного слоев. Также он помогает равномерно распределить нагрузки по всей площади геомембраны и, в отличие от гранулированного дренажа, без затруднений укладывается на откосах.

Геомембрана укладывается на ровное основание в виде бетона или железобетона, хорошо урвненной глины, супеси, суглинка, песка или песчано-гравийной смеси. Если в подстилающем слое имеются частицы, которые могут повредить геомембрану, то в качестве подстилающего защитного слоя используется геотекстиль.

Полотна геомембраны укладываются внахлест вручную или с помощью специальных траверс для укладки. Отдельные полотна геомембраны соединяются между собой свариванием специальным оборудованием. На рис. 1.4. показан пруд-накопитель в процессе укладки геомембраны.

Поверх геомембраны укладывается защитный слой грунта или геотекстиля. Толщина защитного слоя может быть разной от 10 до 80 см в зависимости от назначения объекта строительства и его дальнейшей эксплуатации. Защитным слоем может выступать мелкозернистый грунт без каменистых включений либо бетонная стяжка [20].





Рис. 1.4 Пруд-накопитель, г. Одесса

Конструкции противофильтрационных экранов с применением полиэтиленовой геомембраны выполняют однослойными (рис.1.5), двухслойными или комбинированными (рис. 1.6).

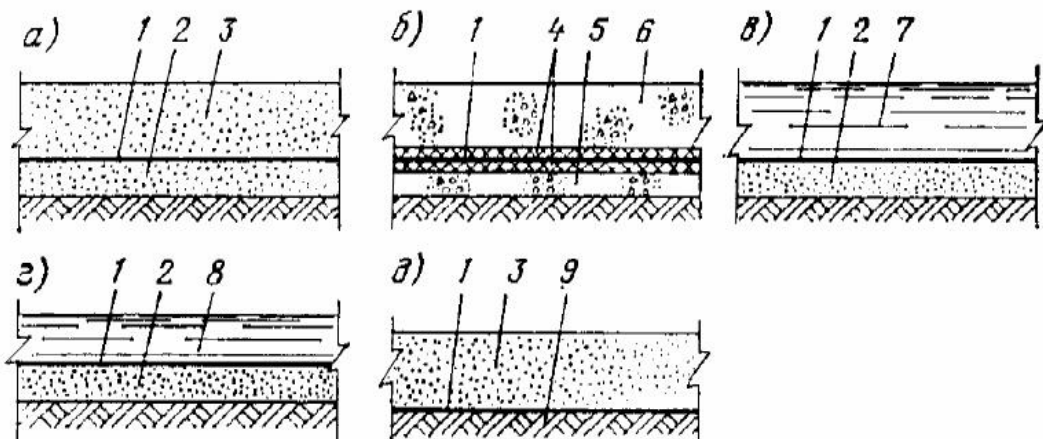


Рис. 1.5 Варианты конструкций однослойного противофильтрационного экрана из геомембраны

*а* – подстилающий и защитный слой из песка; *б* – подстилающий и защитный слой из несвязного грунта с включением остроугольных частиц, полиэтиленовая геомембрана защищенная с обеих сторон геотекстилем; *в* – защитный слой из воды, подстилающий – из песка; *г* – защитный слой из

шлака, подстилающий – из песка;  $d$  – подстилающий слой из местного грунта, защитный – из песка;

1 – полиэтиленовая геомембрана; 2 – подстилающий слой из грунта; 3 – защитный слой из грунта; 4 – защитные слои из геотекстильного полотна; 5,6 – соответственно подстилающий и защитный слой из несвязного грунта с включением остроугольных частиц; 7 – слой воды; 8 – слой шлака; 9 – основание

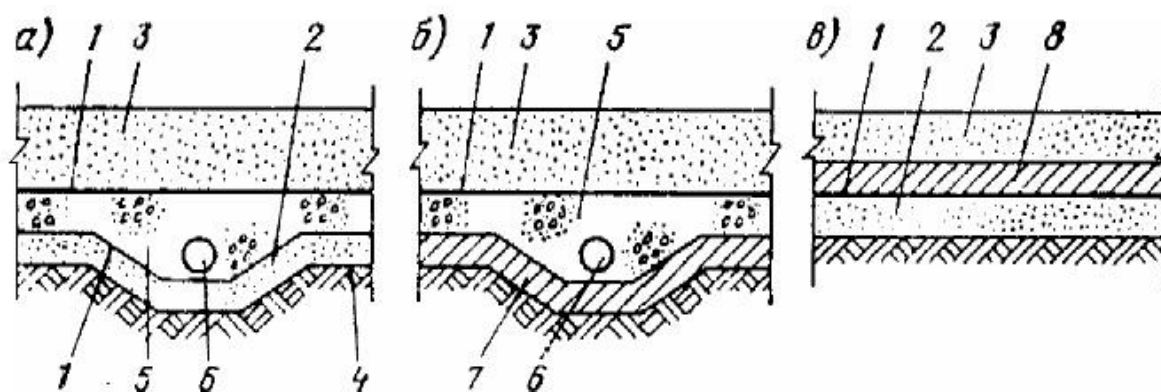


Рис. 1.6 Варианты конструкций двухслойного (а, б) и комбинированного (в) противofiltrационного экрана из геомембраны

а – верхний и нижний противofiltrационные слои выполнены из геомембраны; б – верхний противofiltrационный слой выполнен из геомембраны, нижний – из уплотненной глины или бентонитовых матов; в – противofiltrационный слой выполнен из геомембраны, поверх которой уложен глиняный грунт или бентонитовые маты;

1 – полиэтиленовая геомембрана; 2 – подстилающий слой из грунта; 3 – защитный слой из грунта; 4 – основание; 5 – дренажный слой; 6 – дренажная труба; 7 – слой уплотненного глиняного грунта или бентонитовые маты; 8 – слой глиняного грунта или бентонитовые маты

Геомембраны характеризуются высокими антикоррозийными и гидроизоляционными свойствами, стойкостью по отношению к большинству химических реагентов (возможно применение для хранения жидкостей с рН от 0,5 до 14) и ультрафиолетовому излучению, гибкостью, безусадочностью,

эластичностью, имеют высокие механические характеристики. За счет высокой прочности при растяжении (до 26,2 МПа) мембраны могут воспринимать значительные усилия и, таким образом, кроме противофильтрационных, выполнять функции армирующего материала. Большое относительное удлинение (до 850 %) под действием максимальной нагрузки и трещиностойкость обеспечивают целостность противофильтрационного элемента при значительных просадочных деформациях. Геомембраны сейсмически устойчивы, выдерживают диапазон наружных температур от  $-50^{\circ}$  до  $+70^{\circ}$ . Срок службы их – до 100 лет. Полимерные мембраны устойчивы по отношению к насекомым, грызунам и бактериям. Превосходная свариваемость листов дает возможность быстро и просто выполнять сварочные работы, образуя сплошной непроницаемый экран. Геомембраны удобны при транспортировке и складировании. Очень важный аспект – отработанные методики оценки качества материалов и работ.

Открытый способ устройства противофильтрационного экрана является наиболее экономичным и простым в исполнении. Однако применение данного способа для защиты от фильтрационных потоков из существующих хранилищ является равносильным их перезахоронению, что может повлечь за собой вторичное загрязнение окружающей среды.

*Вертикальные инъекционные завесы.* Инъекционные завесы сооружаются методом поэтапного разбуривания скважин с последующим нагнетанием в них твердеющих растворов (рис.1.7) [119].

Проникая в поры и трещины грунта или породы, они связывают зерна грунта и, твердея, превращают его в водонепроницаемый и не размываемый монолит. На первом этапе расстояние между скважинами составляет 8 – 10 м. На каждом последующем этапе скважины бурят в промежутках между скважинами, пройденными на предыдущем этапе, до достижения необходимой сплошности сооружаемой завесы.

Инъекционные завесы обычно устраиваются из 1 – 2 рядов цементационных скважин с расстоянием между рядами 1 – 3 м и между

скважинами в ряду 1,5 – 5 м. Закачку раствора в грунт осуществляют зонально участками не более 5 м по вертикали.

Инъекционное оборудование подбирается с учетом удельных расходов, требуемых давлений и агрессивности нагнетаемых химических растворов. Инъекторы могут устанавливаться в заранее пробуренные скважины, погружаться в грунт забивкой, задавливаясь.

При устройстве инъекционных завес применяются цементные, глиноцементные, глинистые растворы, силикатный гель, а также битумы и смолы.

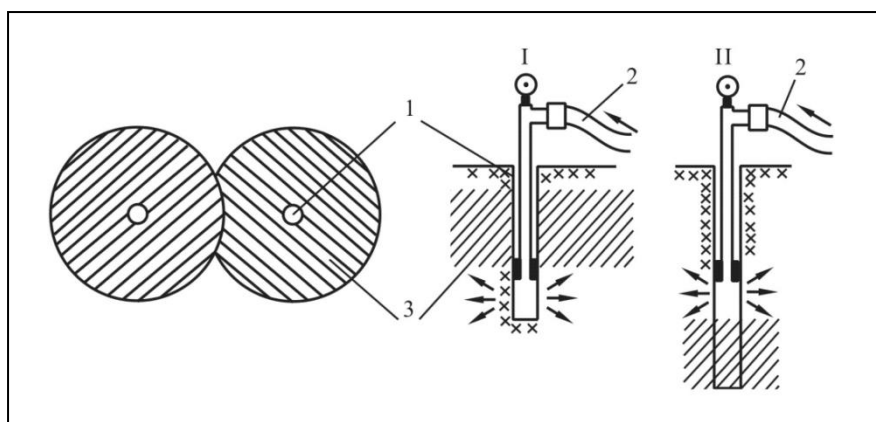


Рис. 1.7 Схема устройства инъекционной завесы

I – нагнетания раствора в скважину нисходящими зонами;

II – нагнетания раствора в скважину восходящими зонами

1 – скважина; 2 – подача раствора; 3 – закрепленная зона

**Способ цементации** применяется в скальных водоустойчивых породах с раскрытием трещин более 0,1 мм при скорости движения грунтовых вод не более 600м/сут, а также в галечниковых и гравелистых отложениях с коэффициентами фильтрации 80–500м/сут [34].

Способ цементации, широко применяемый в гидротехническом строительстве для создания противофильтрационных завес в основании сооружений и для укрепления оснований, в настоящее время наиболее распространен и освоен.

**Способ глинизации** состоит в нагнетании глинистых суспензий в трещиноватые породы и пески с целью их уплотнения.

Глинизация применима в случаях, когда цементация неэкономична из-за больших поглощений цемента в крупных трещинах и взаимосоединяющихся кавернах, при карсте или когда цементация ненадежна из-за наличия агрессивных к цементу вод.

Недостатком способа глинизации является пониженная стойкость глинизационной завесы против суффозии.

**Способ горячей битумизации** служит для создания противofильтрационных завес в трещиноватых скальных, а также в гравийно-галечниковых грунтах.

Сущность способа заключается в нагнетании разогретого до температуры около 200°C битума под давлением в скважины, пробуренные в грунте.

Положительной особенностью способа горячей битумизации является возможность его применения в условиях высоких скоростей фильтрационного потока. Недостатки – способность битума к пластическим деформациям под длительным действием гидростатического напора и трудность заполнения мелких трещин, а также громоздкость и сложность оборудования.

**Способ холодной битумизации** заключается в нагнетании в грунт битумных эмульсий. Нагнетанию в этом случае подвергается тонкодисперсная эмульсия, содержащая 25 – 50% битума. Битумные эмульсии вполне пригодны для уплотнения песчаных грунтов и очень тонких трещин скальных пород [1].

**Силикатизация** заключается в цементировании частиц грунта гелем кремневой кислоты, образуемой силикатными растворами при их смешении с коагулянтом [148]. Коагулянт может быть в виде раствора или газа. Силикатизация применяется в основном для закрепления песчаных грунтов.

Силикатизация не рекомендуется в грунтах, содержащих нефтяные продукты или смолы, при скорости фильтрации подземных вод более 5 м/сут.

**Смолизация** заключается в нагнетании в песчаный грунт растворов высокомолекулярных органических соединений типа карбамида с добавкой кислотных коагулянтов (соляная или щавелевая кислота). При содержании в грунте карбонатов от 0,1 до 3% грунт обрабатывается 3-5%-ным раствором

кислоты. Смолизация возможна в песках с коэффициентом фильтрации от 0,5 до 50 м/сут. [119].

Инъекционные завесы можно сооружать на большие глубины, что дает возможность заглубиться в водоупор и создать совершенную завесу. Недостатком способа является то, что он не позволяет полностью предотвратить фильтрацию, а лишь в той или иной степени снизить ее.

### **Методы устройства противофильтрационных экранов под сооружениями**

*Технология струйной цементации.* Технология струйной цементации грунтов позволяет создать искусственный слой водоупора – горизонтальный противофильтрационный экран (рис.1.8).

По данной технологии можно создавать сплошные массивы, состоящие из взаимно секущихся грунтоцементных колонн. [64].

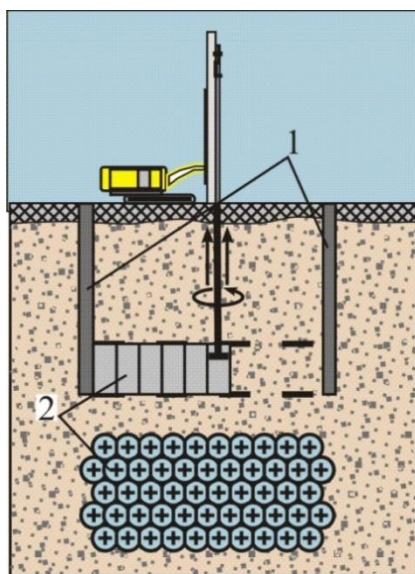


Рис. 1.8 Схема устройства горизонтальной Jet завесы

1– "стена в грунте", 2– горизонтальная завеса

По сравнению с традиционными технологиями инъекционного закрепления грунтов струйная цементация позволяет укреплять практически весь диапазон грунтов – от гравийных отложений до мелкодисперсных глин и илов [140].

К преимуществам технологии следует отнести: высокую скорость сооружения грунтоцементных свай, возможность работы в стесненных условиях, в том числе и в подвальных помещениях, вблизи существующих зданий, на откосах [63,64].

Применение технологии струйной цементации грунтов позволяет создать горизонтальный противofiltrационный экран, при отсутствии водоупорного слоя непосредственно под пятном будущего заглубленного сооружения, однако для создания экрана под существующим сооружением, как правило, потребуется бурение скважин через само сооружение, что может привести к дополнительному загрязнению грунтов токсичными стоками.

*Глиногрунтовая технология.* Технология устройства искусственного водоупора из глиногрунтового материала, основана на применении специализированного оборудования [195]. Она предусматривает устройство вертикальных траншей под защитой глинистого раствора на проектную глубину, опускание в траншею специального рабочего органа 1 с двумя полыми перфорированными валами 2 со шнековой спиралью, прикрепленных к вертикальному полному валу 3 (рис.1.9).

Через вертикальный полый вертикальный вал 3 нагнетают глинистый противofiltrационный раствор к полым перфорированным валам 2. При повороте рабочего органа 1 вокруг вертикальной оси с одновременным вращением перфорированных валов 2 вокруг горизонтальной продольной оси происходит перемешивание раствора с грунтом, формируя горизонтальный противofiltrационный экран.

Применение этой технологии позволяет создать горизонтальный противofiltrационный экран, при отсутствии водоупорного слоя непосредственно под пятном будущего заглубленного хранилища, однако для создания экрана под существующим хранилищем требуется устройство вертикальных траншей через само хранилище, что может привести к дополнительному загрязнению грунтов токсичными стоками.

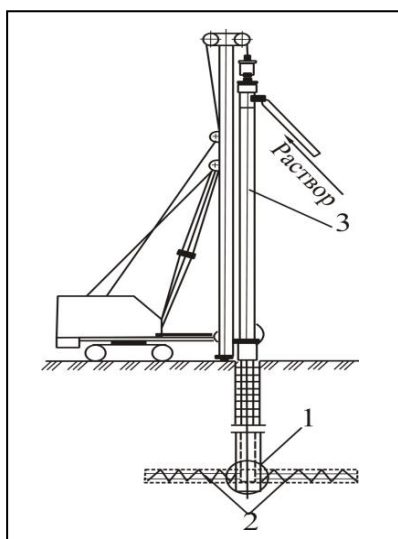


Рис. 1.9. Устройство горизонтального противофильтрационного экрана

*Буромесительная технология.* За рубежом для создания грунтобетонных свай в последние годы стала применяться буромесительная технология.

Популярно японское буромесительное оборудование по введению в предварительно разрыхленный слабый грунт сухого вяжущего в соответствии с технологией Dry Jet Method.

По этой технологии вяжущее вводится в грунт в сухом состоянии, подача его осуществляется воздухом через специальные воздушные сопла/

Применение бурового инструмента позволяет вводить вяжущее и в затворенном водой состоянии. Расположенные на буровом инструменте-смесителе лопасти жестко определяют диаметр закрепляемой колонны и служат для измельчения и перемешивания исходного грунта с поданным в скважину вяжущим. Буровые установки позволяют изготовить грунтобетонные сваи диаметром до 1,0 м и глубиной до 35,0 м.

Безусловный интерес представляют разработки геоинженеров из итальянской фирмы "Soilmec" по объединению преимуществ буромесительной и струйной технологий. Это технология " Turbojet", при которой диаметр закрепляемой колонны жестко обеспечивается механическим путем, а однородность материала и конечная прочность – высоконапорной струей цементного раствора.



Применение буросмесительной технологии для создания искусственных горизонтальных противофильтрационных экранов возможно перед строительством различного рода заглубленных сооружений, но значительно проблематичнее ее использование под уже существующими сооружениями.

*Способ гидравлического разрыва грунта.* При этом способе, для сооружения горизонтального подземного экрана по площади сооружаемого экрана бурят на заданную глубину ряд скважин на определенном расстоянии друг от друга. Устье одной из скважин герметизируют, и подают в нее под давлением твердеющий раствор. Если грунты для данного раствора непроницаемы, то происходит гидравлический разрыв грунта, с выходом раствора в ближайшие скважины. При этом в грунте образуется горизонтальный экран радиусом около 10–30м.

*Способ контролируемого гидравлического разрыва грунта* предусматривает два этапа.

На первом этапе использование струйной технологии для подготовки искусственного слоя грунта с пониженным сопротивлением деформациям, путем струйного размыва в заданном слое грунта.

На втором этапе подаваемый в требуемый слой под давлением раствор производит гидравлический разрыв грунта по сформированной поверхности разрыва и образует фрагмент горизонтального экрана. При достаточном давлении целики между фрагментами разрыхленного грунта соединяются, и экран получается сплошным.

Применение способа гидравлического разрыва для создания искусственного водоупора имеет ряд недостатков: процесс трещинообразования при проведении гидроразрыва грунта является практически неуправляемым; смыкание различных фрагментов экрана является крайне затруднительным, поэтому сплошность экрана не гарантирована; возможны большие потери раствора.

*Технологии устройства экранов под сооружением методом инъектирования.* Анализ таких технологий был выполнен на основании

патентного поиска по теме: "Строительство горизонтального противofильтрационного экрана закрытым способом".

Предметом патентного поиска являлся технологический процесс строительства горизонтального экрана в целом и устройства для его осуществления. Поиск проводится в Украине и России. Глубина поиска – 30 лет

Основным критерием для оценки применимости технического решения, описанного в патенте или авторском свидетельстве, являлась возможность решения проблемы устройства горизонтального экрана под существующим сооружением без его повреждения.

В большинстве патентов, по вышеуказанному критерию, в качестве основного технического решения предлагается устройство из вертикального ствола горизонтальных скважин с последующим инъецированием грунта различными противofильтрационными растворами.

"Способ создания противofильтрационной завесы в лессовом грунте", "Способ тампонажа горных пород с неоднородной трещиноватостью", "Способ создания противofильтрационных завес". Рассмотренные способы устройства горизонтального экрана под существующим сооружением, показывают возможность инъецирования грунтов из горизонтальных скважин для создания экрана, однако общим недостатком предложенных конструктивно-технологических решений является неконтролируемость сплошности создаваемых экранов.

Для более подробного изучения возможности применения технологии инъецирования для защиты подземного пространства от загрязнений необходимо проработать современные составы, которые на сегодняшний день применяют для такого вида строительных работ.

### **1.3. Обзор и анализ инъекционного закрепления грунтовых оснований**

*Характеристика растворов для закрепления грунтов.*

В литературе по различным отраслям строительства способы инъекционного закрепления грунтов традиционно связываются с названием вяжущего: смолизация, силикатизация, битумазация, глинизация, цементация.

Наиболее распространенными вяжущими для закрепления грунтов методом смолизации [10, 65, 121, 178] служат карбамидные, акриловые (АМ-9), фурановые, фенольные смолы [12, 13, 68, 140].

Растворы синтетических смол имеют большую проникающую способность, стойкость к действию агрессивных сред. В качестве недостатков смолизации необходимо отметить канцерогенность большинства смол, а также их высокую токсичность и стоимость.

Основным реагентом для силикатизации грунтов является силикат натрия (т.е. жидкое стекло  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ ) [10, 11, 49, 103, 111, 112, 123].

Различают однорастворный и двухрастворный способы силикатизации [6, 112]. При однорастворной силикатизации используется раствор, состоящий из силиката натрия и одной из кислот (фосфорной, серной, кремнефтористой). При двухрастворном методе силикатизации в грунт последовательно нагнетают растворы силиката натрия и хлористого кальция.

Закрепление грунтов силикатизацией имеет ряд недостатков. Наиболее значительный из них – высокая стоимость силиката натрия. Этот материал, получаемый из силикат-глыбы, фактически является дефицитным. Именно этим обстоятельством объясняются попытки поиска заменителей жидкого стекла теми или иными отходами производства (например, ферросиликатами). Однако наличие подобных заменителей предполагает развитое производство, что имеет место далеко не во всех районах даже развитых стран. В случае однорастворной силикатизации некоторые коагулянты (например, серная кислота) требуют очень точной дозировки, что является затруднительным в процессе производства работ. Специфическим недостатком двухрастворной силикатизации является то, что хлористый кальций, являясь сильным коагулянтом, при соединении с жидким стеклом очень быстро образует гель, что препятствует проникновению раствора в грунт

на требуемую глубину. Кроме того, хлористый кальций, подаваемый даже под относительно небольшим давлением, отжимает жидкое стекло, в связи с чем более равномерное распределение растворов можно получить только повторной инъекцией [10].

Метод битумизации сводится к нагнетанию в грунтовый массив расплавленного битума или специальных битумных эмульсий с заполнением трещин и пустот [3, 10, 121]. Битумы не размываются водой и не растворяются в ней. Существенный недостаток битумов – их способность к пластическим деформациям под нагрузкой, которая приводит к продвижению битума в трещинах породы и в некоторых случаях может привести к «вытеканию» битума за пределы затампонированной зоны.

К.Ф. Жигач для закрепления грунтов методом глинизации [49, 121, 123] рассматривает три типа растворов: растворы, приготовленные из суглинков и цемента; растворы грубодисперсных глин и глинисто-цементные; растворы из тонкодисперсных глин [10]. Глинисто-цементные растворы имеют ряд преимуществ: высокая степень дисперсности глин позволяет им проникать в микротрещины и поры; не разжижаются подземными водами; будучи тиксотропными, обладают высокой прокачиваемостью насосами; структурные свойства препятствуют быстрому осаждению твердых частиц раствора и образованию пробок как в пустотах и трещинах, так и в цементационных скважинах; высокий выход тампонажного камня; 13 устойчивость действию агрессивных вод.

Глинистые и битумные тампонажные растворы как правило применяют для уменьшения водопроницаемости зернистых грунтов и трещиноватых скальных пород.

Необходимо отметить, что выдвигаемые в настоящее время во всем мире строгие экологические требования существенно сужают номенклатуру используемых ранее химических реагентов, закачиваемых в грунты. В виду недостатков вышеперечисленных крепителей для инъекционного закрепления грунтов метод цементации получил наиболее широкое применение в

строительстве. Суть метода цементации заключается во введении в грунт различных цементных растворов [2, 4, 9, 15, 18 – 21, 23, 24, 64 – 67, 75, 78, 80, 138, 139, 150, 170, 172, 173, 182, 183]. К достоинствам цементации следует отнести экологическую чистоту вяжущего (цемента), а также его широкое распространение и доступность [27, 53 – 55, 125, 146 – 148]. Большим недостатком цементации в традиционном исполнении является ее применимость только к высокопроницаемым грунтам, очень редко залегающим в основании зданий [49, 123, 133, 145, 174]. Поэтому в современной практике строительства при укреплении грунтов методом цементации применяют различные добавки с целью создания оптимальных условий твердения цемента и улучшения технологических свойств цементогрунтовых смесей, расширения количества видов грунтов, пригодных для укрепления, а также в целях экономии цемента.

Следует отметить, что качество и свойства цементационных материалов имеют первостепенное значение для результатов инъектирования.

В связи с этим к инъекционным растворам предъявляется ряд требований [14, 38, 90, 91, 98, 158, 159, 175, 176, 179], которые приведены в табл. 1.8.

Для повышения качества цементации грунта используют цементно-песчаные растворы, однако их применение эффективно лишь для пород с удельным водопоглощением не менее 3 л/мин [39]. При меньших значениях водопоглощения почти весь песок остается на границе закрепляемого 14 массива, и поэтому вглубь массива по-прежнему проникает лишь цементно-водная суспензия с величиной водоцементного отношения (В/Ц) больше 1 [50].

Таблица 1.1

Требования к инъекционным растворам

Технические	Технологические	Экономические
1.Подвижность от 17 до 22 см (по конусу АзНИИ); 2.Способность проникать в любые	1.Прокачиваемость буровыми насосами; 2.Возможность комбинирования с другими растворами;	1.Сырье должно быть недорогим и недефицитным.

поры и микротрещины; 3.Отсутствие седиментации и стабильность при действии повышенного давления; 4.Устойчивость к размывающему действию подземных вод; 5.Минимальная усадка при твердении.	3.Смываемость с технологического оборудования; 4.Разбуриваемость цементного камня.	
---	---	--

Путем введения в раствор отходов местных производств, доломитовой пыли электрофильтров и батарейных циклонов, можно добиться экономии дорогостоящего цемента до 50%. Прочность полученного материала на 28 сутки твердения составляет 18,6 МПа, что отвечает предъявляемым требованиям и значительно превосходит прочность грунтовой матрицы. Такие растворы характеризуются небольшим расходом вяжущего, высокой седиментационной устойчивостью, подвижностью, большой проникающей способностью, устойчивостью к размыванию водой в период твердения [5].

Также в целях экономии цемента рекомендуется применять золу-унос, которая представляет собой отходы тепловых электростанций [58, 73, 97, 121, 127, 130]. Зола-унос может служить инертной добавкой к цементным растворам благодаря следующим ее свойствам: крупность частиц золы-уноса соответствует или меньше крупности частиц цемента; в смеси с водой зола-унос обладает слабым вяжущим свойством; цементно-зольные растворы обладают большей подвижностью и стабильностью, чем цементные растворы; низкая стоимость. Зола-унос применяют в качестве заменителя частиц цемента в цементационных растворах во всех случаях, когда доставка ее к месту цементационных работ экономически целесообразна. Соотношение количества цемента и золы (Ц/З) в цементно-зольных растворах принимается 4/1.

Для повышения стабильности к цементным растворам добавляют глину. Такие растворы не расслаиваются, не разжижаются подземными водами, хорошо прокачиваются насосами, дают 100% выход цементного камня, обеспечивают хороший контакт с породой. Прочность цементного камня варьируется от 0,5 до 10 МПа в зависимости от соотношения компонентов раствора и является вполне достаточной для целей уплотнения и армирования грунтового основания [10, 73].

Для повышения вязкости раствора и уменьшения водоотделения рекомендуется вводить в раствор до 25% молотого или мелкого (с крупностью зерен до 1 мм) кварцевого песка [92].

В качестве тонкодисперсного минерального компонента может быть использован карбонатный шлам химводоподготовки, который является отходом производства на ТЭЦ и ТЭС. Недостатком применения модифицированных цементно-водных суспензий является недостаточно высокая прочность закрепленных грунтов [63].

Известен способ цементации слабого грунта, включающий инъекцию в грунт закрепляющего раствора – водной суспензии цемента с высокодисперсным минеральным наполнителем. В качестве наполнителя используют микробиологически активированный пресноводный озерный ил при следующем соотношении компонентов: водная суспензия цемента – 88 – 92%, водная суспензия активированного озерного ила – 8 – 12%. Однако механическая прочность цементно-илистого камня, образовавшегося в грунте в результате инъекции закрепляющего раствора, остается недостаточно высокой. Кроме того, получение микробиологически активированного ила требует значительных затрат времени (24 – 30 час) и сложного технологического оборудования, что усложняет и удорожает закрепление грунта [113].

Весьма эффективной добавкой в цементные растворы является жидкое стекло. Оно повышает выход тампонажного камня, вязкость и седиментационную устойчивость раствора. Согласно [10], при хранении

образцов гель-цементного камня в воздушной среде происходит испарение воды, образцы становятся пористыми, растрескиваются и их механическая прочность снижается, а при хранении образцов под водой их прочность повышается. Следовательно, добавки жидкого стекла могут использоваться при цементации только водоносных пород.

В работах [62, 109] предложена экологически безвредная технология по регулируемому и контрольному закреплению обводненных грунтов (пывунов) силикатным раствором, особенность которой заключается в составе модифицирующей добавки (раствор продуцентов катионов кальция), вводимой в закрепляющий раствор и в технологических режимах подачи растворов в закрепляемый грунт.

В мире многократно возросла номенклатура строительных материалов самого широкого профиля. Внедряются в практику закрепления грунтов новые микрозернистые нетоксичные материалы, которые имеют значительно большую проникающую способность по сравнению с традиционными материалами. Так, в настоящее время на рынке строительных материалов зарубежными производителями представлена достаточно широкая номенклатура микроцементов, среди которых следует выделить RHEOCЕМ («BASF», Германия), SPINOR («CIMENTS D'ORIGNY», Франция), ОТДВ «Микродур» («Dyckerhoff», Германия), MICROCEM («MAPEI», Италия), ИНТРАЦЕМ (РХТУ им. Д.И. Менделеева, РФ).

В геотехническом строительстве широкое применение получил Микроцемент особо тонко дисперсно вяжущее (ОТДВ) Микродур».

Исходя из анализа свойств [9, 91, 94, 101] и опыта применения суспензий на основе «Микродура» [61, 128] этот материал можно рассматривать как альтернативу жидкому стеклу и полимерным композициям (эпоксидной, карбамидной и др) со следующими преимуществами: долговечность, простая технология приготовления суспензии и инъектирования, экологическая чистота, однородность с обычным цементом по составу, совместимость с бетоном и железобетоном, возможность выполнения работ в условиях обводненных и



водонасыщенных грунтов. Инъекции производятся при низком давлении (не более 0,5 МПа) и исключительно в режиме пропитки [101].

Не смотря на ряд преимуществ, в виду отсутствия производства микроцемента в Украине и его дороговизны (около 50 грн/кг) при покупке у официальных дилеров зарубежной продукции, применение микроцемента требует тщательного технологического и экономического обоснования для решения геотехнических задач в условиях современного строительства на территории Украины.

Таким образом, применение метода цементации в современной практике строительства, наряду с другими методами закрепления грунта, является перспективным в виду применения различных добавок к инъецируемому раствору с целью улучшения его характеристик и повышения качества производства работ.

#### **1.4. Применение метода горизонтально-направленного бурения для создания горизонтальных противодиффузионных экранов**

Анализируя способы создания горизонтального экрана под существующим сооружением без его повреждения, следует отметить, что все они основаны на устройстве горизонтальных скважин, как правило, выполняемых из вертикальных стволов. Однако, сегодня достаточно широко применяется метод горизонтально-направленного бурения (ГНБ) для устройства скважин и прокладки различных коммуникаций с поверхности земли под существующими сооружениями.

Бестраншейный метод прокладки коммуникаций – управляемое горизонтально–направленное бурение с использованием специализированных буровых комплексов [287] был изобретен в 1963 году Мартином Черрингтоном (США), как альтернатива традиционному траншейному методу.

На сегодняшний день метод ГНБ позволяет бурить горизонтальные скважины и прокладывать коммуникации длиной от нескольких метров до нескольких километров диаметром более 1200мм [31,196,198].

Бурение скважин методом ГНБ производится специальной буровой головкой, закрепленной на буровых штангах и управляемой системой локации. Буровая головка имеет отверстия для подачи специального бурового раствора, который закачивается в скважину и образует суспензию с размельченной породой. Буровой раствор уменьшает трение на буровой головке и штанге, предохраняет скважину от обвалов, охлаждает породоразрушающий инструмент, разрушает породу и очищает скважину от её обломков, вынося их на поверхность. Устройство скважин большого диаметра происходит после завершения пилотного бурения специальными расширителями обратного действия, которые крепятся на буровые штанги вместо буровой головки.

Основные преимущества метода ГНБ заключаются в возможности прокладки коммуникаций бестраншейным методом под существующими сооружениями в условиях плотной застройки, под различными магистралями, реками и водоемами, в охранных зонах в различных грунтовых условиях от плавунных грунтов до скальных пород .

Финансово-экономический эффект применения метода ГНБ заключается в значительном снижении стоимости строительства за счет исключения затрат на водопонижение и восстановление разрушенных участков на поверхности земли, а социально-экологический эффект – сохранение природного ландшафта и экологического баланса в местах проведения работ, исключение техногенного воздействия на флору и фауну, минимизация негативного влияния на условия проживания людей в зоне проведения работ.

Без сомнения метод ГНБ мог бы быть использован и для создания инъекционных экранов под существующим сооружением.

Исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными Ю.А. Ветровым [55], В.Л. Баладинским [18], А.Н. Зелениным [113], В.В. Кованько [134], С.В. Кравцом [139], В.К. Тимошенко [293] и др. показали возможность использования различных грунторазрабатывающих рабочих органов для устройства полостей в грунте бестраншейным методом для прокладки коммуникаций.

Эти исследования дали возможность расширить использование бестраншейных методов проходки и современных проходческих комплексов [31,160,161,285].

По нашему мнению одним из направлений расширения использования ГНБ - применения горизонтально-направленного бурения для создания экрана под сооружением, как базового метода для новой технологии, при которой сплошной противотриационный экран создается между горизонтальными направляющими скважинами с расположенными в них иньекторами, путем одновременной иньекции противотриационных составов с расчетным радиусом.

## **ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1**

1. Исходя из анализа видов загрязнений, для Украины особую опасность представляют радиационные загрязнения с дальнейшей миграцией частиц в подземные воды.

2. Обзор информационных источников выявил отсутствие экономичной и эффективной технологии устройства противотриационной защиты закрытым способом в случаях, когда в грунте присутствуют твердые включения и водоупорный слой грунта расположен на большой глубине или вообще отсутствует.

3. Наличие миграции радиоактивных веществ в грунтовые воды из многочисленных могильников радиоактивных отходов Чернобыля и отсутствие экономичного и эффективного способа их локализации обуславливает необходимость разработки технологии устройства горизонтального противотриационного экрана закрытым способом.

4. Анализ областей применения иньекционных составов, позволил определить, что для устройства водонепроницаемого экрана в грунтах с коэффициентом фильтрации до 20 м/сут эффективно использовать химические

гелеобразующие составы, а в грунтах с коэффициентом фильтрации более 20 м/сут суспензионные на основе цементных вяжущих.

5. Горизонтально-направленное бурение имеет ряд преимуществ при устройстве скважин и прокладке коммуникаций под существующими сооружениями и рассматривается как базовый метод для создания новой технологии устройства сплошного противofильтрационного экрана под существующим сооружением.

## РАЗДЕЛ 2

### ОБЩАЯ МЕТОДИКА И ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТРОЙСТВА ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ

#### 2.1. Обоснование направления и блок-схема исследований

Работа посвящена решению проблемы защиты подземного пространства от загрязнений при наличии в грунте твердых включений.

Проблема решена путем теоретических исследований и анализа процессов инъекции грунта, разработки технологических основ устройства горизонтальных водонепроницаемых композитных экранов, изучения процессов инъекции грунтов, экспериментально-статистического моделирования влияния технологических факторов на эффективность принятых решений с учетом многовариантных структур грунтов и способов улучшения их свойств, а также разработки технологических регламентов новых способов производства работ с заданными показателями качества.

Анализ проблем, возникающих при захоронении последствий аварии на Чернобыльской АЭС, показал, что по масштабам воздействия и необходимым финансовым и техническим ресурсам, ведущее место занимает локализация загрязнений и снижение эмиссий радиоактивных веществ в окружающую среду. Устройство противofильтрационных экранов способом ГНБ может быть использовано для защиты подземных вод от миграции загрязняющих веществ. Отмечено поступление радионуклидов в грунтовые воды из многочисленных временных могильников радиоактивных отходов в зоне Чернобыльской АЭС. Это около 800 траншей, сооруженных в большинстве случаев без достаточного обеспечения их герметичности, большая часть которых находится на территориях с глубоко расположенными или вообще отсутствующими водоупорными слоями грунта. Устройство противofильтрационных экранов позволит решить данную проблему [44].

Уже с первых моментов захоронения отходов в геологическую среду специалисты принимали во внимание необходимость решения проблемы

защиты водных ресурсов от загрязнения. Акцент на защиту подземных вод делался в связи с тем, что подземные воды имеют определенную скорость фильтрации, что может со временем способствовать расширению очага загрязнения. В этой связи при выборе мест приповерхностного захоронения, например, радиоактивных материалов (РАМ) предпочтение, естественно, отдавалось участкам, где грунтовая толща, перекрывающая первый водоносный горизонт, была представлена суглинистыми отложениями с малым коэффициентом фильтрации. В районах приповерхностного захоронения, где грунтовая толща зоны аэрации была представлена отложениями с большим коэффициентом фильтрации, использовались глинистые экраны с целью снижения интенсивности инфильтрации жидкой фазы отходов, содержащих радионуклиды. Для повышения безопасности при аварийных ситуациях аналогичным образом подходили к решению проблемы защиты подземных вод от загрязнения и в случае складирования РАМ.

Настоящее исследование обладает несомненной экологической, а также социальной значимостью, так как позволит защитить население от последствий заражения загрязнённой радионуклидами водой.

Научная гипотеза работы заключается в обосновании параметров инъекционной технологии защиты подземного пространства с помощью горизонтально-направленного бурения, которое должно осуществляться на основе теоретических и экспериментальных исследований и предпосылок, указывающих на возможность создания горизонтального противофильтрационного экрана с помощью рациональных рецептуры инъекционных растворов и технологических решений при их нагнетании в толщу грунта.

Достоверность результатов, полученных по новой методике в работе, предполагалось обеспечить сравнением теоретических расчетов с экспериментальными исследованиями, а также сопоставлением результатов, полученных нами с результатами отечественных и зарубежных ученых, что изучали подобные технологии.

Принципы анализа сложных систем с вычислением основных элементов и взаимосвязей между ними необходимо применять не только к изучаемому объекту, но и к самому процессу исследования. Такой анализ позволяет обеспечить чёткую логику исследований, обосновать их процедуру, выделить как эвристические (требующие существенного интеллектуального напряжения от исследователя), так и формализуемые до уровня стандарта этапы исследований.

Любое научное исследование проводится по циклической схеме, причём каждый новый его цикл в силу накопления новой научно-технической информации и появления новых идей проходит на более высоком качественном уровне. При планировании общей методики и блок-схемы (алгоритма) исследований автор использовал опыт известных украинских и зарубежных ученых, которые упоминались в первом разделе. В соответствии с основными принципами анализа сложных систем, на основе общей методологии составления блок-схем научных исследований с применением математической теории планирования эксперимента [18, 28-30, 91, 102, 193], определены основные этапы, показанные на блок-схеме исследований, рис.2.1.

*Первый этап.* На первом этапе в результате анализа известных источников, систематизированы существующие способы устройства горизонтальных противofiltrационных экранов и завес в виде классификации. Определено, что для создания горизонтального экрана под сооружением при наличии в грунте твердых включений отсутствует экономически выгодный и эффективный способ устройства такого экрана. Необходимо отметить, что для решения поставленной проблемы одним из возможных технологических решений является устройство противofiltrационных экранов (ПФЭ) в толще грунта с помощью инъекции растворов, создающих конгломерат с плотной структурой, и необходимой водонепроницаемостью. Достигнуть этого результата при отсутствии естественного водоупора возможно при использовании технологии горизонтально-направленного бурения.



Рис. 2.1. Блок-схема исследований



Анализ первого этапа условно можно разделить на несколько направлений, по которым определялись пути решения проблемы. В первом направлении показаны особенности ситуации и состояние путевых вод Украины, приводятся районы поражения радионуклидами, выполнен анализ экологических объектов в Украине.

Второе направление является анализом тех исследований, которые определяют источники подтопления как причины устройства противодиффузионных экранов и завес, и исследования, которые изучают источники загрязнения подземных вод.

Третье направление показывает известные исследования по технологии устройства противодиффузионных завес, которые являются вертикально направленными защитными подземными сооружениями, и исследования по технологии возведения противодиффузионных экранов, направленных горизонтально.

В результате анализа априорной информации, приведенной в первой главе, была поставлена решаемая проблема, сформулированы цель, задачи исследований и научная гипотеза. Сдугает также отметить отсутствие нормативных документов по инъекционной технологии создания ПФЭ в Украине.

#### *Второй этап.*

На втором этапе, говоря о методике проведения исследований, нужно отметить, что для проектирования лабораторного оборудования была взята модель зоны распространения инъекционного раствора в грунтовой толще, напоминающая по форме трубу. Для моделирования процесса горизонтальной инъекции создан специальный стенд.

На этом этапе исследований критерием оценки эффективности технологических решений, был принят за основной показатель коэффициент фильтрации. Это позволило определить наиболее рациональные технологические решения, а также разработать новые схемы проведения испытаний, которые удовлетворяют требованиям соответствующих

нормативных документов. На данном этапе определены конструктивно-технологические схемы инъекции для дальнейших исследований.

При выполнении этого этапа, в разделе экспериментальных исследований, в первую очередь были подобраны материалы для инъекции и составы на их основе. Характеристики составов были получены на основе стандартных методик. Затем, согласно с предложенной моделью, разработаны лабораторные стенды, позволяющие реализовать задачи исследований. Во вторую очередь были подобраны планы экспериментов, позволяющие их выполнить с заданной точностью.

*Третий этап.* На этом этапе исследований выполнена разработка теоретических основ инъекционной технологии устройства горизонтального экрана в грунте и разработаны физико-математические модели. Благодаря экспериментально-статистическому моделированию по полученным коэффициентам математических моделей получена информация о влиянии рецептурно-технологических факторов на физико-механические свойства исследуемых технологических систем.

*На четвертом этапе* разработаны технологические регламент и карты, на основании которых осуществляется проверка результатов исследований и их внедрение в производство, произведены расчеты технико-экономического обоснования применения инъекционного раствора на основе смолы и эколого-экономического эффекта от внедрения данной технологии. Результаты исследований использованы при создании учебно-методического комплекса по новым дисциплинам.

## **2.2. Общая методика и методы исследований**

Одной из основных задач ученого при проведении исследований является формирование методического подхода, относящегося к фундаментальным основам глубокого обобщенного осмысления научного исследования. Это предполагает сформировать качественную картину самого процесса исследований на уровне эвристического анализа и

феноменологического подхода. Одним из решений этого является физическое моделирование процессов. В нашем исследовании при моделировании процесса инъецирования предложено взять за основу физическую модель распространения жидкой фазы в грунте, которого можно достичь с помощью горизонтально-направленного бурения (ГНБ), рис.2.2.

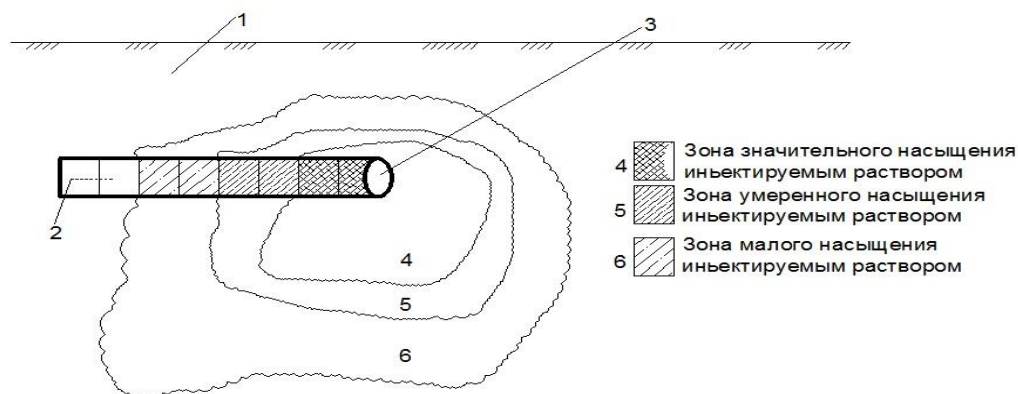


Рис. 2.2. Зоны распространения инъецируемого раствора в грунтовой толще. 1 – инъецируемая толща; 2 - моделируемый лабораторным стендом участок толщи; 3 – скважина горизонтального бурения; 4, 5, 6 – зоны различного насыщения раствором

Для реализации подобной модели исследований создан лабораторный стенд, моделирующий перпендикулярное сечение оси бурения. При такой схеме исследований под воздействием рабочих параметров инъецируемый раствор распространяется, и условно делится на зоны в зависимости от расстояния до сопла инъектора. Выделяя срединную часть сечения, можно получить представление о характере изменения коэффициента фильтрации.

### 2.2.1. Материалы и оборудование, применяемые в исследованиях.

Для изучения физико-механических свойств противofильтрационных экранов применялись следующие материалы и гелиобразующие жидкости.

*Модельный грунт.* В качестве модельного грунта, т.е. грунта, который имитирует грунт в натуральных условиях, принимался кварцевый песок с различными модулями крупности. С учетом этого использованы пески с

$M_{кр}=1.5$  (мелкозернистый песок),  $M_{кр}=2.0$  (среднезернистый песок) и  $M_{кр}=2.5$  (крупнозернистый песок). Это объясняется тем, что в природе встречаются различные виды песчаных грунтов, в том числе и по их крупности.

В исследованиях применялись кварцевые пески:

– мелкозернистый – Ранднеского карьера (Херсонская обл.), гранулометрический состав которого представлен в табл. 2.1. и обладает следующими характеристиками: объемный насыпной вес – 1290 кг/м<sup>3</sup>; влажность – 3,6%; содержание глинистых и пылевидных частиц по массе – 2,3%; модуль крупности – 1,5.

Таблица 2.1

Гранулометрический состав кварцевого песка

Остатки на ситах	Размер отверстий сит, мм					Прошло сквозь сито 0.16
	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	
Частные, г	8,8	3,73	15,83	556,74	369,76	26,12
Частные, %	0,9	0,4	1,6	56,7	37,7	2,7
Полные, %	0,9	1,3	2,9	59,6	97,3	100

– среднезернистый – Вознесенского месторождения (ОАО "Никитинский гранитный карьер). По своим основным характеристикам он соответствует классу I. Модуль крупности – 2,0. Основные физические свойства приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Основные физические характеристики песка

№№ п/п	Наименование характеристики	Показатели	
1	2	3	
1.	Зерновой состав: полные остатки на ситах, % 2,5	частные	полные
		14,5	14,5

Продолжение табл. 2.2			
1	2	3	
	1,25	25,0	39,5
	0,63	20,0	59,5
	0,315	31,25	90,75
	0,14	8,25	9
	прошло через сито 0,14	0,1	-
2.	Содержание зёрен размером свыше 10,0 мм, не должно превышать по массе в %	0,5	
3.	Содержание зёрен размером свыше 5,0 мм, не должно превышать по массе в %	5,5	
4.	Модуль крупности	2,0	
5.	Пылевидных, глинистых частиц в %	1,0	
6.	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1420	
7.	Влажность, %	2	
8.	Глины в комках	нет	

– крупнозернистый – Вознесенского месторождения (Николаевская обл.), гранулометрический состав которого представлен в табл. 2.3. Обладает следующими характеристиками: объемный насыпной вес – 1390 кг/м<sup>3</sup>; влажность – 4,2%; содержание глинистых и пылевидных частиц по массе – 2,9%; модуль крупности – 2,5.

Таблица 2.3

Гранулометрический состав кварцевого песка

Остатки на ситах	Размер отверстий сит, мм					Прошло сквозь сито 0.16
	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	
Частные, г	130,0	55,55	240,18	385,59	161,41	27,27
Частные, %	13,0	5,5	24,0	38,6	16,2	2,7
Полные, %	13,0	18,5	42,5	81,1	97,3	100

*Цемент.* В качестве вяжущего для получения инъекционных растворов на основе цемента в исследованиях использовали портландцемент ПЦ 1-500 производства ОАО «Югцемент». Основные характеристики цемента удовлетворяют требованиям ДСТУ Б.В. 2.7 -75-98 [75]. Основные физико-механические характеристики приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4.

Основные физико-механические характеристики цементов

Вид испытаний	Требования нормативных документов	Усредненные показатели «Югцемент»
Удельная поверхность, по Блейну (м <sup>2</sup> /кг)	не нормируется	320 - 330
Тонкость помола (прошло через сито №008,%)	≥85	91-93
Нормальная густота цементного теста (%)	не нормируется	24 - 24,75
Срок схватывания: Начало (мин.)	≥60	140
Конец (мин.)	≤600	210
Равномерность изменения объема	выдерж.	выдерж.
Предел прочности при сжатии (Н/мм <sup>2</sup> ): 2 суток 28 суток	≥15 50-55	20-22 51-53
Суммарная активность природных радионуклидов (Бк/кг)	≤370	Max 105

*Бентонитовая глина.* В исследованиях использовался бентонитовый порошок Дашуковского месторождения Черкасской области Украины (с содержанием монтмориллонита не менее 80%). Характеристики приведены в табл.2.5.

Таблица 2.5

## Характеристики бентонитовой глины

№№ п/п	Состав и свойства	Ед. изм.	Натуральный натриевый бентонит- порошок
1	Содержание монтмориллонита (XRD анализ)	%	>80
2	Показатель набухания (ASTM D 5890)	Мл/гр <sup>2</sup>	> 24
3	Водоотдача (ASTM D 5891)	мл	> 18

В качестве связующего и модифицирующих добавок для получения различных наноструктурированных композиционных материалов предложено использовать жидкое стекло.

*Силикат натрия гидратированный порошкообразный* (сухое жидкое стекло натриевое) – белый мелкокристаллический порошок без видимых включений, представляет собой жидкое стекло в виде порошка со следующими физико-химическими параметрами, табл.2.6.

Таблица 2.6

## Физико-химические параметры гидросиликата натрия

№№ п/п	Состав и свойства	Ед. изм.	Показатель
1	Плотность	г/см <sup>3</sup>	1,36-1,55
2	Силикатный модуль	-	От 1,6 до 3,5
3	• Скорость растворения при температуре 20С0	мин	в течении 10-15
4	Процентное содержание SiO <sub>2</sub>	%	24.1-35
5	Процентное содержание Na <sub>2</sub> O	%	8.0-13.3

На основе анализ было установлено, что одним из перспективных материалов, которые могут удовлетворить нашим задачам исследований

является *мягко-эластичная герметизирующая инъекционная смола MC-Injekt GL-95 TX*. Это вещество способное, благодаря своей низкой вязкости, проникать в пористую структуру и образовывать прочные и плотные экраны с низким коэффициентом фильтрации. Необходимо отметить, что этот материал отличается дороговизной, но при этом имеет ряд положительных следующих свойств: низковязкий; усиленная полимерами гидроструктурная смола на основе акрилата с коротким регулируемым временем реакции; мягко-эластичная в прореагировавшем состоянии и разбухающая при контакте с водой; водонепроницаемая; стойкая к циклам замораживания и оттаивания; очень высокая адгезия к сухим и влажным основаниям; экологичная. Основные эксплуатационные характеристики приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7

Технические характеристики мягко-эластичная герметизирующая  
инъекционная смола MC-Injekt GL-95 TX

Параметры	Ед. изм.	Значение	Примечание
1	2	3	4
Пропорции смешивания компонентов	по весу	100:2:8	комп. А1: комп. А2: комп. А3
	по весу	27,5:0,5:2,0	комп. А1: комп. А2: комп. А3
	по весу	0,5:100	комп. В : В1(стандарт)
	по весу	120:100,5	комп. А : комп. В (в растворе)
	по весу	30:25,125	комп. А : комп. В (в растворе)
	по объёму	1:1	комп. А : комп. В (в растворе)
Плотность	кг/дм <sup>3</sup>	около 1,1	DIN 53 479
Вязкость	мПа×с	около 40	DIN EN ISO 3219
Удлинение	%	около 150	DIN 52 455
Разбухание	%	около 20-30	выдерживание в воде при 20°С
Уровень рН	%	около 9,0	после полимеризации



Растяжение до разрыва	%	около 396	DIN 52 455
Время работы с материалом	сек.	около 14-125	
Продолжение табл. 2.7			
1	2	3	4
Температура применения	°С	+ 1 до + 40	температура воздуха, основания и материала
* все технические параметры определяются при 20 °С и относительной влажности воздуха 50%			

Подготовительные мероприятия при работе с данной инъекционной смолой. Перед инъектированием необходимо согласовать технологический регламент и выбрать концепцию инъектирования.

Смешивание компонентов. MC-Injekt GL-95 TX – это многокомпонентная инъекционная система. Компонент А и компонент В замешиваются на стройплощадке из отдельных составляющих. Компонент А состоит из субкомпонентов А1, А2 и А3. Субкомпоненты А2 и А3 по очереди добавляются в емкость с компонентом А1 и перемешиваются деревянной лопаткой. Компонент В (стартер) растворяется в компоненте В1. Концентрация приготовленного раствора определяет скорость реакции, табл.2.8. Время реакции также зависит и от температуры. Приготовленные компоненты необходимо выработать в течение 12 часов.

Таблица 2.8

Зависимость времени реакции от количества компонента А в мягко-эластичной герметизирующей инъекционной смоле MC-Injekt GL-95 TX

№№ п/п	Компонент В, растворённый в 100 кг компонента В1	Время реакции при 20 °С
1	4,0 кг (4,0 %)	ок. 14 сек

2	2,0 кг (2,0 %)	ок. 25 сек
3	1,0 кг (1,0 %)	ок. 40 сек
4	0,5 кг (0,5 %)	ок. 65 сек
5	0,2 кг (0,2 %)	ок. 125 сек

Замедление реакции. Для специальных областей применения время реакции MC-Injekt GL-95 TX может быть замедлено с помощью MCInjekt Retarder GL. Замедлитель добавляется в готовый компонент А. Количество замедлителя влияет на время реакции, табл.2.9. Инъектирование материала с замедлителем рекомендуется провести в течение 2-х часов. При применении замедлителя концентрация компонента В в компоненте В1 должна составлять 0,5%.

Таблица 2.9

Зависимость времени реакции от количества компонента В в компоненте А мягко-эластичной герметизирующей инъекционной смоле MC-Injekt GL-95 TX

№№ п/п	MC-Injekt Retarder GL в 120 кг компонента А	Время реакции при 20 °С
1	1,0 кг	прим. 80 сек
2	2,0 кг	прим. 3 мин.
3	3,0 кг	прим. 15 мин.
4	4,0 кг	прим. 28 мин.

Инъектирование Для инъектирования необходимо использовать двухкомпонентный насос, например, MC-I 700 (соблюдать требуемое количество статических миксеров). Для инъектирования рекомендуются пакеры MC-Schlagpacker PT и MC-Hammerpacker LP 12. Подробные рекомендации по применению содержатся в технологических картах с использованием MC-Injekt GL-95 TX.

*Добавкой пластификатором* растворов на цементном вяжущем являлся разжижитель С-3 на основе натриевых солей продукта конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида (ТУС-36020429-625). Он не имеет запаха, не выделяет при хранении вредных газов и паров, малотоксичен. Разжижитель С-3 представляет собой не слеживающийся порошок от светло- до темно-коричневого цвета. рН водного раствора – от 7 до 10. Разжижитель С-3 вводится в растворные смеси в виде заранее приготовленной водной эмульсии требуемой концентрации. Она готовится путем засыпки порошка в воду малыми порциями при одновременном интенсивном механическом перемешивании.

**2.2.2. Методы решения отдельных задач.** *Определение основных технологически параметров, предъявляемых к инъекционным растворам для устройства защитных экранов.* Под защитным экраном подразумевается подземное сооружение, имеющее целью препятствовать поступлению загрязнённых вод в подземные источники, и состоящее из грунта основания, приобретающего вследствие инъецирования противofильтрационные свойства.

Под технологическими параметрами подразумеваются те условия устройства противofильтрационного экрана, которые напрямую влияют на его технологические свойства.

Под закономерностями влияния понимаются зависимости изменения исследуемых показателей под влиянием изменяющихся факторов.

При подборе состава инъецируемого раствора были определены следующие параметры:

- выраженная способность проявлять водонепроницаемые свойства или способность образовывать плотную устойчивую структуру;
- экологическая безопасность и целесообразность использования составляющих;

- технологичность при производстве работ (хорошая смешиваемость, удобство при измерении пропорций и т.д.).

Посредством анализа, приведенным в разделе 1 пункт 1.4. актуальных исследований по теме работы установлено, что заявленным параметрам соответствуют следующие материалы:

- бентонит как материал, обладающий наиболее выраженными свойствами создавать при увлажнении плотную структуру;
- портландцемент марки не менее М400, как вяжущее, обладающее наиболее выраженными свойствами образовывать водонерастворимый, прочный композит из частиц грунта в условиях обводнённости;
- гидросиликат натрия (жидкое стекло) как вещество, являющееся синергистом и интенсификатором свойств двух других составляющих.
- мягко-эластичная герметизирующая инъекционная смола MC-Injekt GL-95 TX, как вещество способное, благодаря своей низкой вязкости, проникать в пористую структуру.

*Определение экспериментальных данных по подбору состава инъецируемого раствора.*

При проведении экспериментов по определению состава инъецируемого раствора была поставлена задача подбора оптимального состава и выявления зависимостей между соотношением концентрации различных видов составляющих и противofильтрационными свойствами образованных проб грунта.

Оптимальным составом будем считать раствор, который при смешивании в идеальных условиях гравитационным способом с грунтом, используемым для лабораторной модели, составляет образец искомого защитного экрана, удовлетворяющий условию водонепроницаемости.

В исследовании использованы различные комбинации инъецируемых растворов с постоянной концентрацией основного составляющего (бентонита) и переменными концентрациями веществ, образующих структуру экрана (портландцемента и гидросиликата натрия).

*Разработка методов решения поставленных задач и создание необходимого лабораторного оборудования.* В работе выделено два направления исследований.

Для решения поставленной задачи необходимо провести две серии экспериментальных испытаний, результатами которых стали зависимости исследуемых показателей от факторов.

Первая серия это – технологические параметры инъецирования в грунт раствора, образующего противofiltrационный экран, а именно определение вязкости составов;

Вторая серия – исследовалась способность ингредиентов инъекционного раствора, при различном их соотношении по массе или в отдельности образовывать совместно с грунтом плотные устойчивые структуры, которые смогут выполнять роль противofiltrационного экрана.

Вследствие того, что основным свойством противofiltrационного экрана является его водонепроницаемость, то есть способность не пропускать подземные воды, то было решено использовать основным показателем такую физическую характеристику грунта, как частный случай водонепроницаемости – коэффициент фильтрации.

*Методика подбора состава инъецируемого раствора.*

Для подбора составов инъецируемых растворов использована теория сокращенного планирования экспериментов. Общие показатели для оценки технологии и факторов, оказывающих на него наибольшее влияние следующие.

$X_1$  – концентрация в инъецируемом составе вяжущего, который придает песчаному грунту противofiltrационные свойства. Данный параметр является ключевым, т.к. грунт основания препятствует проникновению раствора сквозь инъецируемую толщу. В данной связи концентрация раствора должна быть достаточной, чтобы образовался экран, обладающей максимальной противofiltrационной способностью. Однако, существует лимитирующий фактор – вязкость инъецируемого раствора,

который влияет на проникновение материала в промежутки между дисперсными частицами песчаного грунта. Согласно нормативным документам [31,42], допускаемая вязкость для глинистых, глиноцементных растворов и суспензий на основе портландцемента находится в следующих пределах:

– 18-30с – для вязкости, определяемой вискозиметром СПВ-5 объемом 700 мл;

– 26-43с – для условной вязкости, определяемой вискозиметром «Воронка Марша», объемом 1000 мл;

а эффективная вязкость  $\eta_{\text{эф}}$ ;

– от  $1,8 \cdot 10^{-3}$  до  $3,75 \cdot 10^4$  Па·с – для эффективной вязкости, определяемой ротационным вискозиметром "Полимер - РПЭ - 1м" с объемом измеряемого раствора 60 мл, рис.2.3.

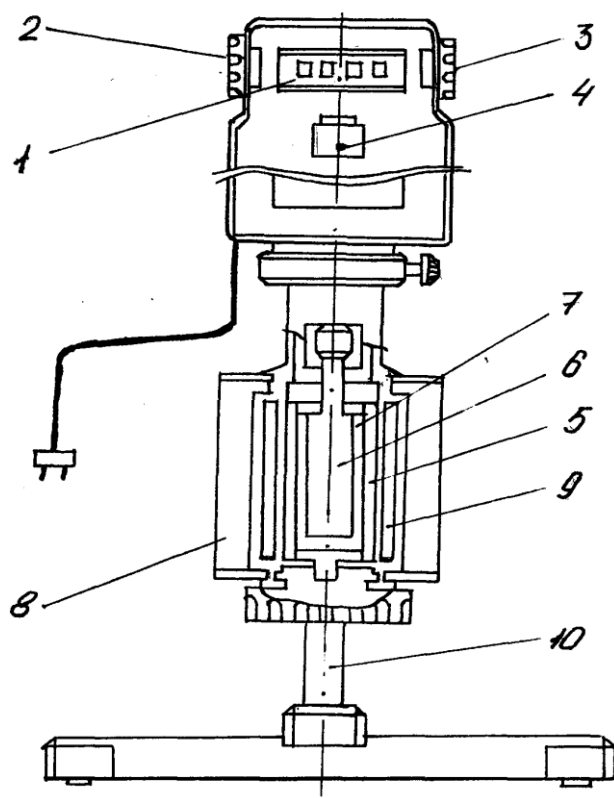


Рис.2.3. Общий вид вискозиметра "Полимер - РПЭ – 1м"

1-цифровой индикатор; 2 - переключатель скорости вращения ротора;

3 - переключатель коэффициентов воспринимающих элементов; 4 -кнопка

включения привода; 5 - наружный цилиндр; 6 - внутренний цилиндр;  
7 - анализируемый материал; 8 - термостатирующая камера; 9-  
теплоноситель; 10 - кронштейн.

$X_2$  – давление нагнетания инъецируемого раствора в грунт основания. Давление нагнетания является ключевым параметром, влияющим на дальность распространения состава инъекции в толще грунта. Данный фактор является очень важным в экономическом аспекте, так как современные промышленные насосы позволяют достичь значений давления вплоть до 100 атм. и выше, при этом позволяя увеличить расстояния между горизонтально пробуриваемыми скважинами, что удешевляет проект.

$X_3$  - продолжительность процесса инъецирования. Фактор длительности позволяет установить прямую пропорциональную зависимость между временем инъекции и концентрацией веществ раствора в рассматриваемой толще, что влияет на противофильтрационные свойства грунта.

При подборе состава использовали методику, приведенную ниже.

Подбор инъецируемого состава имел цель определения наиболее подходящей концентрации составляющих раствора.

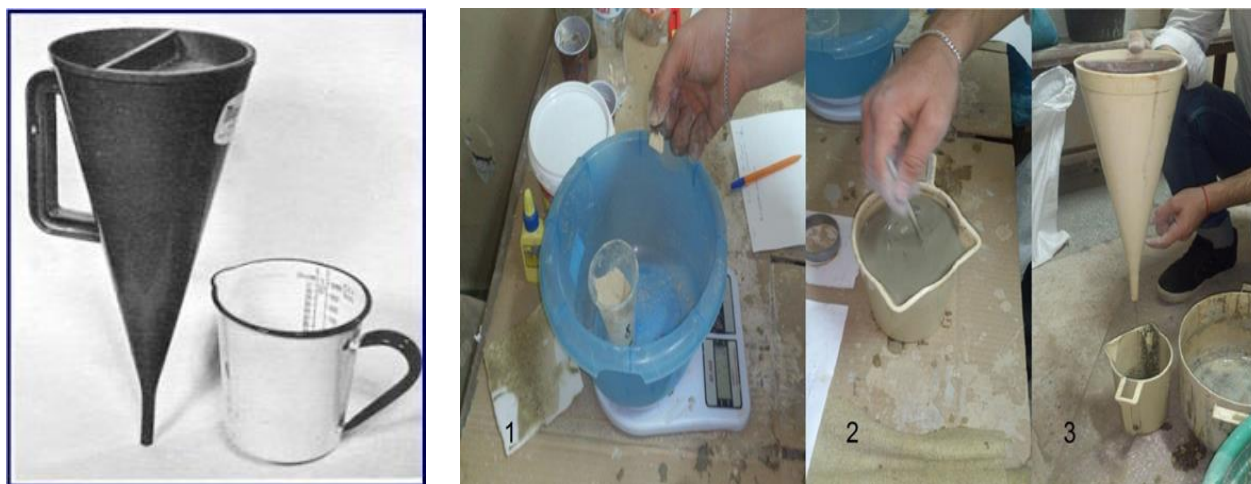
Алгоритм подбора состава представлял собой следующую последовательность действий:

- подготовка и выбор необходимого для определения вязкости лабораторного оборудования и материалов, используемых в опыте.
- приготовление образца раствора и определение его вязкости проводили в соответствии с планом исследования согласно заданной концентрации вяжущих веществ.

При замешивании раствора соблюдали последовательность добавления составляющих: бентонитовый порошок, портландцемент, гидросиликат натрия. Замешивание происходило до тех пор, пока на дне ёмкости не исчезал осадок.

Определение вязкости раствора проводили с помощью вискозиметра «Воронка Марша» в соответствии с заданной методикой, изложенной в нормативном документе [44], рис. 2.4.а:

- подготовка образца раствора, рис.2.4.б;
- удерживая воронку вертикально, закрыв выходное отверстие, наливали раствор в воронку через сито (сито отфильтрует большие частицы, которые могут застопорить выходное отверстие воронки);



а)

б)

Рис. 2.4. Общий вид вискозиметра «Воронка Марша» (а) и процесс определения вязкости раствора (б): 1 - подготовка навески компонентов раствора; 2 - замешивание раствора; 3 - измерение вязкости раствора на воронке Марша

- после открывания выходного отверстия, сразу происходит отсчет времени вытекания жидкости из воронки;
- раствор из воронки Марша вытекал в градуированный контейнер;
- фиксируется время в секундах, которое потребовалось для выхода раствора из воронки.

Смешивание песчаного грунта с образцом раствора проводили в отдельной емкости. При этом строго определённое количество песка (1 литр) перемешивалось гравитационным способом с объёмом раствора, превышающим объём пор используемого песка. После тщательного



перемешивания в течение не менее 5 минут излишек раствора удалялся и проводился отбор проб.

Определение объёмного веса пробы грунта с раствором проводили в замоченном состоянии весами с точностью  $\pm 1$  г, рис.2.5.

Технологический перерыв.

Перерывы были различными для проб, содержащие цемент и для тех, в которых цемент отсутствовал. Для первого случая он составляет не менее 7 суток (время набора цементным раствором 50% прочности), во втором – не менее 12 часов.



Рис. 2.5. Весы OHAUS RV (Adventurer Pro)

Определение плотности пробы проводили после технологического перерыва в сухом состоянии на основе массы образца на весах с точностью  $\pm 1$  г.

Как указывалось выше, для определения вязкости раствора особо нужно обратить внимание на дозировку компонентов, которую можно достичь точностью измерений. Исходя из этого условия, наибольшее внимание было уделено весовому оборудованию, а именно его погрешности измерений.

Класс точности лабораторных весов, используемых в исследованиях – высокий (II) по ДСТУ. В Государственный реестр средств измерений Украины весы лабораторные внесены под № 25843-06. Весы

сертифицированы на Украине, а также в других странах. Их технические характеристики представлены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Технические характеристики весов OHAUS RV

№/№ п/п	Наименование характеристик	Параметры
1	2	3
1	Марка весов	RV 1502
2	Фирма-производитель электронных весов	Ohaus
3	Область применения	Ювелирные весы
4	Функциональная классификация весов	Простые
5	Количество диапазонов взвешивания	1
6	Цена деления	0.01г
7	Наибольший предел взвешивания	1500г
8	Тип калибровки электронных весов	калибровка внешней гирей
9	Класс точности по ГОСТ 24104-1988	4
10	Класс точности по ГОСТ 24104-2001	II
11	Конструкция весовой чаши	круглая открытая весовая чаша

Как указывалось выше, одним из основных показателей инъекционных суспензий является их вязкость. Для определения реологических характеристик материалов существуют методы, отличие между которыми состоит в области применения, виду измеряемой величины, принципами нагружения, степени автоматизации. Для практического выбора метода измерений учитывается необходимое количество проб, точность и продолжительность измерений, и другие моменты, которые зависят от конкретных конструктивных решений измерительного реологического прибора [60, 36, 77, 154].

Принцип действия приборов для измерения реологических характеристик жидких систем основан на: одномерном стационарном сдвиговом течении, одномерном осцилирующем сдвиговом течении (приборы для измерения вязкоупругих характеристик), комплексном нагружении (для определения консистенции и реологических характеристик материалов).

Одномерное сдвиговое течение может быть реализовано при капиллярном, плоскопараллельном, торсионном и цилиндрическом течении.

Реологические приборы можно разделить на интегральные [25, 53], дающие возможность измерять суммарный эффект сопротивления сдвиговым деформациям в высококонцентрированных суспензиях, и на дифференциальные, позволяющие непосредственно наблюдать деформации во времени в каждой точке дисперсной системы при ее течении.

В зависимости от формы ротора имеются четыре вида приборов интегрального типа: цилиндрические, дисковые, биконические и конус-плоскость [25, 30, 53]. Все они относятся к так называемым ротационным вискозиметрам. Для цилиндрических и биконических приборов скорость сдвига принимается одинаковой во всех точках деформированного материала. В вискозиметрах с вращающимся цилиндром, в особенности при малом зазоре, течение материала приближается к простому сдвигу [30].

Простота методики наблюдений и обработки опытных данных при работе с ротационными вискозиметрами во многом предопределила их широкое применение для изучения реологических свойств различных дисперсных систем.

К дифференциальным приборам относятся: ротационные вискозиметры, в которых на торце легко наблюдаются распределение скоростей в массе испытуемого материала; капиллярные вискозиметры, в которых можно наблюдать изменение скоростей течения материала в трубах и пр.

Измерение вязкости основано на законе Ньютона, записанного в форме

$$F = \eta \frac{dv}{dy} S \quad (2.1)$$

где  $F$  – сила внутреннего трения в слое жидкости с поверхностью  $S$ ;

$v$  – скорость жидкости;

$y$  – направление, перпендикулярное скорости течения.

Нами для фундаментальных научных исследований специальных реологических характеристик материалов с высокой точностью предпочтение отдавалось методам, которые позволяют производить обработку результатов с минимальной зависимостью от субъективных факторов и с их максимальной автоматизацией.

Для изучения эффективной вязкости цементсодержащих суспензий применялся ротационный вискозиметр "Полимер - РПЭ - 1м" с коаксиальными цилиндрами. Общий вид вискозиметра показан на рис.2.3.

Принцип действия прибора основан на измерении момента сопротивления сдвигу испытываемого материала, помещенного между воспринимающими элементами, при вращении одного из них с постоянной угловой скоростью. Расчетное уравнение реологических характеристик при этом имеет вид:

$$\eta = \frac{M * (R^2 - r^2)}{4\pi * (\omega_n - \omega_s) * R^2 - r^2}, \quad (2.2)$$

где  $M$  – момент действующих на цилиндр сил на определенном отрезке;

$R, r$  – радиус наружного и внутреннего цилиндров;

$\omega_n, \omega_s$  – условные скорости наружного и внутреннего цилиндров.

Система воспринимающих элементов выбиралась в зависимости от вязкости исследуемого материала и необходимости обеспечения заданных напряжений сдвига.

Измерение вязкости цементсодержащих суспензий проводилось следующим образом. Исследуемый материал в количестве 46,4 см<sup>3</sup> (для системы воспринимающих элементов Т1-В10) помещается в зазор между

цилиндрами. На вискозиметре закрепляется термостатирующая камера и соединяется шлангами с жидкостным термостатом, при помощи которого в ней поддерживается необходимая температура. С помощью переключателей 2, 3 устанавливаются скорость вращения ротора и коэффициент восприимчивости элементов. При вращении внутреннего цилиндра, связанного с приводом происходит его торможение, которое воспринимается измерительной моментной пружиной и деформирует ее так, что момент упругости пружины уравнивает момент сопротивления сдвигу. При этом, на выходе фотодатчиков, связанных с моментной пружиной, появляется сигнал, длительность которого пропорциональна моменту сопротивления, т.е. вязкости жидкости.

Проведенные исследования по подбору состава в данном подпункте и анализ информационных источников [ ], в которых приведены инъекционные составы позволили определить квинтэссенцию составов, т.е. наиболее эффективные и оптимальные для нашей технологии. В дальнейших исследованиях приняты составы, представленные в табл. 2.11-2.14.

Таблица 2.11

Составы цементно-силикатных растворов

№№ п/п	В/Ц	расход материалов на 1.0 м <sup>3</sup> раствора			Плотность раствора, г/см <sup>3</sup>
		Вода, л	Цемент, кг	Жидкое стекло, л/кг	
1	2.0	832	416	29/42	1.29
2	1.5	796	530	28/40	1.37
3	1.0	731	731	25/37	1.5
4	0.8	693	867	18/26	1.59
5	0.5	595	1190	8/12	1.80

Таблица 2.12

## Составы цементных суспензий

№№ п/п	В/Ц	расход материалов на 1.0 м <sup>3</sup> раствора			Плотность раствора, г/см <sup>3</sup>
		Вода, л	Цемент, кг	Суперпластификатор С-3 кг	
1	4	919	230	2.3	1.15
2	3.5	909	259	2.6	1.17

Таблица 2.13

## Цементобentonитово-силикатные растворы

№№ п/п	В/Ц	расход материалов на 1.0 м <sup>3</sup> раствора				Плотность раствора, г/см <sup>3</sup>
		Вода, л	Цемент, кг	Бентонит, кг	Жидкое стекло, л/кг	
1	10	924	80	12	45 / 64	1.08
2	8	918	104	11	44 / 63	1.1
3	5	894	166	13	46 / 66	1.14
4	4	884	205	16	43 / 61	1.17
5	3	865	275	18	38 / 55	1.21
6	2	833	397	20	28 / 40	1.29
7	1.5	796	505	25	26 / 38	1.36
8	1.33	777	557	28	27 / 39	1.40
9	1	731	696	35	24 / 35	1.50
10	0.8	693	841	25	18 / 25	1.58
11	0.67	656	951	28	16 / 24	1.66
12	0.6	633	1024	31	14 / 21	1.71

Составы на основе мягко-эластичной герметизирующей инъекционной смолы MC-Injekt GL-95 TX приведены в инструкции производителя, табл.2.7.

**2.2.2. Методика проведения исследований коэффициента фильтрации стандартными методами и разработанными.** *Выполнение экспериментов при исследовании параметров технологических режимов инъецирования.*

При экспериментальных исследованиях был использован лабораторный стенд, моделирующий распространение инъецируемого раствора в рассматриваемой толще грунта. Под влиянием переменных комбинаций технологических параметров инъецируемый раствор образует модель защитного экрана с различной противофильтрационной способностью на разноудаленном расстоянии от места ввода состава.

Замеряя значения коэффициента фильтрации в различных сечениях трубы, можно определить пропорциональные зависимости противофильтрационных свойств от используемых параметров.

Определение коэффициента фильтрации пробы проводили согласно следующей методике.

***Методика определения с помощью разработанного лабораторного стенда и прибора СПЕЦГЕО.***

Рассмотрена методика проведения 1-ой серии экспериментов по определению технологических режимов инъецирования, т.е. методы и практические приемы решения отдельных лабораторных задач.

На основании анализа для исследования коэффициента фильтрации грунтов инъецируемых растворами на основе бентонитовых глин разработана общая схема установки (рис.2.6) и на основании ее лабораторный стенд, рис.2.7.

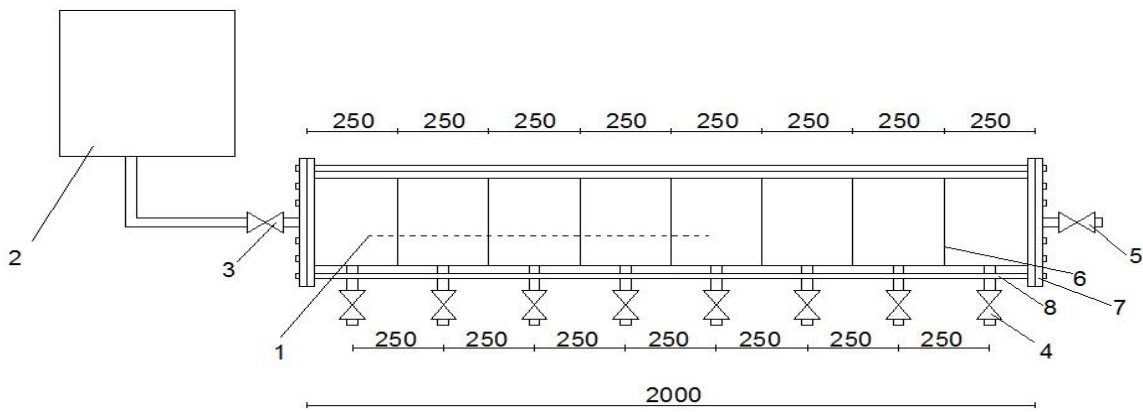


Рис.2.6. Схема лабораторного стенда исследований инъецирования бентонитовым раствором:

1. Цилиндрический резервуар лабораторного стенда;
2. Насос с манометром для подачи раствора в установку;
3. Кран для подачи раствора;
4. Краны для индикации заполнения трубы раствором и водой;
5. Кран для выхода раствора;
6. Резьбовое соединение секций;
7. Фланцевая торцевая крышка;
8. Металлические стяжки для герметизации резьбового соединения

Цикл испытаний включал в себя:

1. Подготовка лабораторного стенда к испытаниям.
2. Заполнения цилиндрического резервуара установки песчаным грунтом и приготовление инъекционного раствора.
3. Процесс инъецирования с заданными параметрами.
4. Технологический перерыв.
5. Отбор проб и лабораторные определения коэффициента фильтрации. После проведения каждого цикла результаты заносятся в таблицу.
6. Подготовка результатов эксперимента к аналитическому моделированию в программе «Сомрех» [10,24,43].





Рис.2.7. Лабораторный стенд и порядок проведения исследований технологических режимов инъецирования бентонитовым раствором:

1. Торцевое фланцевое соединение резервуара лабораторного стенда;
2. Забор проб грунта после инъекции;
3. Резервуар стенда с насосом для подачи раствора;
4. Резервуар стенда в рабочем положении

Подготовка лабораторного стенда к испытаниям включает в себя: смазку резьбовых соединений; сборку отдельных секций трубы лабораторного стенда в одно целое; установку трубы в вертикальное положение для заполнения песком, а также подготовку материалов, механизмов и приборов; заполнение цилиндрического резервуара установки собранной из отрезков трубы, песчаным грунтом и приготовление инъекционного раствора.

Заполнение цилиндрического резервуара лабораторного стенда производилось в вертикальном положении с послойным уплотнением песчаного грунта (заполнителя). Уплотнение производилось последовательно 3-мя способами:

- штыкованием;
- трамбовкой;
- вибрированием.

Таким образом, достигалась плотность, приближенная к плотности песчаного грунта в природных условиях.

После заполнения резервуара фланцевые соединения торцевых крышек закрывались, и труба приводилась в горизонтальное положение. Далее металлические стяжки, находящиеся вокруг трубы, затягивались посредством гаек, расположенных на их концах, с тем, чтобы уплотнить резьбовые соединения отдельных секций трубы. Открывались краны, расположенные в нижней части цилиндрического резервуара.

Приготовление раствора происходило в отдельной ёмкости непосредственно перед началом инъецирования. Отмеренные количества бентонитового порошка добавлялись малыми порциями в ёмкость с водой и посредством миксера перемешивались в однородный раствор.

При проведении инъецирования раствор периодически перемешивался, чтобы частицы бентонита не оседали на дно ёмкости и концентрация раствора не менялась.

Инъецирование приготовленного раствора происходило при заданных технологических параметрах, а именно, варьировались давление и время нагнетания раствора. При этом краны, расположенные в нижней части цилиндрического резервуара, последовательно закрывались по мере распространения раствора в трубе до их сечения. Кран, находящийся в противоположном от места ввода раствора, оставался открытым на протяжении всего времени проведения эксперимента.

После нагнетания устраивали технологический перерыв. Он необходим для того, чтобы стекли излишки раствора, находящиеся в резервуаре стенда. Технологический перерыв продолжался не менее 12 часов.

Отбор проб происходил при посекционной разборке трубы в сечениях, находящихся на заданном расстоянии от места ввода раствора.

При этом, в каждой из точек отбора проб было проведено 3 испытания по определению коэффициента фильтрации, что обеспечивало необходимую достоверность результатов.

Последовательность определения коэффициента фильтрации в приборе СПЕЦГЕО (рис. 2.6.а) принималась по нормативному документу и заключалась в следующем [44]:

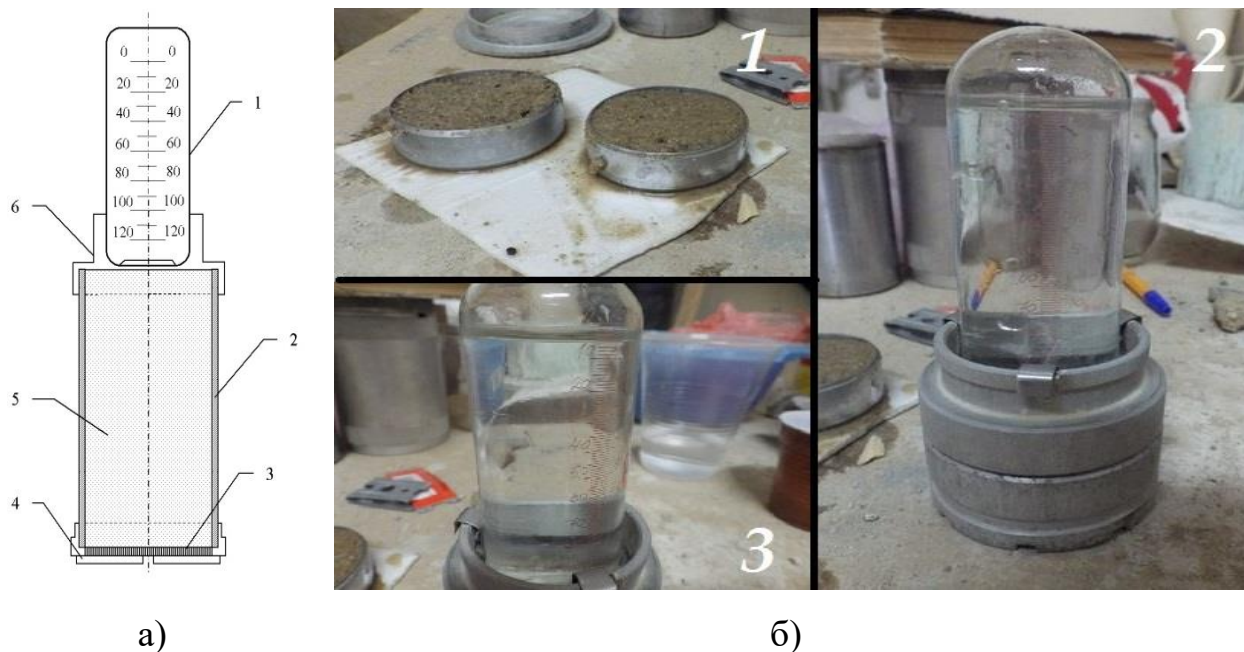


Рис. 2.8. Схема прибора СПЕЦГЕО (а): 1– стеклянный мерный цилиндр с ценой деления 1 см<sup>3</sup>; 2 – основная трубка; 3– сетка; 4 – нижняя крышка; 5 – полость, заполняемая грунтом; 6 – верхняя крышка; и порядок измерения коэффициента фильтрации (б): 1 - пробы проинъецированного грунта; 2 - прибор СПЕЦГЕО в сборе; 3 - стеклянный мерный цилиндр с численной шкалой

Порядок определения коэффициента фильтрации по стандартной методике, рис.2.8.б:

- I. Трубка 1 заполнялась модельным песчаным грунтом.
- II. Заполнение трубки песком производилось послойно.
- III. После заполнения мерного цилиндра водой, его переворачивают над трубкой и закрепляют в верхней крышке так, чтобы горлышко его отстояло от поверхности грунта в трубке приблизительно на 0,5-1 мм.

В таком виде мерный цилиндр поддерживает уровень воды над образцом постоянный. Как только вследствие просачивания воды через образец этот уровень понижался, в мерный цилиндр прорывался пузырёк воздуха и соответствующее количество воды из него выходило. Этим достигается постоянство градиента, численное значение которого равно единице, так как в данном случае напор равен длине пути фильтрации.

Если после установки цилиндра в него прорывались крупные пузырьки воздуха, это свидетельствовало о том, что горлышко цилиндра находится на слишком большом расстоянии от поверхности грунта. В этом случае вдавливали мерный цилиндр немного глубже и добивались, чтобы в нём через воду поднимались только мелкие пузырьки воздуха, следующие один за другим на одинаковом расстоянии.

По достижении указанного режима замеряли по шкале уровень воды в цилиндре (1), включали секундомер и через определённое время (50-100 сек для среднезернистых грунтов, 250-500 сек для глинистых песков) замерить второй уровень.

Повторяли опыт несколько раз, данные наблюдений заносили в таблицу, и вычислили по ним среднее значение коэффициента фильтрации.

Подготовка результатов эксперимента к аналитическому моделированию в программе «Сомрех» заключалась в расчёте коэффициента фильтрации по формуле 2.3. [16]:

$$K = \frac{Q}{TF} \text{ см/с} \quad (2.3)$$

где: Q- объем воды, профильтровавшейся за время T, см<sup>3</sup>;

T – время фильтрации, с;

F – площадь поперечного сечения трубки, см<sup>2</sup>.

После проведения процедуры вычислений построены графики зависимостей коэффициента фильтрации от глубины распространения раствора в цилиндрическом резервуаре лабораторного стенда для каждого из проведённых опытов.

**Методика определения коэффициента фильтрации грунта с помощью разработанного метода.** Схема лабораторной установки для проведения инъекций приведена на рисунке 2.9. Лабораторный стенд представляет собой металлическую трубу (рис.2.10), длиной 1,5м.

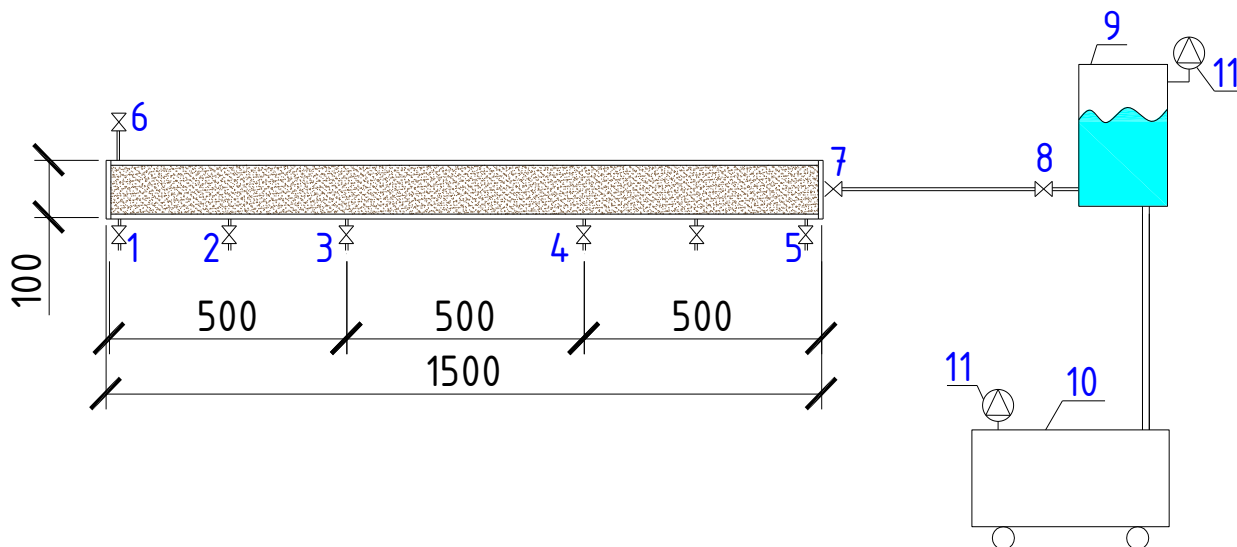


Рис.2.9. Схема лабораторной установки для проведения инъекций грунта раствором

1-8 – краны; 9 – бак с водой; 10 – компрессор; 11 – манометр

В исследованиях использованы миксер (для приготовления раствора), лабораторные электронные весы (точность  $\pm 1$ г), таймер, вискозиметр, воронка Марша, набор ключей для сборки и разборки стенда, приспособления для уплотнения песчаного грунта.

Цикл испытаний включал в себя:

1. Подготовка лабораторного стенда к испытаниям.
2. Заполнения цилиндрического резервуара установки песчаным грунтом и приготовление инъекционного раствора.



Рис.2.10. Лабораторный стенд и установка для подачи воды и раствора

3. Процесс инъецирования с заданными параметрами и с последующим тампонирующим грунтом.

4. Технологический перерыв.

5. Определения коэффициента фильтрации по разработанной методике в лабораторном стенде, фиксирование результатов.

Подготовка лабораторного стенда к испытаниям включает в себя смазку резьбовых соединений, установку трубы в вертикальное положение для заполнения песком, а также подготовку материалов, механизмов и приборов, используемых в испытании.

Заполнение цилиндрического резервуара лабораторного стенда производилось в вертикальном положении с послойным уплотнением песчаного грунта (заполнителя). Уплотнение производилось трамбовкой. Таким образом, достигалась плотность, приближенная к плотности песчаного грунта в природных условиях. После заполнения резервуара, труба приводилась в горизонтальное положение.

Приготовление раствора происходило в отдельной ёмкости непосредственно перед началом инъецирования. Отмеренные количества компонентов вливались в бак и посредством миксера перемешивались в однородный раствор.

При проведении инъецирования раствор периодически перемешивался, чтобы не изменялась концентрация раствора.

Инъецирование раствором происходило с учетом заданных технологических параметров: определенным давлением и заданным временем. Кран, находящийся в противоположном от места ввода раствора, оставался открытым на протяжении всего опыта, до того момента, пока раствор не проходил через весь лабораторный стенд и не начинал вытекать через него.

Для приготовления инъекционного состава были использованы такие материалы, как бентонитовый порошок, хлористый кальций и жидкое стекло, мягко-эластичная гидроизолирующая смола MC-Injekt GL-95. Выбор данных материалов обусловлен их выраженными водонепроницаемыми свойствами.

Для приготовления раствора инъекций бентонитовым порошком потребовалось 5 литров воды и 350г бентонитового порошка (70г порошка на 1л воды). Количество раствора для инъекции было получено из расчета пористости песка. Соотношение компонентов в растворе выбиралось исходя из подбора по вязкости. Вязкость определяли визкозиметром воронка Марша (рис. 2.4.). По методике, описанной в п. 2.3.4. определили, что вязкость воды составляет 37 сек на 1 л, а количество бентонитового порошка из расчета вязкости раствора 45 сек. Данные компоненты были влиты в бак и тщательно перемешивались миксером. Рабочее давление инъекции составило 2 атм. Время инъецирования 4мин.

Для инъецирования мягко-эластичной гидроизолирующей смолой MC-Injekt GL-95 использовали следующее количество компонентов: А1 – 2,46 кг, А2 – 41г, В – 6г. Компонент В имеет порошкообразную структуру и разводится на 3л воды. Все компоненты вливали в бак и перемешивали. Инъецирование проводили под давлением 2,5 атм, продолжительность составляла 5 минут.

Инъекция жидким стеклом происходила в 2 этапа, за основу была взята методика силикатизации двухрастворным методом, табл.2.11. Химическая

сущность двухрастворной силикатизации, необходимые реагенты и технология были установлены еще в 1931 г. исследованиями, проведенными под руководством Ржаницына Б.А. Процесс заполнения пор и упрочнения песка происходит по следующей схеме. Нагнетаемое через скважину жидкое стекло заполняет поры грунта, вытесняя из них воду. При этом жидкое стекло разбавляется водой и, концентрация его уменьшается. Нагнетаемый затем в скважину раствор хлористого кальция вытесняет из пор жидкое стекло, за исключением тонких пленок его вокруг минеральных частиц. В результате реакции между жидким стеклом и раствором хлористого кальция на границе раздела этих жидкостей образуется пленка геля кремневой кислоты. Через эту пленку, из жидкого стекла диффундирует щелочь, которая взаимодействует с хлористым кальцием, образуя гидрат окиси кальция и хлористый натрий. Обедненное щелочью жидкое стекло постепенно желатинизируется и целиком переходит в гидрогель кремневой кислоты с адсорбированным на нем гидратом окиси кальция. Этот процесс заканчивается в пленке толщиной до 1 мм лишь через 10 сут.

В процессе реакции исходных растворов в осадок выпадают гель кремневой кислоты и окись кальция, заполняющие поры грунта, а адсорбционное соединение кремневой кислоты и гидрата окиси кальция образует на поверхности частиц песка цементирующую их пленку. Хлористый натрий остается в растворе и уносится новыми порциями раствора  $\text{CaCl}_2$  в отдаленные зоны, частично смешиваясь с ним и разбавляя раствор силиката натрия. Отверждение жидкого стекла происходит при взаимодействии его не только с хлористым кальцием, но и с другими хлоридами. Однако хлористый кальций является наиболее экономичным составляющим. [2].

Для инъектирования использовали 1,3 кг (800 мл) жидкого стекла и 2,5 л воды, 1 кг хлористого кальция и 3 л воды.

Первый этап инъектирования. Инъектирование раствором жидкого стекла. Объем раствора: 3,8 л, начальное давление инъекции – 0, конечное



давление – 4 атм. Время инъекции составило 1 мин, (полное прохождение раствора через секцию длиной 1500мм).

Второй этап инъектирования. Инъектирование хлористым кальцием.

Объем раствора 4 л. Начальное давление инъекции 2 атм, конечное – 5 атм. Время инъекции 1,5 мин. (полное прохождение раствора через секцию длиной 1500мм).

**Методика определения коэффициента фильтрации противофильтрационного экрана в лабораторном стенде.** На первом этапе был определен коэффициент фильтрации грунта (песка) без инъекции с помощью лабораторной установки (рис.2.11).

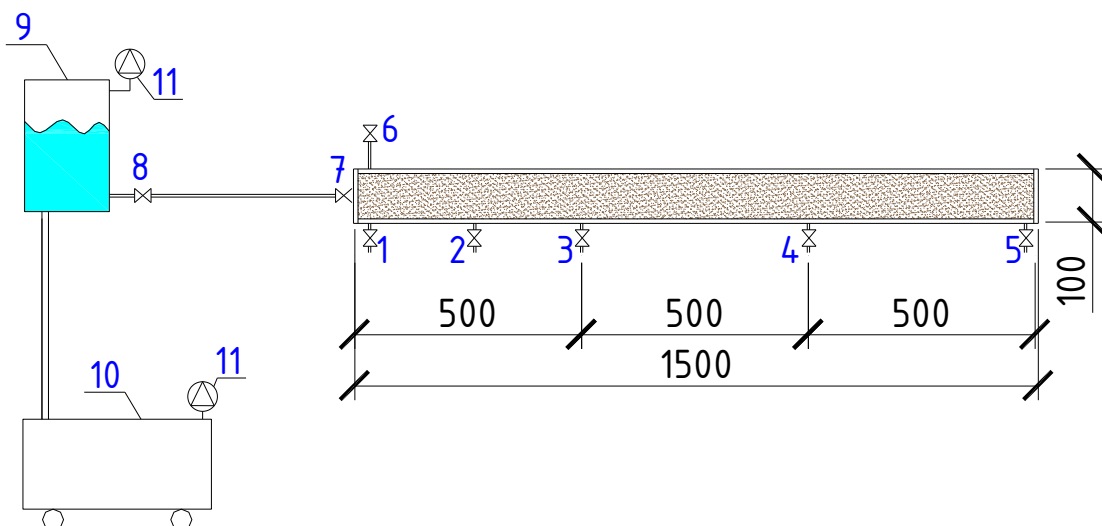


Рис.2.11. Схема лабораторной установки для определения коэффициента фильтрации противофильтрационного экрана

1-8 – краны; 9 – бак с водой; 10 – компрессор; 11– манометр.

Затем проведены испытания заинъектированного песчаного грунта (после окончания срока технологического перерыва) с помощью лабораторной установки.

Данные испытания проводились по следующей схеме:

- Наполняем бак (9) водой. Измеряем ее температуру.
- Включаем компрессор (10) и подаем давление. Значение величины давления устанавливаем таким, чтобы движение воды было ламинарным (начинаем с минимального давления при котором будет равномерная струя).

- Открываем кран (7,8) и кран (1), при этом остальные краны закрыты.
- Подставляем под кран (1) емкость, в которую будет течь профильтровавшаяся вода.
- Начинаем отсчёт времени фильтрации воды, когда течение жидкости ламинарное.
- Фиксируем время фильтрации, количество профильтрованной воды, давление.
- Повторяем те же действия с краном (2) (7,8), (3) (7,8), (4) (7,8), (5) (7,8).

Заносим полученные данные в таблицы 4.1-4.4 (см.раздел.4).

Полученные по разработанной методике образцы грунтобетона, были испытаны по стандартной методике на прочность при осевом сжатии и водонепроницаемости согласно с методикой, изложенной в ДСТУ Б В.2.7-48-96. Схема испытаний и образцы приведены на рис.2.12.

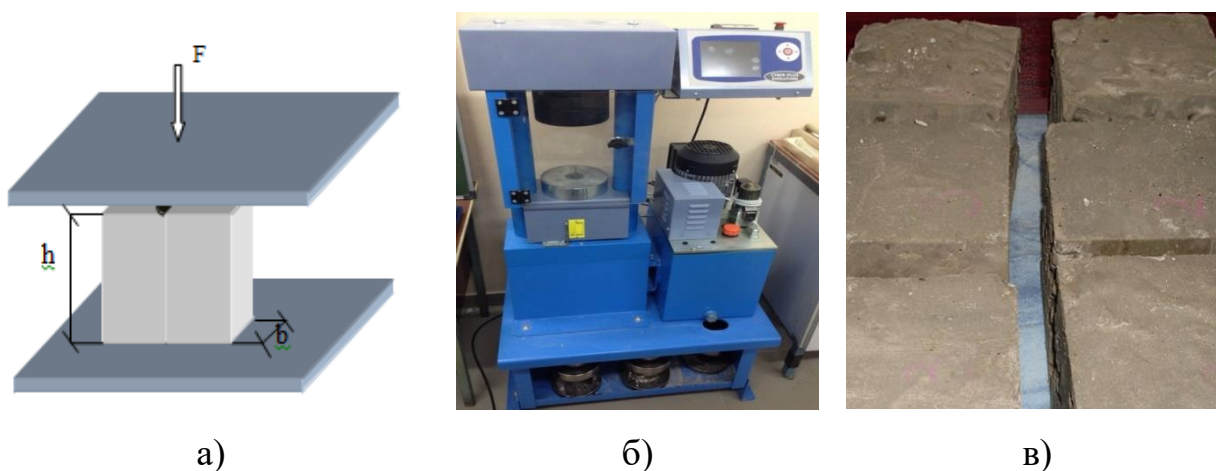


Рис.2.12. Испытание образцов-кубов грунтобетона на прочность при осевом сжатии: а) схема испытание; б) гидравлический пресс; в) образцы-кубы

### 2.3. Экспериментальное-статистическое моделирование

Планирование и анализ исследования основных свойств противифльтрационного экрана проводилось с использованием методов математического моделирования. Проведенные исследования направлены на определение оптимального сочетания факторов рецептуры и технологии,

обеспечивающего удовлетворение требований, предъявляемых к готовому материалу.

Одним из современных методов, позволяющих значительно улучшить свойства материалов, является использование разного рода компонентов составов. Качество противотранспортного экрана изменялось за счет варьирования двух групп факторов «технологических решений + рецептуры состава»: «Технологические решения» (давление инъецирования + время инъецирования) и «рецептура состава цементной суспензии» (расход вяжущего + количество минерального наполнителя).

Основной эксперимент по определению физико-механических и эксплуатационных характеристик грунтобетонного композита на основе портландцемента проводился по трехуровневому D-оптимальному 18-ти точечному четырехфакторному плану. Графическое отображение экспериментальных точек плана представлено в виде диаграммы «Квадраты на квадрате» (рис. 2.13) [94].

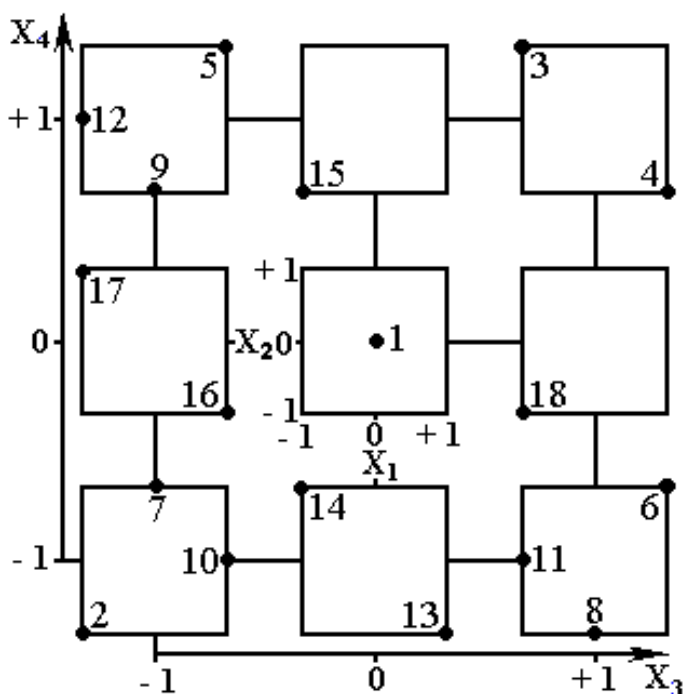


Рис. 2.13. Расположение экспериментальных точек

Нормализация всех факторов состава бетона выполнена по стандартным формулам (2.4) [82]:

$$x_i = (X_i - X_{oi})/\Delta X_i \quad (2.4)$$

где  $X_{oi} = 0.5 (X_{i.max} - X_{i.min})$ ;

$\Delta X_i = 0.5 (X_{i.max} + X_{i.min})$ .

Расчет коэффициентов моделей и регрессионный анализ проводились по разработанной на кафедре процессов и аппаратов Одесского инженерно-строительного института (Одесской государственной академии строительства и архитектуры) в 1991 году системе COMPEX на компьютере.

Порядок работы в диалоговой системе следующий:

- ввод плана эксперимента;
- ввод экспериментальных данных;
- ввод «гаусовской точности»  $tS_3$  эксперимента: где  $t$  – критерий

Стьюдента для выбранного уровня значимости  $\alpha$  (при исследовании физико-механических свойств степень риска  $\alpha = 0.2$ );  $S_3$  – ошибка эксперимента.

Далее рассчитанная ЭС-модель со всеми значимыми оценками коэффициентов проверялась на адекватность по критерию Фишера  $F$ . Затем по полученным моделям рассчитываются максимальные и минимальные значения откликов и строятся однофакторные, двухфакторные и трехфакторные диаграммы. Также для проведения изопараметрического анализа и компьютерный поиск рациональных составов, расчета статистических оценок и построения части диаграмм и графиков применялась программа Microsoft Excel, входящая в комплект программ Microsoft Office.

#### **2.4. Обработка результатов эксперимента**

Вычисления результатов эксперимента и обработка их проводились с помощью компьютерных технологий. В частности для накопления, анализа и сортировки полученных экспериментальных данных применялась программа обработки электронных таблиц Microsoft Excel 2010, входящая в комплект программ Microsoft Office 2010. Эта же программа применялась для

построения диаграмм и графиков. Некоторые таблицы и весь текст работы были получены при применении текстового редактора Word 2010, который также является набором программ Microsoft Office 2010. Редактирование части рисунков и графиков проходило с помощью профессионального графического редактора для работы с цветными растровыми изображениями Adobe PhotoShop 7.0, а также графической программы с растровой графикой CorelDRAW 10.0.

Построение и статистический анализ экспериментально-статистических моделей (ЭСМ) выполнялся по стандартным методикам [27, 143, 29, 71] с применением диалоговой системы COMPEX, разработанной на кафедре процессов и аппаратов Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Все модели построены со степенью риска  $\alpha = 0,2$ .

Модель со всеми значимыми оценками коэффициентов проверялась на адекватность по критерию Фишера F. Если  $F_a < F_{кр}(\alpha, f_{на}, f_{э})$ , то модель допускалась для дальнейшего анализа и принятия решения.

Предсказательная способность моделей оценивалась по расхождениям расчетных и экспериментальных значений анализируемого свойства в контрольных точках.

Комплекс используемой методики и материалов, а также технологии, позволили нам выполнить задачи, поставленные перед нами, и добиться поставленной цели – защита подземного пространства от загрязнений при наличии в грунте твердых включений путем разработки и исследования новых технологий.

## **Выводы по разделу 2**

1. Разработана блок-схема исследований, позволяющая выполнить теоретико-экспериментальные исследования и обосновать логическое их направление.

2. Разработанные методы и методика исследований обеспечили получение достоверных оценок основных показателей и принятие по ним технологических решений.
3. Разработанная теоретическая гипотеза о возможности горизонтальной инъекции для защиты подземного пространства подтверждена результатами экспериментальных исследований.
4. Экспериментально подобраны оптимальные инъекционные составы для устройства эффективных противofильтрационных экранов.
5. Разработана методика определения коэффициента фильтрации.
6. Выбраны планы математического моделирования для решения поставленных задач.
7. Определен комплекс анализируемых критериев качества инъекционных составов и противofильтрационных экранов в толще грунта.

### РАЗДЕЛ 3

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНЪЕКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭКРАНА В ГРУНТЕ И РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для защиты подземного пространства от техногенных загрязнений, возникших вследствие устройства могильников с разного вида отходами, необходимо использовать искусственные противofильтрационные экраны. В качестве таких экранов наиболее перспективны те из них, для создания которых не требуется использования дефицитных материалов, больших финансовых затрат. Это, прежде всего, разновидности природных глинистых материалов и материалов на основе цементов. Их применяют для создания цементно-глинистых горизонтальных экранов в основании различных могильников и ям складирования отходов.

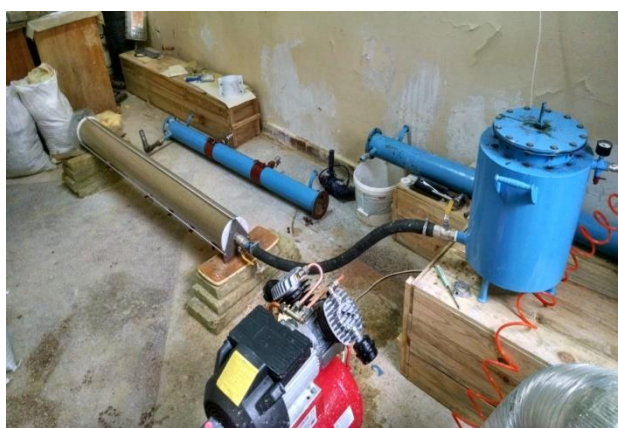
Глина, слабопроницаемый материал, используется при создании горизонтального экрана. Глинистый материал применяют и для приготовления суспензии, которая используется при создании инъекционных горизонтальных экранов. Но детальное изучение инъекционного способа показало, что для использования глинистых суспензий есть серьезное ограничение. Согласно критерию Кинга-Буша вопрос о возможности инъекции суспензионного раствора в тампонируемый песок решается в зависимости от соотношения дисперсности песка и твердой фазы глинистой суспензии. Если это невозможно, для создания защитного экрана используются химические гелеобразующие растворы с малой начальной вязкостью. Как показали исследования, оптимальным является химическое соединение акрилов и производных на их основе.

Окончательный выбор способа защиты должен осуществляться с учетом, прежде всего, эффективности работы экрана как геохимического барьера, а также возможности его технической реализации. Эффективность экранирования определяется свойствами материала экрана, элементарным

составом и видом отходов. Оценить ее можно только путем расчета предельно-допустимого времени эксплуатации экрана ( $T_{пр}$ ).

### 3.1. Моделирование проницаемости грунта при ламинарной и турбулентной фильтрации жидкости

Для теоретического обоснования процесса моделирования проницаемости грунта при ламинарной и турбулентной фильтрации жидкости выполнялся предварительный эксперимент с применением прозрачной трубы, рис.3.1. Методика эксперимента описана в разделе 2.



а)



б)



в)



г)

Рис.3.1. Визуальное наблюдение за распространением модельной жидкости в песке при различном времени инъецирования: а) общий вид установки; б) распространение жидкости в начальный период инъецирования; в) распространение отфильтрованной воды по длине тубы; г) уплотнение грунта и седиментация возле сопла инъектора



Визуальное наблюдение за распространением модельной жидкости в песке при различном времени инъецирования показало следующее:

1) при инъецировании в грунт, раствор спустя некоторое время проявился на некотором расстоянии от сопла инъектора.

2) дальнейшее нагнетание привело к тому, что инъецируемый раствор, уплотнив песок на некотором расстоянии постепенно начал заполнять пространство близ сопла инъектора.

3) отмечено, что с удалением от сопла инъектора наблюдается отфильтровывание воды от пигментных частиц.

**Математические и физические модели течения жидкости в пористой среде.** При математическом моделировании процессов инъецирования грунта первоочередной является задача изучения пропускной способности пористой среды. При одной и той же пористости, но в различных типах грунтов пропускная способность разная. Способность пористой среды пропускать жидкость характеризуется проницаемостью. Ее определение связано с основным законом движения жидкости в пористой среде, называемым законом Дарси.

Согласно закону Дарси, скорость ламинарной фильтрации можно выразить уравнением:

$$W = K_{\phi} I \quad (3.1)$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации грунта,  $I$  – гидравлический градиент, определяемый из выражения:

$$I = \frac{P_1 - P_2}{h} \quad (3.2)$$

Изучению коэффициента фильтрации посвящены работы многих исследователей. В теории фильтрации известны математические выражения, выведенные Зельгеймом, Алланом Газена, Зауэрбреем И.И., Замариным Е.А., Крюгером, Донатом []. При лабораторных исследованиях фильтрационных свойств грунтов этот показатель вычисляется из выражения:

$$K_{\phi} = \frac{864h_1}{tT} f \left[ \frac{S}{H_0} \right] \quad (3.3)$$

где  $h$ , – высота образца грунта в трубке, см; 864 – переводной коэффициент из см/с в м/сутки;  $t$  – время падения уровня воды, с;  $T = (0,7 + 0,03T_{\phi})$  – температурная поправка в условиях фильтрации воды при температуре 10 °С;  $T_{\phi}$  – фактическая температура воды во время опыта;  $S$  – наблюдаемое падение уровня воды в пьезометре, отсчитанное от первоначального уровня, см;  $H_0$  – начальный напор, см;  $f = \left[ \frac{S}{H_0} \right]$  – безразмерный коэффициент, определяемый по таблицам.

Грунты представлены частицами различной крупности, а поры – каналами, имеющими переменное сечение и переплетающимися между собой. Поэтому при изучении фильтрации в основу положен статистический метод. Частицы грунта имеют неправильную форму и самые разнообразные размеры, исследование вязкой жидкости и решение уравнений для нее производилось с учетом допущения, что гидродинамическая фильтрация осуществляется на идеальном или фиктивном грунте. Причем, под идеальным понимается грунт, у которого все поры цилиндрические, и оси цилиндров параллельны между собой, а под фиктивным – грунт, сложенный из одинаковых шарообразных частиц.

Слихтер путем простых геометрических преобразований определил пористость фиктивного грунта и установил, что она не зависит от диаметра шарообразных частиц, а зависит только от их относительной конфигурации, обуславливаемой величиной угла  $\Theta$  (рис. 3.1, а).

Рассматривая модель фиктивного грунта, можно установить, что движение элементарной струйки между шарообразными частицами фиктивного грунта осуществляется по криволинейной траектории, искривленной в пространстве. Слихтер исследовал изменение поперечного сечения канала при плотном расположении шаров ( $\theta = 60^\circ$ ) и установил, что траектория имеет как сужения, так и расширения. Наименьшее поперечное

сечение порового канала является треугольником (точка А на рис. 3.1,б). Далее сечение понемногу увеличивается до наибольшего в точке D, а затем снова падает до своей первоначальной величины в точке В. В дальнейшем происходит увеличение порового пространства до максимума в точке G и уменьшение до первоначальной величины в точке С.

Пористость, по фундаментальной формуле Сликтера, характеризующей фиктивный грунт, равна:

$$n = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \Theta) \sqrt{1 + 2 \cos \Theta}} \quad (3.4)$$

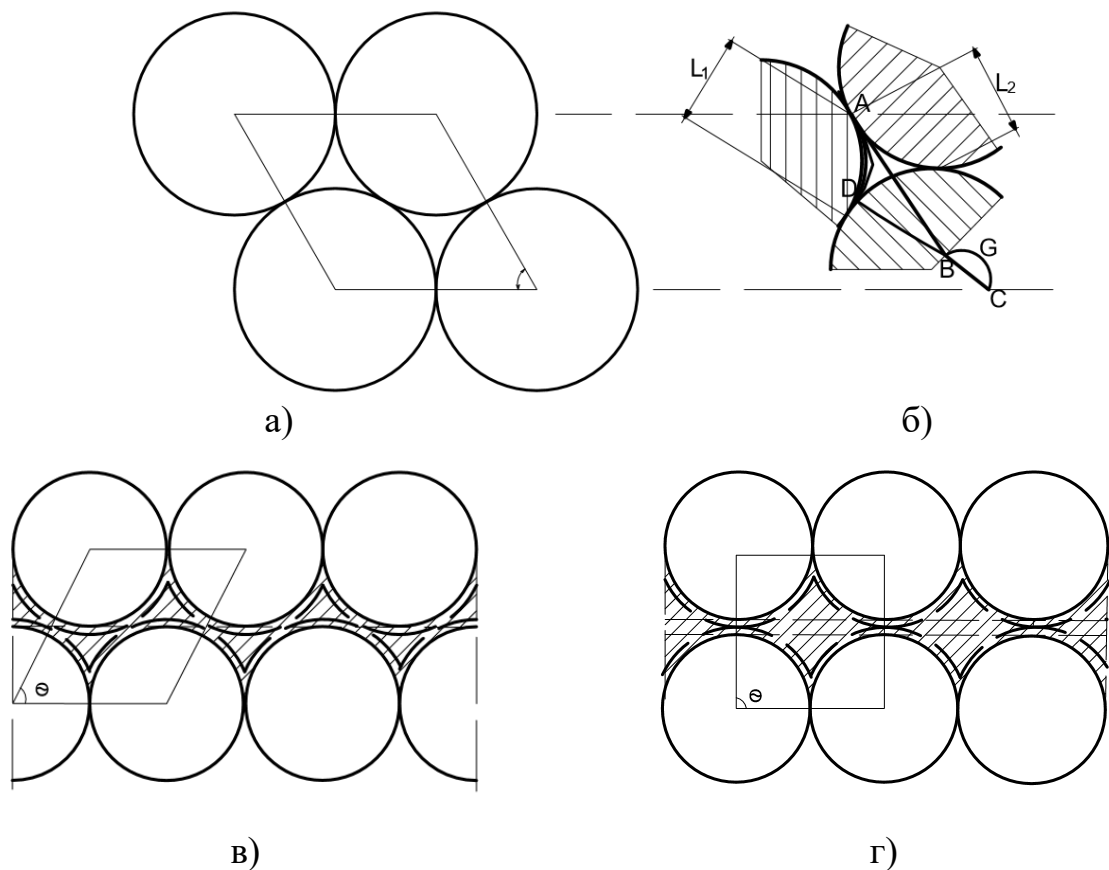


Рис. 3.1. Расположение минеральных частиц в фиктивном грунте: а – смещение частиц при рядной упаковке; б – траектория движения жидкости в поровом пространстве; в – поры в фиктивной шахматной упаковке; г – поры в фиктивной рядной упаковке

Поскольку крайние значения угла  $\Theta$  равны  $60^\circ$  (рис. 3.1,в) и  $90^\circ$  (рис. 3.1,г), следовательно экстремальные значения пористости  $n_{\min} = 0,259$ ;  $n_{\max}$

$=0,476$ , что будет обуславливать интервал теоретической пористости. Просвет фиктивного грунта изменяется в пределах от  $m_{\min} = 0,0931$  до  $m_{\max} = 0,2146$ . Помимо рассмотренных аспектов следует учитывать, что поры имеют не только изменяющуюся конфигурацию, но и застойные зоны, не участвующие в процессе фильтрации.

При соприкосновении твердой минеральной частицы с водой возникают электромолекулярные силы, которые притягивают диполи воды к поверхности частиц. Самые близкие к частице слои (1-3 ряда молекул воды) образуют пленки прочносвязанной воды, что сопровождается энергетическим эффектом. Слои молекул воды, связанные меньшими силами, образуют слой рыхлосвязанной воды. Следовательно, можно рассмотреть систему, включающую в себя объем частиц грунта, объем свободной воды и объем связанной воды.

Андрианов П.И. [11] отождествляет связанную воду в грунте с максимальной молекулярной влагоемкостью по Лебедеву А.Ф. Толщина пленки связанной воды в % от среднего диаметра частиц может изменяться в следующих пределах:

- для крупного песка при  $d = 0,75$  мм максимальная молекулярная влагоемкость составляет 1,57 % при толщине пленки 0,7%;
- для глинистых частиц при  $d_{\text{cp}} = 0,0025$  мм влагоемкость составляет 44,85% при толщине пленки равной 20,0% .

Наличие пленок жидкости вокруг частиц грунта уменьшает его пористость на 5%.

При обтекании вязкой жидкостью твердого тела может произойти отрыв обтекающей жидкости от поверхности тела, причем за местом отрыва образуется область застойной зоны (рис. 3.2).

Угол отрыва при ламинарном обтекании шара вязкой жидкостью составляет  $\varphi = 116,2^\circ$ . Застойные области как бы увеличивают объем каждой шарообразной частицы на 12% . Пористость грунта с учетом пленки воды на поверхности частиц и мертвых зон, образованных в углах треугольного

сечения, называют эффективной. Эффективную пористость  $n_1$  можно выразить через истинную:

$$n_1 = n \left[ 1 - 3 \left( \frac{1-n}{n} \right) \zeta \right] \quad (3.5)$$

где  $\zeta = \frac{d_1}{d_u} - 1$ ,  $d_1$  – диаметр шарообразной частицы с учетом пленки воды;  $d_u$  – диаметр минеральной частицы грунта.

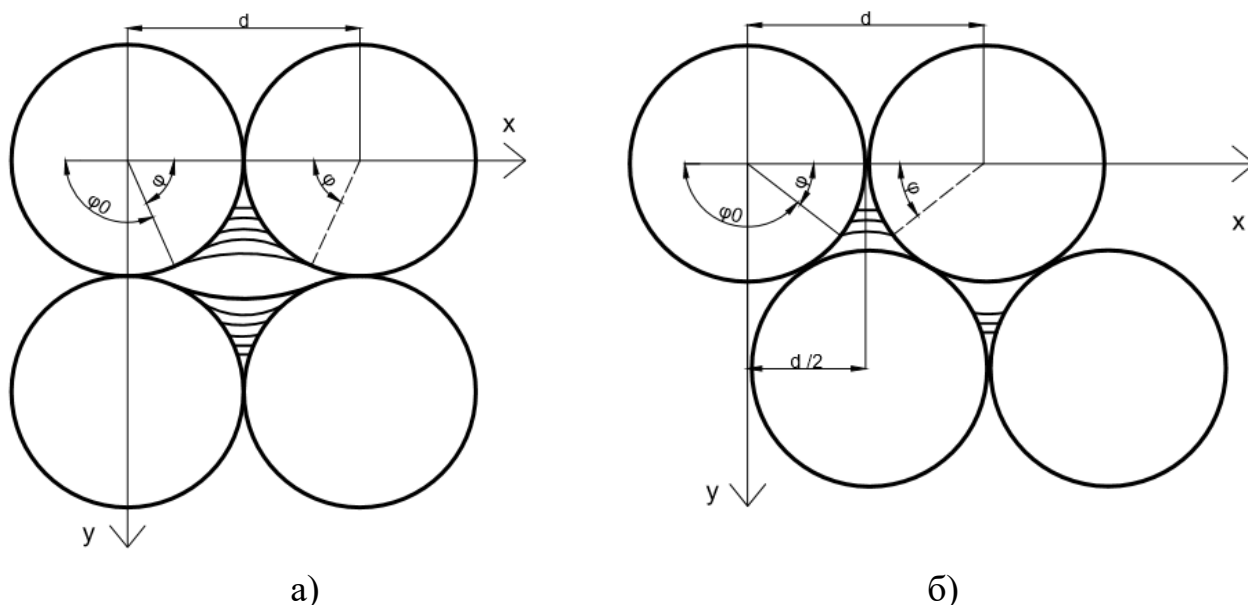


Рис. 3.2. Области застойных зон: а – при рядной упаковке; б – при шахматной упаковке

Ламинарная фильтрация зависит от двух основных параметров: гранулометрического состава и вязкости жидкости. Гранулометрический состав характеризуется коэффициентом фильтрации, эффективным диаметром, удельной поверхностью, пористостью. Поскольку жидкость, характеризуемая определенной вязкостью, распространяется в пористой среде от источника, в котором создается давление, то в самой струе жидкости давление также будет изменяться – от  $\max$  у источника до  $\min$  на периферии. Это явление в теории фильтрации характеризуется коэффициентом пьезопроводности.

Принципы движения несжимаемой жидкости через пористую среду

рассмотрены на основе исследований Лейбензона Л.С. [12, 13], Щелкачева В.Н. [14], Полубаринова-Кочиной П.Я. [15,16], Веригина Н.Н. [17,18], Волоцкого Д.В. [5, 19, 20], Истоминой В.С. [21], Жуковского Н.Е. [22], Минца Д.В. [23], Аравина В.И. [24], Ломидзе Г.М. [25], Соболевского Ю.А. [26], Камбефора А. [2] и других исследователей.

Скорость фильтрации через идеальный грунт может быть выражена через действительную скорость течения жидкости  $W_0$  с учетом пористости  $n$ :

$$W_1 = nW_0 \quad (3.6)$$

Поскольку в идеальном грунте все поры цилиндрические, то они будут характеризоваться гидравлическим радиусом, представляющим собой отношение площади поперечного сечения порового канала  $\omega$  к периметру  $\chi$ :

$$\delta = \frac{\omega}{\chi} \quad (3.7)$$

Скорость фильтрации через идеальный грунт может быть выражена не через пористость, а через коэффициент проницаемости  $k$ , имеющий размерность площади

$$W = \frac{k(P_1 - P_2)}{\mu l}, \quad (3.8)$$

$$\text{где } k = nk_0 = n \frac{\delta^2}{\beta^2}; \beta = \sqrt{\frac{\tau}{8}} \quad (3.9)$$

$\tau$  – показатель, зависящий от режима течения жидкости;  $(P_1 - P_2)$  – падение гидродинамического давления;  $l$  – длина порового канала,  $\mu$  – абсолютная вязкость, на основании которой, а также плотности жидкости можно определить и кинематическую вязкость  $\nu$ .

Гидравлический радиус идеального грунта определяется из выражения:

$$\delta = \beta \sqrt{\frac{k}{n}} \quad (3.10)$$

Между коэффициентами фильтрации и проницаемости существует взаимосвязь:

$$K_{\phi} = k \frac{\rho}{\mu} \quad (3.11)$$

где  $\rho$  – плотность раствора.

Фильтрация через фиктивный грунт подробно изучена Сликтером, Козени, Терцаги, Смрекером, Рейнольдсом. Скорость фильтрации в фиктивном грунте определяется из выражения:

$$W_2 = mW_0 \quad (3.12)$$

где  $m$  – просвет фиктивного грунта, определяемый из выражения

$$m = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \Theta} \quad (3.13)$$

где  $\Theta$  – угол ромба, из которого образованы грани ромбоэдра и который изменяется от  $\Theta = 90^\circ$  до  $\Theta = 60^\circ$ .

Скорости фильтрации в идеальном и фиктивном грунте описываются одним и тем же выражением (3.8), однако проницаемость по Сликтеру находится по формуле:

$$k = \frac{m^2 r_u^2}{96(1-n)} \quad (3.14)$$

где  $r_u$  — радиус шара, вписанного в ромбоэдр.

Л. С. Лейбензон [12] вывел ту же самую формулу, но по отношению к выражению Сликтера результаты, получаемые по формуле Лейбензона, вдвое больше.

Между пористостью грунта и просветом существует взаимосвязь, которая описывается уравнением:

$$m = Nn^{1.4} \quad (3.15)$$

где  $N$  – постоянная величина.

Таким образом, при изучении фильтрации в основу положен метод, позволяющий рассматривать грунт как идеальный или фиктивный, характеризуемые пористостью или просветом. Течение жидкости при ламинарном режиме подчиняется закону Дарси, на основании которого можно получить выражения, характеризующие скорость течения жидкости с

учетом характеристик грунта.

*Реологические особенности течения вязких жидкостей в пористой среде.* Основная задача технологии инъектирования грунтов состоит в управлении процессом на всех стадиях, особенно на начальной, с целью получения защитного экрана с допустимой проницаемостью и однородной структурой и сохранение его свойств после химико-физических превращений. В связи с разработкой новых высокоэффективных инъекционных материалов важно установление взаимосвязи реологических свойств и процессов структурообразования с целью их направленного регулирования для получения материалов с заданными свойствами.

Для экспериментального определения реологических параметров материалов существуют методы, которые отличаются по области применения, принципам нагружения, степени автоматизации. Для практического выбора метода измерений учитывается необходимое количество проб, точность и продолжительность измерений, и другие моменты, которые зависят от конкретных конструктивных решений измерительного реологического прибора [97, 110-112].

В основе действия приборов измеряющих реологические характеристики жидких систем лежит одномерное стационарное сдвиговое течение, одномерное осциллирующее сдвиговое течение (приборы для измерения вязкоупругих характеристик), комплексное нагружение (для определения консистенции и реологических характеристик материалов). Реологические свойства характеризуют поведение систем в условиях напряженного состояния и позволяют связать между собой напряжения, деформации или скорости деформаций в процессе приложения усилий [113-116].

Любая система, в которой отношения напряжения сдвига к скорости деформации численно равно динамической вязкости  $\eta$  при постоянных давлениях и температуре и не зависит от режима деформирования, называется ньютоновской. Системы, у которых напряжение сдвига



изменяется не пропорционально скорости сдвига, называются неньютоновскими [117], какими являются цементные, полимерные и полимерцементные композиционные материалы, наполненные дисперсными наполнителями.

**Течение ньютоновских жидкостей.** Простейшим типом жидкостей, с точки зрения теории вязкости, являются ньютоновские растворы, к которым относятся инъекционные растворы высокомолекулярных органических соединений типа карбамидных смол и неорганических соединений силикатных растворов.

При ламинарном течении жидкости между ее соседними слоями, имеющими различную скорость, возникают касательные напряжения. Вязкая жидкость, текущая вблизи твердой поверхности, прилипает к ней, из-за чего появляются силы сопротивления. Когда жидкость течет в пористой среде, то скорость любого ее элемента быстро изменяется от точки к точке, по мере того как элемент продвигается по своему извилистому пути.

Касательные напряжения вязких ньютоновских жидкостей определяются уравнением Ньютона:

$$\tau = -\mu \frac{\partial W}{\partial N} \quad (3.16)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение;  $\mu$  – вязкость жидкости;  $\frac{\partial W}{\partial N}$  – градиент скорости при переходе от одного слоя жидкости к другому.

Реологическая кривая истинной жидкости всегда характеризуется абсолютной вязкостью. Истинные жидкости начинают течь при сколь угодно малых напряжениях сдвига. Уравнение движения этой жидкости, протекающей через круглую капиллярную трубку, было получено Пуазейлем в 1842 году:

$$Q = \frac{\pi \delta^4 (P_1 - P_2)}{8l\mu} \quad (3.17)$$

где  $Q$  – объем вытекающий из капилляра в единицу времени;  $\delta$  – радиус капилляра;  $(P_1 - P_2)$  – разность давлений на конце трубки;  $l$  – длина

капилляра. Течение вязко-пластичной жидкости описывается уравнением Бингама [27].

$$\tau = \mu \frac{\partial W}{\partial N} + \tau_c \quad (3.18)$$

где  $\tau_c$  – статическое напряжение сдвига.

Для полной гидродинамической характеристики пористой среды Веригиным Н.Н. [18] было выведено понятие коэффициента пьезопроводности, характеризующего скорость распространения давления в упругой пористой среде. Если в какой-нибудь точке (источник инъектирования) произойдет изменение давления, то это изменение в пористой среде передается в другую точку через некоторый промежуток времени. Поэтому в точке пласта, расположенной ближе к источнику нагнетания, перераспределение давления наступает раньше и проявляется более интенсивно, чем на участке, более удаленном от источника. Для определения коэффициента пьезопроводности Н.Н. Веригин привел выражение:

$$a = \frac{k}{\mu(e\beta_{ж} + \beta_{породы})} \quad (3.19)$$

где  $\beta_{ж}$  – коэффициент сжимаемости жидкости;  $\beta_{породы}$  – коэффициент сжимаемости породы;  $e$  – коэффициент пористости.

В части теоретических построений, рассматривая инъекцию вязких синтетических смол, будем относить их к ньютоновским жидкостям, которые применительно к пористым средам подчиняются закону Дарси, т.е. имеют ламинарный режим течения.

**Течение неньютоновских жидкостей. Эффективная вязкость – реологическая характеристика смеси.** Вязкость  $\eta$  (Па·с) по закону Ньютона связывает напряжение сдвига  $\tau$  (Па) и скорость сдвиговых деформаций  $\dot{\gamma}$  ( $s^{-1}$ ) в текущей жидкости как  $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$ . В неньютоновских жидкостях эта связь обеспечивается эффективной вязкостью, которая зависит от скорости деформаций.

Эффективная вязкость  $\eta_{\text{эф}}$  неньютоновских жидкостей состоит из двух компонентов:

1 - ньютоновской вязкости  $\eta_{\infty}$ , которая основана на внутреннем трении жидкости и представляет физическую константу материала;

2 - структурного сопротивления  $\eta_{\text{эф}}(\dot{\gamma}) - \eta_{\infty}$ , которое зависит от структурного состояния дисперсных систем и является функцией скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ .

Следовательно,  $\eta_{\text{эф}}$  является реологической характеристикой, которая учитывает внутреннее трение и структурно-динамическую равновесную компоненту.

Согласно известным представлениям, развитым П.А. Ребиндером и его школой, эффективная вязкость определяется равновесной степенью разрушения структуры системы, достигаемой по завершении предстационарной стадии деформации.

Эффективная вязкость достаточно хорошо характеризует реологические свойства неньютоновских систем, если она известна на всем интересующем исследователя диапазоне скоростей деформаций. Для этого необходимо определить взаимосвязь между реологическими характеристиками и интенсивностью механического воздействия с помощью построения реологической кривой. Полная реологическая кривая позволяет установить изменение эффективной вязкости  $\eta$ , характеризующей степень равновесного разрушения структуры, от интенсивности механического воздействия во всем возможном диапазоне изменения скоростей деформаций  $\dot{\gamma}$ .

Впервые полная реологическая кривая была получена в работах П.А. Ребиндера, Г.В. Виноградова и др. [118-120]. Получение полной реологической кривой затруднительно, поэтому на практике наиболее часто используют неполные реологические кривые течения.

Неполная реологическая кривая ньютоновской жидкости представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат  $\{\eta, \gamma'\}$ . Для наполненных полимерных систем, к которым относятся полимерцементные композиции, армированные целлюлозным волокном, характерно псевдопластичное течение, возникающее вследствие разрушения структуры с увеличением скорости деформации [119].

Основоположник физико-химической механики и учения о структурообразовании дисперсных систем академик П.А. Ребиндер уделял большое внимание структурообразованию дисперсных систем.

Структурообразование дисперсных систем связано с возникновением контактов между частицами при определенной фиксации их пространственного положения. Образующаяся в дисперсных суспензиях пространственная структура, в основном подчиняется закономерностям формирования структур коагуляционного типа, начало изучения которых положено П.А. Ребиндером. Но наряду с общими для таких систем свойствами, например, невысокой прочностью и способностью к самопроизвольному восстановлению после механического разрушения, цементные суспензии обладают некоторыми особенностями. В первую очередь это относится к реологическим свойствам, которые, в общем, соответствуют свойствам других коагуляционных структур [121].

Структура суспензий часто образуется не только за счет коагуляционных контактов, но и вследствие одновременного образования механических зацеплений. Система «частицы-жидкость» в таких случаях приобретает определенные индивидуальные механические или, а в более широком смысле, реологические свойства. Эти свойства суспензий имеют большое практическое значение.

Использование моделей, построенных на базе фундаментальных физических закономерностей, позволяет надежно оценить структурно-механические свойства, интерпретировать происходящие явления и процессы поведения систем в процессе деформации, использовать эти характеристики

для расчета технологического оборудования, а также для оценки ряда технологических и качественных показателей высокодисперсных систем, управления ими и получения заранее заданных технологических характеристик.

Количественно описание реологических свойств возможно при использовании математического моделирования и анализа идеальных механических моделей вязкого, упругого и пластического тела и их сочетаний [122-127].

Математическое описание реологического поведения жидкости является предпосылкой для инженерного расчета процесса течения. Для неньютоновских жидкостей применяют модели, достаточно хорошо описывающие их реологическое поведение в интересующей области деформаций.

Практическая значимость реологических исследований связана с углублением представлений о протекании технологических процессов промышленности, их расчетом и оптимизацией, прогнозированием и оценкой эксплуатационных характеристик готовой промышленной продукции.

**Основные положения инъекции грунтов.** Теоретически нагнетание раствора в грунты может происходить при постоянных давлении, расходе или скорости фильтрации (рис 3.3).

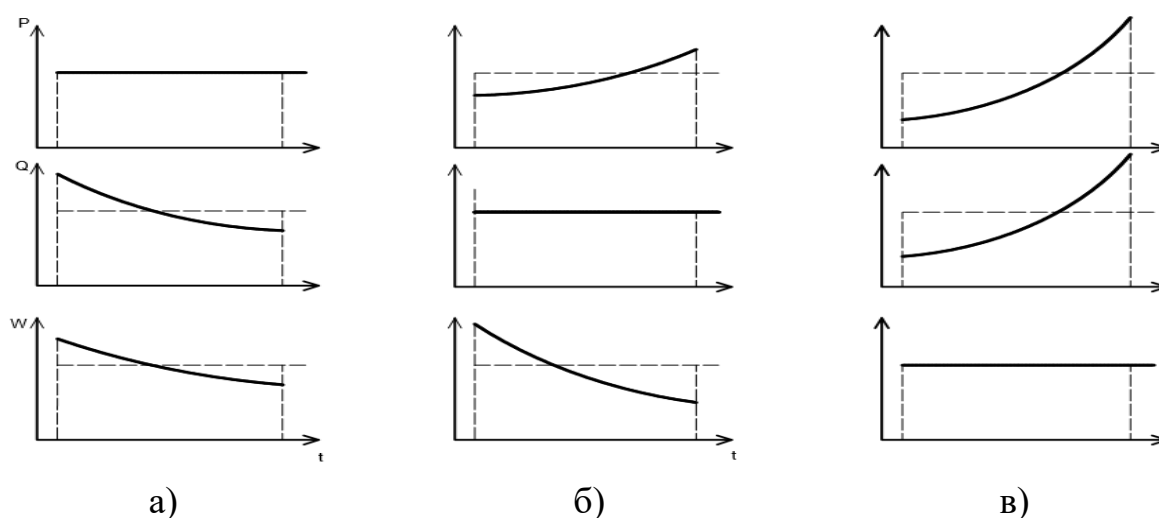


Рис. 3.3. График зависимости параметров нагнетания от времени: а –

при постоянном давлении  $P$ ; б – при постоянном расходе  $Q$ ; в – при постоянной скорости распространения раствора  $W$

Общепринятым считается первый режим, когда нагнетание раствора происходит при постоянном давлении. Второй режим возможен при очень ограниченном времени, когда поры грунта свободны, и тогда небольшое увеличение давления приведет к постоянному расходу. Однако со временем поры заполнятся раствором, и повышение давления приведет к нарушению ламинарного режима течения жидкости и к разрыву сплошности грунтового массива.

Третий режим связан с постоянным увеличением расхода раствора и давления нагнетания. Такой режим возможен при нагнетании раствора в трещиноватые породы или породы, имеющие большие пустоты и полости. Нагнетать таким режимом растворы в песчаные грунты невозможно.

При рассмотрении процесса нагнетания жидкости в пористую среду могут возникнуть следующие задачи: одномерная, плоско-радиальная и сферическая.

Одномерная задача, представляющая собой поток из совокупности параллельных линий, может быть рассмотрена при инъецировании в сухие и водонасыщенные грунты (рис. 3.4).

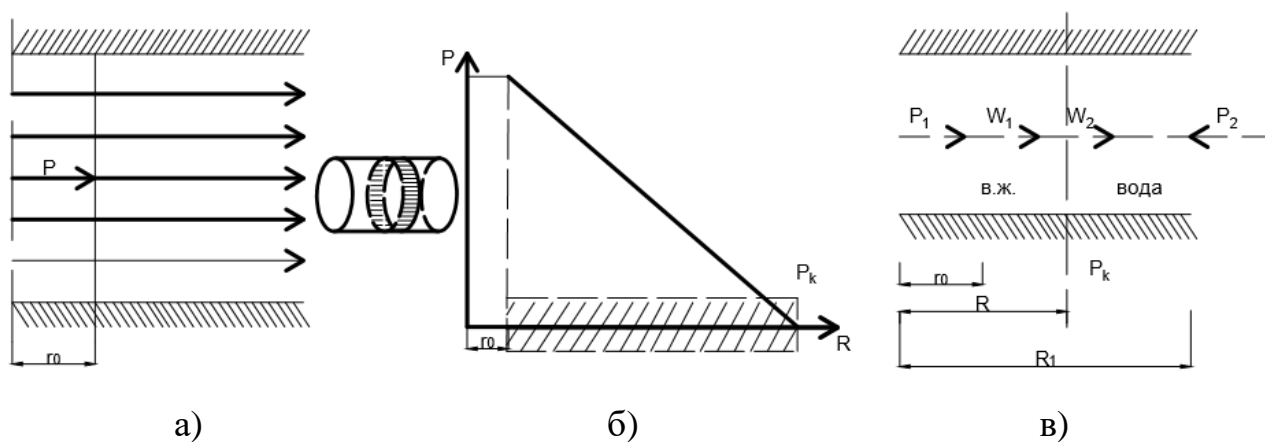


Рис. 3.4. Одномерная задача: а – схема инъецирования в сухие грунты; б – зависимость радиуса распространения раствора в сухих грунтах от

создаваемого давления; в – инъе́ктирование в водонасыщенные грунты.

График, обозначающий процесс нагнетания (рис. 3.4, б), составлен с учетом постоянного давления и переменного расхода ньютоновской жидкости, фильтрующейся по закону Дарси. При этом упругостью воды, крепителя и грунта, а также сопротивлением вытесненного из пор воздуха пренебрегаем. Поскольку течение жидкости происходит от источника по открытым порам, то давление возле инъе́ктора имеет максимальное значение. За счет возникновения трения между струей раствора и стенкой поры давление на периферии снижается до нуля. Учитывая, что скорость фильтрации описывается уравнением (3.8), а между коэффициентами фильтрации и проницаемости существует взаимосвязь описываемая уравнением (3.11), легко получить выражение:

$$W = \frac{K_{\phi}(P_1 - P_2)}{\rho n(R - r_0)} \quad (3.20)$$

где длину фильтрационного потока  $l$  заменим на разность между радиусом распространения раствора  $R$  и радиусом инъе́ктора  $r_0$ .

Пользуясь методом смены стационарных режимов Л.С. Лейбензона [13], сущность которого заключается в том, что процесс неустановившейся фильтрации рассматривается как совокупность мгновенных, установившихся процессов с непрерывно изменяющимися во времени характеристиками, и выражая скорость через изменение радиуса во времени:

$$W = \frac{\partial R}{\partial t} \quad (3.21)$$

можно получить выражение:

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{K_{\phi}(P_1 - P_2)}{pn(R - r_0)} \quad (3.22)$$

Интегрируя выражение в пределах от  $r_0$  до  $R$  и от  $0$  до  $t$  и введя безразмерный радиус  $\chi$ , были получены формулы для всех трех задач [28,29].

**Для плоского одномерного источника** продолжительность инъе́ктирования в зависимости от глубины проникновения жидкости

выражается уравнением:

$$t = \frac{pnr_0^2}{K_\phi(P_1 - P_2)} f(\chi) \quad (3.23)$$

$$f(\chi) = \left( \frac{\chi - 1}{2} \right) \text{ и } \chi = \frac{R}{r_0} \quad (3.24)$$

$K_\phi$  – коэффициент фильтрации грунта, соответствующий плотности и вязкости жидкости.

Практически, для песков при давлении в инжекторе измеряемом атмосферами, капиллярное давление можно принимать равным нулю.

При инъецировании водонасыщенных грунтов одномерная задача будет иметь вид, изображенный на рис. 2.4, в. Предположим, что за время  $t$  вязкая жидкость проникла в грунт на глубину  $R$ . На эту жидкость действует избыточное давление  $P$  – слева, на воду  $P_2$  – справа.

$$W_1 = \frac{K_{\phi 1}(P_1 - P_x)}{p_1(R - r_0)} \quad (3.25)$$

В плоскости раздела жидкостей будет давление  $P$ . Определим скорость фильтрации в зонах согласно уравнению Дарси:

$$W_2 = \frac{K_{\phi 2}(P_x - P_2)}{p_2(R_1 - R)} \quad (3.26)$$

Уравнение неразрывности потока должно удовлетворять условию:

$$W_1 = W_2 \quad (3.27)$$

Отсюда  $P_x$  будет равно:

$$P_x = \frac{(R_1 - R)P_1 - b(R - r_0)P_2}{(R_1 - R) + b(R - r_0)}, \text{ где } b = \frac{K_{\phi 2}P_1}{K_{\phi 1}P_2} \quad (3.28)$$

Подставляя полученное выражение в формулу (2.25), получим скорость фильтрации

$$W_1 = \frac{K_{\phi 1}b(P_1 - P_x)}{p_1(R_1 - R) + b(R - r_0)} \quad (3.29)$$

Продолжительность инъецирования на расстояние  $R$  определим интегрированием уравнения (3.21) в пределах от 0 до  $t$  и от  $r_0$  до  $R$ :



$$\int_0^t \partial t = n \int_{r_0}^R \frac{\partial R}{W_1} \quad (3.30)$$

Подставив значения из предыдущего выражения и проинтегрировав его в указанных пределах, можно определить продолжительность инъецирования на глубину R:

$$\int_0^t \partial t = \frac{np_1}{K_{\phi 1} b (P_1 - P_2)} \int_{r_0}^R [(R_1 - R) + b(R - r_0)] \partial R \quad (3.31)$$

$$t = \frac{np_1 r_0}{K_{\phi 1} (P_1 - P_2)} \left[ \chi_1 (\chi - 1) + (b - 1) \frac{(\chi - 1)^2}{2} \right] \quad (3.32)$$

где  $\chi_1 = \frac{R_1}{r_0}$  – безразмерный радиус влияния источника.

Последнее выражение можно представить в виде:

$$t = \frac{nr_0^2}{(P_1 - P_2)} \Phi(\chi) \quad (3.33)$$

$$\Phi(\chi) = \left( \frac{P_1}{K_{\phi 1}} - \frac{P_2}{K_{\phi 2}} \right) f(\chi) + \frac{P_2}{K_{\phi 2}} \chi_1 \varphi(\chi) \quad (3.34)$$

где  $\varphi(\chi) = \chi - 1$ ,  $f(\chi)$ ,  $\chi$  – те же, что и в формуле (3.24).

**Плоско-радиальная задача** (рис. 3.5) может рассматриваться в двух случаях:

а) когда сверху и снизу область распространения жидкости ограничена водоупорами;

б) когда отношение длины перфорированной части инъектора к его диаметру больше пяти.

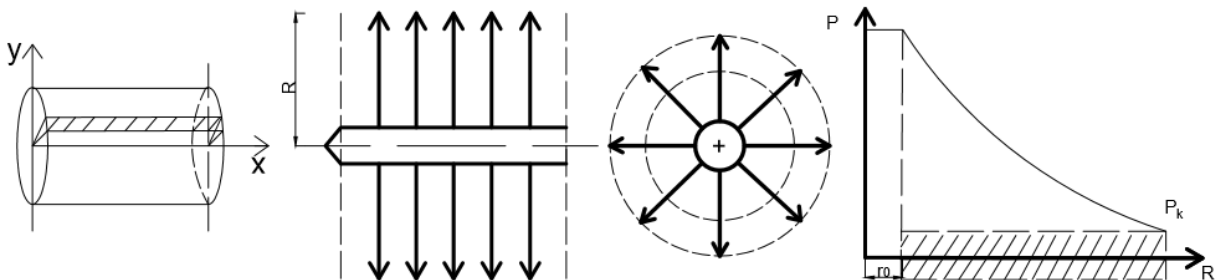


Рис. 3.5. Плоско-радиальная задача

Для плоско-радиального источника, что соответствует длинным инъекторам (отношение длины перфорированной части  $L$  к диаметру инъектора  $D_{II}$  ( $L/D_{II} > 5$ )), зависимость радиуса от времени выражается той же формулой, что и в плоской задаче (3.23), а безразмерная величина равна:

$$f(x)_R = \frac{x^2 \left( \ln^2 x + \frac{1}{x^2} - 1 \right)}{4} \quad (3.35)$$

Для практических расчетов при  $\chi > 10$  величиной  $1/\chi^2$  можно пренебречь, и тогда выражение примет вид:

$$f(x)_R = \frac{x^2 (\ln^2 x - 1)}{4} \quad (3.36)$$

**Сферическая задача.** Рассматривается при отношении длины перфорированной части инъектора к его длине меньше пяти или при нагнетании раствора через трубу с открытым концом.

Для сферического источника безразмерная величина равна:

$$f(x)_c = \frac{2x^3 - 3x^2 + 1}{6} \quad (3.37)$$

Сравнивая безразмерные части (3.24), (3.35), (3.37) можно сделать вывод, что, быстрее всего, инъекция идет через одномерный источник, затем через плоско-радиальный и наиболее медленно через сферический. Приведем соотношение между безразмерными величинами:

$$\frac{t_R}{t_c} = \frac{6x^2 \left( \ln x^2 + \frac{1}{x^2} - 1 \right)}{4(2x^3 - 3x^2 + 1)} = \frac{6x^2 \left( \ln x^2 + \frac{1}{x^2} - 1 \right)}{4 \left[ x^2 (2x - 3) + 1 \right]} = \frac{6x^2 \left( \ln x^2 + \frac{1}{x^2} - 1 \right)}{\left[ 4x^2 \left( 2x - 3 + \frac{1}{x^2} \right) \right]} = 1,5 \frac{\left( \ln x^2 + \frac{1}{x^2} - 1 \right)}{\left[ \left( 2x - 3 + \frac{1}{x^2} \right) \right]} \quad (3.38)$$

На основании приведенного выражения можно заключить, что при увеличении радиуса распространения раствора время нагнетания через радиальный источник будет приближаться ко времени через сферический.

**Вывод уравнения для определения радиуса распространения раствора.** При нагнетании раствора в грунт область пропитки представляет собой геометрическую фигуру в виде эллипсоидального цилиндра.

Рассмотрим гидродинамическую схему фильтрации раствора через одиночный иньектор (рис.3.6).

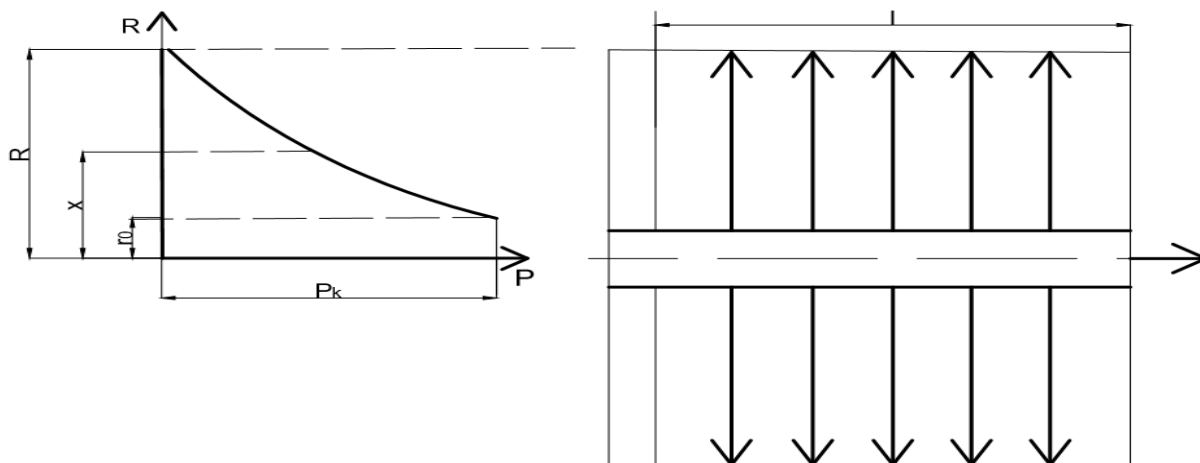


Рис.3.6. Гидродинамическая схема фильтрации через одиночный горизонтальный иньектор

График зависимости  $R-f(P)$  свидетельствует о том, что наибольшая величина давления в области пропитки будет у самого иньектора, т.е. при выходе раствора из отверстия. На периферии давление падает до капиллярного.

Общий расход раствора через иньектор будет состоять из расхода в радиальной области:

$$Q_{\Sigma} = Q_R \quad (3.39)$$

Следовательно, истечение из иньектора раствора  $Q_{\Sigma}$  приведет к поровому заполнению цилиндрической области за время  $t$ . Для дальнейших выводов остановимся на  $t_R$ , так как именно это время позволяет определить радиус распространения раствора.

Время, необходимое для иньектирования раствора может быть определено из выражения (3.23). Для плоско-радиального источника безразмерная часть определяется из выражения (3.36), а для сферического – по формуле (3.37).

Выразим безразмерную часть уравнения через технологические параметры и характеристики грунта:

$$f(x) = \frac{tK_{\phi}(P_1 - P_2)}{pnr_0^2} \quad (3.40)$$

Как видно, в полученном выражении в числителе представлена разница давлений в инжекторе и на периферии распространения раствора. Кроме того, раствор, выходя из отверстия инжектора, распределяется на большую площадь, чем в самом отверстии инжектора, что приводит к падению давления при выходе раствора из отверстия инжектора.

Горбунов Б.П. [29] предложил рассматривать коэффициент гидравлических потерь как отношение разности давлений внутри инжектора  $P_0$  и на внешней его стороне  $P_1$ :

$$K_z = \frac{P_0}{P_1} \quad (3.41)$$

Рассматривая разницу давлений в инжекторе и на границе растекания раствора, где это давление будет равно капиллярному, можно заключить, что для песков при давлении в инжекторе, измеренном атмосферами, капиллярное давление можно принимать равным нулю.

Проведенные лабораторные исследования по нагнетанию вязких растворов в песчаный грунт подтверждают потери, возникающие при инжектировании. Особенно их следует учитывать при нагнетании раствора в поверхностные слои, где каждое отверстие и его размер влияют на эффективность пропитки. Поэтому, приняв коэффициент гидравлических потерь за показатель, характеризующий размеры и количество отверстий инжектора, получаем выражение:

$$K_z = \frac{\sum N_i r_i}{2r_0 + \sum N_i r_i} \quad (3.42)$$

где  $N$  – число отверстий одного диаметра в инжекторе;  $r_0$  – радиус инжектора;  $r_i$  – радиус отверстий одного диаметра.

Коэффициент гидравлических потерь выведем для инжектора, перфорированного отверстиями разного диаметра. Следует отметить, что он будет тем больше, чем больше разница между диаметром инжектора и количеством

отверстий одного сечения. Отсюда следует вывод, что перфорация иньектора является важной величиной, которую необходимо учитывать при расчетах.

Для определения коэффициента гидравлических потерь обозначим  $\sum N_i r_i$  через показатель конструктивных параметров иньектора  $P_k$ . Приняв граничные условия составляющих коэффициента гидравлических потерь, строим номограмму (рис. 3.7).

Рассмотрев процесс неустановившейся фильтрации как совокупность мгновенных, установившихся процессов с непрерывно изменяющимися во времени характеристиками, можно записать выражение:

$$t = \frac{p \pi r_0^2}{K_\phi P_0 K_e} \cdot f(x) \quad (3.43)$$

Определение радиуса распространения раствора по выражению 3.43 производим в следующем порядке:

1. Определяем коэффициент гидравлических потерь. Для этого по разработанной номограмме [30] для параметров иньектора  $2 \text{ мм} < N < 32 \text{ мм}$ ;  $1 \text{ мм} < r < 4 \text{ мм}$ ;  $5 \text{ мм} < r_0 < 15 \text{ мм}$  определяем численное значение этого коэффициента.

2. Подставляем параметры, характеризующие фильтрационные свойства грунта, технологические данные и определяем размерную часть выражения (3.43).

3. Зная численное значение размерной части, определяем безразмерную функцию  $f(x)$ , по которой вычисляем радиус распространения раствора.

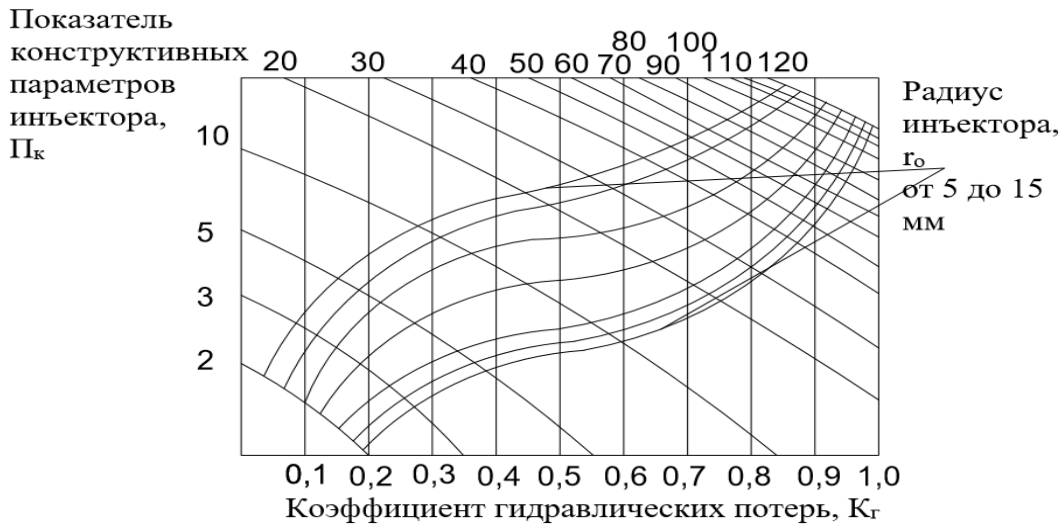


Рис. 3.7. Номограмма определения коэффициента гидравлических потерь по Ю.Г. Бабаскину [ ]

Для характеристики значений радиуса распространения раствора, полученного по выведенной формуле, определяли показатель точности:

$$P_T = \pm \frac{100m_0}{X} \quad (3.44)$$

где  $m_0$  – средняя ошибка среднего арифметического, определяемая из выражения:

$$m_0 = \frac{Lg}{\sum n_0} \quad (3.45)$$

где  $L$  – гарантийный коэффициент, определяемый по интегралу вероятности Лапласа (при  $L = 1$  значение  $X$  будет подтверждено в 683 случаях из 1000, при  $L = 1,3$  в 800, при  $L = 2$  в 995);  $v$  – среднее квадратичное отклонение;  $n_0$  – число наблюдений;  $X$  – среднеарифметическое значение рассматриваемых случайных величин.

Чем меньше показатель точности, тем надежнее результат исследований. Как отмечено в работах Н.В. Леонтьева [31] и И.Е. Евгеньева [32], достаточная надежность эксперимента будет обеспечена только в случае, если показатель точности не превышает 5%.

Радиус распространения раствора, помимо выражения 3.43, определялся по формулам, выведенным Т.С. Каранфиловым [33] с

допущением, что коэффициент фильтрации в процессе нагнетания раствора остается постоянным, а характер движения раствора в грунте является ламинарным. В таком случае радиус распространения раствора составляет:

– для сферического источника:

$$R = 1,54 \sqrt{\frac{r_0 K_\phi \frac{\nu}{\nu_p} P_0 t}{\beta n}} \quad (3.46)$$

– для плоско-радиального:

$$R = 0,8 \sqrt{\frac{K_\phi \frac{\nu}{\nu_p} P_0 t}{\beta n}} \quad (3.47)$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воды, связанный с абсолютной вязкостью  $\mu$  через выражение:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.48)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $\nu_p$  – кинематический коэффициент вязкости раствора;  $\beta$  – коэффициент заполнения пор раствором.

Мааг [3] вывел формулу для определения времени нагнетания ньютоновских жидкостей. Изменив это выражение и сгруппировав исходные данные относительно основного показателя получаем зависимость:

$$R = 1,4 \sqrt[3]{\frac{r_0 (3t K_\phi P - r_0^2 a n)}{a n}} \quad (3.49)$$

где  $a$  – коэффициент, учитывающий отношение вязкости раствора к вязкости воды;  $n$  – пористость грунта.

А. Камбефор [2] вывел выражение по определению времени нагнетания с учетом расхода жидкости. Изменив выражение и выразив его относительно радиуса, можно получить:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3Qt}{4\pi n} + r_0^3} = \sqrt[3]{\frac{0,23Qt}{n} + r_0^3} \quad (3.50)$$

В указаниях по смолизации грунтов [34] приведена формула, по которой рекомендуется определять количество раствора на одну заходку.

Изменив это выражение относительно радиуса распространения раствора, получим:

$$R = \frac{Q}{10\pi n\ell} \quad (3.51)$$

где  $t$  – величина заходки.

В Белорусском дорожном научно-исследовательском институте разработаны методические рекомендации по борьбе с пучинами инъекцией закрепляющих растворов [35]. В этих рекомендациях радиус закрепления рекомендуется определять по формуле Т.С. Каранфилова (2.47).

С опытными данными сравнивались значения радиуса распространения раствора, вычисленные по формулам Б. П. Горбунова и В.М. Марголина (3.23, 3.35, 3.36), Т.С. Каранфилова (3.46, 3.47), Маага (3.49), указаний по смолизации (3.51) и формуле, выведенной с учетом коэффициента гидравлических потерь (3.43).

Анализируя результаты вычислений (табл. 2.1), можно заметить, что данные, полученные по формуле, выведенной с учетом коэффициента гидравлических потерь, дают показатель точности не более 5%. В связи с этим заключаем, что при нахождении радиуса распространения раствора в пористой среде это выражение с достоверной точностью описывает его зависимость от свойств грунта, материала, параметров нагнетания и конструкции инъектора. Определение численных значений каждого из вышеперечисленных показателей, обеспечивающих наибольшее распространение раствора в радиальном направлении при экономичном расходе и ограниченном времени нагнетания, легло в основу экспериментальных исследований.

В таблице 3.1. в числителе приведены значения радиусов, вычисленных по формулам, а в знаменателе – показатель точности, определяемый по формуле (3.44).



Таблица 3.1.

Результаты вычислений радиусов распространения растворов в пористой среде

№ п/п	Принадлежность математических выражений	Радиус распространения раствора в м при давлении Р, МПа и коэффициенте фильтрации К <sub>ф</sub> , м/сут					
		Р=0,1 МПа, К <sub>ф</sub> =9,5 м/сут			Р =0,15 МПа, К <sub>ф</sub> =5,2 м/сут		
		10	20	30	10	20	30
		3	4	5	6	7	8
1	Экспериментальные данные	0,128	0,153	0,166	0,100	0,138	0,150
2	Указания по смолизации (2.51)	0,136 6,20	0,199 30,0	0,244 47,0	0,054 46,0	0,103 25,3	0,140 6,6
3	Формула Маага (2.49)	0,079 38,3	0,100 34,6	0,115 30,7	0,076 24,0	0,095 3U	0,108 28,0
4	Формула Каранфилова (2.46)	0,097 24,2	0,138 9,8	0,169 1,8	0,089 11,0	0,126 8,7	0,152 1,3
5	Формула Каранфилова (2.47)	0,051 60,1	0,072 52,9	0,088 46,9	0,047 53,0	0,067 51,4	0,082 45,3
6	Формула Горбунова и Марголина (2.23 и 2.35)	0,087 32,0	0,108 29,4	0,120 27,7	0,085 15,0	0,105 23,9	0,117 22,0
7	Формула Горбунова и Марголина (2.23 и 2.36)	0,132 3.1	0,176 15,0	0,208 25,3	0,124 19,3	0,165 19.5	0,195 30,0
8	Формула с учетом коэффициента	0,127 0,8	0,167 9,1	0 192 15,6	0,101 1.0	0,134 2,9	0,158 5,3

***Математическое моделирование процесса диффузии и получение прогнозных решений для однослойных экранов.***

Для оценки процесса миграции агрессивной среды в пределах создаваемых по инъекционной технологии искусственных экранов, вмещающих участок захоронения и предохраняющих подземные воды от загрязнения, автором использована микродисперсионная математическая

модель, которая учитывает процесс сорбции потенциальных загрязнителей. Микродисперсионная модель позволяет в случае необходимости учитывать возможный процесс десорбции поглощенных радионуклидов и, естественно, включать его в оценку эффективности работы естественных и искусственных экранов.

Принятая модель позволяет оценить характер миграции агрессивной среды в однослойных искусственных экранах и, путем определенных преобразований, получить количественную оценку эффективности работы естественной грунтовой толщи или искусственного экрана как геохимических барьеров на пути миграции агрессивной среды.

Для описания микродисперсионной математической модели используется следующая система дифференциальных уравнений и граничных условий:

$$n \times \frac{dc(x,t)}{dt} = D \times \frac{d^2c(x,t)}{dx^2} - v \frac{dc(x,t)}{dx} \quad (3.52)$$

$t$  – время;  $t > 0$ ;

$n$  – эффективная пористость,

$D$  – коэффициент микродисперсии,

$v$  – скорость фильтрации,

$x$  – расстояние вдоль пути фильтрации ( $0 < x < \infty$ ).

Начальное условие

$c(x,0) = c^0$  – фоновая концентрация;

Граничные условия:

$c(0,t) = c_0$  – исходная концентрация в точке  $x=0$ ;

$c(\infty,t) = c^0$  – исходная концентрация в точке  $x=\infty$ .

Для решения данной системы используется интегральное преобразование Лапласа-Карсона, которое задаётся в виде:

$$c = p \int_0^{\infty} c(t) \exp(-pt) dt \quad (3.53)$$

где  $p$  – параметр преобразования.

Решение имеет вид:

$$c(x, t) = \frac{c(x, t) - c_0}{c^0 - c_0} = \frac{1}{2} \left( \operatorname{erfc} \xi^2 + Pe \operatorname{erfc} \sqrt{\xi^2 + Pe} \right), \quad (3.54)$$

где  $\xi = \frac{nx - vt}{2\sqrt{Dnt}}$

$Pe = \frac{vx}{D}$ , число Пекле

$c(x, t)$  – относительная концентрация.

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \exp(-x^2) dx \quad (3.55)$$

На пути миграции загрязнителей формируются три области относительных концентраций загрязнителя:

1)  $c=1$ ; 2)  $0 < c < 1$ ; 3)  $c=0$

В этом случае второе слагаемое уравнения (3) стремится к 0 и имеет место приближенное решение

$$c(x, t) = \frac{c(x, t) - c_0}{c^0 - c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\xi) \quad (3.56)$$

В естественных условиях грунтовая толща, перекрывающая водоносный горизонт, часто бывает представлена несколькими литологическими разностями, отличающимися по составу и структуре. Также и искусственный экран может быть представлен различными по составу и строению материалами (цементно-песчаными, песчано-глинистыми, песчано-гелевыми) и иметь многослойную структуру. Каждая литологическая разность и слой искусственного экрана характеризуются присущими им миграционными параметрами. Причем эти параметры могут довольно значительно отличаться для разных грунтов, слагающих естественную грунтовую толщу, и составных компонентов искусственного экрана.

Исходя из предпосылки, что в каждом слое многослойного геохимического барьера процесс миграции происходит аналогично этому процессу в однослойной толще, математическое описание моделирования процесса миграции в двухслойном экране может быть представлено в форме [87]:

$$n_1 \frac{dc_1(x, t)}{dt} = D_1 \frac{d^2 c_1(x, t)}{dx^2} - v_1 \frac{dc_1(x, t)}{dx} \quad t > 0 \quad 0 < x < r$$

$$n_2 \frac{dc_2(x,t)}{dt} = D_2 \frac{d^2c_2(x,t)}{dx^2} - v_2 \frac{dc_2(x,t)}{dx} \quad t > 0 \quad 0 < x < \infty$$

Начальное условие:

$c_1(0,t) = c_0$  – исходная концентрация в точке  $x=0$ ;

$c_1(r,t) = c_2(r,t)$ ,  $r$  – мощность первого слоя;

$c_2(\infty,t) = c^0$ ;

где  $n_1$  и  $n_2$  – эффективные пористости 1 и 2 слоя;

$D_1$  и  $D_2$  – коэффициенты микродисперсии 1 и 2 слоя;

$v_1$  и  $v_2$  – скорости фильтрации в 1 и 2 слое.

Для решения данной системы уравнений вводятся новые осреднённые переменные для каждого слоя, которые записываются как:

$$c_1(x,t) = \frac{c_1(x,t) - c^0}{c^0 - c_0}$$

$$c_2(x,t) = \frac{c_2(x,t) - c^0}{c^0 - c_0}$$

Тогда исходная система принимает вид:

$$n_1 \frac{dc_1(x,t)}{dt} = D_1 \frac{d^2c_1(x,t)}{dx^2} - v_1 \frac{dc_1(x,t)}{dx} \quad t > 0 \quad 0 < x < r$$

$$n_2 \frac{dc_2(x,t)}{dt} = D_2 \frac{d^2c_2(x,t)}{dx^2} - v_2 \frac{dc_2(x,t)}{dx} \quad t > 0 \quad r < x < \infty$$

Начальное условие

$c(x,0) = c^0$  – фоновая концентрация;

Граничные условия:

$c_1(0,t) = 1$

$c_1(r,t) = c_2(r,t)$

$c_2(\infty,t) = 0$

На первой стадии миграции распространение загрязнителя происходит в первом слое. Первая стадия длится до тех пор, пока загрязнитель не достигнет границы между слоями ( $x=r$ ), т.е.  $c_1(r,t) = c_2(r,t) = 0$ . В этом случае решение можно представить в виде решения микродисперсионной модели в однослойной толще, т.е. в виде:

$$c_1(x, t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{n_1 x - v_1 t}{2\sqrt{D_1 n_1 t}} \right) \quad 0 < t < t_0$$

$$c_2(x, t) = 0$$

Для нахождения решения в следующих стадиях процесса миграции загрязнителя – 2)  $0 < c_1(x, t) < 1$        $0 < c_2(x, t) < 1$ ;

$$3) c_1(x, t) = 1 \quad 0 < c_2(x, t) < 1;$$

$$4) c_1(x, t) = 1 \quad c_2(x, t) = 1$$

переформируем задачу. Введём предположение, что решение в первом слое таково, как если бы слой продолжался до бесконечности, т.е.

$$c_1(x, t) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{n_1 x - v_1 t}{2\sqrt{D_1 n_1 t}} \right) + \exp\left(\frac{v_1}{D_1} x\right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n_1 x + v_1 t}{2\sqrt{D_1 n_1 t}} \right) \right\},$$

тогда на границе первого и второго слоя концентрация вычисляется как:

$$c_1(r, t) = c_2(r, t) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{n_1 r - v_1 t}{2\sqrt{D_1 n_1 t}} \right) + \exp\left(\frac{v_1}{D_1} r\right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n_1 r + v_1 t}{2\sqrt{D_1 n_1 t}} \right) \right\}.$$

В этом случае моделирование процесса миграции во втором слое описывается следующей системой дифференциальных уравнений и граничных условий:

$$n_2 \frac{dc_2(x, t)}{dt} = D_2 \frac{d^2 c_2(x, t)}{dx^2} - v_2 \frac{dc_2(x, t)}{dx} \quad t > 0 \quad r < x < \infty$$

Граничное условие в точке  $x=r$ .

$$c_2(r, t) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{n_1 r - v_1 t}{2\sqrt{D_1 n_1 t}} \right) + \exp\left(\frac{v_1}{D_1} r\right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n_1 r + v_1 t}{2\sqrt{D_1 n_1 t}} \right) \right\}.$$

Граничное условие в точке  $x=\infty$ .

$$c_2(\infty, t) = 0$$

Начальное условие:

$$c_2(x, 0) = 0$$

Применяем преобразование Лапласа

$$(c(x, s) = \int_0^\infty c(x, t) \exp(-st) dt, \text{ где } s - \text{ параметр преобразования}) \text{ и и}$$

формулы операционного исчисления. Получаем решение в виде:

$$c_2(x, t) = \int_0^t \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{n_2(x-r) - v_2 Q}{2\sqrt{D_2 n_2 Q}} \right) + \exp\left(\frac{v_2}{D_2}(x-r)\right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n_2(x-r) + v_2 Q}{2\sqrt{D_2 n_2 Q}} \right) \right\} \frac{r}{2(t-Q)} \sqrt{\frac{n_1}{\pi D_1(t-Q)}} \exp\left(-\left(\frac{n_1 r - v_1(t-Q)}{2\sqrt{D_1 n_1(t-Q)}}\right)^2\right) dQ$$

При продолжении процесса массопереноса, т.е.  $t \gg 0$ , можно использовать приближенное решение в виде:

$$c_2(x, t) = \frac{1}{2} \int_0^t \frac{r}{2(t-Q)} \sqrt{\frac{n_1}{\pi D_1(t-Q)}} \exp\left(-\left(\frac{n_1 r - v_1(t-Q)}{2\sqrt{D_1 n_1(t-Q)}}\right)^2\right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n_2(x-r) - v_2 Q}{2\sqrt{D_2 n_2 Q}} \right) dQ \quad (3.57)$$

Аналогично случаю двухслойной среды, математическое описание моделирования процесса миграции в случае трёхслойного геохимического барьера будет иметь вид:

$$\begin{aligned} n_1 \frac{dc_1(x,t)}{dt} &= D_1 \frac{d^2 c_1(x,t)}{dx^2} - v_1 \frac{dc_1(x,t)}{dx} & t > 0 \quad 0 < x < r_1 \\ n_2 \frac{dc_2(x,t)}{dt} &= D_2 \frac{d^2 c_2(x,t)}{dx^2} - v_2 \frac{dc_2(x,t)}{dx} & t > 0 \quad r_1 < x < r_2 \\ n_3 \frac{dc_3(x,t)}{dt} &= D_3 \frac{d^2 c_3(x,t)}{dx^2} - v_3 \frac{dc_3(x,t)}{dx} & t > 0 \quad r_2 < x < \infty \end{aligned}$$

Начальное условие

$$c_1(x,0) = c_2(x,0) = c_3(x,0) = c^0$$

Граничные условия:

$$c_1(0,t) = c_0$$

$$c_1(r_1, t) = c_2(r_1, t)$$

$$c_2(r_2, t) = c_3(r_2, t)$$

$$c_3(\infty, t) = c^0$$

После осреднения система принимает вид:

$$\begin{aligned} n_1 \frac{dc_1(x,t)}{dt} &= D_1 \frac{d^2 c_1(x,t)}{dx^2} - v_1 \frac{dc_1(x,t)}{dx} & t > 0 \quad 0 < x < r_1 \\ n_2 \frac{dc_2(x,t)}{dt} &= D_2 \frac{d^2 c_2(x,t)}{dx^2} - v_2 \frac{dc_2(x,t)}{dx} & t > 0 \quad r_1 < x < r_2 \end{aligned}$$

$$n_3 \frac{dc_3(x,t)}{dt} = D_3 \frac{d^2c_3(x,t)}{dx^2} - v_3 \frac{dc_3(x,t)}{dx} \quad t > 0 \quad r_2 < x < \infty$$

Начальное условие

$$c_1(x,0) = c_2(x,0) = c_3(x,0) = 0$$

Граничные условия:

$$c_1(0,t) = 1$$

$$c_1(r_1,t) = c_2(r_1,t)$$

$$c_2(r_2,t) = c_3(r_2,t)$$

$$c_3(\infty,t) = 0$$

Рассмотрим три стадии развития процесса миграции в случае трёхслойной среды и соответствующие им решения.

Первая стадия процесса миграции – перенос происходит в первом слое экрана до тех пор, пока не достигнет границы между первым и вторым слоями. Решение в данном случае фактически определяется первым слоем и имеет вид:

$$c_1(x,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{n_1 x - v_1 t}{2\sqrt{D_1 n_1 t}} \right)$$

$$c_2(x,t) = 0$$

$$c_3(x,t) = 0$$

Вторая стадия процесса миграции – перенос загрязнителя происходит в первом и втором слоях до тех пор, пока не достигнет границы между вторым и третьим слоем. Решение в этом случае аналогично решения двухслойной среды и имеет вид:

$$c_1(x,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{n_1 x - v_1 t}{2\sqrt{D_1 n_1 t}} \right)$$

$$c_2(x,t) = \frac{1}{2} \int_0^t \frac{r}{2(t-Q)} \sqrt{\frac{n_1}{\pi D_1 (t-Q)}} \exp\left(-\left(\frac{n_1 r - v_1(t-Q)}{2\sqrt{D_1 n_1 (t-Q)}}\right)^2\right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n_2(x-r) - v_2 Q}{2\sqrt{D_2 n_2 Q}} \right) dQ$$

$$c_3(x,t) = 0$$

Третья стадия процесса – миграция загрязнителя в трёх слоях. Для нахождения решения в этом случае переформулируем задачу. Будем считать, что приближённо решение во втором случае таково, как если бы слой продолжался на  $\infty$ , тогда в точке  $x=r_2$  будем иметь следующее граничное условие:

$$c_2(r_2, t) = \frac{1}{2} \int_0^t \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{n_2(r_2 - r_1) - v_2 Q}{2\sqrt{D_2 n_2 Q}} \right) + \exp\left(\frac{v_2}{D_2}(r_2 - r_1)\right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n_2(r_2 - r_1) + v_2 Q}{2\sqrt{D_2 n_2 Q}} \right) \right\} \times \\ \times \frac{r_1}{2(t - Q)} \sqrt{\frac{n_1}{\pi D_1(t - Q)}} \exp\left(-\left(\frac{n_1 r_1 - v_1(t - Q)}{2\sqrt{D_1 n_1(t - Q)}}\right)^2\right) dQ$$

В этом случае задачу для третьего слоя можно переформулировать следующим образом:

$$n_3 \frac{dc_3(x, t)}{dt} = D_3 \frac{d^2 c_3(x, t)}{dx^2} - v_3 \frac{dc_3(x, t)}{dx}$$

Начальное условие:  $c_3(x, 0) = 0$

Граничные условия:  $x=r_2$

$$c_3(r_2, t) = \frac{1}{2} \int_0^t \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{n_2(r_2 - r_1) - v_2 Q}{2\sqrt{D_2 n_2 Q}} \right) + \exp\left(\frac{v_2}{D_2}(r_2 - r_1)\right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n_2(r_2 - r_1) + v_2 Q}{2\sqrt{D_2 n_2 Q}} \right) \right\} \times \\ \times \frac{r_1}{2(t - Q)} \sqrt{\frac{n_1}{\pi D_1(t - Q)}} \exp\left(-\left(\frac{n_1 r_1 - v_1(t - Q)}{2\sqrt{D_1 n_1(t - Q)}}\right)^2\right) dQ$$

$c_3(\infty, t) = 0$ , граничное условие в  $x=\infty$

Аналогично случаю двухслойной грунтовой толщи решение данного уравнения получается с помощью интегрального преобразования Лапласа.

$c(x, s) = \int_0^\infty c(x, t) \exp(-st) dt$ , где  $s$  – параметр данного преобразования.

Чтобы получить решение в оригинале используется обратное интегральное преобразование Лапласа и теоремы операционного исчисления.



Окончательное решение в оригиналах будет иметь вид:

$$c_3(x, t) = \frac{1}{2} \int_0^t \left[ \frac{(x - r_2)}{(t - Q_2)} \sqrt{\frac{n_3}{\pi D_3 (t - Q_2)}} \exp \left( - \left( \frac{n_3 (x - r_2) - v_3 (t - Q_2)}{2 \sqrt{D_3 n_3 (t - Q_2)}} \right)^2 \right) \int_0^{Q_2} \left\{ \frac{r_1}{2(Q_2 - Q_1)} \sqrt{\frac{n_1}{\pi D_1 (Q_2 - Q_1)}} \right\} \exp \left( - \left( \frac{n_1 r_1 - v_1 (Q_2 - Q_1)}{2 \sqrt{D_1 n_1 (Q_2 - Q_1)}} \right)^2 \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n_2 (r_2 - r_1) - v_2 Q_1}{2 \sqrt{D_2 n_2 Q_1}} \right) dQ_1 \right] dQ_2$$

### 3.2. Выбор модели исследований и методы анализа проникающего действия струи

Задачей теоретического исследования процесса разрыхления материала затопленной струей жидкой фазы является определение минимального динамического давления струи, необходимого для нарушения сплошности слоя материала в зоне контакта струи с поверхностью. Для определения параметров струи жидкости, необходимых для динамического разрушения слоя твердого материала, был изучен процесс взаимодействия затопленной струи с поверхностью. Для оценки этого взаимодействия надо знать характеристики растекания свободных затопленных осесимметричных струй.

В качестве объекта анализа была принята модель распространения струи инъекционного раствора в толще грунта. Под инъекционной струей будем понимать форму струи, которая выходит с инжектора в толщу материала, которая характеризуется длиной  $L$ , шириной распыления  $D_0$ . Модель конусообразной струи позволяет проанализировать механизмы ее распространения в зависимости от давления. Форма распространяющейся струи в виде конуса предполагает, что, в зависимости от ширины ее распространения, в ее объеме жидкая фаза находится в свободном состоянии, в виде полиадсорбционных слоев и в виде моноадсорбированного слоя в непосредственной близости от вершины конуса. При истечении жидкости из инжектора в композитной среде в силу находящихся препятствий существует

свой напор на определенных участках. Исходя из этого предположения нами условно выделено четыре зоны, характеризующие поэтапное распространение жидкой фазы в твердой среде при  $t = \text{const}$  (рис.3.8).

Анализ распространения струи в матричном материале проводили графо-аналитическим методом и методом фотоупругости. Графо-аналитический метод позволяет количественно оценить направление распространения струи и ее относительную величину в матричном материале с учетом его различных характеристик. Сущность графо-аналитического метода изучения распределения деформаций твердеющего матричного материала состоит в предположении, что каждая точка матрицы взаимодействует со всеми точками, принадлежащими поверхности раздела «матричный материал – поверхность раздела».

Метод фотоупругости основан на свойствах оптически чувствительных материалов, становится двоякопреломляющими под действием нагрузки. При этом возникает неоднородное поле деформаций, что ведет к образованию оптической анизотропии. Оптическая анизотропия возникает в процессе отверждения оптически чувствительных материалов и “замораживается” в материале. Это позволяет анализировать распределение остаточных деформаций в зависимости от геометрических параметров структуры материала, образца или изделия. Анализировать остаточные оптические эффекты или изменение порядка интерферентных полос при внешних воздействиях можно на интерференционно-поляризационной установке.

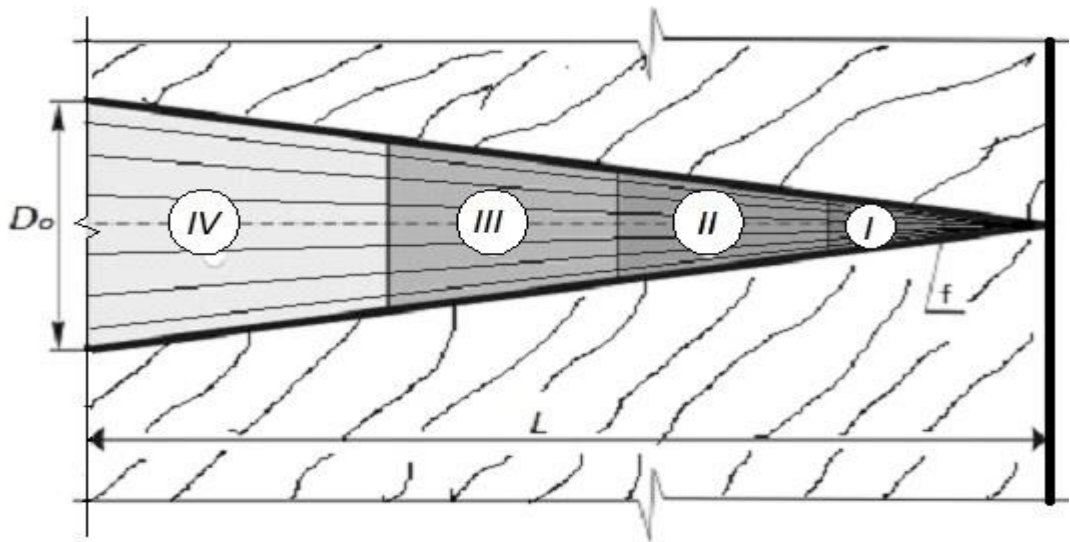


Рис. 3.8. Модель конусообразной струи в пористом материале в разрезе:

$L$  – длина струи;  $(D_0)$  – диаметр распространения струи;  $f$  – угол распространения; I, II, III, IV – зоны, характеризующие поэтапное распространение жидкой фазы в твердой среде

**Обоснование модели распространения жидкой фазы в твердой среде.** При обосновании модели распространения жидкой фазы в твердой среде в первую очередь было уделено внимание проницаемости. Ведь она в пористом материале, характеризует его способность пропускать через себя жидкость под действием приложенного градиента давления. Проницаемость через измеряемые величины, как указывалось ранее, определяется по закону Дарси. Для пористого тела длиной  $l$  с площадью поперечного сечения  $F$  при протекании жидкости вдоль тела проницаемость можно определить по формуле:

$$k = \frac{G \cdot \mu}{[F(\Delta P/l)]}, \quad (3.58)$$

где  $G$  – объемный расход жидкости;  $\Delta P$  – перепад давления на длине образца  $l$ . Проницаемость  $k$  зависит от структуры пористого материала и при ламинарном течении жидкости обычно постоянна и не зависит от расхода. Она имеет размерность площади.

Проведенный анализ (раздел 1.2.) показал, что в зависимости от принятой модели инъекции жидкой фазы в твердую, предлагается тот или иной механизм его взаимодействия. При представлении грунтов как капиллярно-пористых систем основное внимание уделяется процессам и явлениям, которые возникают в порах и пустотах различного размера при распространении в них жидкости. К основным факторам, влияющим на распространение жидкости в системе, отнесены: – влияние давления нагнетания на частицы модельного материала; – гидравлическое давление жидкости и ее миграция к ослабленным местам; – капиллярные эффекты, связанные с изменением давления в зависимости от концентрации жидкости; – осмотические явления, связанные с возникновением градиентов концентрации поровой жидкости; – кристаллизационное давление, возникающее при химических реакциях гидратации. В случае принятия модели фиктивного грунта как двухкомпонентной системы, состоящей из матрицы в которой распределены включения (песок), основное внимание уделяется различию по абсолютным значениям коэффициентов раздвижки зерен материала матрицы и включений.

Анализ макроснимка увлажненного (влажность системы составляет порядка 5-6 % по массе) кварцевого песка (как фиктивная модель) песчаного грунта показал следующее, рис. 3.9. На снимке видно капиллярное взаимодействие мелких частиц песка с крупными. «Прилипшие» частички образуют агрегаты-глобулы, которые в свою очередь строят «арочные» структуры. При этом проникновение жидкой среды под давлением в ее поровое пространство возможно приведет к раздвижке зерен и нарушению их капиллярного взаимодействия.

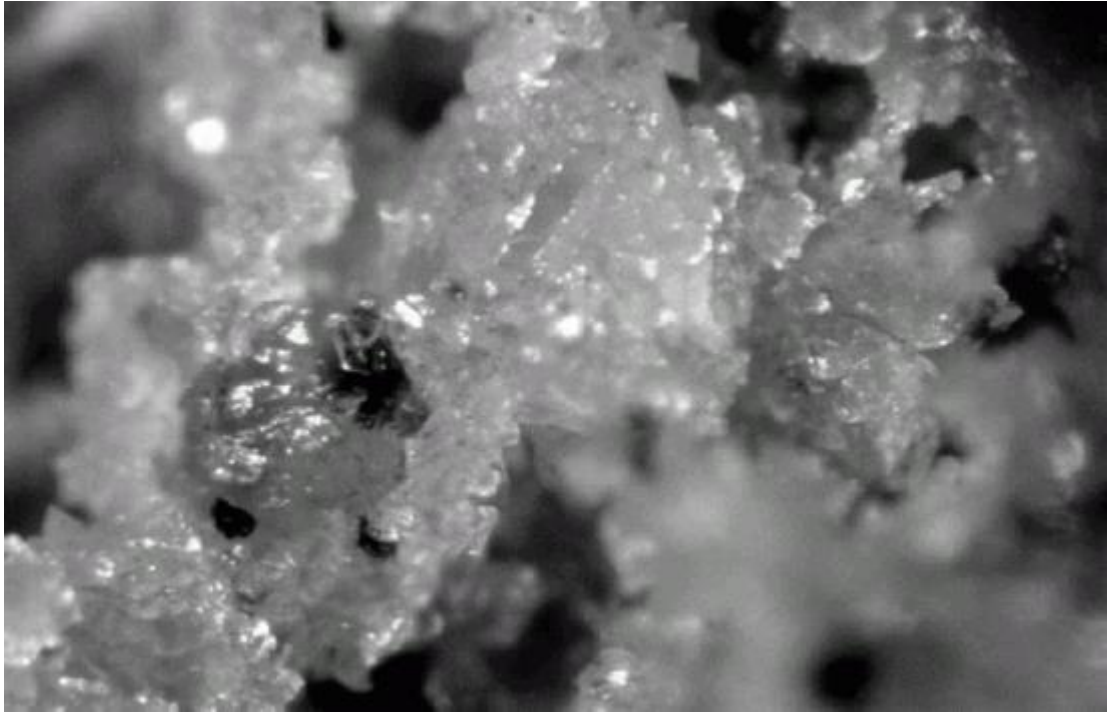


Рис. 3.9. Макроснимок увлажненного кварцевого песка [ ]

В силу того, что сила сцепления между частицами различна из-за разности их размеров, то логично предположить, что в первую очередь струя жидкости будет в большей мере приводить к нарушению связей и большей раздвижки непосредственно возле головки иньектора, т.е. там, где скорость выхода струи максимальная. Это может быть связано с тем, что сила сцепления частиц значительно ниже силы воздействия струи.

Распространение жидкости в твердом теле по времени могут не совпадать по скорости продвижения в зависимости от структуры матричного материала. Это связано с тем, что с увеличением размера частиц твердого материала по мере удаления от иньектора в объем материала скорость распространения снижается, рис.3.10. Кроме того, для структур, состоящих из дискретных блоков, взаимодействующих через внутренние поверхности раздела, коэффициенты диффузионного массопереноса могут изменяться на порядки. Поэтому, в таких случаях, целесообразно говорить не о локальном («ручейковом») механизме массопереноса, а фронте, как достаточно широкой площади, формируемой под действием градиентов скорости струи.

Подобные предположения позволяют расширить представления о распространении струи жидкой фазы при разных давлениях нагнетания ее в объеме твердого тела. В силу того, что в первую очередь при нагнетании в толщу образцов вступают в «работу» частицы твердого вещества, создавая поверхностные явления, то при выборе ее модели будем исходить из предположения, что струя распространяется вглубь материала в виде сжатого конуса. Модель фиктивного грунта с единичной струей в виде конуса, в основании которого эллипс, представлена на рис. 3.11.

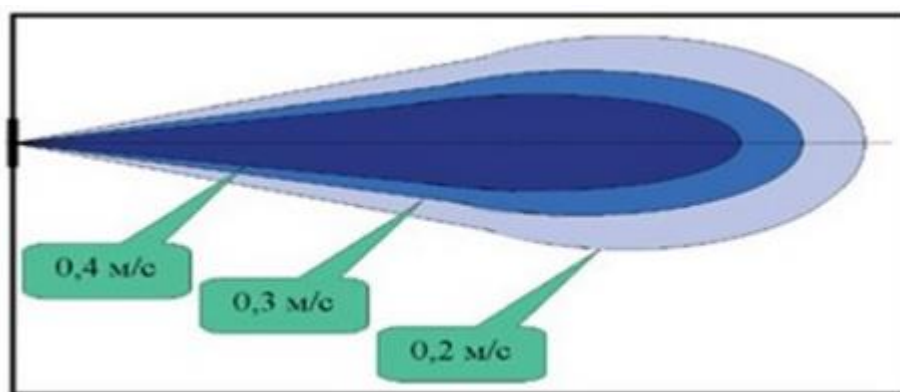


Рис. 3.10. Модель скорости распространения струи в материале

В общем виде коническая поверхность второго порядка опирается на эллипс; в подходящей декартовой координатной системе (оси  $Ox$  и  $Oy$  параллельны осям эллипса, вершина конуса совпадает с началом координат, центр эллипса лежит на оси  $Oz$ ) её уравнение имеет вид:

$$V_{cm} = \frac{1}{3} \pi Rr \cdot H = \frac{1}{3} \pi Ox \cdot Oy \cdot Oz = \frac{1}{3} \pi O_1A \cdot O_1C \cdot OO_1$$

В наиболее общем случае, когда конус опирается на произвольную плоскую поверхность, можно показать, что уравнение боковой поверхности конуса (с вершиной в начале координат) задаётся уравнением, где функция является однородной, то есть удовлетворяющей условию для любого действительного числа  $\alpha$ .

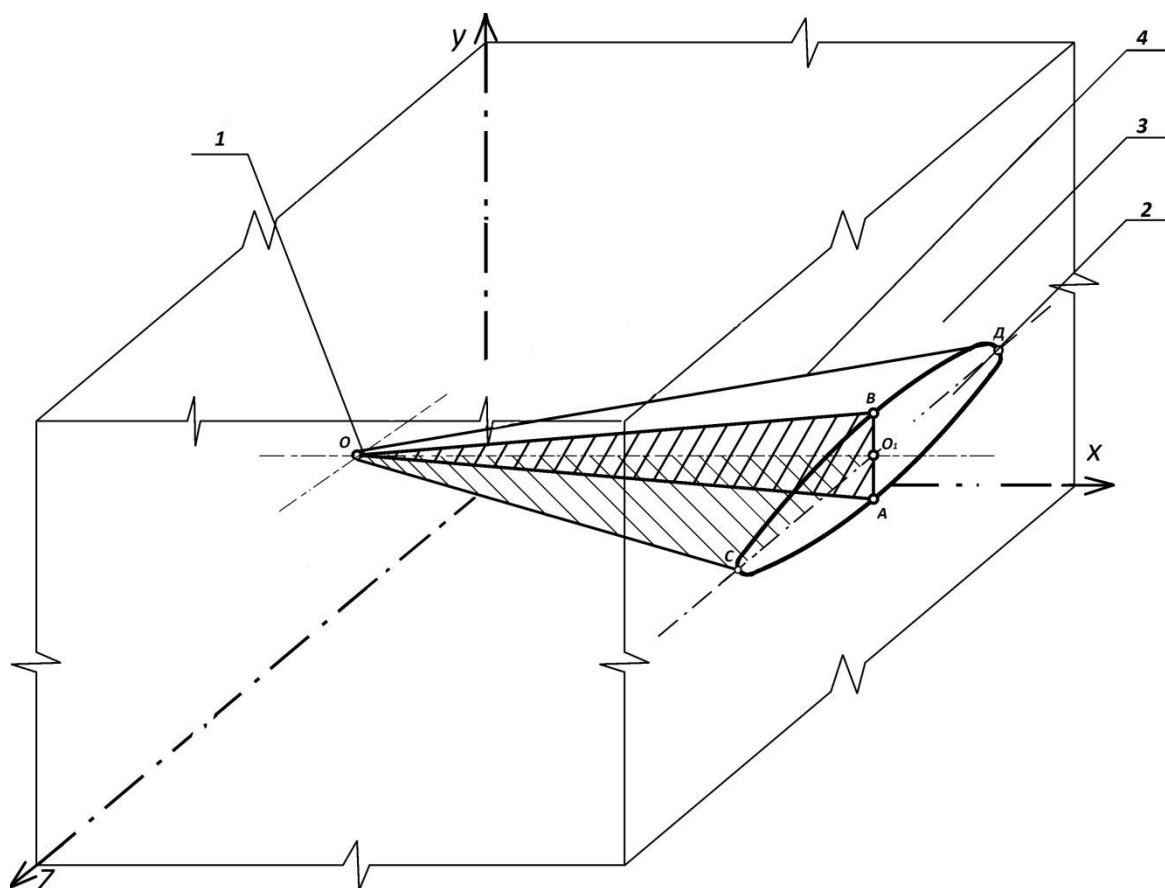


Рис. 3.11. Фрагмент модели материала с распространением струи:  
 1 – (полюс) устье струи; 2 – площадь рассеивания струи; 3 –  
 модельный грунт; 4– внешние границы струи

По принятой в гидродинамике [98,134] терминологией и характеристиками струи в ней присутствуют внешние границы свободной струи, которые характеризуются площадью их поверхности; фронт струи, определяемый его длиной или протяженностью; полюсом струи, оцениваемое радиусом полюса.

На первом этапе анализа примем плоскую (двухмерную) модель струи, которая представляет собой сечение объемной струи, проходящее через ее ось симметрии (АОВ, рис. 3.12).

Таким образом, в качестве модели струи принята двухмерная клиновидная струя, которая характеризуется диаметром распространения ( $d$ ), длиной ( $L$ ), внешними границами (ОА, ОВ) и радиусом полюса, рис. 3.12.

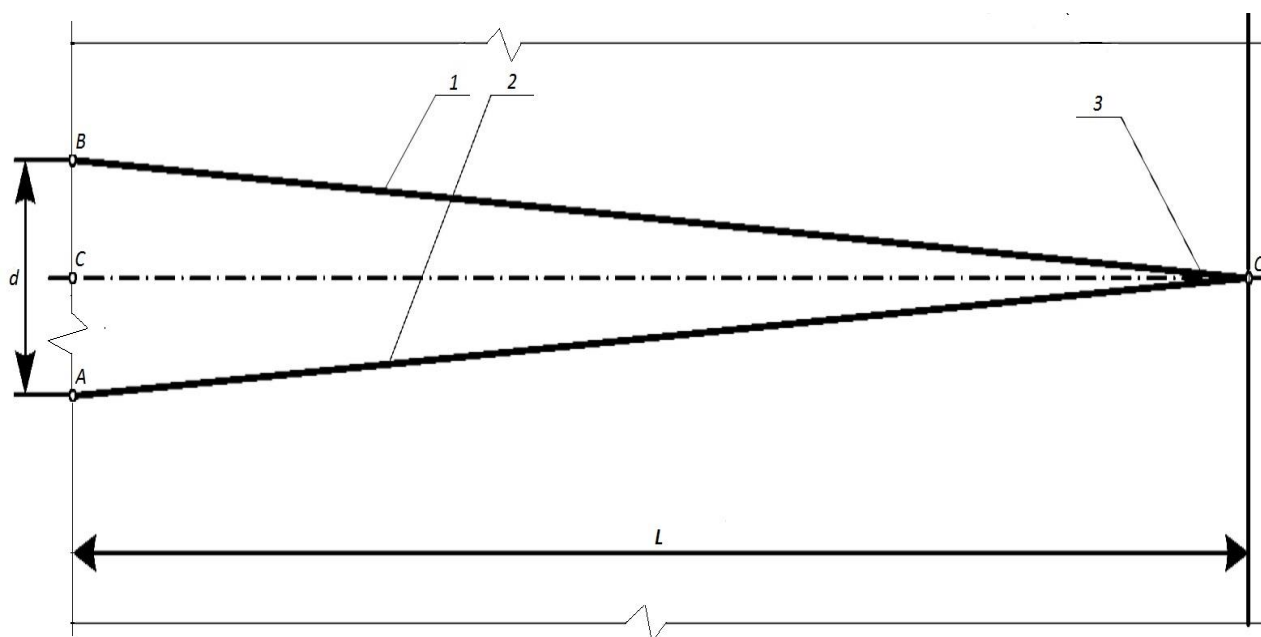


Рис.3.12. Геометрические характеристики модели струи:

1 – материал; 2 – условные границы струи; 3 – устье струи;  
 $d$  – диаметр распространения струи;  $L$  – длина струи.

Примем, что на диаметр распространения струи ( $a$ ) влияет начальная скорость ее истечения. Клиновидная форма струи предполагает, что по ее длине изменяется скорость распространения. Принятая модель струи и схема изменения скорости распространения струи, в зависимости от расстояния от полюса, представлены на рис. 3.13.

В общем случае можно выделить следующие участки по скорости распространения струи

- участок ОЕ, в котором струя имеет скорость, практически равную на выходе из сопла;
- участок ЕГ, в котором струя замедляет скорость распространения вследствие сил трения о поверхность частиц;
- участок ГС, в котором струя практически потеряла начальную кинетическую энергию вода находится в моноадсорбционном состоянии.



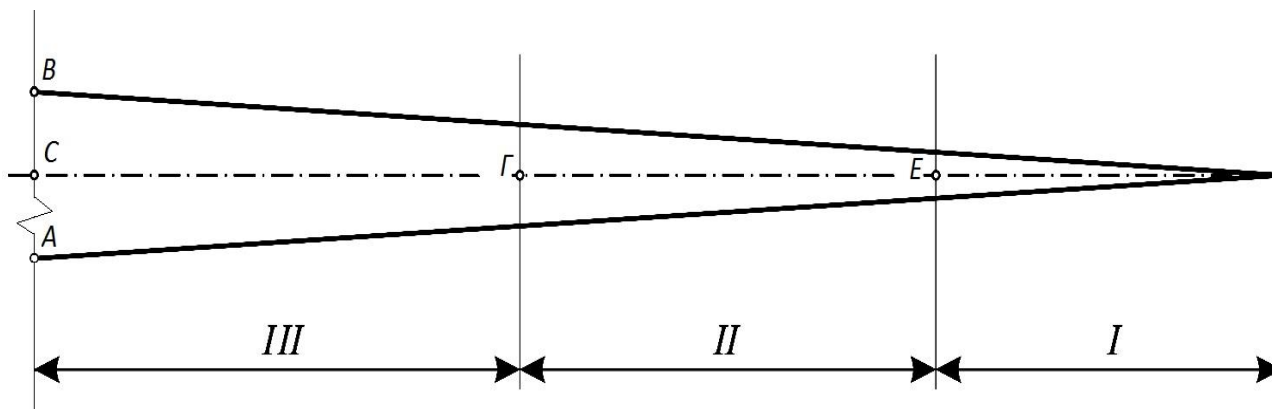


Рис.3.13. Распределение скорости распространения в материале по длине струи в модели струи:

I – участок распространения без изменения скорости первоначального истечения струи;

II – участок распространения струи с замедлением скорости вследствие возникающих сил трения о поверхность частиц в большем объеме;

III – участок распространения струи, в котором она существенно замедляет свою скорость, при этом расширяется в диаметре.

Распределение жидкой фазы в порах твердого тела предполагает, что по мере достижения крайней точки расстояния от иньектора до «конца» струи в предварительно насыщенных водой порах происходит поэтапное изменение состояния иньекционного раствора в зависимости от его начальной скорости истечения и вязкости.

Проведенный анализ позволяет принять для последующего анализа следующие модели распространения струи в модельном грунте:

1. Модель распространения струи в грунте организованных по принципу «жидкость в твердом теле» включает в себя струю иньекции на различных уровнях структурных неоднородностей вследствие ее распространения. Анализ позволил смоделировать струю, которая в зависимости от удаления от иньектора меняет форму распространения и

скорость. К такой струе отнесены струи, распространение которых происходило при давлении  $\text{const}$ .

2. В качестве модели струи принята двухмерная клиновидная струя с фиксированными параметрами. Клиновидная форма струи принята в предположении, что по ее длине в связи с изменением расстояния от инжектора, уменьшается ее скорость, вследствие возрастающего трения о частицы грунта. При этом между противоположными берегами происходит изменения видов связи между частицами грунта. Это предполагает изменение радиуса распространения по длине струи.

*Анализ процессов, возникающих при распространении струи в твердом пористом теле.* Изменение длины и давления струи инъекции в твердом пористом материале должно привести к развитию локальных деформаций и, связанных с ними, изменениям геометрических характеристик начальной струи. В свою очередь изменение геометрических характеристик струи предполагает перераспределение углов распространения струи и скорости в объеме материала и развитие новых (инициированных) локальных деформаций с очередным изменением геометрических характеристик струи. Изменение параметров скорости начальной струи должно привести к изменению распространения ее в объеме материала. В связи с этим представляется важным решения задачи по анализу явлений и процессов, которые происходят при распространении струи в пористом сыпучем материале.

При анализе примем следующие допущения и ограничения:

- струя свободно проходит в материале и приводит к раздвижке частиц его;
- модельный материал рассматривается как пористая система, которая обладает изотропными свойствами и оценивается с позиций непрерывности;
- при изменении геометрических параметров струи не анализируется изменение напряжений и деформаций в окружающем материале;

– не рассматривается струя с небольшим значением скорости истечения. Поскольку в этом случае вследствие превышения сил межчастичных взаимодействий над силами распространения струи наблюдается ламинарное истечение без разрушения структур материала и как следствие направление истечения происходит в сторону от инжектора и вниз от воздействия сил притяжения.

Предположение о способности материала изменять структуру поровых связей при действии на него жидкой фазы, основано на данных о наличии пластической составляющей в общих деформациях строительных материалов при действии внешних нагрузок [13].

Непрерывность материала, в котором распространяется струя, принята в связи с необходимостью его оценки свойствами, принятыми для сплошной среды.

Изменение параметров струи (скорости истечения, давление инъецирования) предполагает перераспределение в окружающей среде напряжений и деформаций, что может привести к увеличению объема занимаемой жидкой фазой. На данном этапе исследований объектом анализа являются процессы, протекающие в объеме материала при воздействии струи жидкости и связанные с ними изменения ее параметров.

По данным [37] объемные деформации грунта меньше деформаций жидкой среды при изменении ее агрегатного состояния. В предположении изотропности свойств деформации, вызванные незначительным давлением жидкой фазы, будут одинаковыми и исключены из рассмотрения.

Основные параметры струи в материале представлены на рис. 3.14.а. Основные размеры струи (длина, диаметр раскрытия) даны в относительных единицах, что позволяет, при сохранении соотношений, рассматривать струю на различных уровнях распространения. Примем, что наибольший объем инъецирующей жидкости занимает третью часть длины моделируемой струи, рис. 3.14.б.

Известно, что при повышенном давлении скорость распространения струи в толще материала формирует фронт уплотненной поверхности. При продвижении фронта изменяется насыщенность жидкой фазы твердыми включениями грунта, что вызывает увеличение его объема. Увеличение объема происходит на участке струи, максимально заполненной твердыми частицами, поскольку сила раздвижки зерен неуплотненного материала меньше, нежели сила трения между слоями жидкой фазы. Анализ начинаем проводить с предположения, что конусообразный объем заполнен жидкой фазой с взвесью. Распределение деформаций в участке модельной струи изучали при помощи графоаналитического метода [68]. При этом принимали, что увеличение объема занимаемого жидкой фазой за определенное время составило 9%. Анализ показал, что скорость струи влияет на геометрию распространения и тем самым оказывает влияние на разность распределения объемных деформаций на различных участках, рис. 3.14.б.

Давление, которое возникает при наполнении пространства жидкой фазой, передается на внешние границы струи, вызывая ее увеличение на величину  $2b(n-1)$ .

Увеличение концентрации жидкой фазы ведет к увеличению площади участка начальной струи в среднем на 30%. Согласно принятым допущениям, увеличение количества жидкой фазы в полости материала может вызвать два возможных случая дальнейшего развития процессов: – первый случай связан с увеличением расстояния от оси струи до ее внешних границ, практически, без увеличения ее длины; – второй случай предполагает увеличение длины струи без значительного увеличения внешних границ струи.

Изменение расстояния от оси до внешних границ может происходить за счет уплотнения структуры в вертикальной плоскости по оси  $y$  на границе «жидкая фаза – твердая среда». При такой схеме распространения струи происходит увеличение ее радиуса полюса (в нашем случае радиус полюса увеличился с 5,5 до 6). Для второго случая характерно изменение длины струи без значительного изменения радиуса ее полюса.

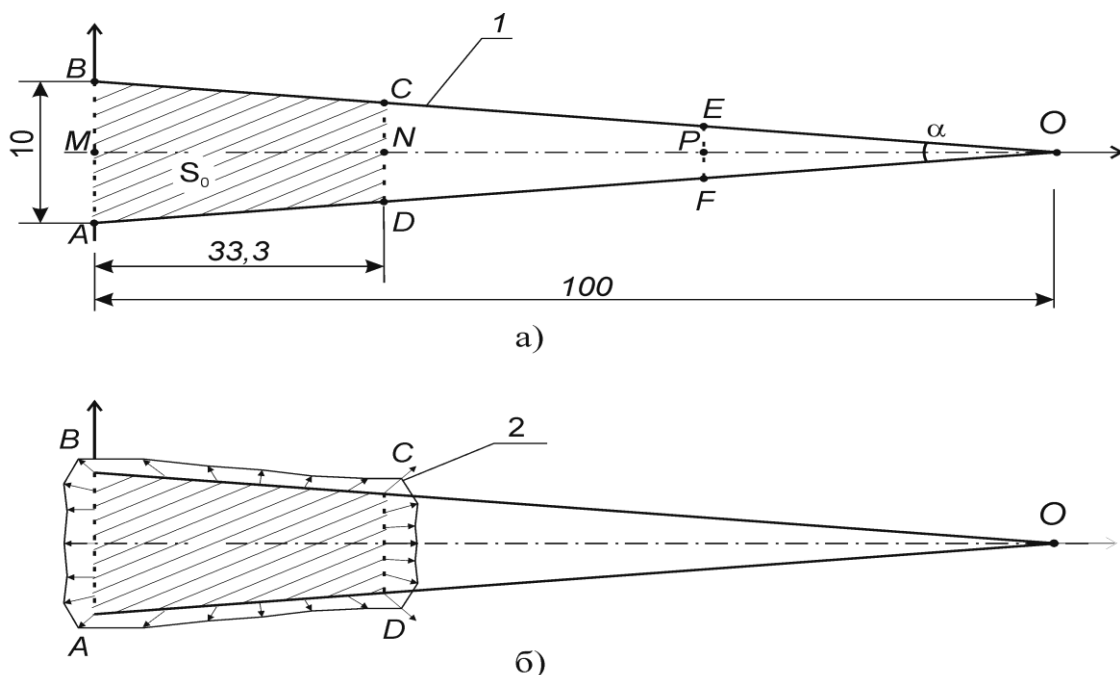


Рис. 3.14. Распределение деформаций при увеличении объема нагнетаемой жидкости за определенное время:

а) основные параметры струи; б) схема распределения деформаций при увеличении объема нагнетаемой жидкости;

1 – внешние границы струи; 2 – относительная величина и направление деформаций при увеличении объема инъецируемой жидкости;  $\alpha$  – радиус устья;  $S_0$  – площадь участка заполненного жидкостью;  $S_1$  – площадь участка струи;  $b$  – увеличение границ струи за время  $\tau = \text{const}$ .

***Анализ механизмов развития струи при внутреннем давлении.***

Процессы, которые происходят в объеме грунта при инъецировании в условиях увеличения объема занимаемой жидкостью, превращают полость в нестабильный структурный элемент материала грунта. Нестабильность распространения струи связана с увеличением ее диаметра и с уменьшением скорости распространения при удалении от полюса. Это создает неравномерное распределение деформаций и напряжений в окружающем материале, что приводит к изменению радиуса инъеции. Сам факт изменения параметров струи является достаточным условием перераспределения деформаций и напряжений в окружающем материале.

Согласно основным положениям гидродинамики, с увеличением расстояния изменяется давление, возникающее в материале. При распространении струи в грунте происходит как внутренне давление на стенки полости, образующиеся в грунте, за счет раздвижки его зерен, так и давление самой толщи грунта на струю. Таким образом, процессы, которые инициируются струей и в струе, провоцируют процессы, которые возникают в материале, в объем которого нагнетается жидкая среда. Это предопределило задачу исследований – анализ механизмов распространения струи при ее воздействии вследствие увеличения объема жидкой фазы.

При анализе процессов, которые возникают, принята модель струи в форме клина (пункт 3.2.1.). Примем, что в результате нагнетания жидкости давление передается на внешние границы струи, рис.3.15.

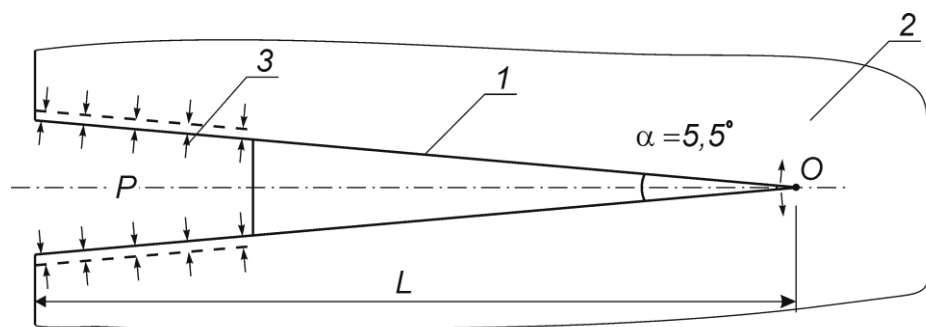


Рис. 3.15. Расчетная схемы давления инъекции:

1 – внешние границы струи; 2 – грунт; 3 – давление струи; 4 – давление грунта

Для изучения влияния давления выходящей струи на перераспределения деформаций и напряжений в пористом материале с моделируемой плоской струей была определена задача изучения влияния давления струи жидкости на поведение материала на физических моделях.

Визуальную качественную картину распределения давления, вызванного струей в материале при увеличении объема жидкой фазы, изучали на модели материала со струей при помощи методов фотоупругости. Данный метод изучения распределения деформаций и напряжений в

материале основан на исследованиях научной школы профессора Вырового В.Н. [ ]. Была принята плоская модель фрагмента материала со струей, рис. 3.16,а.

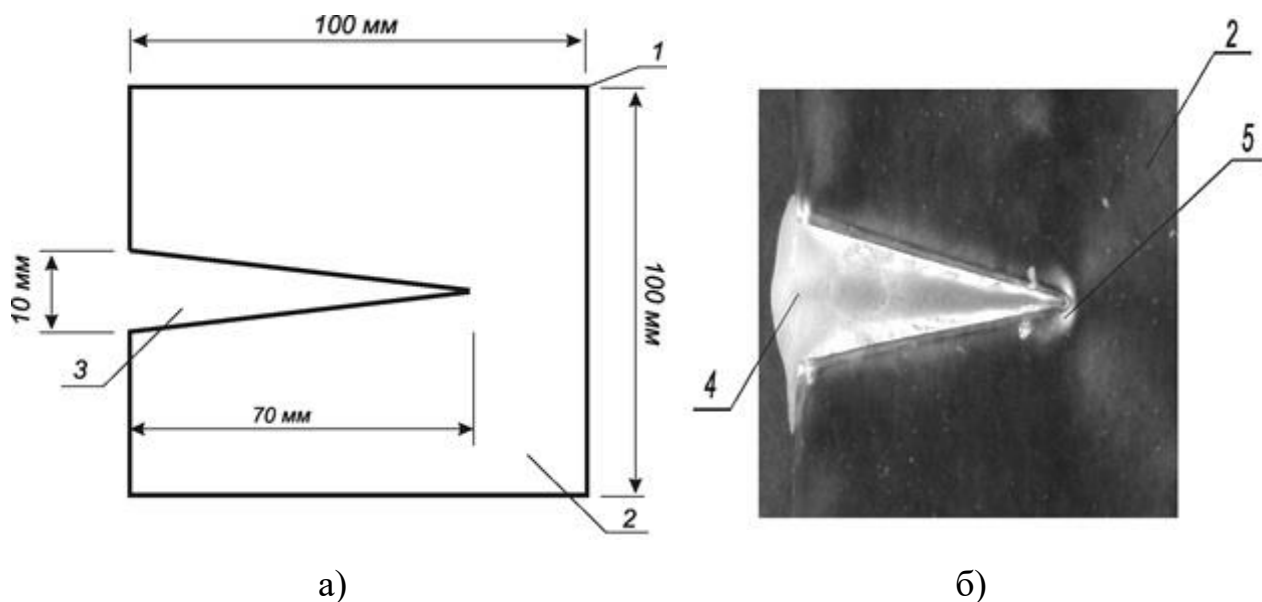


Рис 3.16. Визуализация действия струи, моделируемая давлением льда на распределение деформаций и напряжений в модели:  
 а) образец модели; б) модель образца температуре  $-18^{\circ}\text{C}$ ;  
 1 – общий вид модели со струей; 2 – модельный грунт; 3 – струя; 4 – замерзший в материале лед; 5 – интерферентные полосы

Модель была выполнена из эпоксидной смолы типа ЭД-16 с отвердителем ПЭПА. Условная струя создавалась путем заложения имитатора клиновидной формы при формовании модели. Формование моделей происходило одновременно путем их заливки одним и тем же составом эпоксидной смолы с отвердителем. После затвердевания эпоксидной смолы имитатор клиновидной струи извлекался и образовавшийся объем заполнялся водой. Модели помещались в холодильную камеру в которой температура поддерживалась  $T=-18^{\circ}\text{C}$ . При этой температуре модель выдерживалась в течение одного часа, после чего извлекалась и фотографировались в поляризованном свете. На рис.3.16.б,

представлена качественная картина распределения деформаций и напряжений в сохранившейся модели материала с трещиной.

Анализ распределения интерферентных полос показал, что по мере снижения температуры изменяется характер распределения деформаций в модели. При  $T=-18^{\circ}\text{C}$  наблюдается изменение деформаций вдоль внешних границ струи и внутри нее (рис.3.16.б). По мере снижения температуры происходит такое перераспределение деформаций и напряжений, при которых они начинают концентрироваться у полюса, рис.3.16. Наблюдается известное явление [98] релаксации деформаций и напряжений вдоль внешних границ струи с их концентрацией у полюса (O).

Интересно отметить, что такой процесс моделирования с помощью образца, выполненного на основе эпоксидной смолы, характеризует не только распределение деформаций в материале, но и отражает сам процесс распространения струи в материале, что отчетливо видно при сравнении рисунков 3.1 и 3.2.

### **Выводы по разделу 3**

1. Распространение жидких растворов, составленных на основе высокомолекулярных соединений, относящихся к ньютоновским жидкостям, в пористой среде грунта имеет ламинарный характер и подчиняется закону Дарси. Ламинарная фильтрация зависит от гранулометрического состава грунта и вязкости раствора. Касательные напряжения вязких ньютоновских жидкостей определяются уравнением Ньютона. При изучении фильтрации применяется статистический метод с допущением, что гидродинамическая фильтрация осуществляется на идеальном или фиктивном грунте.

2. На основании теоретических предпосылок можно заключить, что инъ-ектирование раствора в грунты может осуществляться при постоянных: давлении, расходе и скорости распространения раствора. Общепринятым считается режим, при котором нагнетание раствора осуществляется при постоянном давлении. Рассмотрены три задачи распространения раствора в



пористой системе грунта: в виде совокупности параллельных линий (одномерная задача), в виде радиальных линий (плоско-радиальная задача), в виде сферических областей пропитки (сферическая задача). Решение каждой задачи обуславливает определение радиуса распространения раствора с учетом технологических параметров нагнетания, фильтрационных свойств грунта, плотности и вязкости раствора. Впервые эти задачи были сформулированы д.т.н., проф. Горбуновым Б. П.

3. Учитывая разницу давлений внутри иньектора и на периферии распространения раствора, была предложена формула для определения коэффициента гидравлических потерь с учетом конструктивных параметров иньектора. Введение этого коэффициента в выражение для определения радиуса распространения раствора позволило скорректировать формулу, выведенную для плоско-радиального источника, с помощью которой стало возможным определять радиус с достоверной точностью.

## РАЗДЕЛ 4

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ИНЪЕКЦИОННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО ЭКРАНА

#### 4.1. Результаты определения технологических параметров

##### горизонтального инъецирования грунта на основе бентонитовых глин

В настоящем разделе показаны результаты проведённых исследований по определению технологических параметров горизонтального инъецирования грунта на основе бентонитовых глин.

Следует заметить, что, несмотря на значительные различия в методике проведения, а также отличия в ожидаемых результатах, при анализе результатов двух серий экспериментов был использован единый математический аппарат. В первой серии испытаний использован сокращённый 15-точечный план полиномиальной модели третьей степени, во второй и третьей – 9-точечный полный факторный план модели второй степени.

Переход от натуральных к кодированным переменным при расчете ЭС-моделей выполнялся по типовой формуле [8,9,13]:

$$x_i = \frac{X_i - \frac{X_{i,\max} + X_{i,\min}}{2}}{\frac{X_{i,\max} - X_{i,\min}}{2}} \quad (4.1)$$

Расчет ЭСмоделей выполнялся с учетом принятой ошибки эксперимента. Двухсторонний риск задавался на типовом уровне 10% ( $\alpha=0.1$ ). С учетом заданного риска проводилась проверка гипотез об отличии оценок коэффициентов рассчитанных моделей от нуля. При проверке гипотезы о равенстве полученных коэффициентов нулю использовался критерий Гаусовской точности. Оценки коэффициентов  $b_i$ , которые по результатам проверки были неотличимы от нуля, последовательно

исключались из ЭС-модели. После этого модель со всеми значимыми оценками коэффициентов проверялась на адекватность по критерию Фишера (F). Если данный критерий меньше критического для заданного риска с учетом полученного числа степеней свободы, т.е.  $F_a < F_{кр}(\alpha, f_{на}, f_э)$ , то модель принималась для инженерных решений и анализа. Построение и статистический анализ ЭС-моделей выполнялся с применением разработанной в Одесской государственной академии строительства и архитектуры диалоговой системы COMPEX-99 [8,16].

В первой серии экспериментов была поставлена задача изучить закономерности влияния параметров инъецирования на характер распространения инъецируемого раствора в грунтовой толще. В качестве исследуемых факторов, которые влияют на показатель противofильтрационных свойств грунта (коэффициент фильтрации) были выбраны:

- концентрация бентонитового порошка в инъецируемом растворе;
- давление подачи раствора;
- время инъецирования.

Данные технологические параметры были выбраны в качестве варьируемых факторов для построения ЭС-модели. При этом показателем принят коэффициент фильтрации проинъецированного грунта, как физическая характеристика, непосредственным образом показывающая противofильтрационные свойства образуемого защитного экрана.

В таблице 4.1. показаны результаты экспериментальных исследований, в которых для каждой из комбинации факторов получено восемь значений коэффициента фильтрации в зависимости от удаления от сечения ввода раствора. При анализе полученных данных возникла задача корректным образом отобразить характер изменения показателя от факторов безотносительно места замера исследуемого значения. Для этого была использована методика исключения величин коэффициента фильтрации,

неудовлетворяющих критериям достоверности, с последующим расчётом среднего арифметического значения.

Учитывая, что каждый из пятнадцати массивов данных представляет собой выборку небольшого объёма, в качестве критерия исключения незначимых величин был использован метод вычисления максимального относительного отклонения.

Таблица 4.1

## Результаты экспериментов по исследованию режимов инъецирования.

Номер по плану	Условия проведения опытов			Коэффициент фильтрации, м/сут, на расстоянии от места ввода раствора, м.							
	X1, г/л.	X2, атм.	X3, мин.	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
1	70	5	110	0,39051	0,51204	0,43543	0,35881	0,33359	0,37630	0,35989	0,34348
2	70	5	10	0,17821	0,25868	0,24225	0,22583	0,30942	0,39301	0,33691	0,20999
3	70	2	110	0,22756	0,22213	0,17415	0,18912	0,22068	0,25868	0,21850	0,17832
4	10	5	110	0,07879	0,08495	0,08277	0,08059	0,07842	0,07972	0,05891	0,05796
5	70	2	10	0,39305	0,40308	0,35957	0,35186	0,38291	0,43370	0,48450	0,53529
6	10	5	10	0,43981	0,12195	0,11240	0,06218	0,07970	0,07846	0,06856	0,10572
7	10	2	110	4,32965	2,03342	1,46964	0,90585	0,23004	0,23962	0,48639	0,23962
8	10	2	10	0,08980	0,11032	0,09294	0,18269	0,55668	0,51230	0,53535	0,53258
9	70	3	60	0,05640	0,24341	0,69773	0,22235	0,05640	0,58442	0,22692	0,66330
10	10	3	60	0,40503	0,27732	0,25611	0,23490	0,23989	0,29878	0,35766	0,32220
11	40	5	60	0,19004	0,13982	0,12558	0,11134	0,12246	0,14493	0,17498	0,23521
12	40	2	60	0,14693	0,10786	0,08526	0,08793	0,09060	0,07322	0,06727	0,05913
13	40	3	110	0,13200	0,18599	0,15531	0,13536	0,16469	0,16618	0,11720	0,11683
14	40	3	10	0,08761	0,21526	0,20527	0,19689	0,16333	0,12978	0,14129	0,14158
15	40	3	60	0,08869	0,05218	0,03737	0,04827	0,04168	0,03509	0,05180	0,02692

Отсеивание грубых погрешностей проводилось по следующему алгоритму [23], приведенному ниже:

1. Определение среднего значения:  $X_{cp} = \Sigma X_i / n$

2. Определение среднеквадратичного отклонения:  $S = \sqrt{\frac{\Sigma (X_i - X_{cp})^2}{n-1}}$

3. Нахождение статистики:  $\tau = \frac{|X_i - X_{cp}|}{S}$

где  $X_i$  - крайний (наибольший и наименьший) элемент выборки, по которой подсчитывались оценки среднего значения  $X_{cp}$  и среднеквадратичного отклонения  $S$ .

4. Сравнение найденной статистики с табличным значением  $\tau \leq \tau_\alpha$ ,  $\tau_\alpha$  - табличное значение статистики  $\tau$ , вычисленной с доверительной вероятностью.

Если неравенство  $\tau \leq \tau_\alpha$  справедливо, то наблюдение не отсеивают, если не справедливо – исключают. После отсеивания предполагается повторить процедуру расчёта столько раз, сколько потребуется для исключения всех грубых погрешностей. Однако данным требованием было решено пренебречь вследствие значительного естественного разброса данных в каждой выборке из-за нетривиального характера распространения раствора в инъецируемой толще и провести одну итерацию приведённого алгоритма, после чего рассчитать среднее арифметическое выборки.

После всех необходимых преобразований была составлена матрица эксперимента (табл. 4.2), где показаны полученные значения показателя, а также натурные и нормализованные значения варьируемых факторов. При нормализации был учтён тот факт, что используемый для нагнетания раствора насос не позволяет выдерживать дробные значения фактора давления, что в свою очередь, привело к его коррекции до значения  $P = 3$  атм. ( $X_2 = -0,33(3)$ ). При этом была построена более адекватная математическая модель.

Матрица эксперимента по исследованию режимов инъецирования.

Номер по плану	Значения факторов						Коэффициент фильтрации, м/сут.
	Натурные			Нормализованные			
	Концентрация бентонита, г/л	Давление инъецирования, атм	Время инъецирования, мин	X1	X2	X3	
1	70	5	110	1	1	1	0,37114
2	70	5	10	1	1	-1	0,26929
3	70	2	110	1	-1	1	0,21114
4	10	5	110	-1	1	1	0,07526
5	70	2	10	1	-1	-1	0,40124
6	10	5	10	-1	1	-1	0,08985
7	10	2	110	-1	-1	1	0,80065
8	10	2	10	-1	-1	-1	0,36041
9	70	3	60	1	-0,33(3)	0	0,34387
10	10	3	60	-1	-0,33(3)	0	0,29899
11	40	5	60	0	1	0	0,15554
12	40	2	60	0	-1	0	0,08977
13	40	3	110	0	-0,33(3)	1	0,14669
14	40	3	10	0	-0,33(3)	-1	0,17049
15	40	3	60	0	-0,33(3)	0	0,04775

По результатам расчёта в программном комплексе COMPEX-99 [23]

была получена следующая экспериментально-статистическая модель:

CompEx 2009.01. Copyright (c) BoNi Software 1990

Результаты расчёта модели: Koeff\_filtrazii

Уровень риска = 0.200

Критерий Studenta = 1.282

Ошибка эксперимента (Ts)э = 0.114

N	Коэффициенты	Ts
1	b0 = 0.081 (	0.139 )
2	b1 = 0.005 (	0.017 )
3	b2 = -0.090 (	0.285 )
4	b3 = 0.030 (	0.095 )
5	b11 = 0.192 (	0.307 )
6	b22 = 0.026 (	0.036 )
7	b33 = 0.029 (	0.046 )
8	b12 = 0.123 (	0.352 )
9	b13 = -0.064 (	0.182 )
10	b23 = -0.016 (	0.047 )

NКоэффициентыTs

1	b0 = 0.105 (	0.232 )
2	b12 = 0.123 (	0.352 )
3	b2 = -0.087 (	0.281 )
4	b13 = -0.064 (	0.182 )
5	b11 = 0.212 (	0.386 )

NYEYDELTDDELTT\*\*2

1	0.371	0.287	0.084	0.007
2	0.269	0.416	-0.147	0.022
3	0.211	0.217	-0.006	0.000
4	0.075	0.170	-0.095	0.009
5	0.401	0.345	0.056	0.003
6	0.090	0.042	0.048	0.002
7	0.801	0.591	0.210	0.044
8	0.360	0.462	-0.102	0.010
9	0.344	0.305	0.039	0.002
10	0.299	0.386	-0.087	0.008
11	0.156	0.017	0.138	0.019
12	0.090	0.192	-0.102	0.010
13	0.147	0.134	0.013	0.000
14	0.170	0.134	0.037	0.001
15	0.048	0.134	-0.086	0.007

Суммы по строкам            -0.000    0.145  
 Число степеней свободы эксперимента            10  
 Ошибка эксперимента            0.0891  
 Дисперсия неадекватности    0.0145  
 Ошибка неадекватности        0.1205  
 Критерий Fisher =    1.8300  
 Критерий Fkr =    1.8300  
 Kzm = 1.000    NSe = 0.089



Также были рассчитаны экстремумы данной модели, имеющие вид:

Ymin =	0.024	Ymax =	0.591
	Xmin		Xmax
1	-0.441		-1.000
2	1.000		-1.000
3	-1.000		1.000

Таким образом, была получена ЭС-модель с пятью значимыми коэффициентами (ошибка эксперимента  $S_3=0,0891\text{м/сут.}$ ):

$$\begin{aligned}
 \text{КФ (м/сут)} = & 0.105 \bullet + 0.212 x_1 x_2 + 0.123 x_1 x_2 - 0.064 x_1 x_3 \\
 & - 0.087 x_2 + \bullet \bullet \\
 & \bullet + \bullet
 \end{aligned}$$

В данной записи коэффициенты, признанные неотличимыми от нуля, выделены точками.

Рассмотрим ранжирование степени влияния варьируемых факторов на показатель. Согласно рисунку 3.1, полученному с помощью программных средств COMPEX-99, отметим, что степени влияния факторов в зоне максимума и минимума различны, хотя характер их ранжирования одинаков.

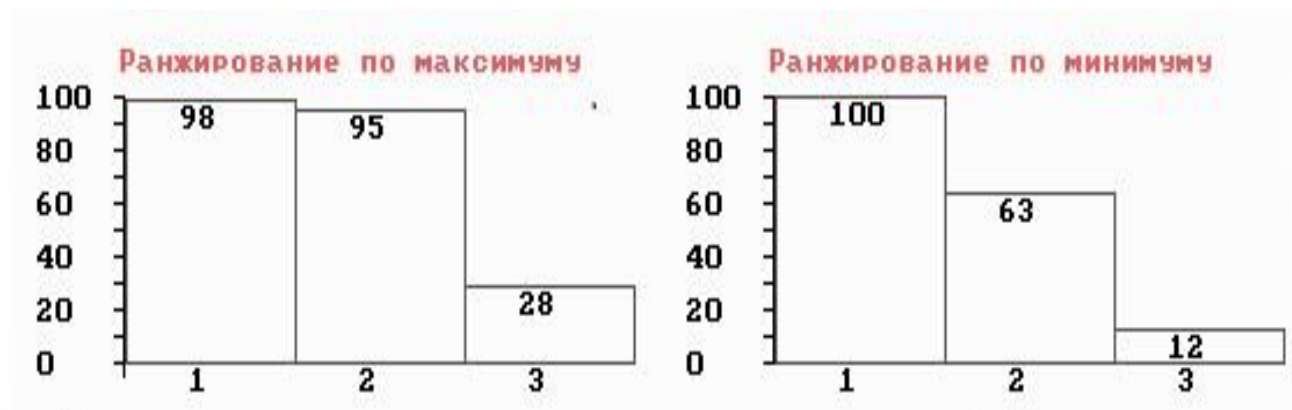


Рис. 4.1. Ранжирование влияния варьируемых факторов на показатель коэффициента фильтрации.

В зоне максимума наибольшим влиянием на коэффициент фильтрации обладают два фактора в примерно одинаковой степени: концентрация бентонитового порошка в растворе и давление его подачи. При этом время инъекции не играет столь значительной роли на изменения показателя. В зоне минимума влияние состава раствора является наиболее значительным, при этом степень влияния давления инъецирования несколько снизилась. Степень значимости фактора времени в данном факторном пространстве снизилась до пределов, не являющихся значимыми с инженерной точки зрения.

Данные показания ранжирования можно интерпретировать следующим образом:

- Концентрация бентонита в растворе играет наибольшую роль по следующим причинам: условия проведённых экспериментов дали возможность наиболее полным образом изучить данную зависимость в рамках выбранного факторного пространства, что подтверждается характером графика, показанного на рис.4.2; состав раствора действительно играет одну из важнейших ролей при устройстве защитных противофильтрационных экранов.

- С физической точки зрения, степень влияния давления на противофильтрационные свойства является достаточно высокой, так как давление подачи раствора прямым образом влияет на количество действующего вяжущего в инъецируемой толще.

- Фактор длительности инъецирования не отыгрывает значительной с инженерной точки зрения роли на исследуемый показатель в рамках выбранных условий эксперимента.

На рисунке 4.2 показаны графики зависимости показателя от каждого из варьируемых факторов.

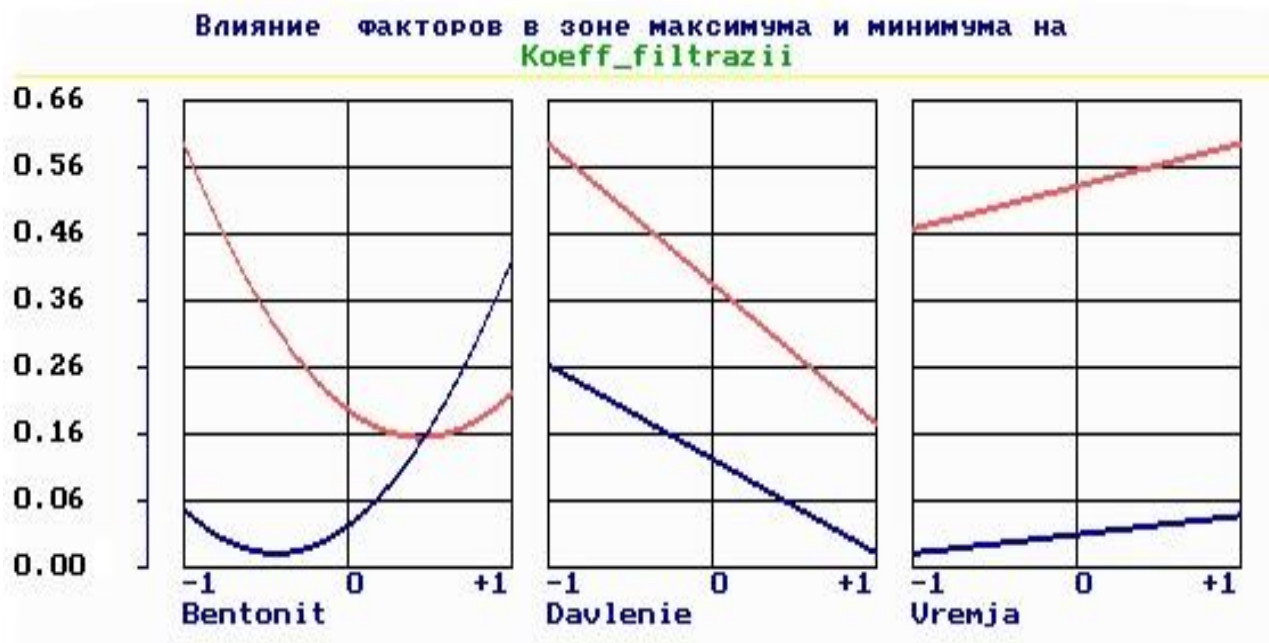


Рис. 4.2. Графики зависимости показателя от факторов.

Характер графика зависимости коэффициента фильтрации от концентрации бентонита можно назвать близким к параболическому. При этом, экстремум данной кривой ярко выражен и находится в пределах  $X_1 = (-0,4; -0,5)$  в зоне минимумов, тогда как для зоны максимумов он находится в пределах  $X_1 = (+0,6; +0,7)$ . Можно заявить, что для условий, принятых при проведении экспериментов, удалось выявить оптимальные условия насыщенности инъекционного раствора основным вяжущим. При переводе в натурные показатели, в зоне минимумов наиболее эффективным окажется раствор с количеством бентонита 22 - 25 г/л., в зоне максимумов – 58 – 61 г/л.

Вязкость раствора с содержанием бентонитового порошка около 25 г/л. равна 34 сек., 60 г/л. – 39,5 сек.. Значения, что является допустимыми по условию проницаемости в грунтовой толще. Следует заметить, что для получения защитных экранов с повышенными требованиями по водонепроницаемости и долговечности могут потребоваться составы, содержащие различные комбинации действующих веществ, что может привести к повышению вязкости раствора. Несмотря на то, что значения

коэффициента фильтрации, полученные с помощью состава с повышенной вязкостью, менее благоприятны, использование таких растворов может оказаться оправданным, так как многокомпонентные смеси могут компенсировать ухудшенные показатели распространяемости улучшением водонепроницаемости. Условия, необходимые для проникновения более вязкого раствора, будут рассмотрены ниже.

Зависимость коэффициента фильтрации от давления подачи раствора является обратно пропорциональной. Угол наклона прямой к горизонтали достаточно острый, следовательно, можно предположить, что полученные точки принадлежат кривой параболического характера с пиком, не вошедшим в данное факторное пространство. При этом, использованные значения давления не являются наибольшими возможными с технической точки зрения, и могут быть скорректированы в сторону увеличения при проведении дальнейших исследований.

Характер влияния длительности инъецирования на значения рассматриваемого показателя является прямо пропорциональным. Пределы изменения коэффициента фильтрации являются достаточно малыми при значительном варьировании временем подачи раствора в лабораторный стенд, поэтому можно заключить, что закономерность, следующая из полученных зависимостей, является недостаточно значимой с инженерной точки зрения. Однако, в натуральных условиях, бо́льшая длительность инъецирования несомненно влияет на показатели коэффициента фильтрации защитной завесы в сторону их уменьшения. Причиной данного несоответствия могут выступать несовершенные условия проведения экспериментов.

Характеры зависимостей, полученные в зоне максимумов и минимумов, близки, следует заметить, что в рамках данного исследования необходимо принимать за значимые те зависимости и показания, которые получены в зоне минимумов. Так как конечной целью экспериментов является определение условий, при которых коэффициент фильтрации

устраиваемого защитного экрана будет удовлетворять заданным условиям по водонепроницаемости, по крайней мере, будет минимальным.

Отмеченные выше закономерности можно наблюдать в комплексе на рисунке 3.3, на котором показаны изоповерхности изменения показателя от варьируемых факторов в выбранном факторном пространстве.

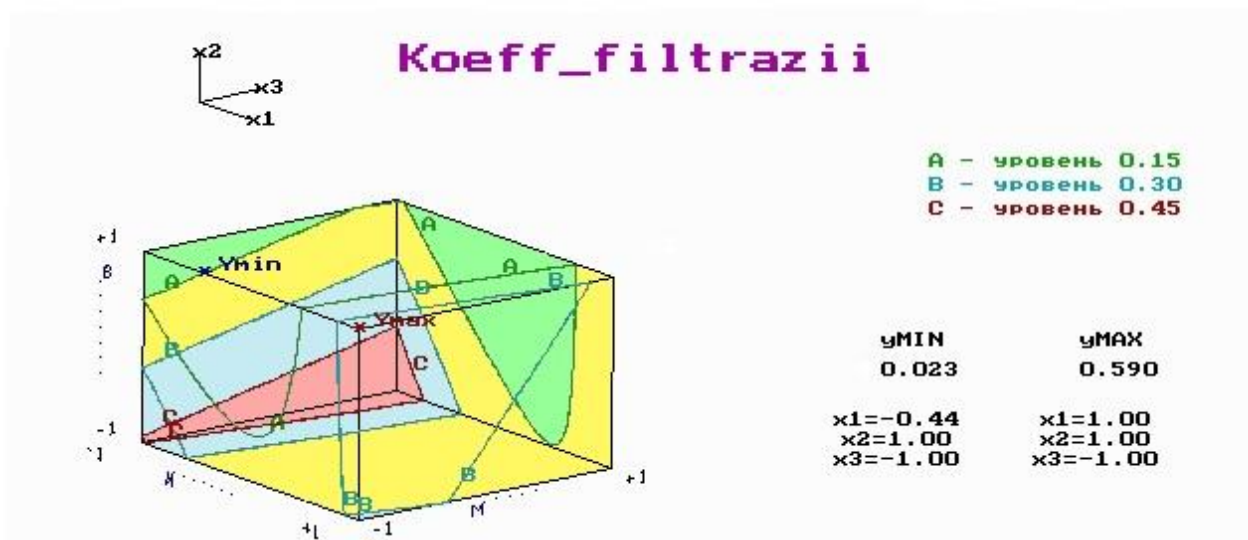


Рис. 4.3. Изоповерхности значений коэффициента фильтрации при изменении варьируемых факторов.

Под изоповерхностью понимают плоскость, на которой находятся равные значения функции отклика. Минимальное значение коэффициента фильтрации получено при следующей комбинации факторов:  $X_1 = -0,44$ ;  $X_2 = +1$ ;  $X_3 = -1$ , что соответствует концентрации бентонита 23,5 г/л., давлению 5 атм. и времени инъецирования 10 мин. Максимальное значение коэффициента фильтрации получено при следующей комбинации факторов:  $X_1 = +1$ ;  $X_2 = +1$ ;  $X_3 = -1$ , что соответствует концентрации бентонита 70 г/л., давлению 5 атм. и времени инъецирования 10 мин. Необходимо отметить, что на существенные изменения значения функции отклика наибольшее влияние оказал фактор  $X_1$  – концентрация бентонитового порошка в растворе, в то время как два других фактора остались неизменными. Это свидетельствует о возможных неточностях

выбора пределов варьирования факторов, которые необходимо скорректировать при проведении дальнейших исследований.

В ходе анализа полученных экспериментально-статистических данных было высказано предположение о том, что существует неочевидная связь между используемой концентрацией вяжущего в растворе и давлением инъецирования. Действительно, с физической точки зрения, для успешного прохождения в инъецируемой толще, раствор, имеющий различную вязкость, требует разные значения рабочего давления инъекции: для состава большей вязкости необходимо меньшее давление во избежание эффекта гидроразрыва грунтовой толщи плотным раствором и осаждения большей части действующего вещества в отдельных «гнездах» на небольшом от инъектора расстоянии; для менее вязкого состава обоснованным выглядит применение высоких значений давления с тем, чтобы «продавить» достаточное количество вяжущего на как можно большее расстояние от места ввода раствора.

Проанализируем обоснованность данного предположения следующим образом: на основе полученной ЭС-модели с помощью программы Excel построим графики зависимости показателя от двух факторов с фиксацией третьего на определённом значении. Коэффициент фильтрации грунта, точнее, его минимальное значение при варьировании исследуемых показателей находится в пределах от 0.01 до 0.42.

Рисунки 4.4, 4.5, 4.6 содержат графики зависимости коэффициента фильтрации от концентрации вяжущего в растворе и давления инъецирования с фиксацией значений времени ввода состава.

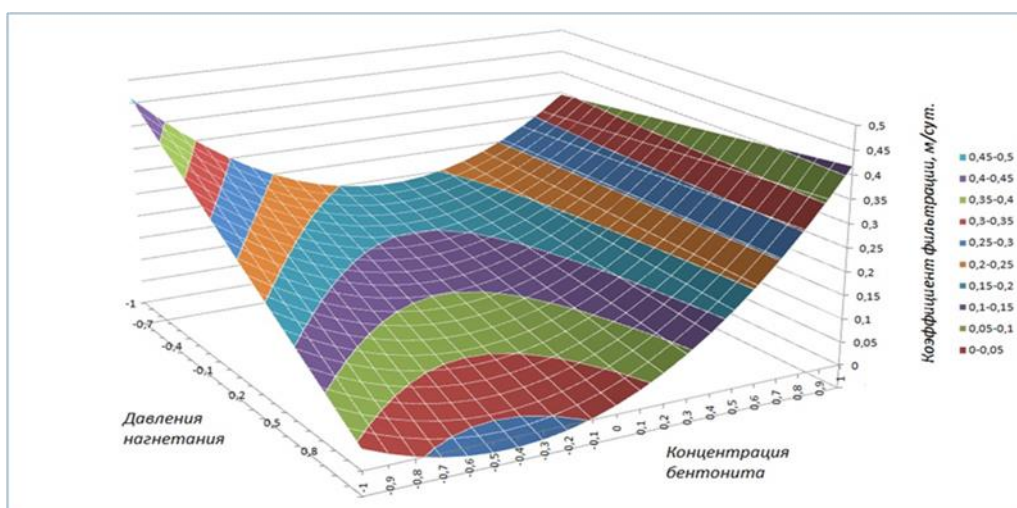


Рис. 4.4. График зависимости исследуемого показателя от факторов X1 и X2 с фиксацией значений фактора X3=10 мин.

Анализируя графики, можно заметить, что все они представляют собой поверхности, близкие к параболическим. Наиболее показательным является график №1 на рис. 4.4. На нём зона минимумов образуется при наибольших значениях давления, зона максимумов – при наименьших. В зоне минимумов экстремум кривой наблюдается при значении концентрации бентонита  $X_2 = (-0,5; -0,4)$ , в зоне максимумов – при значении  $X_2 = (0,1; 0,2)$ .

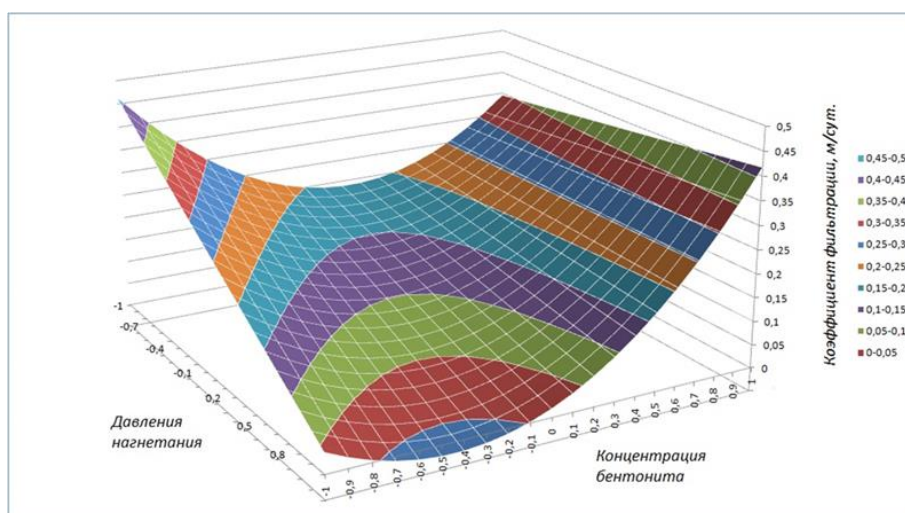


Рис. 4.5. График зависимости исследуемого показателя от факторов X1 и X2 с фиксацией значений фактора X3=60 мин.

Таким образом, в случае кратковременной инъекции, при наибольшем давлении наиболее оптимальным следует признать раствор концентрации 22-25 г/л., при наименьшем – 43-46 г/л., при этом менее вязкий раствор более эффективен. При увеличении времени инъектирования экстремумы кривых как в зоне максимумов, так и в зоне минимумов смещаются в сторону большей концентрации бентонита, а влияние давления снижается. С физической точки зрения данный эффект можно объяснить тем, что большее время инъекции компенсирует недостаток давления и избыточную вязкость раствора.

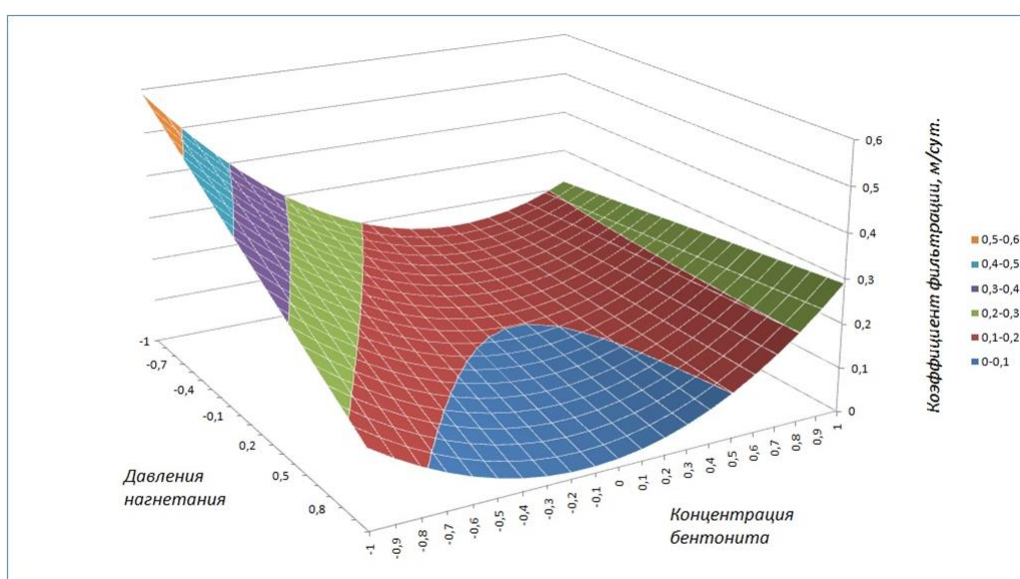


Рис. 4.6. График зависимости исследуемого показателя от факторов X1 и X2 с фиксацией значений фактора X3=110 мин.

Рассмотрим таблицу 4.3. В ней показаны величины коэффициента фильтрации, усреднённые для каждого эксперимента по методике, принятой выше. Посредством ранжирования данных значений по нисходящей, можно проанализировать, какие условия являются наиболее оптимальными для получения низких значений коэффициента фильтрации в условиях лабораторного стенда.

Отметим, что согласно оптимизированному плану, было проведено 5 экспериментов, содержащих значение фактора концентрации бентонита в



растворе на уровне 40 г/л. При этом большинство из них было проведено при рабочих давлениях, равных  $X_2 = (-1; -0,33(3))$ . Данные эксперименты показали усредненные значения коэффициента фильтрации на самом низком уровне. Также низкими значениями коэффициента фильтрации отличаются эксперименты, в которых были использованы комбинации низкой вязкости раствора и высокого давления относительно пределов факторного пространства. Эксперименты, в которых высокая вязкости раствора и малое давления, показали значения коэффициента фильтрации несколько выше. Наконец, наименее благоприятными оказались комбинации высокого содержания бентонита в растворе и большого давления; малого насыщения раствора бентонитовым порошком и малого давления. Несоответствия расстановки экспериментов выявленным зависимостям можно отнести на счёт корректирующего влияния фактора  $X_3$  – времени инъецирования.

Проанализируем графики, представленные в рисунке 4.7, 4.8, 4.9. Данные графики получены с помощью фиксации фактора  $X_2$  (рабочего давления) на различных значениях в пределах факторного пространства.

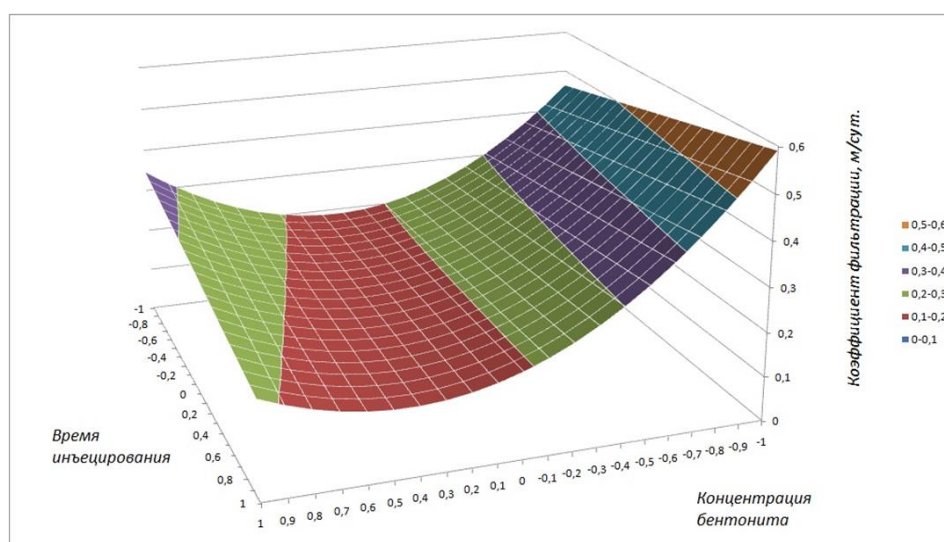
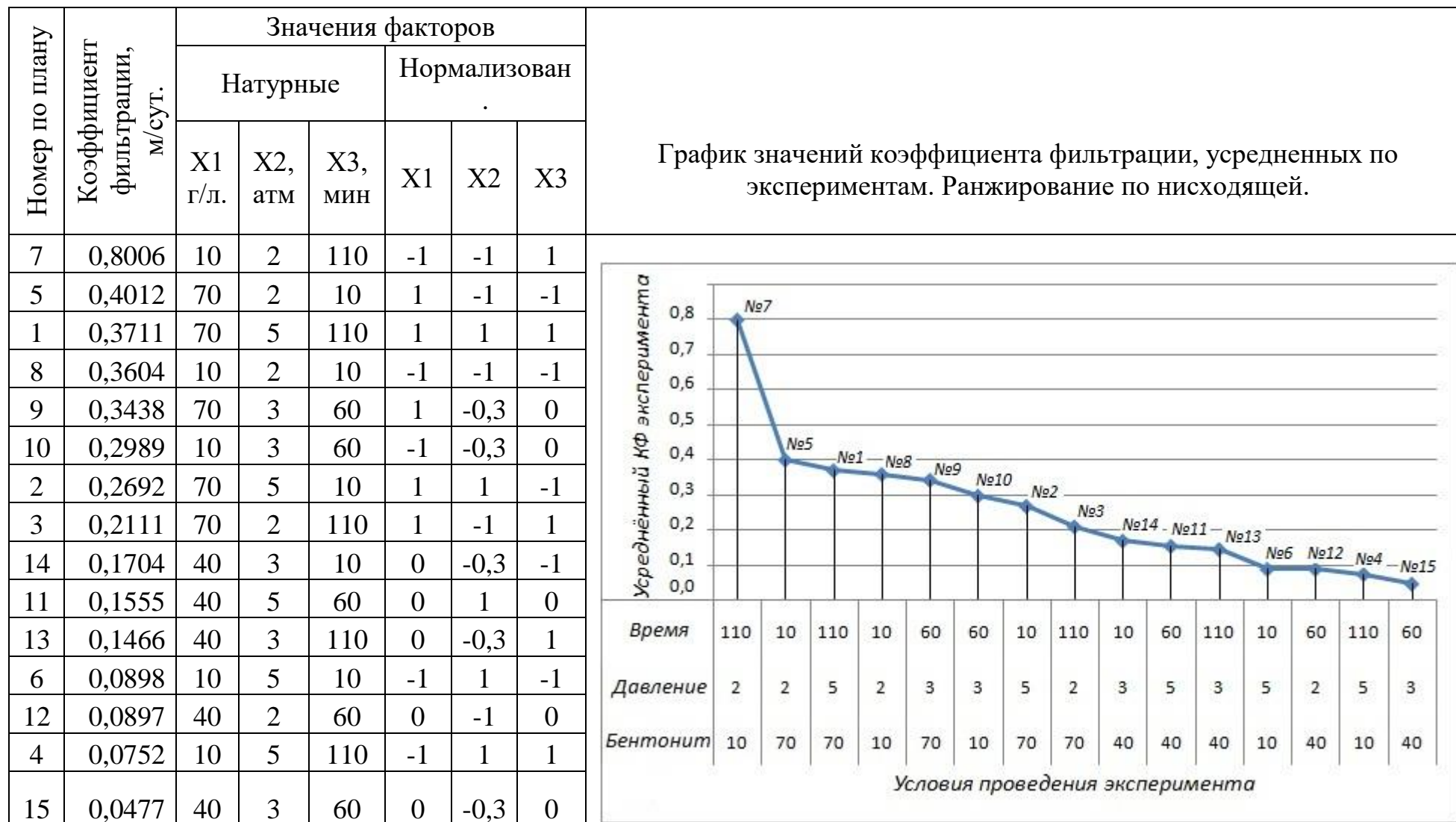


Рис. 4.7. Графики зависимости исследуемого показателя от факторов  $X_1$  и  $X_3$  с фиксацией значений фактора  $X_2=2$  атм.

Таблица 4.3

Значения коэффициента фильтрации, усредненные по экспериментам. Ранжирование по нисходящей.



Отметим общий для всех зависимостей параболический характер плоскости, содержащей оптимумы показателя по фактору X1 (концентрации бентонита), а также малое взаимное смещение пиков кривых в зоне максимума и минимума.

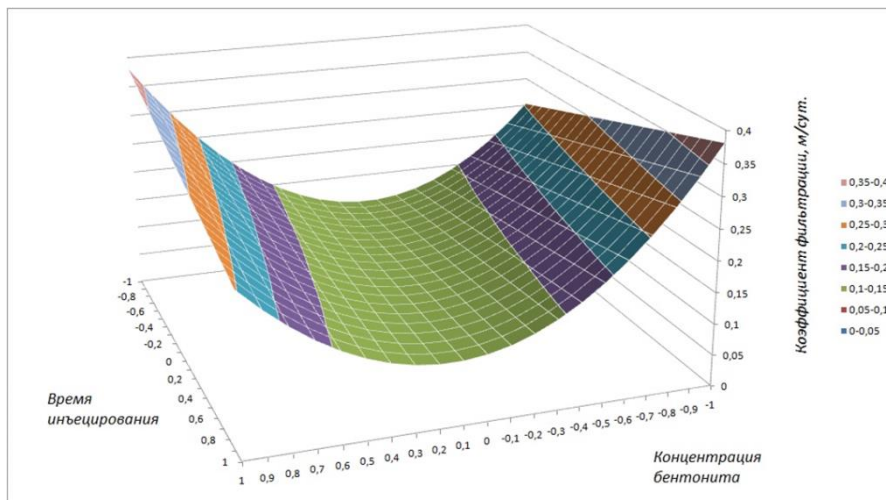


Рис. 4.8. График зависимости исследуемого показателя от факторов X1 и X3 с фиксацией значений фактора X2=3 атм.

На графиках заметно малое влияние длительности инъецирования на показатель. При этом, давление инъецирования существенно смещает зону оптимумов концентрации вяжущего в растворе: со значений  $X1 = (0,25; 0,35)$  при  $X2 = -1$  (2 атм.) до  $X1 = (-0,15; -0,35)$  при  $X2 = +1$  (5 атм.).

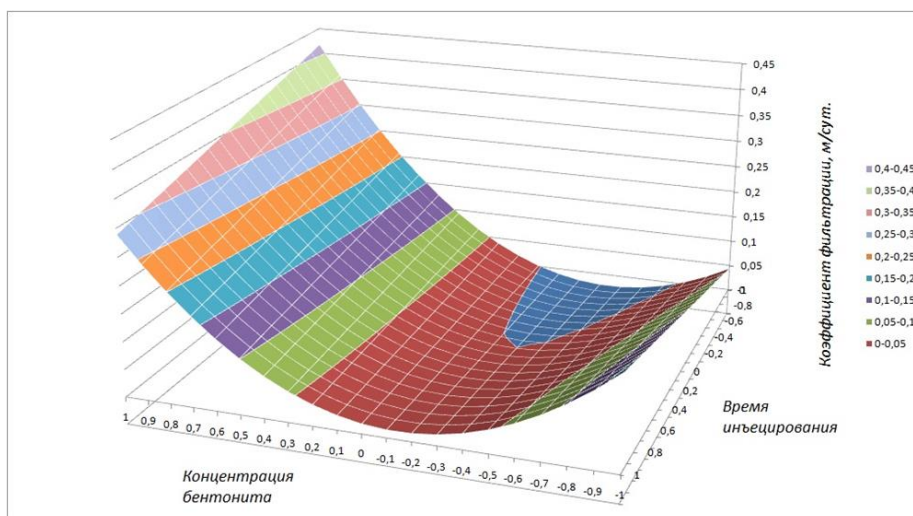


Рис. 4.9. График зависимости исследуемого показателя от факторов X1 и X3 с фиксацией значений фактора X2=5 атм.

Следует отметить, что в условиях лабораторных исследований значительно более эффективным является высокое значение давления и подбор для него величины концентрации вязущего, являющейся оптимальной. Расчёт с помощью ЭС моделирования показывает, что это позволяет изменить значение показателя более чем в 20 раз.

Рассмотрим графики, полученные при фиксации значений фактора X1. Они представлены на рисунках 4.10, 4.11, 4.12.

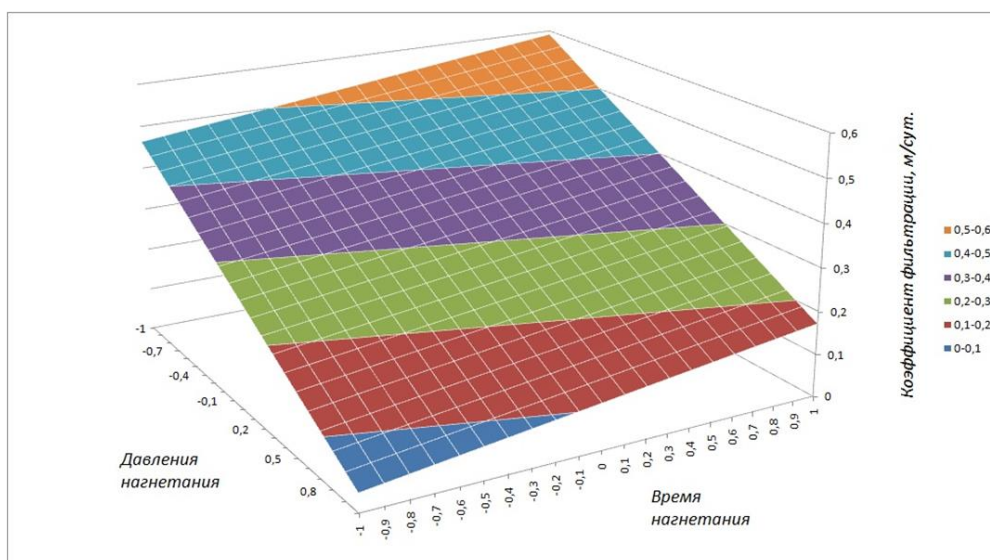


Рис. 4.10. График зависимости исследуемого показателя от факторов X2 и X3 с фиксацией значений фактора X1 = 10 г/л..

Графики представляют собой плоскости, имеющие наклон, характеризующий влияние факторов X2 и X3. При минимальной принятой вязкости раствора влияние факторов давления и длительности наиболее выражено и их оптимальное сочетание X2=+1;X3=-1.

На графике №2 с концентрацией бентонита в растворе, равной  $X1 = 0$  (40 г/л.), влияние фактора  $X3$  значительно снизилось, а на графике №3 стал обратным, и его оптимум сместился в точку  $X2 = -1; X3 = +1$ . Следует отметить, что если неоднозначное влияние фактора длительности можно обосновать погрешностями эксперимента, то значительное влияние (от 5 до 15 раз в сторону уменьшения) фактора давления на показатель нельзя отрицать.

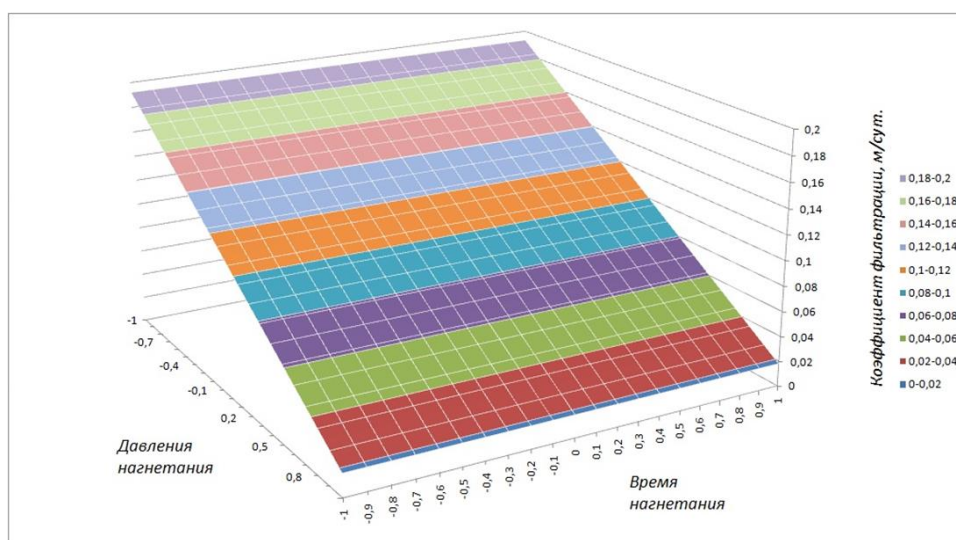


Рис. 4.11. График зависимости исследуемого показателя от факторов  $X2$  и  $X3$  с фиксацией значений фактора  $X1 = 40$  г/л.

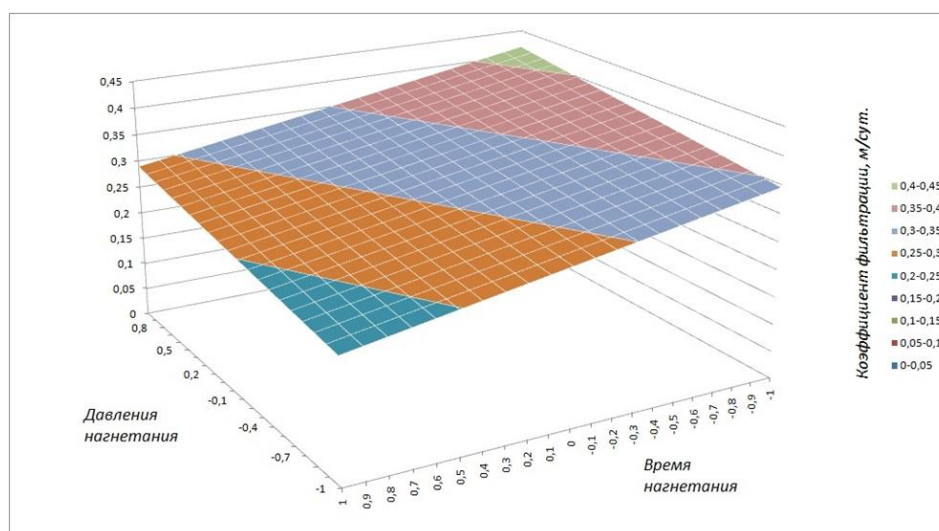


Рис. 4.12. График зависимости исследуемого показателя от факторов  $X2$  и  $X3$  с фиксацией значений фактора  $X1 = 70$  г/л.

## 4.2. Анализ результатов опытов по подбору инъекционного раствора.

В данном подразделе представлен анализ результатов экспериментов второй серии – подбора оптимального состава инъекционного раствора. В качестве составляющих раствора были выбраны следующие компоненты:

- бентонитовый порошок;
- портландцемент;
- гидросиликат натрия.

Так как значение концентрации бентонита в каждой пробе раствора оставалось неизменным – на уровне 70 г/л. – в качестве варьируемых факторов были приняты: концентрация портландцемента (X1) и концентрация гидросиликата натрия (X2). Показателем были выбраны коэффициент фильтрации проб. Также замерялась вязкость раствора. Полно факторная модель эксперимента второй степени и результатам проведённых экспериментальных исследований была составлена матрица экспериментов, которая показана в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Матрица экспериментов по подбору оптимального состава инъекционного раствора.

Содержание вяжущих в растворе, г/л.			Значения факторов		Вязкость сек.	Коэффициент фильтрации, м/сут.
Бентонит	Портланд-цемент	Гидросиликат натрия	X1	X2		
1	2	3	4	5	6	7
70	0	0	-1	-1	43,86	0,2325
70	0	5	-1	0	44,51	0,1860
70	0	10	-1	1	46,76	1,0743
70	70	0	0	-1	43,72	0,2232
70	70	5	0	0	44,40	0,2059
70	70	10	0	1	46,63	0,8800
70	140	0	1	-1	42,43	0,2573
70	140	5	1	0	45,70	0,1741
70	140	10	1	1	52,30	1,5715

В ходе расчёта с помощью программного комплекса COMPEX-99 была получена следующая экспериментально-статистическая модель:

CompEx 2009.01. Copyright (c) BoNi Software 1990  
 Результаты расчета модели: koef\_filtrazii  
 Уровень риска = 0.200  
 Критерий Studenta = 1.282  
 Ошибка эксперимента (Ts)э = 0.149

N	Коэффициенты	Ts
1	b0 = 0.091 (	0.122 )
2	b1 = 0.085 (	0.208 )
3	b2 = 0.469 (	1.148 )
4	b11 = 0.146 (	0.207 )
5	b22 = 0.518 (	0.732 )
6	b12 = 0.118 (	0.236 )

N	Коэффициенты	Ts
1	b12 = 0.118 (	0.236 )
2	b1 = 0.085 (	0.208 )
3	b2 = 0.469 (	1.148 )
4	b11 = 0.201 (	0.367 )
5	b22 = 0.573 (	1.045 )

NYEYDELTDDELТ\*\*2

1	0.233	0.338	-0.105	0.011
2	0.186	0.116	0.070	0.005
3	1.074	1.039	0.035	0.001
4	0.223	0.104	0.120	0.014
5	0.206	0.000	0.206	0.042
6	0.880	1.041	-0.161	0.026
7	0.257	0.272	-0.014	0.000
8	0.174	0.286	-0.112	0.013
9	1.572	1.445	0.126	0.016

Суммы по строкам                    0.164    0.129  
 Число степеней свободы эксперимента                    4  
 Ошибка эксперимента                    0.1164  
 Дисперсия неадекватности                    0.0321  
 Ошибка неадекватности                    0.1793  
 Критерий Fisher =    2.3700  
 Критерий Fkr =    2.3700  
 Kzm = 1.000    NSe = 0.116

Также были рассчитаны экстремумы данной модели, имеющие вид:

$Y_{min} =$	0.098	$Y_{max} =$	1.445
	$X_{min}$		$X_{max}$
1	-0.094		1.000
2	-0.399		1.000

Таким образом, была получена ЭС-модель с пятью значимыми коэффициентами (ошибка эксперимента  $S_0=0,0891$  м/сут.):

$$K\Phi \text{ (м/сут)} = \bullet + 0.085 x_1 + 0.201 x_1^2 + 0.118 x_1 x_2 + 0.469 x_2 + 0.573 x_2^2$$

В данной записи коэффициент  $b_0$ , признанный неотличимым от нуля, выделен точкой.

Рассмотрим ранжирование влияния двух факторов на показатель.

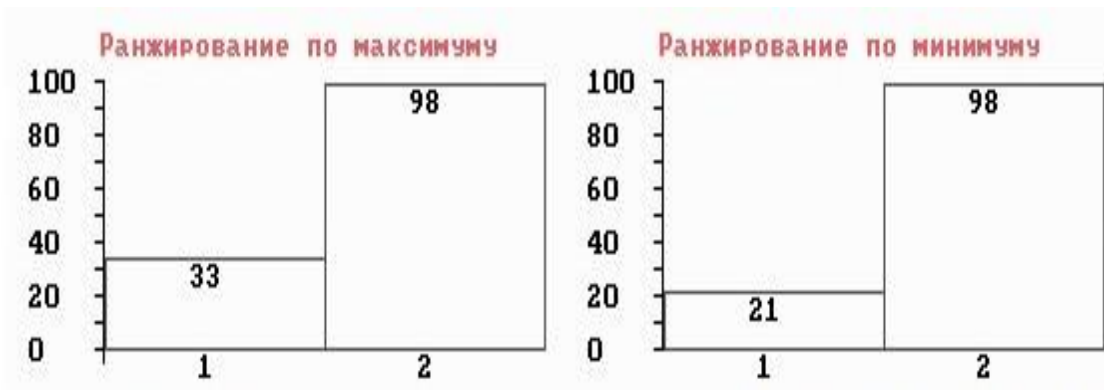


Рис. 4.13. Ранжирование влияния факторов в зоне максимума и минимума.

Отметим высокое влияние концентрации гидросиликата натрия на коэффициент фильтрации как в зоне максимума, так и в зоне минимума. При этом влияние концентрации портландцемента в растворе значительно ниже, и равно 21% в зоне минимума, которая является более значимой в рамках настоящего исследования.



На рисунке 4.14 показаны однофакторные зависимости коэффициента фильтрации от концентрации портландцемента и гидросиликата натрия.

В зоне максимума пик кривой влияния концентрации портландцемента находится в районе  $X_1 = -0,5$ , что соответствует натурному значению 35 г/л. В зоне минимума пик смещён в сторону увеличения концентрации и равен  $X_1 = -0,1$ , что соответствует натурному значению 63 г/л. Отметим, что добавление портландцемента снизило значение коэффициента фильтрации в 2,5 раза в зоне минимума.

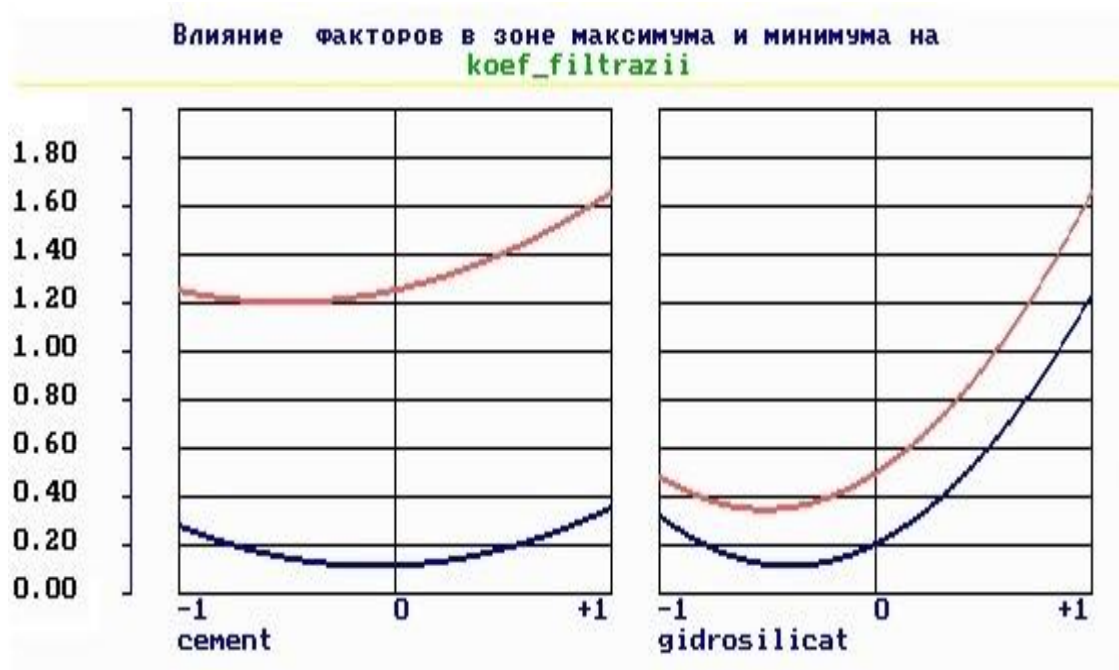


Рис. 4.14. Однофакторные зависимости показателя от факторов.

Характер кривой влияния фактора  $X_2$  на показатель практически идентичен как в зоне максимума, так и в зоне минимума. Пики этих кривых находятся в пределах  $X_2 = (-0,5; -0,3)$ , что соответствует концентрации гидросиликата натрия 2,5 -3,5 г/л. Следует заметить, что на данном рисунке ясно видно причину высокого ранга влияния фактора  $X_2$  на показатель: превышение концентрации гидросиликата натрия привело к значительному увеличению значения коэффициента фильтрации, что, несомненно, является негативным эффектом. С физической точки зрения данный эффект можно объяснить следующим образом: добавление большого относительно концентрации портландцемента количества гидросиликата натрия (до 7,5%)

привело к упорядочению структуры полученной пробы и повышению её прочности, однако ухудшило её гидрофобные свойства.

Рассмотрим изолинии изменения показателя от двух факторов рисунок

4.15

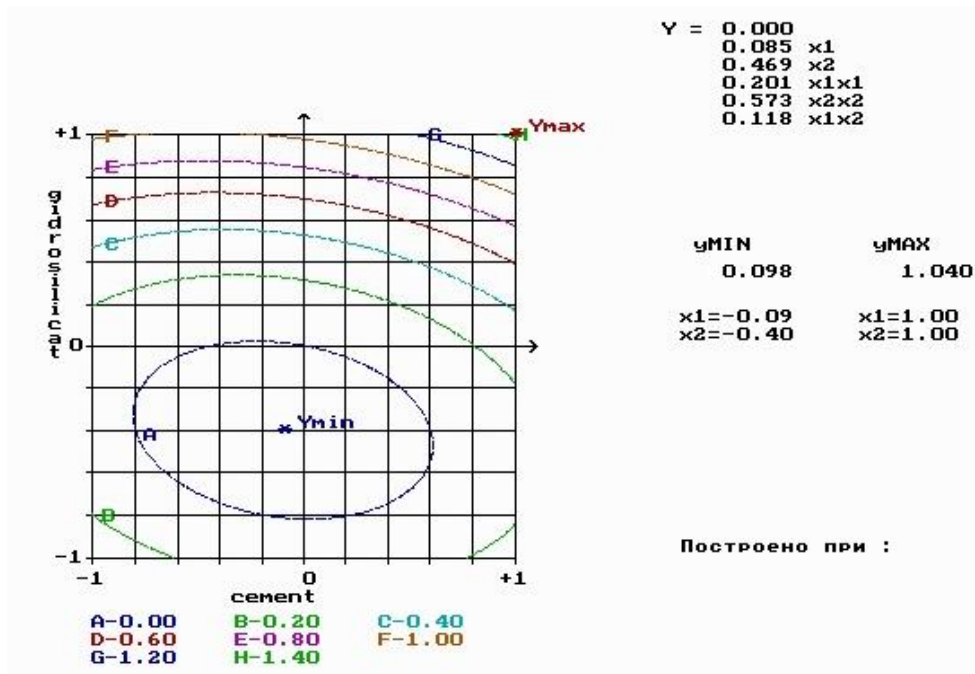


Рис. 4.15. Изолинии изменения коэффициента фильтрации от факторов.

Минимальное значение коэффициента фильтрации, равное 0,098 м/сут., наблюдается при  $X_1 = -0,09$ ;  $X_2 = -0,4$ , что соответствует концентрации портландцемента 63 г/л., а гидросиликата натрия 3 г/л. Максимум полученной ЭС-модели находится в точке  $X_1 = +1$ ;  $X_2 = +1$ , что соответствует концентрации портландцемента 140 г/л., а гидросиликата натрия 10 г/л.

Описанные выше зависимости наглядно продемонстрированы на рисунке 4.16, на котором представлена графическая интерпретация ЭС-модели исследования, построенная с помощью программы Excel.

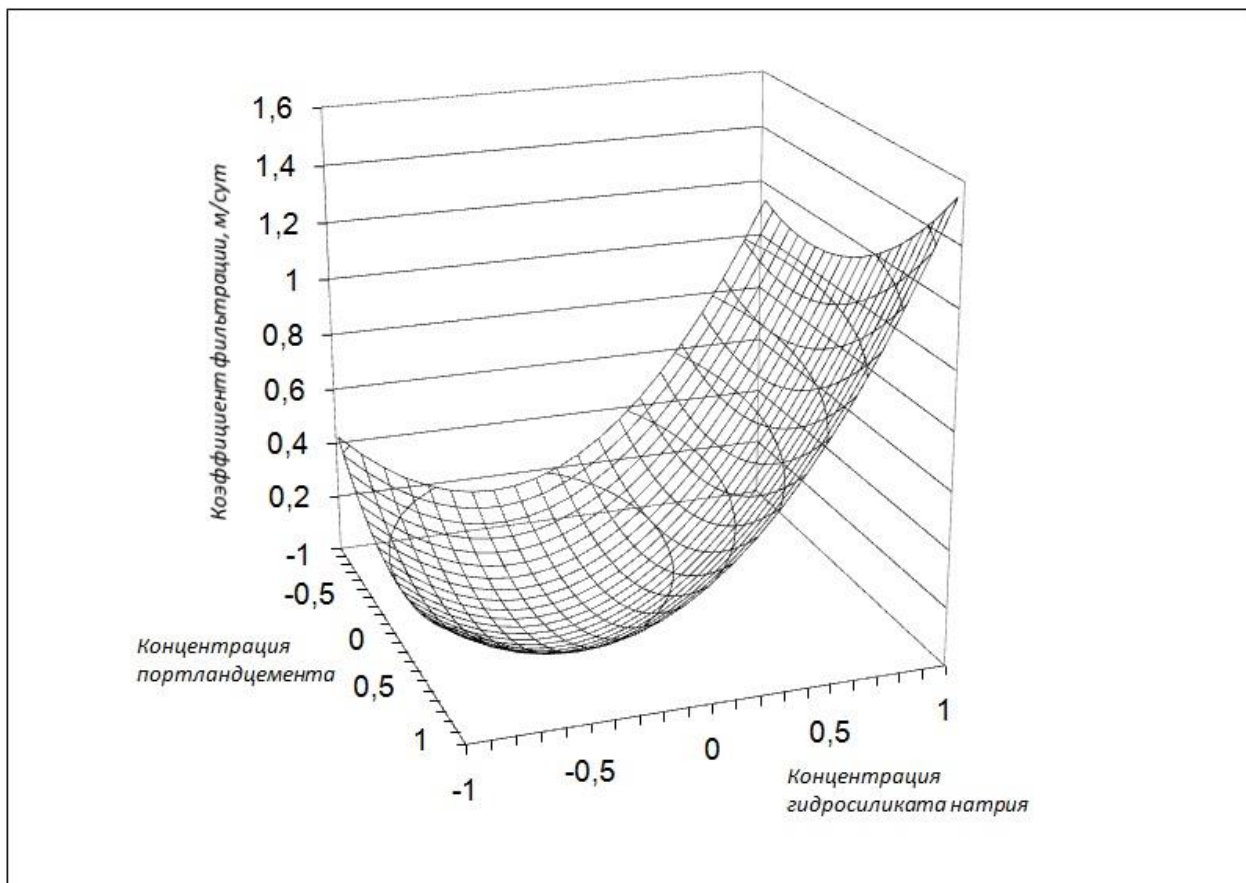


Рис. 4.16. Графическая интерпретация двухфакторной модели в Excel

Покажем меру воздействия добавления наиболее оптимальной концентрации портландцемента и гидросиликата натрия вместе и по отдельности по сравнению с использованием раствора с применением только бентонитового порошка. Следует отметить, что показанные соотношения действительно для данных, полученных с помощью ЭС-модели.

При добавлении в раствор, содержащий 70 г/л. бентонитового порошка в натуральных показателях, концентрации портландцемента, равной 77 г/л., коэффициент фильтрации образца возможно снизить в 2,17 раза (с 0,4357 до 0,2004 м/сут.). При добавлении концентрации гидросиликата натрия, равной 3,5 г/л., коэффициент фильтрации образца возможно снизить в 2,72 раза (с 0,4357 до 0,16 м/сут.). Добавление оптимальной концентрации портландцемента и гидросиликата натрия (в натуральных показателях: 63 г/л. и 3 г/л. соответственно) позволяет снизить коэффициент фильтрации в 4,45 раз (с 0,4357 до 0,098 м/сут.).

На основании данных соотношений можно сделать вывод, что применение портландцемента и гидросиликата натрия является оправданным в инъекционных растворах, применяемых для создания противofильтрационных защитных экранов. При этом, следует отметить, что мера их совместного воздействия значительно выше, чем по отдельности.

#### **Выводы по разделу 4**

1. Составлена матрица эксперимента, на основании которой была получена экспериментально-статистическая модель и графическая интерпретация исследуемых зависимостей.

2. Получен оптимум концентрации бентонитового порошка в инъекционном растворе, равный  $X_1 = (-0,3;0)$ .

3. Изучена обратно пропорциональная зависимость между значением давления ввода инъекционного раствора и значением коэффициента фильтрации с оптимальным значением  $X_2 > +1$ ;

4. Составлена матрица эксперимента, на основании которой была получена экспериментально-статистическая модель и графическая интерпретация исследуемых зависимостей.

5. Изучены зависимости между исследуемым показателем и варьируемыми факторами и найден оптимум концентрации предложенных компонентов:

\* концентрация портландцемента в инъецируемом растворе – параболическая зависимость показателя от фактора с незначительно выраженным с инженерной точки зрения оптимумом в зоне  $X_1 = (-0,5;0)$ ;

\* концентрация гидросиликата натрия в инъецируемом растворе – параболическая зависимость показателя от фактора с выраженным оптимумом в зоне  $X_2 = (-0,5;-0,3)$ .

6. Двухфакторная модель по исследованию технологических режимов инъецирования позволила точно определить зависимости значений показателя от варьируемых факторов.

7. Анализ двухфакторной модели, полученной при упрощении с 15-ти до 9-ти точечного плана, показал обратно пропорциональную криволинейную закономерность показателя от фактора с оптимальным значением  $X_2 > +1$ .

8. По результатам анализа ЭС-моделей по исследованию технологических режимов инъецирования установлено, что разработанная методика и оборудование нуждаются в корректировке.

## РАЗДЕЛ 5

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ИНЪЕКЦИОННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО ЭКРАНА НА ОСНОВЕ ТВЕРДЕЮЩИХ СОСТАВОВ

### 5.1. Результаты определения коэффициента фильтрации по разработанной методике на лабораторном стенде

Важным показателем при планировании инъекционных работ является как гранулометрический состав грунтов, так и сам состав инъекционного раствора. Идеальным случаем инъекции является соблюдение оптимального соотношения между размерами частиц раствора и инъецируемой средой. Это соотношение соответствует полному пропитыванию среды. На сегодняшний день в области строительных технологий известны классические методы закрепления грунтов с применением процесса инъекции [9]. Это может быть цементация либо силикатизация с применением различных химических составов. Производство работ по таким технологиям отличается от той технологии, что разработано нами. Однако следует отметить, что физико-механические свойства полученных грунтоцементных или грунтосиликатных элементов имеют примерно одинаковые прочностные характеристики. В силу того, что нами предложена инновационная технология устройства противofильтрационных завес, особое внимание необходимо уделить эксплуатационным и физико-механическим свойствам полученных в результате инъекции грунтобетонов. Это вызвано тем, что предложенная технология предусматривает малоизученные технологические решения, применение которых в конечном итоге должны привести к получению противofильтрационных экранов с заданными свойствами.

Результаты определения коэффициента фильтрации по разработанной методике в лабораторном стенде при различных инъекционных составах представлены в табл.5.1, 5.2, 5.3, 5.4.

Таблица 5.1

Результаты экспериментов по исследованию коэффициента фильтрации песка на лабораторном стенде

№ показ.	Давл. Р, атм	Время фильтр. t, с	Объем проф. воды V <sub>проф. в.</sub> , см <sup>3</sup>	Темпер. воды T <sub>ф</sub> , °С	Площадь попер. сечения цилиндра фильтр. трубки А, см <sup>2</sup>	Кэфф. фильтр. К <sub>ф</sub> , м/сут	Среднее значение К <sub>ф</sub> , м/сут
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Кран 1 (расстояние от инжектора 1500мм)</b>							
1	0.8	180	153	6.5	78.54	10.448	12.422
2	0.8	180	156	6.5	78.54	10.653	
3	1	180	170	6.5	78.54	11.609	
4	1	180	190	6.5	78.54	12.974	
5	1	180	189	6.5	78.54	12.906	
6	1	180	184	6.5	78.54	12.564	
7	1.2	180	193	6.5	78.54	13.179	
8	1.2	180	191	6.5	78.54	13.042	
9	1.5	180	195	6.5	78.54	13.316	
10	1.5	180	197	6.5	78.54	13.452	
<b>Кран 3 (расстояние от инжектора 1000мм)</b>							
1	0.8	180	140	6.5	78.54	9.56	11.253
2	0.8	180	139	6.5	78.54	9.492	
3	1	180	148	6.5	78.54	10.106	
4	1	180	147	6.5	78.54	10.038	

5	1	180	159	6.5	78.54	10.857	
6	1	180	161	6.5	78.54	10.994	
7	1.2	180	185	6.5	78.54	12.633	
8	1.2	180	187	6.5	78.54	12.769	
9	1.5	180	190	6.5	78.54	12.974	
10	1.5	180	192	6.5	78.54	13.111	
<b>Кран 4 (расстояние от инжектора 500 мм)</b>							
1	0.8	180	149	6.5	78.54	10.175	11.083
2	0.8	180	142	6.5	78.54	9.697	
3	1	180	159	6.5	78.54	10.857	
4	1	180	157	6.5	78.54	10.721	
5	1	180	162	6.5	78.54	11.062	
6	1	180	164	6.5	78.54	11.199	
7	1.2	180	168	6.5	78.54	11.472	
8	1.2	180	165	6.5	78.54	11.267	
9	1.5	180	178	6.5	78.54	12.155	
10	1.5	180	179	6.5	78.54	12.223	
<b>Кран 5 (расстояние от инжектора 50мм)</b>							
1	0.8	180	137	6.5	78.54	9.355	10.939
2	0.8	180	140	6.5	78.54	9.56	
3	1	180	160	6.5	78.54	10.926	



4	1	180	157	6.5	78.54	10.721
5	1	180	163	6.5	78.54	11.131
6	1	180	164	6.5	78.54	11.199
7	1.2	180	170	6.5	78.54	11.609
8	1.2	180	167	6.5	78.54	11.404
9	1.5	180	172	6.5	78.54	11.745
10	1.5	180	174	6.5	78.54	11.882

Зависимость изменения коэффициента фильтрации песка от давления и расстояния от иньектора по данным таблицы 5.1 представлена на рис.5.1.

Аналитическую зависимость влияния давления и расстояния от иньектора, на коэффициент фильтрации можно записать в виде полиномиальных уравнений 3-ей степени с уровнем аппроксимации  $R^2 = 1$ . Они приведены ниже (5.1, 5.2, 5.3, 5.4). Каждое из уравнений соответствует определенному расстоянию от иньектора: (5.1) – 1500мм, (5.2) – 1000мм, (5.3) – 500мм, (5.4) – 50мм.

$$y = 0.1736x^3 - 1.7245x^2 + 5.9209x + 6.1805, (5.1)$$

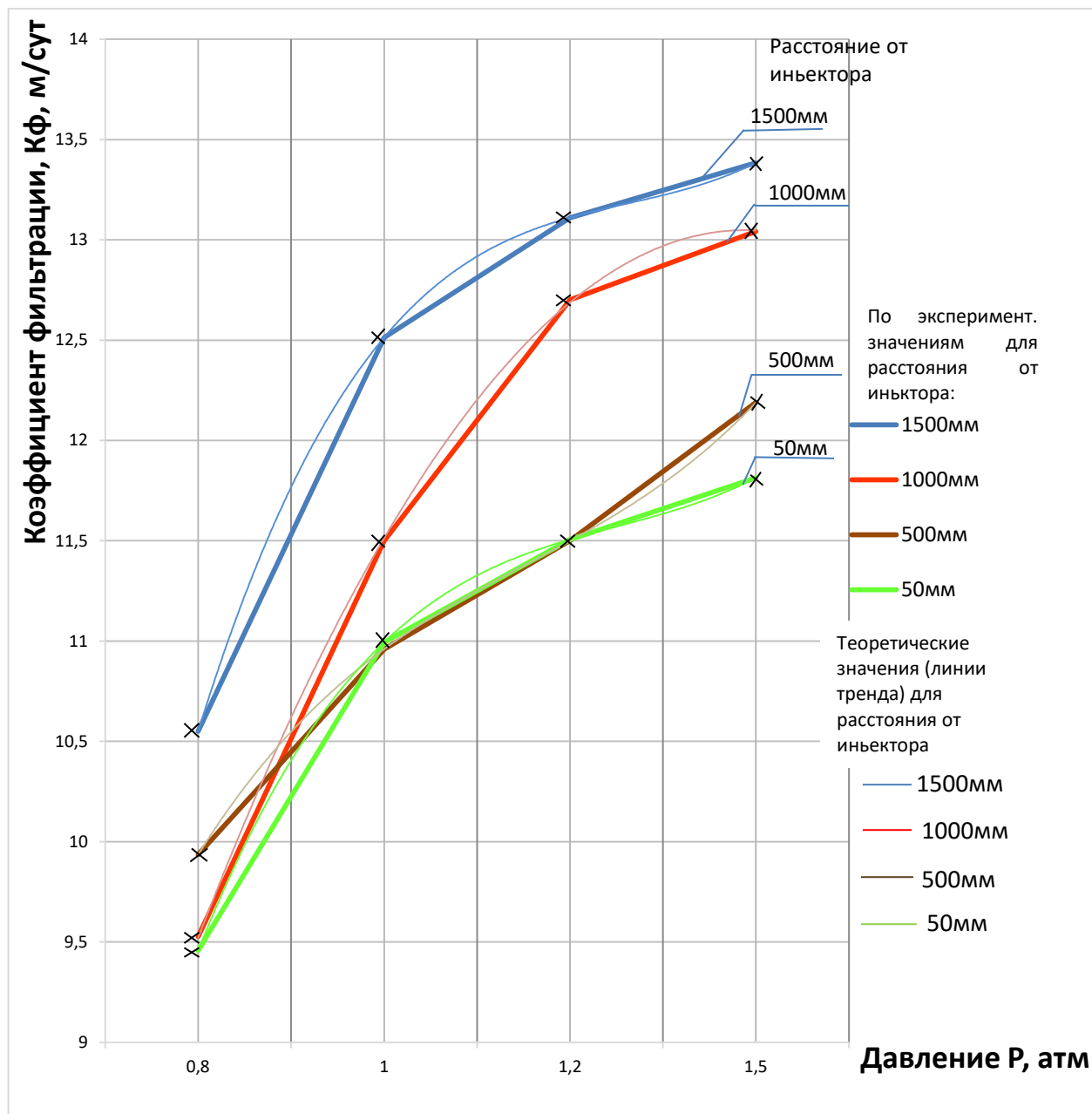


Рис. 5.1. Зависимость изменения коэффициента фильтрации песка от давления и расстояния от инжектора

$$y = -0.0144x^3 - 0.3x^2 + 2.9749x + 6.8655, \quad (5.2)$$

$$y = 0.1054x^3 - 0.874x^2 + 2.9081x + 7.7965, \quad (5.3)$$

$$y = 0.1365x^3 - 1.3315x^2 + 4.5755x + 6.077, \quad (5.4)$$

где  $x$  – давление  $P$ , м/с.

График на рис.5.1 составлен по результатам исследования коэффициента фильтрации песка без инъекции, поэтому на каждом расстоянии от инжектора наблюдаются близкие значения.

Рассмотрим кривые графика при давлении 0,8 атм. На расстоянии от иньектора 1500мм значение коэффициента фильтрации песка – 10,5505м/сут, 1000мм – 9,526м/сут, 500мм – 9,936м/сут, 50мм – 9,4575м/сут.

Значение коэффициента фильтрации песка при давлении 1,5 атм при расстоянии от иньектора 1500мм – 13,384м/сут, 1000мм – 13,0425м/сут, 500мм – 12,189 м/сут, 50мм – 11,8135м/сут. Таким образом, коэффициент фильтрации песка при давлении 1,5атм увеличился, по сравнению с значениями коэффициента фильтрации песка при давлении 0,8атм для расстояния от иньектора 1500мм на 21%, 1000мм – 27%, 500мм – 19%, 50мм – 20%. Анализ графика, показал, что при увеличении давления, увеличивается коэффициент фильтрации. Подтверждением этой зависимости служат полиномиальные уравнения (5.1-5.4). Переменные (x) являются давлением, с его увеличение возрастает значение переменной (y) (коэффициента фильтрации).

## 5.2. Исследование противofильтрационного экрана на основе цементного вяжущего, глиноцементные составы

Таблица 5.2

Результаты экспериментов по исследованию коэффициента фильтрации песка с иньекцией бентонитовым раствором на лабораторном стенде

№ показ.	Давл. Р, атм	Время фильтр. t, с	Объем проф. воды V <sub>проф. в.</sub> , см <sup>3</sup>	Температ. воды Т <sub>ф</sub> , °С	Площадь попер. сеч.цилиндра фильтр.трубки А, см <sup>2</sup>	Коэфф. фильтр. К <sub>ф</sub> , м/сут	Сред. знач. К <sub>ф</sub> , м/сут
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Кран 1 (расстояние от иньектора 1500мм)</b>							
1	0.8	240	80	14	78.54	3.274	3.876
2	0.8	240	84	14	78.54	3.438	
3	1	240	90	14	78.54	3.683	

4	1	240	91	14	78.54	3.724		
5	1	240	88	14	78.54	3.601		
6	1	240	89	14	78.54	3.642		
7	1.2	240	104	14	78.54	4.256		
8	1.2	240	96	14	78.54	3.929		
9	1.5	240	110	14	78.54	4.502		
10	1.5	240	115	14	78.54	4.706		
<b>Кран 3 (расстояние от инжектора 1000мм)</b>								
1	0.8	240	46	14	78.54	1.883	2.443	
2	0.8	240	50	14	78.54	2.046		
3	1	240	54	14	78.54	2.21		
4	1	240	56	14	78.54	2.292		
5	1	240	52	14	78.54	2.128		
6	1	240	55	14	78.54	2.251		
7	1.2	240	63	14	78.54	2.578		
8	1.2	240	61	14	78.54	2.496		
9	1.5	240	81	14	78.54	3.315		
10	1.5	240	79	14	78.54	3.233		
<b>Кран 4 (расстояние от инжектора 500мм)</b>								
1	0.8	240	39	14	78.54	1.596		2.226
2	0.8	240	42	14	78.54	1.719		

3	1	240	53	14	78.54	2.169	
4	1	240	51	14	78.54	2.087	
5	1	240	54	14	78.54	2.21	
6	1	240	51	14	78.54	2.087	
7	1.2	240	57	14	78.54	2.333	
8	1.2	240	59	14	78.54	2.415	
9	1.5	240	66	14	78.54	2.701	
10	1.5	240	72	14	78.54	2.947	
<b>Кран 5 (расстояние от иньектора 50мм)</b>							
1	0.8	240	46	14	78.54	1.883	2.480
2	0.8	240	43	14	78.54	1.76	
3	1	240	59	14	78.54	2.415	
4	1	240	57	14	78.54	2.333	
5	1	240	55	14	78.54	2.251	
6	1	240	61	14	78.54	2.496	
7	1.2	240	64	14	78.54	2.619	
8	1.2	240	67	14	78.54	2.742	
9	1.5	240	76	14	78.54	3.11	
10	1.5	240	78	14	78.54	3.192	

Зависимость изменения коэффициента фильтрации песка, заиньецированного бентонитовым раствором от давления и расстояния от иньектора представлена на рисунке 5.2.

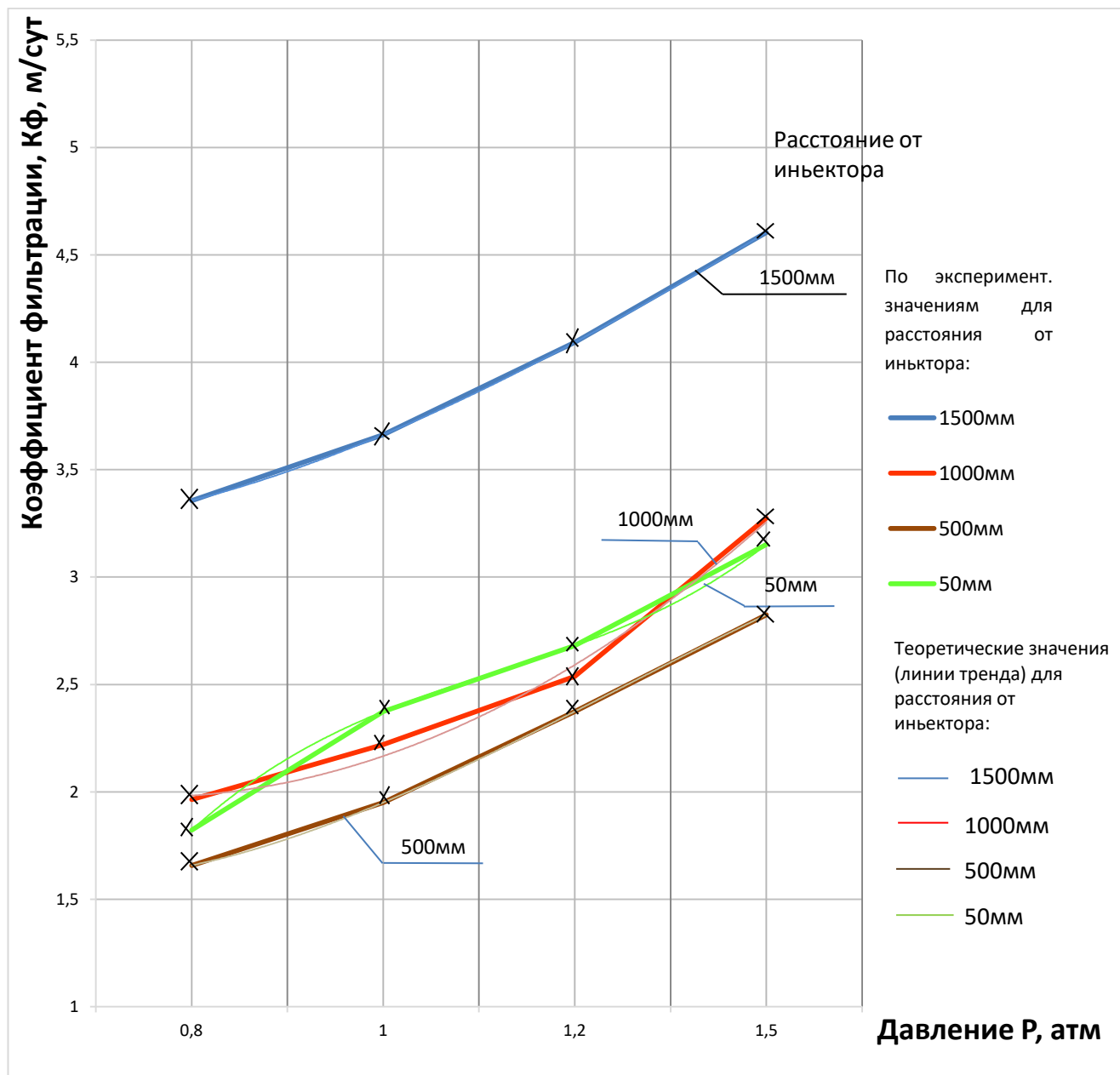


Рис. 5.2. Зависимость изменения коэффициента фильтрации песка, заиньецированного бентонитовым раствором от давления и расстояния от иньектора.

Аналитическую зависимость влияния давления и расстояния от иньектора, на коэффициент фильтрации можно записать в виде полиномиальных уравнений 3-ей степени с уровнем аппроксимации  $R^2 = 1$ . Они приведены ниже (5.5, 5.6, 5.7, 5.8). Каждое из уравнений соответствует определенному расстоянию от иньектора ((5.5) – 1500мм, (5.6) – 1000мм, (5.7) – 500мм, (5.8) – 50мм).

$$y = -0.007x^3 + 0.1038x^2 + 0.0443x + 3.215, \quad (5.5)$$

$$y = 0.0599x^3 - 0.3287x^2 + 0.8229x + 1.4105, \quad (5.6)$$

$$y = 0.0682x^3 - 0.532x^2 + 1.6708x + 0.6145, (5.7)$$

$$y = -0.0176x^3 + 0.1712x^2 - 0.0982x + 1.602, (5.8)$$

где  $x$  – давление  $P$ , м/с.

График на рис. 5.2 составлен по результатам исследования коэффициента фильтрации песка заинъецированным бентонитовым порошком с помощью лабораторной установки.

Рассмотрим кривые графика, они отображают различное расстояние от иньектора. Каждая из них имеет восходящее направление. Это говорит о том, что с увеличением давления, увеличивается коэффициент фильтрации. Такая зависимость также прослеживается при анализе полиномиальных уравнений (5.5 – 5.8). С увеличением переменной  $x$  (давление), увеличивается переменная  $y$  (коэффициентом фильтрации).

На графике кривая соответствующая расстоянию от иньектора 1500мм находится выше других кривых, что объясняется влиянием значения расстояния от иньектора на показатель коэффициента фильтрации. Для того чтобы разобраться какое именно влияние оказывает этот фактор, проанализируем значение коэффициента фильтрации при минимальном и максимальном расстояниях от иньектора. На расстоянии от иньектора 1500мм значение коэффициента фильтрации при давлении 0,8атм – 3,356м/сут, 1атм – 3,6625м/сут, 1,2атм – 4,0925м/сут, 1,5атм – 4,604м/сут. Коэффициент фильтрации на расстоянии от иньектора 50мм имеет следующие значения: при давлении 0,8атм – 1,8215м/сут, 1атм – 2,3738м/сут, 1,2атм – 2,6805м/сут, 1,5атм – 3,151м/сут. С увеличением расстояния от иньектора (от 50мм до 1500мм), видим как возрастает значение коэффициента фильтрации. Так при расстоянии от иньектора 1500 мм по сравнению с расстоянием 50мм, коэффициент фильтрации при давлении 0,8 атм. увеличивается на 45,7%, 1 атм – 35%, 1,2атм – 35%, 1,5атм – 32%. Из указанных процентных соотношений следует, что с увеличением расстояния от иньектора увеличивается коэффициент фильтрации. Это объясняется тем, что иньецируемый раствор может распространяться на различном расстоянии от иньектора.

Полученные результаты показали достаточный радиус распространения (на всю лабораторную установку) инъекционного состава. Однако фильтрационные свойства образовавшегося противофильтрационного экрана неудовлетворительны и соответствуют значению «сильноводопроницаемый» грунт. Был получен противофильтрационный экран с низкой фильтрационной прочностью. Поэтому нужно было проводить эксперименты по определению коэффициента фильтрации при минимальном давлении (0,1атм). Необходимо путем вычислений и экспериментов изменить концентрацию раствора.

### 5.3. Исследование противофильтрационного экрана на основе гидросиликата натрия с хлористым кальцием

Таблица 5.3

Результаты экспериментов по исследованию коэффициента фильтрации песка с инъекцией хлористым кальцием и жидким стеклом

№ показ.	Давл. Р, атм	Время фильтр t, с	Объем проф. воды V <sub>проф. в.</sub> , см <sup>3</sup>	Темпер ат. воды T <sub>ф</sub> , °С	Площадь попер. сеч. цилиндра фильтрац, трубки А, см <sup>2</sup>	Коэфф. фильтрац. К <sub>ф</sub> , м/сут	Средне е знач. Кф, м/сут
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Кран 1 (расстояние от инъектора 1500мм)</b>							
1	0.8	420	32	14	78.54	0.748	0.872
2	0.8	420	34	14	78.54	0.795	
3	1	420	35	14	78.54	0.819	
4	1	420	36	14	78.54	0.842	
5	1	420	34	14	78.54	0.795	



6	1	420	35	14	78.54	0.819	
7	1.2	420	38	14	78.54	0.889	
8	1.2	420	40	14	78.54	0.935	
9	1.5	420	46	14	78.54	1.076	
10	1.5	420	43	14	78.54	1.006	
<b>Кран 3 (расстояние от инжектора 1000мм)</b>							
1	0.8	420	11	14	78.54	0.257	0.360
2	0.8	420	10	14	78.54	0.234	
3	1	420	15	14	78.54	0.351	
4	1	420	13	14	78.54	0.304	
5	1	420	14	14	78.54	0.327	
6	1	420	13	14	78.54	0.304	
7	1.2	420	16	14	78.54	0.374	
8	1.2	420	18	14	78.54	0.421	
9	1.5	420	25	14	78.54	0.585	
10	1.5	420	19	14	78.54	0.444	
<b>Кран 4 (расстояние от инжектора 500мм)</b>							
1	0.8	420	9	14	78.54	0.21	0.330
2	0.8	420	10	14	78.54	0.234	
3	1	420	12	14	78.54	0.281	
4	1	420	11	14	78.54	0.257	
5	1	420	13	14	78.54	0.304	
6	1	420	12	14	78.54	0.281	

7	1.2	420	16	14	78.54	0.374	
8	1.2	420	15	14	78.54	0.351	
9	1.5	420	19	14	78.54	0.444	
10	1.5	420	24	14	78.54	0.561	
<b>Кран 5 (расстояние от иньектора 50мм)</b>							
1	0.8	420	11	14	78.54	0.257	0.388
2	0.8	420	9	14	78.54	0.21	
3	1	420	18	14	78.54	0.421	
4	1	420	16	14	78.54	0.374	
5	1	420	17	14	78.54	0.398	
6	1	420	19	14	78.54	0.444	
7	1.2	420	17	14	78.54	0.398	
8	1.2	420	18	14	78.54	0.421	
9	1.5	420	22	14	78.54	0.514	
10	1.5	420	20	14	78.54	0.468	

Зависимость изменения коэффициента фильтрации песка заиньецированного хлористым кальцием и жидким стеклом от давления и расстояния от иньектора показана на рисунке 5.3.

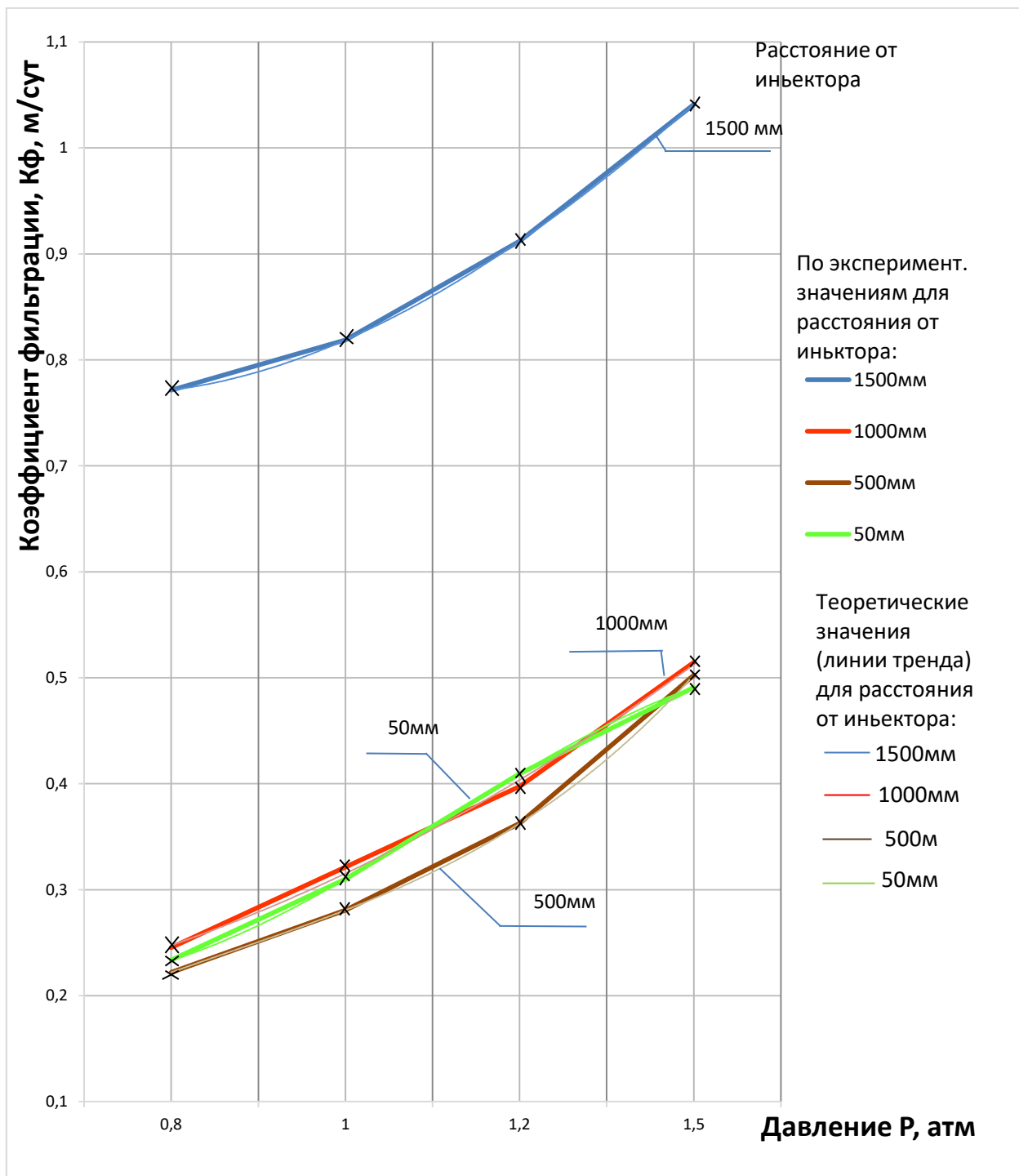


Рис. 5.3. Зависимость изменения коэффициента фильтрации песка заиньецированного хлористым кальцием и жидким стеклом от давления и расстояния от иньектора.

График на рис. 5.3 составлен по результатам исследования коэффициента фильтрации песка заиньецированном хлористым кальцием и жидким стеклом с помощью лабораторной установки.

Аналитическую зависимость влияния давления и расстояния от иньектора, на коэффициент фильтрации можно записать в виде полиномиальных уравнений 3-

ей степени с уровнем аппроксимации  $R^2 = 1$ . Они приведены ниже (5.9, 5.10, 5.11, 5.12). Каждое из уравнений соответствует определенному расстоянию от иньектора ((5.9) – 1500мм, (5.10) – 1000мм, (5.11) – 500мм, (5.12) – 50мм).

$$y = -0.0017x^3 + 0.0333x^2 - 0.0405x + 0.7805, (5.9)$$

$$y = 0.0068x^3 - 0.041x^2 + 0.1512x + 0.1285, (5.10)$$

$$y = y = 0.0059x^3 - 0.0237x^2 + 0.0889x + 0.151, (5.11)$$

$$y = -0.0068x^3 + 0.0525x^2 - 0.0332x + 0.221, (5.12)$$

где  $x$  – давление  $P$ , м/с.

На кривых графика отображены различные расстояния от иньектора. Каждая из них имеет восходящее направление. Это говорит о том, что с увеличением давления, увеличивается коэффициент фильтрации. Такая зависимость также прослеживается при анализе полиномиальных уравнений (5.9 – 5.12). С увеличением переменной  $x$  (давление), увеличивается переменная  $y$  (коэффициентом фильтрации).

На графике рис.5.3 кривая соответствующая расстоянию от иньектора 1500мм находится выше других кривых, что объясняется влиянием значения расстояния от иньектора на показатель коэффициента фильтрации. Для того чтобы разобраться какое именно влияние оказывает этот фактор, проанализируем значение коэффициента фильтрации при минимальном и максимальном расстояниях от иньектора. На расстоянии от иньектора 1500мм значение коэффициента фильтрации при давлении 0,8атм – 0,7715м/сут, 1атм – 0,81875 м/сут, 1,2атм – 0,912м/сут, 1,5атм – 1,041м/сут. Коэффициент фильтрации на расстоянии от иньектора 50мм имеет следующие значения: при давлении 0,8атм – 0,2335м/сут, 1атм – 0,31м/сут, 1,2атм – 0,4095м/сут, 1,5атм – 0,491 м/сут. С увеличением расстояния от иньектора (от 50мм до 1500мм), видим как возрастает значение коэффициента фильтрации. Так при расстоянии от иньектора 1500 мм по сравнению с расстоянием 50мм, коэффициент фильтрации при давлении 0,8 атм увеличивается на 70%, 1 атм – 62%, 1,2атм – 55%, 1,5атм – 53%. Полученные процентные соотношения показывают, что на расстоянии 1500мм от иньектора иньекционный раствор распространился не

полностью, поэтому коэффициент фильтрации на этом расстоянии имеет наибольшие показатели. На расстояниях от инъектора 50, 500, 1000мм имеем практически одинаковые значения коэффициента фильтрации, что свидетельствует о равномерном распространении раствора на этих участках.

#### 5.4. Исследование противofильтрационного экрана на основе мягко-эластичной гидроизолирующей смолы MC-Injekt GL-95

Таблица 5.4

Результаты экспериментов по исследованию коэффициента фильтрации на лабораторном стенде с инъекцией мягко-эластичной гидроизолирующей смолой MC-Injekt GL-95.

№ показ.	Давл. Р, атм	Время филтр. t, с	Объем проф. воды V <sub>проф. в.</sub> , см <sup>3</sup>	Темпер. воды T <sub>ф</sub> , °С	Площадь попер.сеч. цилиндра филтр.трубки А, см <sup>2</sup>	Коэфф. филтр. K <sub>ф</sub> , м/сут	Среднее значение K <sub>ф</sub> , м/сут
<b>Кран 1 (расстояние от инъектора 1500мм)</b>							
1	0.8	180	190	14	78.54	10.368	11.017
2	0.8	180	183	14	78.54	9.986	
3	1	180	203	14	78.54	11.077	
4	1	180	200	14	78.54	10.913	
5	1	180	202	14	78.54	11.023	
6	1	180	199	14	78.54	10.859	
7	1.2	180	208	14	78.54	11.350	
8	1.2	180	207	14	78.54	11.295	
9	1.5	180	212	14	78.54	11.568	
10	1.5	180	215	14	78.54	11.732	
<b>Кран 2, 3, 4, 5 – водоупор</b>							
<b>Кран 2 (расстояние от инъектора 1250мм)</b>							

Зависимость изменения коэффициента фильтрации песка заинъектированного мягко-эластичной гидроизолирующей смолой MC-Injekt GL-95 от давления и расстояния от инъектора показана на рисунке 5.4.

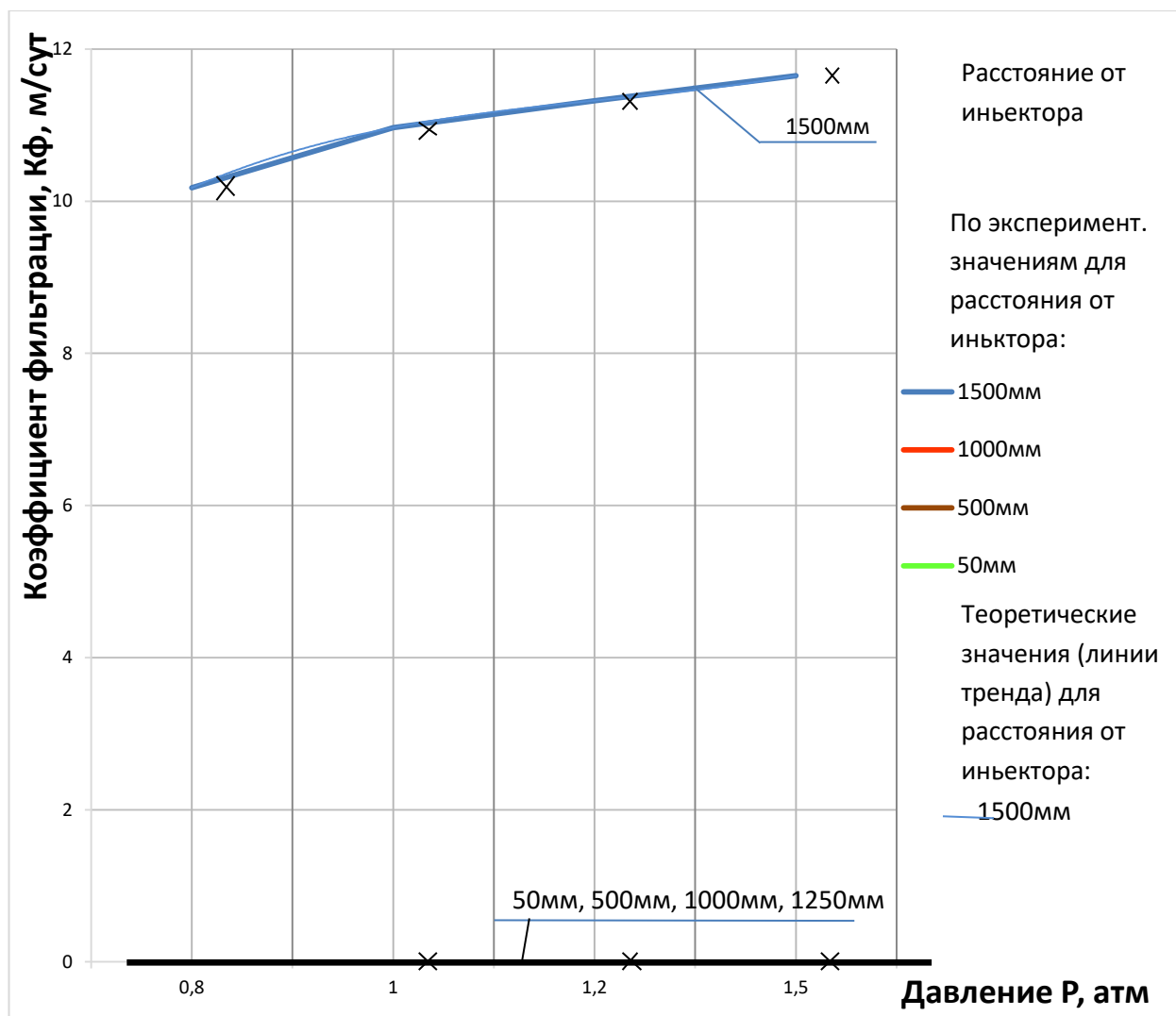


Рис. 5.4. Зависимость изменения коэффициента фильтрации песка заинъектированного мягко-эластичной гидроизолирующей смолой MC-Injekt GL-95 от давления и расстояния от инъектора.

Аналитическую зависимость влияния давления и расстояния от инъектора, на коэффициент фильтрации можно записать в виде полиномиального уравнений 3-ей степени с уровнем аппроксимации  $R^2 = 1$ . Они приведены ниже (5.13). Уравнение (5.13) соответствует определенному расстоянию от инъектора – 1500мм.

$$y = 0.0682x^3 - 0.6277x^2 + 2.1965x + 8.54, \quad (5.13)$$

где  $x$  – давление  $P$ , м/с.

Уравнение 5.13, а также кривая, полученная по результатам испытаний на расстоянии (1500мм) от инжектора, свидетельствуют о том, что до этой точки инъекционный раствор не распространился. Результаты испытаний показывают, что на этом расстоянии значение коэффициента фильтрации, такое же, как в испытаниях коэффициента фильтрации чистого песка. На расстоянии 50, 500, 1000, 1250мм от инжектора значение коэффициента фильтрации равно нулю. Это говорит о том, что образовавшийся противofiltrационный экран водонепроницаем, а радиус распространения инъекционного раствора составляет 1,25м.

Зависимость коэффициента фильтрации от инъекционного состава и расстояния от инжектора показана на рисунке 5.5.

Аналитическую зависимость коэффициента фильтрации от инъекционного состава и расстояния от инжектора можно записать в виде полиномиальных уравнений 3-ей степени с уровнем аппроксимации  $R^2 = 1$ . Они приведены ниже (5.14, 5.15, 5.16, 5.17). Уравнение (5.14) соответствует кривой, которая построена по результатам определения коэффициента фильтрации для чистого песка, (5.15) – инъекционного состава из бентонитового порошка, (5.16) – инъекционного состава из хлористого кальция и жидкого стекла, (5.17) – инъекционный состав мягко-эластичная гидроизолирующая смолой.

$$y = 0.1622x^3 - 0.96x^2 + 1.8888x + 9.848 \quad (5.14);$$

$$y = 0.1242x^3 - 0.5095x^2 + 0.4053x + 2.46 \quad (5.15);$$

$$y = 0.0657x^3 - 0.35x^2 + 0.5323x + 0.14 \quad (5.16);$$

$$y = 1.8362x^3 - 11.017x^2 + 20.198x - 11.017 \quad (5.17).$$

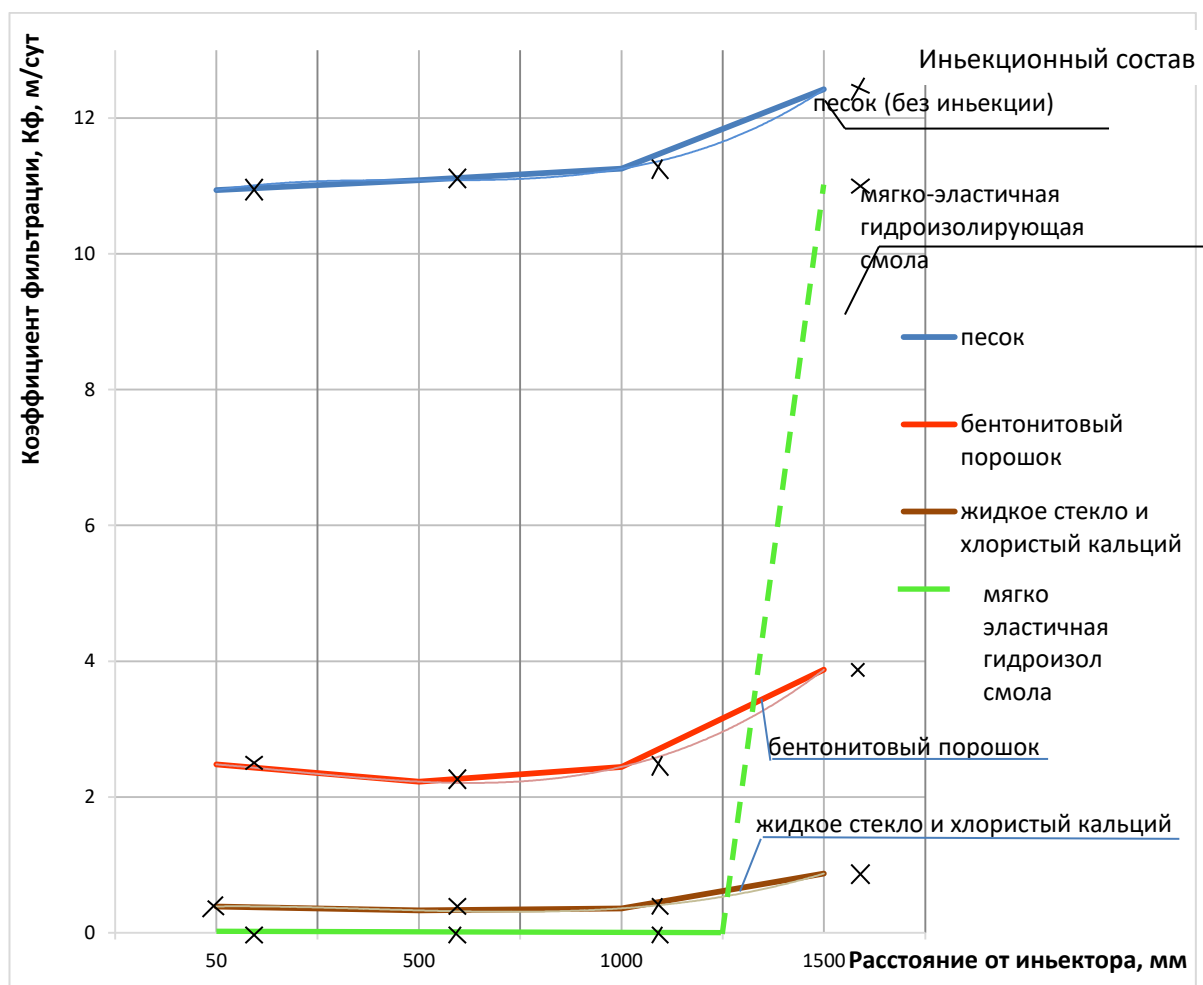


Рис. 5.5. Сравнение зависимостей коэффициента фильтрации песка, заиньекцированного различными составами при различных расстояниях от иньектора.

На рисунке 5, видно, что коэффициент фильтрации изменяется в зависимости от расстояния до иньектора и состава иньекционного раствора. Это объясняется тем, что в зависимости от иньекционного раствора меняется радиус иньекции. Рассматривая каждую из кривых графика, можно увидеть, что при максимальном расстоянии от иньектора (1500мм) коэффициент фильтрации имеет максимальные значения. Такая закономерность возникает из-за того, что каждый из иньекционных составов не распространяется на максимальное расстояние от иньектора или распространяется не полностью (не равномерно).

В полиномиальном уравнении (5.15) значения коэффициентов стоящих при переменных  $x$ , указывают на высокие показатели коэффициента фильтрации.



То есть данный инъекционный состав обладает низкими фильтрационными свойствами.

Анализ кривой, отображающей результаты коэффициента фильтрации, полученные при инъецировании раствором жидкого стекла и хлористым кальцием, а также полиномиального уравнения (5.16) показывает, что инъекционный раствор распределился равномерно на максимальном расстоянии от инжектора (1500мм), однако значения коэффициента фильтрации при данном инъекционном составе не являются достаточными для устройства водонепроницаемого экрана.

Кривая соответствующая инъекционному составу мягко-эластичной гидроизоляционной смолы указывают на достижение требуемого результата. На расстоянии от инжектора 0-1250мм значение коэффициента фильтрации равно нулю. Данный состав для инъекции позволяет создать надежный водонепроницаемый противофильтрационный экран.

## 5.5. Результаты определения коэффициента фильтрации по прибору СПЕЦГЕО

Результаты определения коэффициента фильтрации по прибору СПЕЦГЕО представлены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Журнал определения коэффициента фильтрации по формуле из ДСТУ Б В.2.1-23: 2009, с помощью прибора СПЕЦГЕО

№ п/п	Краткое описание грунта	Время фильтрации, с	Объем профильтр. воды, см <sup>3</sup>	Коэфф. фильтрации, см/с	Сред. коэфф. фильтр. см/с	Темпер. воды, С
	ИГЭ	T	Q	k	k <sub>ср</sub>	t, С
1	2	3	4	5	6	7
1	Песок среднезернистый (в сухом	50	55	0.044	0.0426	20 С
2		50	50	0.04		
3		50	50	0.04		

4	состоянии)	50	60	0.048		
5		50	55	0.044		
6		50	50	0.04		
1	Песок среднезернистый (в увлажненном состоянии)	60	25	0.0166	0.0165	20 С
2		50	20	0.016		
3		50	22	0.0176		
4		60	23	0.0153		
5		60	25	0.0166		
6		50	21	0.0168		

Исследования по определению коэффициента фильтрации по прибору СПЕЦГЕО проводились для грунта (песка) в сухом и водонасыщенном состоянии. Были получены значения для песка среднезернистого в сухом состоянии – 36.81 м/сут, в увлажненном состоянии – 14.26 м/сут. Для определения переходного коэффициента бралось значение в водонасыщенном состоянии.

#### **5.6. Результаты определения коэффициента фильтрации по разработанной методике в лабораторном стенде с учетом переходного коэффициента.**

Для определения переходного коэффициента мы брали среднее значение коэффициента фильтрации песка определенного по прибору СПЕЦГЕО (табл.5.5), а также среднее значение коэффициента фильтрации песка определенного по разработанной методике в лабораторном стенде (табл.5.1). Имея два значения коэффициента фильтрации чистого песка полученных по разным методикам, определяли переходной коэффициент, для приведения всех результатов к методике по ДСТУ Б В.2.1-23: 2009 [1]. Значение переходного коэффициента составило 1,30. В таблице 5.6 представлены результаты всех проводимых испытаний, с учетом переходного коэффициента.

Результаты экспериментов по исследованию коэффициента фильтрации в  
 приведенные к методике ДСТУ Б В.2.1-23: 2009 [1] ( $k=1,3$ )

Исследуемый образец	Знач. коэф. фильтр. на расст. от крана 1500мм (Кран 1), м/сут	Знач. коэф. фильтр. на расст. от крана 1000мм (Кран 3), м/сут	Знач. коэф. фильтр. на расст. от крана 500мм (Кран 4), м/сут	Знач. коэф. фильтр. на расст. от крана 50мм (Кран 5), м/сут	Среднее знач. по всем кранам м/сут
1	2	3	4	5	6
Чистый песок	15.8808	14.6289	14.4079	14.2207	14.7846
Песок с инъекцией бентонитовым раствором	5.0388	3.1759	2.8938	3.224	3.5831
Хлористый кальций + жидкое стекло	1.1336	0.468	0.429	0.5044	0.6338
Мягко-эластичная гидроизолирующая смола MC-Injekt GL-95	14.3221	водоупор	водоупор	водоупор	-

Исходя из таблицы 5.6, можно сделать выводы о фильтрационных свойствах исследуемых инъекционных составов. Инъекционный состав с бентонитовым порошком по степени водопроницаемости относится к сильноводопроницаемым. Состав с хлористым кальцием и жидким стеклом относится к водопроницаемым. Наилучшие показатели по степени водопроницаемости показал противофильтрационный состав из мягко-эластичной гидроизолирующей смолы MC-Injekt GL-95, он оказался не водопроницаемым, радиус распространения данного экрана составил 1,25 м.

## 5.7. Влияние рецептурно-технологических факторов на механические свойства грунтобетонного экрана на основе цемента

В данном исследовании изучались свойства полученного грунтобетонного противодиффузионного экрана. Такие конструкции должны обладать рядом заданных физико-механических свойств. Представляло интерес изучить прочность на сжатие полученной грунтобетонной конструкции. Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели следующие: подбор и определение рецептурного состава, а также варьирование технологических режимов инъецирования.

В целях снижения затрат при приготовлении высокодисперсных суспензий инъекционных растворов должно осуществляться совместно с тонкодисперсными минеральными добавками и суперпластификаторами [10, 11]. Применение последних позволяет снизить эффективную вязкость суспензий инъекционных вяжущих и резко снизить седиментацию. Это должно быть достигнуто за счет гомогенизации смеси.

Возможности повышения прочности грунтобетона, создание более плотной упаковки зерен, могут быть осуществлены путем целенаправленного влияния на его структуру технологических факторов. Такими факторами являются как сам состав грунтобетона, так и технологические решения, применяемые при его получении.

В данной работе представляло интерес оптимизировать составы грунтобетонов, а также установить влияние технологических факторов на их физико-механические характеристики.

Исследования проводились по 18-ти точечному четырехфакторному D-оптимальному плану [12], описанному в разделе 2, п.2.4.

Нормализация всех факторов состава бетона выполнена по стандартным формулам [12]:

$$x_i = (X_i - X_{0i})/\Delta X_i, \quad (5.18)$$

где  $X_{0i} = 0.5 \cdot (X_{i,max} + X_{i,min})$ ,  $\Delta X_i = 0.5 \cdot (X_{i,max} - X_{i,min})$ .

В эксперименте варьировались такие независимые факторы как:

$X_1 = 450 \pm 100$  – расход вяжущего в грунтобетоне, кг/м<sup>3</sup>;

$X_2 = 10 \pm 10$  – количество наполнителя, %;

$X_3 = 3 \pm 2$  – давление нагнетания раствора, МПа;

$X_4 = 3 \pm 1$  – время нагнетания, мин.

Обращает на себя внимание тот факт, что для кубического метра грунтобетона принято достаточно большое количество вяжущего. Это объясняется тем, что в пробуренной скважине находится достаточно большое количество бентонитового раствора, частички которого необходимо связать в один плотный конгломерат. Таким образом, полученный в результате этого композитный грунтобетон должен обладать необходимыми для противофильтрационного экрана свойствами, а именно прочностью при сжатии.

В качестве наполнителя, был использован молотый кварцевый песок ( $X_2$ ), с удельной поверхностью  $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Эта дисперсность наполнителя была predetermined относительно недорогим помолом.

Влияние содержания наполнителя на свойства цементного камня исследовались в работах многих авторов [13, 14]. Однако, согласно [15], простой перенос оптимальных значений степени наполнения цементных суспензий на бетоны является некорректным, т.к. часть вяжущего расходуется на обволакивание зерен заполнителя и сцепление с ними, то концентрация молотого кварцевого песка в вяжущем снова была принята в качестве рецептурного фактора. При этом необходимо учесть, что портландцемент является одним из самых дорогих вяжущих компонентов.

В качестве добавки пластификатора в бетонную смесь использовался разжижитель С-3 в количестве 0,8 % (в пересчете на сухое вещество) от массы вяжущего. Как указывалось ранее, применение данной достаточно дорогой и эффективной добавки вызвано необходимостью получения инъекционного раствора с заданной вязкостью, при условии сохранения или частичного уменьшения физико-механических свойств затвердевшего раствора.

Как упоминалось в разделе 2 в качестве эталонных составов грунтов приняты кварцевые пески с  $M_{кр} = 1.5, 2.0, 2.5$ .

Приготовление грунтобетонных смесей происходило в следующей последовательности. При приготовлении грунтобетонных смесей предварительно полученная суспензия вяжущего, полученная совместным смешением, последовательно введенных воды с добавкой С-3, портландцемента и молотого кварцевого песка, в скоростном смесителе, нагнеталась в лабораторный стенд, заполненный немолотым кварцевым песком, перемешанным в соотношении 70/30 с глинистым раствором.

В результате реализации эксперимента получены экспериментально-статистические модели, которые описывают исследуемый показатель качества грунтобетонов.

### ***Влияние технологических факторов на эксплуатационные характеристики грунтобетонов.***

Качество грунтобетона в большой степени зависит от используемых материалов. Правильный подбор материалов для инъецирования грунта, учитывающий как требования к грунтобетону, так и свойства самих материалов, – важный этап в проектировании технологического процесса. Свойства используемых материалов должны удовлетворять соответствующим государственным стандартам и техническим условиям.

Физико-механические свойства грунтобетона определяются в основном его структурой и равномерностью распределения цементной суспензии в порах песка. После инъецирования цементной суспензии в ней начинают происходить существенные изменения, которые приводят к конечным свойствам материала. Эти изменения вызываются как внешними силами, действующими при перемешивании и уплотнении в поровом пространстве, так и внутренними физико-химическими процессами, в первую очередь гидратацией цемента [16]. Немаловажным фактором, влияющим на гидратацию цемента, а, следовательно, на прочность композита в целом является рецептурный состав и режимы инъецирования.

В результате реализации эксперимента была исследована кинетика набора прочности при сжатии  $f_{ck,cube}$  грунтобетонов при различных режимах инъецирования.

Графическое представление модели 5.19, отображающей влияние рецептурно-технологических факторов показано на рис. 5.6.

$$\begin{aligned}
 Rb[1,5] = & 2,7 + 0,33x_1 \pm 0x_{12} \pm 0x_{1x2} - 0,19x_{1x3} \pm 0x_{1x4} \\
 & \pm 0x_2 - 0,44x_{22} + 0,38x_{2x3} - 0,19x_{2x4} \\
 & + 0,69x_3 \pm 0x_{32} - 0,37x_{3x4} \\
 & + 0,6x_4 - 1,07x_{42}
 \end{aligned}
 \tag{5.19}$$

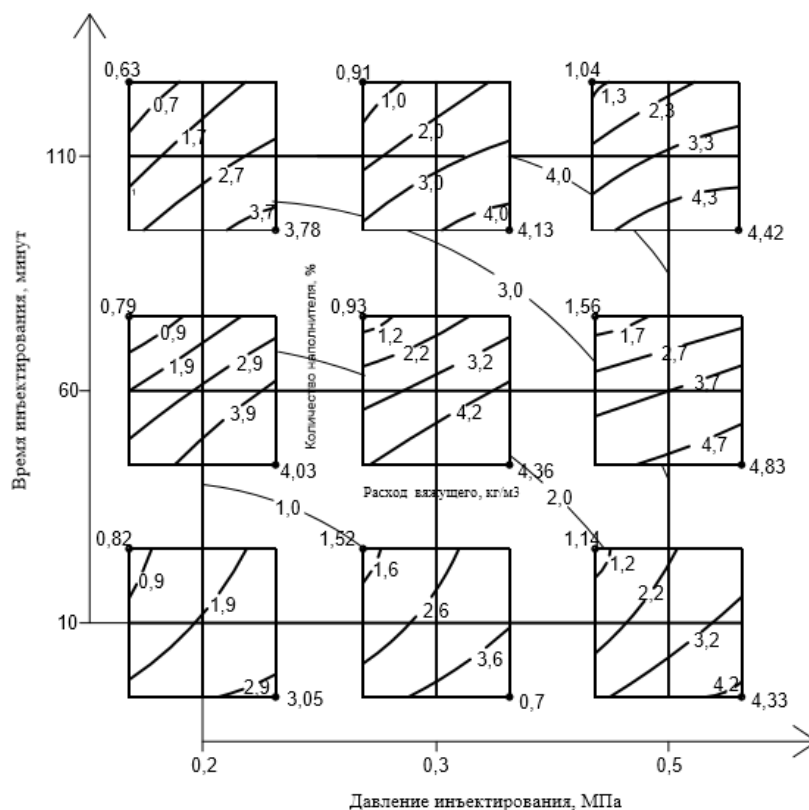


Рис.5.6. Влияние технологических и рецептурных факторов на прочность при сжатии грунтобетонов на песках с  $M_{кр}=1.5$

Анализ модели 5.19 показывает, что при относительно низком давлении инъецирования (1 МПа) и при небольшом времени инъецирования (4 мин.) возможно, получать грунтобетоны с достаточной прочностью при сжатии от 3 МПа и выше, что соответствует требованиям нормативных документов.

В свою очередь максимальных значений прочности при сжатии  $f_{ck,cube}=7,2$  МПа грунтобетон достигает при увеличении давления до 5 МПа и времени инъекции 4 мин.

Интересно отметить, что увеличение давления инъецирования с 1 до 5 МПа приводит к повышению прочности с 1,8 до 5,7 МПа (т.е. почти в 3,2 раза). В тоже время при увеличении давления с 1 до 3 МПа, при фиксированных значениях варьируемых факторов, повышение прочности наблюдается в 2 раза. Дальнейшее повышение давления приводит к повышению прочности уже до 2,5 раз. Это может быть вызвано тем, что в первом случае при низком давлении цементная суспензия пытается заполнить свободное пространство между частичками песка, а во-втором случае – струя при высоком давлении инъекции раздвигает частички песка, и тем самым в общем объеме преобладает большее количество цементной суспензии.

Аналогичная картина увеличения прочности при увеличении давления и времени инъецирования наблюдалась и при исследовании песков с  $M_{кр}=2$ , и 2,5, модели 5.20 и 5.21, их графическое отображение на рис.5.7.а и рис.5.7.б, соответственно. Причем максимальную прочность при сжатии получили на модельных грунтах с  $M_{кр}=2,5$ . Это объясняется большей проницаемостью грунтов и меньшим коэффициентом смачивания песка.

$$\begin{aligned}
 Rb[2,0] = & 3,3 + 0,28x_1 + 0,13x_1x_2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_4 \\
 & -0,11 x_2 - 0,44x_2^2 + 0,19x_2x_3 - 0,16x_2x_4 \\
 & + 0,56x_3 \pm 0x_3^2 - 0,16x_3x_4 \\
 & \pm 0x_4 - 1,12 x_4^2
 \end{aligned}
 \tag{5.20}$$



$$\begin{aligned}
 Rb[2,5] = & 4,1 + 1,7x_1 + 2,5x_2 \pm 0x_1x_2 - 0,3x_1x_2 \pm 0x_1x_4 \\
 & \pm 0x_2 + 3,5x_2^2 - 0,9x_2x_3 + 1,4x_2x_4 \\
 & + 0,2x_3 + 3,2x_3^2 + 2,6x_3x_4 \\
 & - 0,9x_4 \pm 0x_4^2
 \end{aligned}
 \tag{5.21}$$

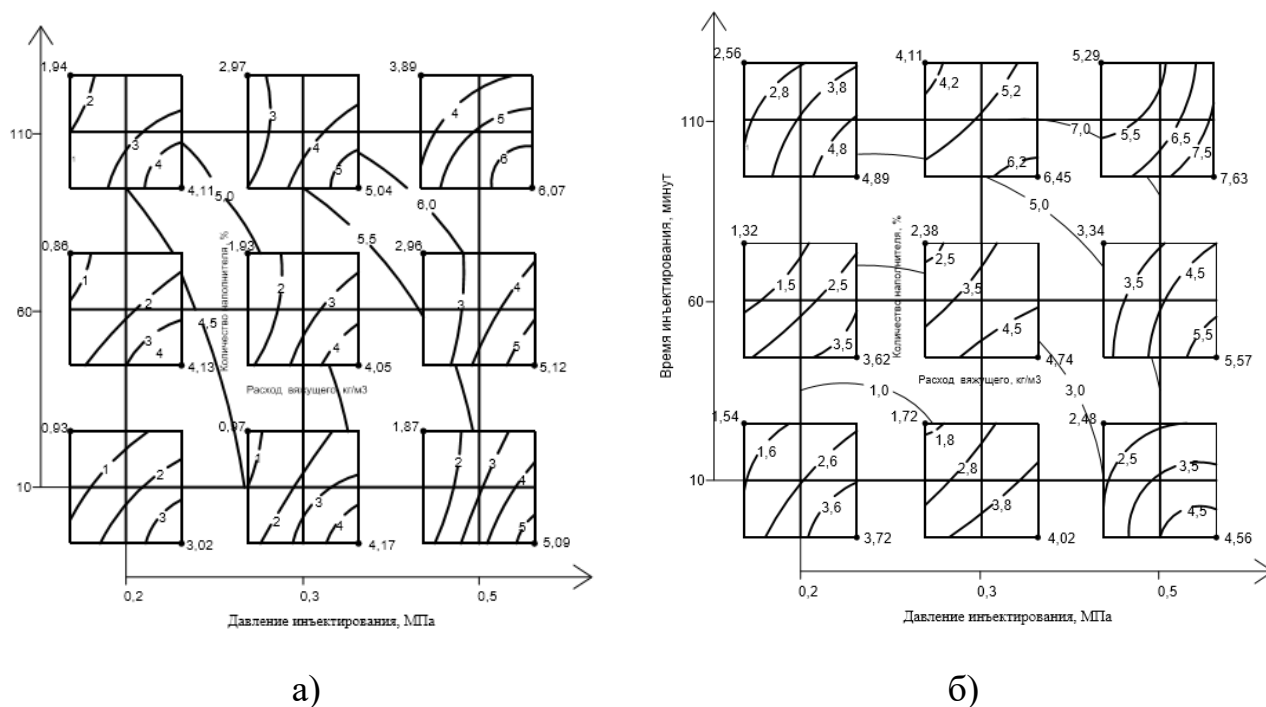


Рис.5.7. Влияние технологических и рецептурных факторов на прочность при сжатии грунтобетонов на песках с  $M_{кр}=2.0$  (а) и с  $M_{кр}=2.5$  (б)

### Выводы по разделу 5

1. Разработанная методика исследования и оборудование позволило определить коэффициент фильтрации песка, заинъецированного различными составами.

2. Сравнение результатов определения коэффициента фильтрации в приборе СПЕЦГЕО и на лабораторном стенде, позволило определить переходной коэффициент (1,3) .

3. Полученные результаты экспериментальных исследований позволили получить графики и составить полиномиальные уравнения, определяющие закономерности влияния технологических режимов инъецирования и состава инъецируемого раствора на противofильтрационные свойства грунта.

4. Анализ графиков и уравнений позволил определить наиболее эффективный состав для создания противофильтрационного экрана.

5. Проведены исследования по оптимизации составов грунтобетонов, которые возможно применять для инъекционной технологии.

6. В результате реализации эксперимента получен комплекс экспериментально-статистических моделей, которые описывают основные показатели качества грунтобетонов.

7. Анализ модели показывает, что при относительно низком давлении инъецирования (1 МПа) и при небольшом времени инъецирования (4 мин.) возможно, получать грунтобетоны с достаточной прочностью при сжатии от 3 МПа и выше, что соответствует требованиям нормативных документов.

8. Установлено, что увеличение давления инъецирования, а также времени инъекции в грунт (песок) приводит к увеличению прочности при сжатии грунтобетонов, приготовленных на основе модельного песка с  $M_{кр} = 2$ .

## РАЗДЕЛ 6

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ ПО РАЗРАБОТАННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

#### 6.1. Разработка технологической карты по инъекционной технологии

Технологический регламент на устройство горизонтального противοфильтрационного экрана (ПФЭ) закрытым способом включает следующие основные операции:

1. Отрывка траншей.
2. Засыпка траншей глиной.
3. Монтаж буровой установки.
4. Бурение пилотной скважины.
5. Протягивание трубы иньектора.
6. Откачка буровой пульпы из приямков.
7. Приготовление иньекционного раствора.
8. Ииньекция.

Технологическая карта является составной частью ППР и может использоваться при строительнο-монтажных работах в составе и предназначается для инженернο-технических работников строительных организаций, производителей работ, мастеров и бригадиров, а также работников технического надзора заказчика. В технологической карте приведены: область применения, организация и технология выполнения работ, требования к качеству и приёмке работ, калькуляция трудовых затрат, график производства работ, потребность в материально-технических ресурсах, решения по безопасности и охране труда и технико-экономические показатели.

*Область применения.* Настоящая технологическая карта разработана для комплекса работ по устройству противοфильтрационного экрана (ПФЭ) закрытым способом по разработанной методике и подобранному

инъекционному составу для локализации радиоактивных отходов (РАО). Могильник РАО расположен на территории пункта временной локализации радиоактивных отходов (ПВЛРО) "Нефтебаза" в окрестностях г. Припять. Конструктивно могильник РАО представляет собой котлован (искусственное заглубление в рельефе местности) с размерами в плане 32 x 50 м и глубиной 3 м рис.6.1. Грунт представлен в виде песка, обломки скальных пород отсутствуют, строительная группа грунта – I.

Горизонтальный противофильтрационный экран располагается под хранилищем радиоактивных отходов.

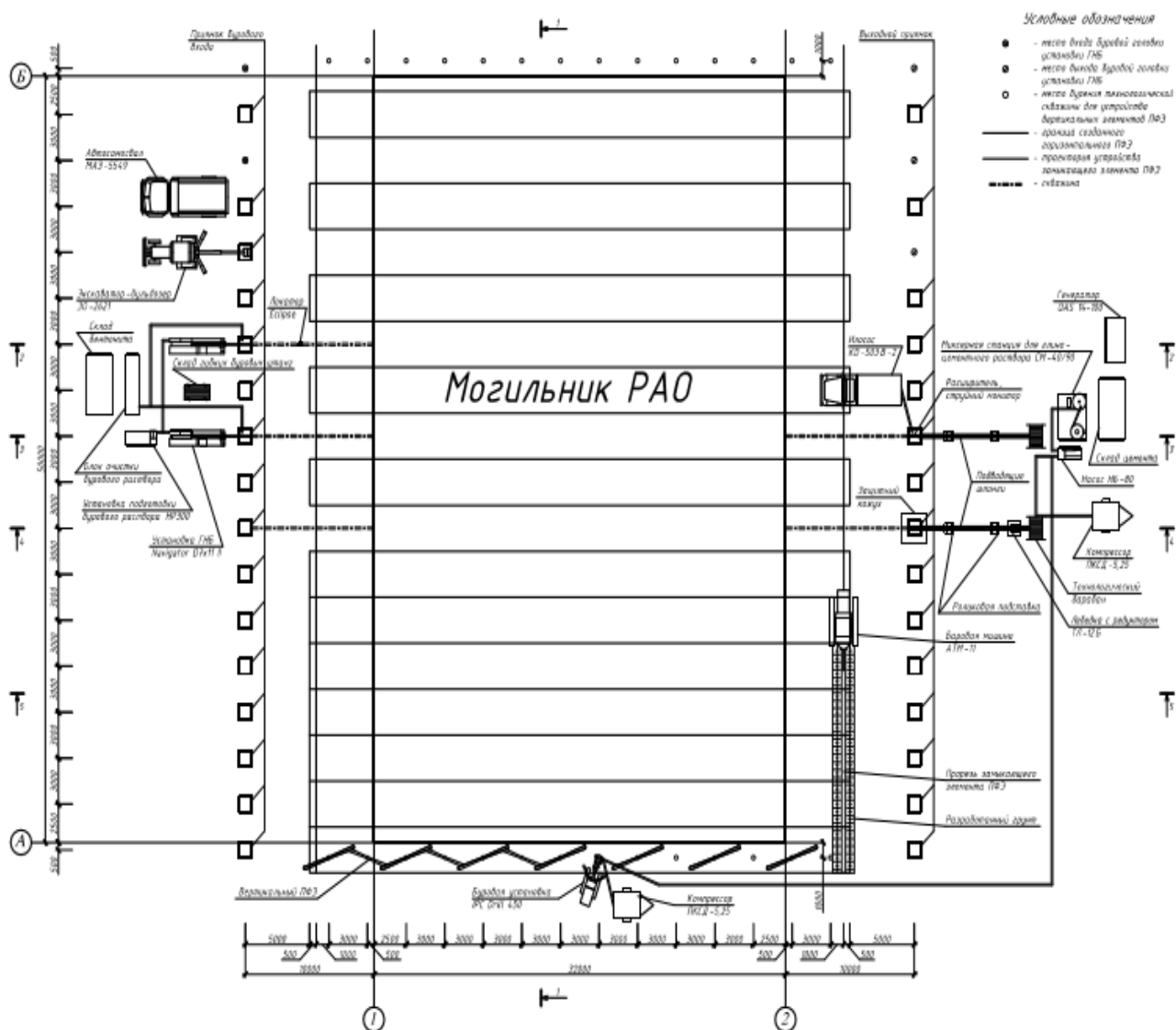


Рис. 6.1. Схема устройства противофильтрационного экрана (ПФЭ)

В качестве вертикальных противофильтрационных элементов служат вырытые по периметру траншеи, заполненные глиной.

В состав рассматриваемых картой работ входят:

- Отрывка траншей
- Засыпка траншей глиной.
- Монтаж буровой установки.
- Бурение пилотной скважины.
- Протягивание трубы иньектора.
- Откачка буровой пульпы из приямков.
- Приготовление иньекционного раствора.
- Иньекция.

Бурение скважин производят методом горизонтально направленного бурения (ГНБ) установкой Navigator D7x11 Series II фирмы "Vermeer".

*Организация и технология выполнения работ.* До начала работ по устройству противофильтрационного экрана на стройплощадке должны быть выполнены следующие подготовительные работы:

- уточнены места расположения существующих подземных объектов в зоне работ и выполнены предусмотренные проектом охранные мероприятия;
- выполнена геодезическая разбивка и вынос на местность проектных координат, а также оси сооружаемых скважин;
- устроено ограждение стройплощадок;
- устроено электроосвещение площадок;
- сооружены внутриплощадочные проезды;
- размещены передвижные административно-бытовые помещения, подготовлены места складирования строительных материалов и конструкций;
- смонтированы временный водопровод и средства пожаротушения;
- доставлены на строительную площадку все необходимые механизмы и оборудование.

Для технологии ГНБ необходимо устройство приемков бурового входа и выходных приемков расчётной ёмкости для своевременного отбора отработанной буровой суспензии илососами и транспортировки её на регенерацию. Так как мы имеем «частый» шаг скважин, расстояние между скважинами 0,3м, устройство отдельных приемков не целесообразно. Поэтому было принято решение для бурового входа и выхода устраивать траншеи ( $L = 51,5\text{м}$ ,  $b=0,5\text{м}$ ,  $h =0,5\text{м}$ ).

Перед анкерной фиксацией установки ГНБ производят настройку сигнализации предупреждения подземного столкновения с электрическими сетями, находящимися под напряжением, размещение защитных "зануляющих" матов, а, также соединение матов, корпуса установки ГНБ, миксера (смесителя) и системы сигнализации кабелями, тестирование всей системы перед началом проведения работ.

Установка ГНБ устанавливается в точке бурения, закрепляется анкерными стойками и фиксируется упорными устройствами, рассчитанными на двойное тяговое усилие, которое может развить установка. Закрепление буровой установки производится с наклоном рамы под углом  $14^\circ$ . После анкерной фиксации установки ГНБ производится запуск двигателей установки ГНБ.

Устройство вертикальных элементов ПФЭ (рис. 6.2). Траншеи, засыпанные глиной, являются вертикальными элементами противofильтрационного экрана. Они устраиваются в торцах. Всего необходимо устроить четыре траншеи. Глубина траншеи на 0,5м глубже горизонтального противofильтрационного экрана.

Бурение пилотной скважины (рис. 6.3). Пилотное бурение осуществляется при помощи породоразрушающего инструмента – буровой головки со скосом в передней части и встроенным излучателем. Буровая головка соединена, посредством полого корпуса, с гибкой приводной штангой, что позволяет управлять процессом строительства пилотной скважины и обходить выявленные препятствия в любом направлении в пределах естественного изгиба протягиваемой рабочей нити.

Буровая головка имеет отверстия для подачи специального бурового раствора, который закачивается в скважину и образует суспензию с размельчённой породой. Буровой раствор уменьшает трение на буровой головке и штанге, предохраняет скважину от обвалов, охлаждает породоразрушающий инструмент, разрушает породу и отчищает скважину от ее обломков, вынося их на поверхность.

Буровой раствор готовится на основе бентонитового порошка Tunnel-Gel Plus фирмы Baroid. Расчёт требуемого объёма специального раствора определяется по формуле:

Расчёт требуемого объёма специального раствора определяется по формуле:

$$V_{бр} = D_{ск} \times L_{ск} \times K_p = 0,19 \times 53 \times 3 = 20,14 \text{ м}^3 \quad (6.1)$$

где  $D_{ск}$  – проектный диаметр скважины;

$L_{ск}$  – длина скважины;

$K_p$  – коэффициент расхода бурового раствора.

Общий объем бурового раствора (для всех скважин):

Первую буровую штангу загружают в направляющую раму и производят её сборку с буровой головкой. Перед свинчиванием буровой штанги и буровой головки необходимо тщательно смазать резьбовые соединения, так как от этого зависит долговечность службы штанг и бура.

После выполнения операции сборки буровой штанги с буровой головкой необходимо с помощью переключателя управления подачи с насосно-нагнетательной станции буровой жидкости, пропустить жидкость через шланги в буровую штангу, ствол буровой головки, фильтр и сопла, убедившись в правильном функционировании гидросистемы и создании необходимого для выполнения бурения давления буровой жидкости.

Далее буровая головка вращательно-поступательным движением вводится в грунт и выполняется бурение по проектной траектории пилотной скважины диаметром 57 мм. Скважину устраивают на глубину 5 м. Длина скважины составляет 53 м. Бурение производят со скоростью 3 м/мин.

Оператор установки ГНБ контролирует рычагами управления (джойстиком) поступательное и вращательное движение бура, наращивает плеть буровых штанг, с помощью загрузчика и специальных зажимов, отключая при этом давление буровой жидкости в гидросистеме.

Контроль местоположения буровой головки осуществляется с помощью приёмного устройства локатора, который принимает и обрабатывает сигналы встроенного в корпус буровой головки передатчика.

На мониторе локатора отображается визуальная информация о местоположении, уклоне, азимуте буровой головки. Также эта информация отображается на дисплее оператора буровой установки. Находясь в постоянной радиосвязи с оператором локационной системы, оператор установки ГНБ обеспечивает направление движения буровой головки по заданной траектории, путём комбинации прямых проходов бура (при его вращении) с дугообразными (рулевыми). "Руление" происходит за счёт поворота бурильной лопатки до нужной ориентации бурового скоса и последующего проталкивания бура без вращения, что приводит к нужному изменению направления движения. Первый этап "руления" выполняется для горизонтального выравнивания бура, когда буровая головка достигла необходимой глубины, определяемой локационной системой. Оператор локационной системы постоянно отмечает новую позицию, глубину и "угол атаки" бурильной головки, сверяет её местонахождение с спланированной траекторией, определяет, требуется ли дополнительное переориентирование и наносит фактическую траекторию продвижения бура на план бурения.

Пилотное бурение завершается выходом буровой головки на поверхность почвы в заданной проектом точке. Поворот траектории горизонтального бурения к запланированной точке выхода не должен превышать ограничений радиуса изгиба.



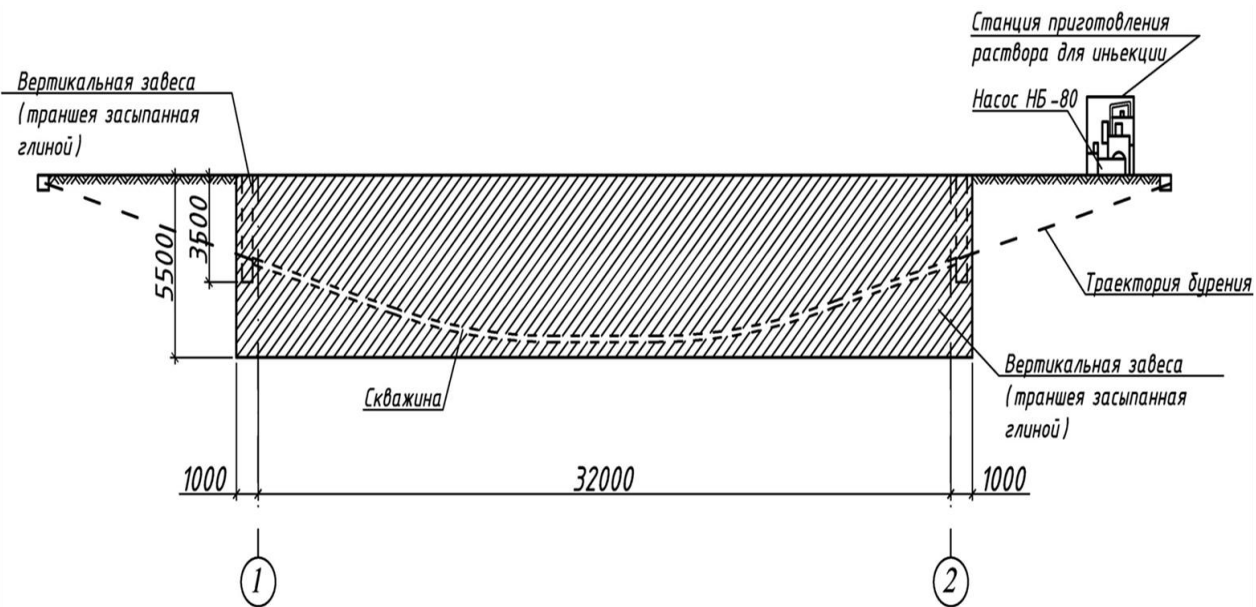


Рис. 6.2. Поперечный разрез противофильтрационного экрана, устройство поперечного замыкающего элемента (траншея заполненная глиной) (разрез 4-4)

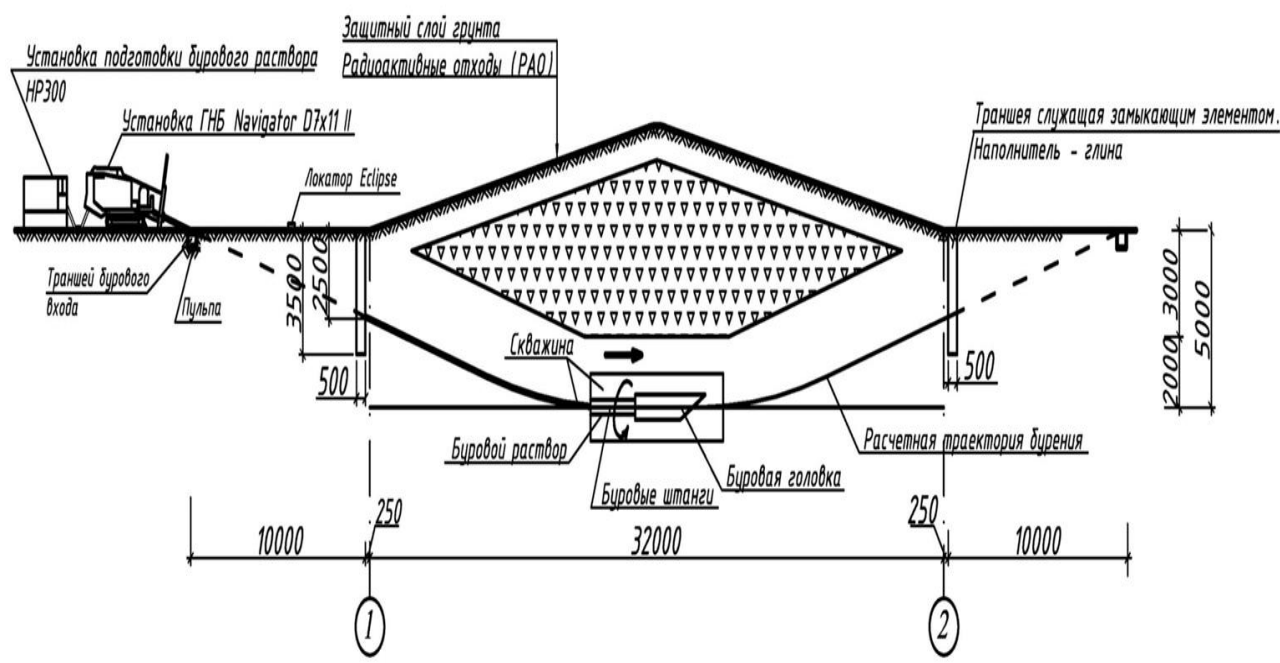


Рис. 6.3. Бурение пилотной скважины. (Разрез 2-2)

Когда оператор локационной системы видит, что буровая головка сориентирована вверх, необходимо обезопасить зону вокруг точки выхода и, как только головка выйдет на поверхность, оператор установки ГНБ должен продвинуть плетень вперёд, чтобы освободить бурильную

головку от земли и выключить двигатель, а затем отсоединить бурильную головку и извлечь передатчик.

Далее в пробуренную скважину затягивается перфорированная труба, обмотанная геосинтетикой. Геосинтетический материал позволяет раствору распространяться и не пропускает песок. Перфорирование трубы делается в тех местах, где необходимо инъецирование раствора. По краям трубы, где перфорирование заканчивается, ставятся заглушки (Рис. 6.4.).

До завершения затягивания трубы на длину одной буровой штанги (пока труба не покажется у входного отверстия скважины) на длину одной буровой штанги оператор установки ГНБ не включает подачу инъекционного раствора.

*Устройство горизонтального ПФЭ (Рис. 6.4.).*

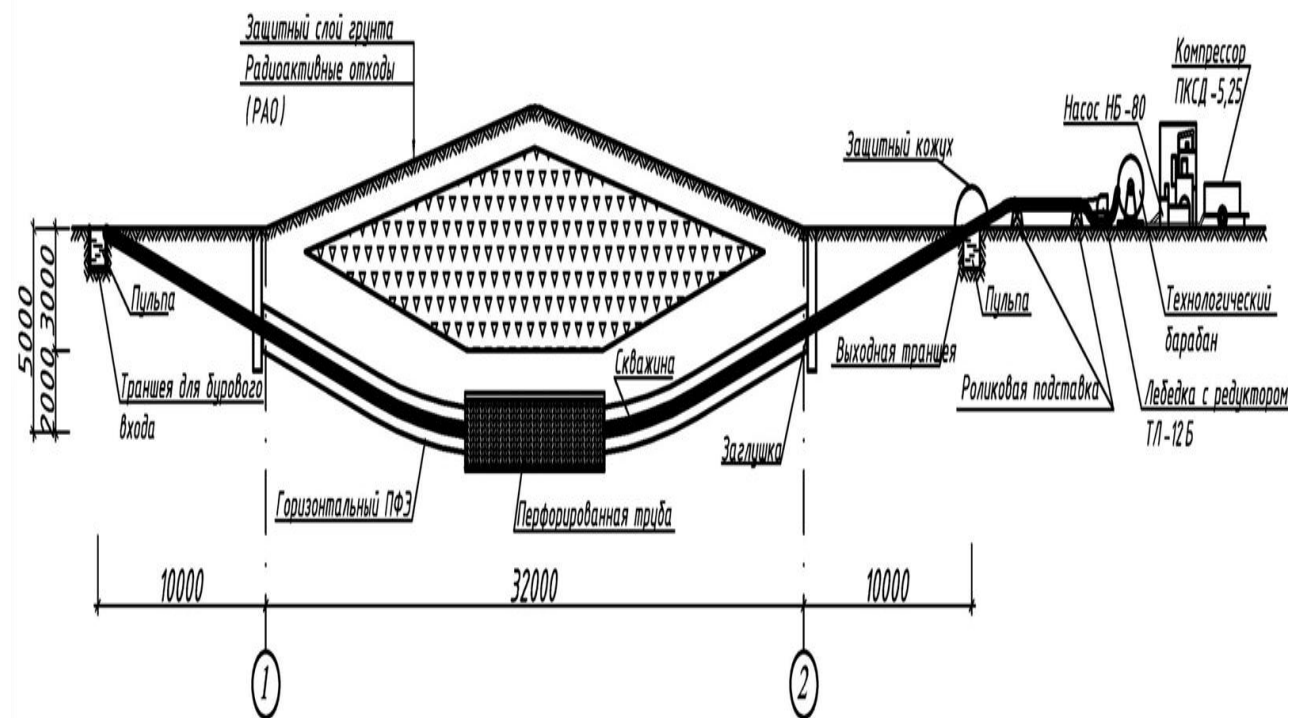


Рис. 6.4. Устройство горизонтального ПФЭ (разрез 3-3)

Перед инъецированием должно быть установлены и подготовлены к работе все необходимые механизмы и оборудование, а также согласно

инструкции приготовлен инъекционный раствор из мягко-эластичной гидроизолирующей смолы MC-Injekt GL-95.

После твердения раствора в грунте образуется секция противofильтрационного экрана толщиной 30 – 40 см.

Горизонтальный ПФЭ устраивают отдельными секциями от скважины к скважине. Всего необходимо устроить 171 секцию. Для обеспечения надёжного смыкания секций, радиусы распространения раствора накладываются друг на друга. Расстояние между технологическими скважинами из оптимизационного расчёта принято равным 0,3 м. инъекция раствора выполняется на длину 32,5 м. Поперечный разрез противofильтрационного экрана показан на Рис. 6.5.

Во избежание выхода раствора на дневную поверхность выходной приямок необходимо накрыть защитным металлическим кожухом, а горизонтальный ПФЭ необходимо устраивать с расчётом, чтобы расстояние от струи раствора до дневной поверхности составляло не менее 0,5 м. Для замыкания горизонтального ПФЭ с дневной поверхностью устраивают замыкающие элементы противofильтрационного экрана.

*Завершающий этап работ.* После завершения операций по устройству противofильтрационного экрана необходимо:

- произвести демонтаж оборудования;
- убрать ограждения.

*Требование к качеству и приёмке работ.* Высокое качество и надёжность сооружаемого противofильтрационного экрана должны обеспечиваться строительной организацией путём осуществления комплекса технических, экономических и организационных мер эффективного контроля на всех стадиях сооружения экрана.

Контроль качества выполняемых работ должен осуществляться специалистами или специальными службами, оснащёнными техническими средствами, обеспечивающими необходимую достоверность и полноту

контроля и возлагается на руководителя производственного подразделения (прораба, мастера), выполняющего данные работы.

Производственный контроль качества строительно-монтажных работ должен включать входной контроль рабочей документации и оборудования, операционный контроль отдельных строительных процессов или производственных операций в процессе их выполнения и по завершении и оценку соответствия выполненных работ, результаты которых становятся недоступными для контроля после начала выполнения последующих работ.

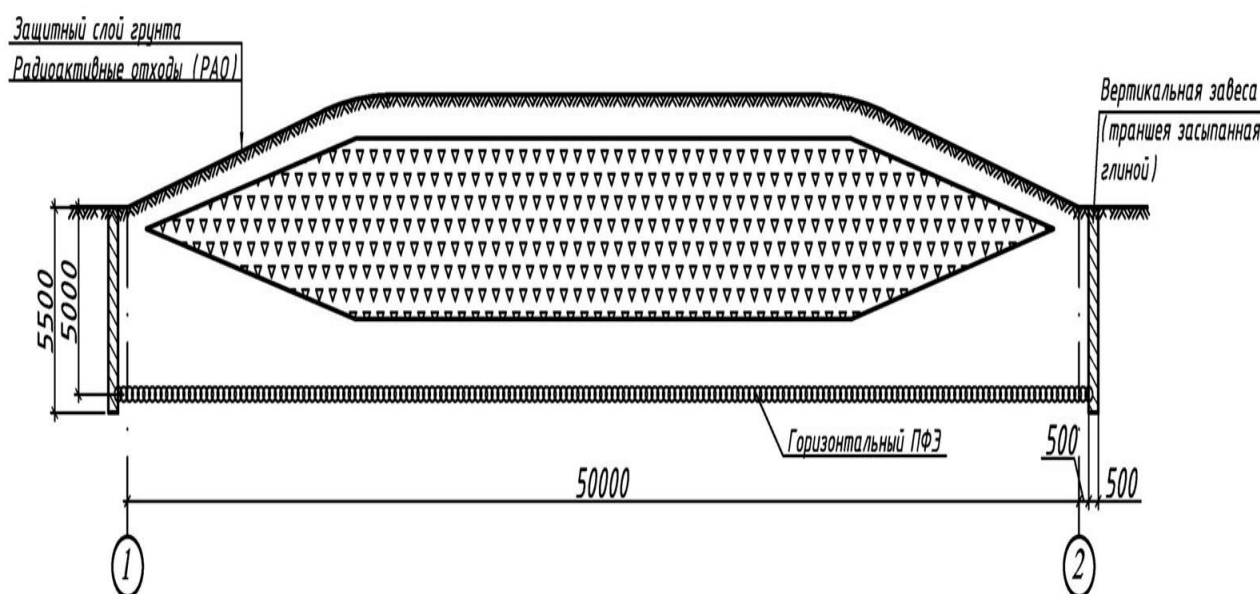


Рис. 6.5. Поперечный разрез противодиффузионного экрана

При входном контроле проектной документации должна производиться проверка её комплектности и достаточности содержащейся в ней технической информации для производства работ.

Поступающие на строительную площадку изделия, материалы и оборудование должны пройти входной контроль. Данный контроль проводится с целью выявления отклонений от требований проекта и соответствующих стандартов. Входной контроль осуществляется путём проверки внешним осмотром и замерами, а также контрольными испытаниям

в случаях сомнений в правильности характеристик или отсутствии необходимых данных в сертификатах и паспортах заводов-изготовителей. Результаты входного контроля оформляются актами входного контроля.

Операционный контроль должен осуществляться в ходе выполнения строительных процессов или производственных операций и обеспечивать своевременное выявление дефектов и принятие мер по их устранению и предупреждению. Контроль проводится под руководством мастера или прораба.

В ходе выполнения работ необходимо вести журналы бурения.

Контроль качества готового сооружения включает в себя бурение исследовательских скважин, выбуривание образцов для определения прочности водонепроницаемости и сплошности созданного противодиффузионного экрана.

Вода для приготовления инъекционного раствора должна соответствовать требованиям ГОСТ 23732-79 "Вода для бетонов и растворов. Технические условия".

*Калькуляция трудовых затрат* (таблица 6.1), которая может быть использована при выдаче нарядов-заданий рабочим, составляется в соответствии с требованиями ДБН А.3.1-5-96 "Организация строительного производства" и Пособием к ДБН А.3.1-5-96 по разработке ПОС и ППР.

*Примечание:* в связи с отсутствием норм в современной нормативной базе на выполнение работ 3,4,5,6,7 в технологической карте нормы времени приняты по результатам экспертной оценки.

*График производства работ.* Календарный график работ разработан почасово на устройство 1п.м. завесы, длиной 32,5м. График производства работ приведён в табл. 6.2.

Таблица 6.1.

№ п/п	Обоснование нормы	Наименование работы	Ед. изм.	Объем работ		Норма времени на ед. изм. <i>чел.-ч.</i> <i>маш.-ч.</i>	Затраты труда, <i>чел.-дн.</i> <i>маш.-см</i>		Состав звена по норме
				На зах- ватку	На весь объем		На зах- ватку	На весь объем	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Е 2-1-22	Засыпка траншей глиной при помощи бульдозера	100м <sup>3</sup>	-	4,46	<u>0,88</u> 0,88	-	<u>0,5</u> 0,5	Маш. 5р-1 Бульдозер Д-104
2	Согласно нормам предприятия производителя работ	Монтаж буровой установки	1 стоянка	1	71	<u>0,085</u> 0,085	<u>0,01</u> 0,01	<u>1,81</u> 1,81	Маш. 5р-2 Буровой комплекс Vermeer Navigator D7x11 SeriesII
3	Е14-23	Приготовление и очистка бурового раствора	10м <sup>3</sup>	2,014	44,39	<u>1,68</u> 0,42	<u>0,42</u> 0,10	<u>72,32</u> 18,08	Маш.5р-1 пом.маш.3р-1

4	Согласно нормам предприятия производителя работ	Бурение пилотной скважины	1 м скважины	53	9063	<u>0,019</u> 0,018	<u>0,13</u> 0,12	<u>21,52</u> 20,39	Маш. 5р-1 Vermeer Navigator
5	Согласно нормам предприятия производителя работ	Протягивание трубы иньектора	1 м скважины	53	9063	<u>0,008</u> 0,008	<u>0,053</u> 0,053	<u>9,063</u> 9,063	Маш. 5р-1 Vermeer Navigator
6	Согласно нормам предприятия производителя работ	Откачка буровой пульпы из приямка	10 м 1 м скважины	5,3	906,3	<u>0,16</u> 0,14	<u>0,106</u> 0,093	<u>18,13</u> 15,86	Маш. 5р-1 пом.маш. 3р - 1
7	Применительно Е4-1-47, п.4а	Пригот. иньекц. раствора МС-Inject-95	1 м <sup>3</sup>	0,99	239,7	0,25	0,03	,29	5 Маш. 3р-1 Миксерная станция СМ-40/90
8	Согласно нормам предприятия производителя работ	Иньецирование раствором МС-Inject-95	1 м скважины	53	9063	<u>0,019</u> 0,018	<u>0,13</u> 0,12	<u>21,52</u> 20,39	Маш.5р-2 Буровой комплекс Vermeer Navigator





*Материально-технические ресурсы.*

Потребность в основных материалах приведена в табл. 6.3.

Потребность в технологической оснастке, инвентаре, инструментах и приспособлениях приведена в табл.6.4.

Таблица 6.3

Ведомость потребности в машинах, механизмах и оборудовании

п/п	Наименование	Тип, марка, ГОСТ	Краткая техническая характеристика	Назначение	Кол-во
1	2	3	4	5	6
1	Экскаватор	ЕК-1490	Емкость ковша 0,8(0,4; 0,5; 0,65) Макс. глубина копания 5,5м; Мощность 90кВт	Рытье траншей	1
2	Бульдозер	Д-104	Вместимость ковша - 0,25 м <sup>3</sup> ; наибольшая глубина копания - 4,6 м; мощность - 44 кВт	Засыпка грунта	1
3	Автосамосвал	МАЗ-5549	Вместимость кузова - 5,1 м <sup>3</sup> ; грузоподъемность - 8 т;	Транспортировка грунта	1
5	Установка ГНБ	Vermeer Navigator D7x11 Series II	Тяговое усилие - 4082 кг; мощность двигателя - 34,6 кВт; буровые штанги - длина 1,83 м, Ø 42 мм, радиус изгиба 29 м; макс. длина бурения - 110 м; макс. расширение -300 мм	Бурение пилотной скважины	1
6	Установка подготовки бурового раствора	Vermeer HP300	макс. производительность насоса - 68.1 л/мин; макс. давление - 4,9 МПа; емкость бака - 1135 л; мощность двигателя - 18,6 кВт.	Приготовление и перекачивание бентонитового раствора	1
7	Блок очистки бурового раствора	—	—	Очистка бурового раствора	
8	Система локации	DigiTrak Eclipse	Радиус действия телеметрии - 610 м; макс. глубина - 42 м.	Отслеж. траектории бурения.	1

Продолжение табл.6.3

1	2	3	4	5	6
9	Машина илосос-ная	КО-503В-2	Вместимость цистерны - 3,75 м <sup>3</sup> ; максимальная глубина всасывания -4 м; производительность вакуум-насоса - 240 м <sup>3</sup> /ч; максимальное разрежение в цистерне 0,08 МПа; время наполнения цистерны 3-6 мин.	Откачка буровой пульпы	1
10	Миксерная станция	СМ-40/90 "Вихрь"	Макс. производительность - 10 м <sup>3</sup> /ч; объем бака смесителя - 400 л; объем бака накопителя – 900 л; общая мощность 10,8 кВт.	Приготовление раствора	1
11	Поршневой насос	НБ-80	Наибольшее давление - 10 МПа; макс. производительность - 19,8 м <sup>3</sup> /ч; мощность - 80 кВт	Подача раствора	1
12	Генератор	Atlas Copco QAS 14-	Мощность - 100 кВт.	Источник электроэнергии	1

Таблица 6.4.

Потребность в технологической оснастке, инвентаре, инструментах и приспособлениях.

№п/п	Наименование	Тип, марка, ГОСТ	Назначение	Кол-во
1	2	3	4	5
1	Комплект гибких буровых штанг	Firestick, Ø 57, мм L=1,83 м	Оснащение для проходки	1
2	Буровая головка	Стандартная, Ø 57 мм	Оснащение для проходки	1
3	Буровое долото	Ø 57 мм	Оснащение для проходки	1

1	2	3	4	5
4	Труба	Ø 57 мм	Заполнение прорези раствором	1
5	Геосинтетика	рулонов 1,5x132	Обвертывание трубы	100
6	Рулетка 10 м	ГОСТ 7502-98	Для линейных измерений	1
7	Рукавицы строительные	ГОСТ 12.04.010-75	Для защиты рук	0
8	Каска строительная	ГОСТ 12.4.087-84	Для защиты головы	6

Техника безопасности и охрана труда. Работы по устройству противофильтрационного экрана должны выполняться в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:

- ДБН А.3.2 – 2009 Система стандартів безпеки праці. Промислова безпека у будівництві;
- НПАОП 0.00-1.07-94 "Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением";
- НАПБ А.01.001-2008 " Правила пожежної безпеки в Україні". Радиационную безопасность необходимо обеспечивать в соответствии ОСПУ-2005 "Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України".

Работы по устройству противофильтрационного экрана должны выполняться под руководством ответственных руководителей работ (начальника участка, прораба, мастера), назначенных приказом. На них также возлагается ответственность за выполнение мероприятий по безопасности работ и промсанитарии, охране труда, экологической и пожарной безопасности.

К выполнению работ допускаются: лица старше 18 лет, прошедшие соответствующее обучение, проверку знания требований безопасности, инструктаж в соответствии с требованиями ДБН А.3.2-2-2009 и НПАОП 0.00-4.12-05 "Типовое положение про порядок проведения обучения и проверки знаний по вопросам охраны труда" и получившие удостоверения на право производства конкретного вида работ.

Охрана труда рабочих должна обеспечиваться выдачей администрацией необходимых средств индивидуальной защиты (специальной одежды, обуви и др.), выполнением мероприятий по коллективной защите рабочих (ограждения, освещение, вентиляция, защитные и предохранительные устройства и приспособления и т.д.), санитарно-бытовыми помещениями и устройствами в соответствии с действующими нормами и характером выполняемых работ. Рабочим должны быть созданы необходимые условия труда, питания и отдыха. Работы выполняются в спецобуви и спецодежде. Все лица, находящиеся на строительной площадке, обязаны носить защитные каски.

Санитарно-бытовые помещения, автомобильные и пешеходные дороги должны размещаться вне опасных зон. В вагончике для отдыха рабочих должны находиться и постоянно пополняться аптечка с медикаментами, носилки, фиксирующие шины и другие средства для оказания первой медицинской помощи. Все работающие на строительной площадке должны быть обеспечены питьевой водой.

Все опасные зоны работ должны быть обозначены предупредительными и указательными знаками, хорошо видимыми в любое время суток.

Все используемое оборудование и инструменты должны быть в исправном состоянии. Работа на неисправном оборудовании или с использованием неисправных инструментов запрещается. Все открытые и движущиеся части механизмов и машин должны быть снабжены средствами защиты, исключающими возможность попадания в механизмы и машины посторонних предметов и травмирования людей. Электродвигатели и пусковая аппаратура должны быть защищены от попадания на них воды и раствора. Корпусы всех механизмов, ручных электрических машин должны быть заземлены. Места соединений кабелей должны быть заизолированы.

При монтаже и эксплуатации оборудования должны выполняться требования безопасности, указанные в технических инструкциях по

эксплуатации, монтажу и ревизии оборудования, разработанные заводами-изготовителями.

Лица, ответственные за содержание строительных машин в работоспособном состоянии, обязаны обеспечивать техническое обслуживание и ремонт в соответствии с требованиями эксплуатационных документов завода-изготовителя.

Наладка, смазка и ремонт механизмов без их остановки запрещается.

После окончания монтажа все трубопроводы работающие под давлением, должны быть испытаны при давлении, в 1,5 раза превышающем максимальное рабочее давление.

Пуск насосов должен производиться при полностью открытом кране растворовода.

Разработка магистралей, насосов должна производиться только после полного снятия давления в системе.

Членам буровой бригады запрещается:

- передавать управление и обслуживание механизмов и оборудования лицам, не имеющим на это права, а также оставлять работающие механизмы, требующие присутствия людей, без присмотра;
- допускать присутствие людей непосредственно у ротора во время работы бурового станка;
- переключать скорости, включать и выключать муфты механизмов при включённом фрикционе двигателя;
- находиться в радиусе действия ключа при развинчивании труб ротором и гидрораскрепителем;
- чистить резьбовые соединения труб руками (нужно щётками!), навинчивать и отвинчивать породоразрушающий инструмент на весу (следует применять специальные доски);
- задействовать в работу трубы с недовёрнутыми резьбовыми соединениями;

- продавливать давлением из насоса образовавшиеся во время бурения в буровом стае и магистралях “пробки” (они ликвидируются путём разборки бурового става и магистралей).

Буровую установку следует заземлять до установки анкерных якорей. При установке заземляющих штырей и анкерных якорей необходимо пользоваться диэлектрическими перчатками и резиновыми сапогами. Анкерные и упорные устройства, фиксирующие положение бурильной установки, должны быть рассчитаны на двойное тяговое усилие, которое может развить установка.

Перед началом работы необходимо проверить исправность звуковой аварийной системы бурильной установки.

При повреждении силового электрического кабеля, находящегося под напряжением, запрещается:

- оператору – покидать установку (маты), рассоединять штанги;
- рабочим – двигаться с места, касаться находящихся рядом установки, смесителя и других механизмов.

При повреждении силового электрического кабеля оператор должен:

- при бурении пилотной скважины – вытащить одну штангу назад;
- при обратном расширении – подать одну штангу вперёд.

К продолжению работ приступать только после получения разрешения организации – владельца электрического кабеля. Перед тем как продолжить бурение необходимо проверить работоспособность аварийной системы. В случае неисправности аварийной системы приступать к работе запрещается.

Если при работе на установке произошло повреждение других смежных коммуникаций, необходимо сообщить их владельцу о происшедшей аварии и прекратить работу до получения разрешения на производство работ.

При повреждении действующего газопровода необходимо:

- прекратить бурение, выключить установку и покинуть рабочее место;
- не курить;
- срочно эвакуировать всех людей, находящихся в опасной зоне;
- вызвать по телефону представителя организации, эксплуатирующей газопровод;
- приступить к продолжению работы после разрешения организации - владельца газопровода.

По окончании работ бурильщик обязан:

- снять давление на нагнетательной линии, промыть (в случае большого перерыва в работе) нагнетательные и сбросные линии чистой водой;
- выключить приводы всех механизмов, повесить табличку "не включать";
- осмотреть все механизмы, подтянуть необходимые детали, крепёжные болты, сальники и др.;
- убрать рабочее место, очистить все подходы, сложить инструмент;
- закрыть на замок электропусковую аппаратуру, произвести запись в журнале о проделанной работе, обнаруженных неполадках и неисправностях в работе механизмов, оборудования.

*Технико-экономические показатели* приведены в табл. 6.5.

Технико-экономические показатели составлены по данным калькуляции затрат труда и графику производства работ. В состав технико-экономических показателей входят:

Общая трудоёмкость производства работ – (чел.-дни.) по итогу калькуляции.

Затраты труда на единицу объёма (1 м.п. завесы),  $T_e$

$$T_e = \sum T / V = 11,91 / 8 = 1,48 \text{ (чел-дни/м.п.)}, \quad (6.4)$$

Где  $\sum T$  – суммарные затраты труда рабочих в соответствии с почасовым

графиком производства работ (чел.-дн.).

Выработка одного рабочего в смену,  $V_p$

$$V_p = L/\sum T = 1/1,48 = 0,68, \text{ (м.п./чел.-дн.)}$$

где:  $L$  – 1 м.п. завесы,

$\sum T$  – суммарные затраты труда рабочих .

Общая продолжительность строительства – по графику (дней).

Таблица 6.5

#### Технико-экономические показатели

№ п/п	Наименование показателя	Ед.изм.	Количество
1	Общая трудоёмкость производства работ	чел.-дн	70,36
2	Затраты труда на единицу объёма	чел.-дн./м.п.	1,48
3	Выработка на одного рабочего в смену	м.п./чел-дни	0,68
4	Общая продолжительность строительства	дни	86

### 6.2. Разработка технологической карты по струйной технологии

Технологический регламент на устройство горизонтального противофильтрационного экрана (ПФЭ) закрытым способом включает следующие операции:

1. Бурение пилотной скважины.
2. Расширение скважины и затягивание в неё струйного монитора.
3. Устройство горизонтального ПФЭ.
4. Устройство вертикальных элементов ПФЭ.
5. Устройство замыкающих элементов ПФЭ.

Технологическая карта является составной частью ППР и может использоваться при строительно-монтажных работах в составе и предназначается для инженерно-технических работников строительных



организаций, производителей работ, мастеров и бригадиров, а также работников технического надзора заказчика.

В технологической карте приведены: область применения, организация и технология выполнения работ, требования к качеству и приёмке работ, калькуляция трудовых затрат, график производства работ, потребность в материально-технических ресурсах, решения по безопасности и охране труда и технико-экономические показатели.

*Область применения.* Настоящая технологическая карта разработана на комплекс работ по устройству противофильтрационного экрана (ПФЭ) закрытым способом по разработанной технологии для локализации могильника радиоактивных отходов (РАО). Могильник РАО расположен на территории пункта временной локализации радиоактивных отходов (ПВЛРО) "Нефтебаза" в окрестностях г. Припять. Конструктивно могильник РАО представляет собой котлован (искусственное заглубление в рельефе местности) с размерами в плане 32 x 50 м и глубиной 3 м. Грунт представлен в виде суглинки, обломки скальных пород отсутствуют, строительная группа грунта – I.

Представленный в технологической карте способ создания горизонтального ПФЭ эффективен в случаях, когда водоупорный слой грунта расположен на большой глубине или вообще отсутствует.

Горизонтальный противофильтрационный экран располагается под хранилищем и огибает подземную часть сооружения. Суммарная площадь всех элементов ПФЭ составляет 3186 м<sup>2</sup>.

В состав рассматриваемых картой работ входят:

- пилотное бурение скважин по заданной проектом траектории;
- расширение скважины и затягивание в неё струйного монитора;
- разработка грунта высоконапорными струями раствора с одновременным заполнением полости противофильтрационным материалом;
- устройство вертикальных элементов ПФЭ;
- устройство замыкающих элементов ПФЭ.

Бурение скважин производят методом горизонтально направленного бурения (ГНБ) установкой Navigator D7x11 Series II фирмы "Vermeer".

*Организация и технология выполнения работ.* До начала работ по устройству противофильтрационного экрана на стройплощадке должны быть выполнены следующие подготовительные работы:

- уточнены места расположения существующих подземных объектов в зоне работ и выполнены предусмотренные проектом охранные мероприятия;
- выполнена геодезическая разбивка и вынос на местность проектных координат стартовых и приёмных прямков, а также оси сооружаемых скважин;
- устроено ограждение стройплощадок;
- устроено электроосвещение площадок;
- сооружены внутриплощадочные проезды;
- размещены передвижные административно-бытовые помещения, подготовлены места складирования строительных материалов и конструкций;
- смонтированы временный водопровод и средства пожаротушения;
- доставлены на строительную площадку все необходимые механизмы и оборудование.

Для технологии ГНБ необходимо устройство прямков бурового входа и выходных прямков расчётной ёмкости для своевременного отбора отработанной буровой суспензии илососами и транспортировки её на регенерацию.

Перед анкерной фиксацией Установки ГНБ производят настройку сигнализации предупреждения подземного столкновения с электрическими сетями, находящимися под напряжением, размещение защитных "зануляющих" матов, а также соединение матов, корпуса установки ГНБ, миксера (смесителя) и системы сигнализации кабелями, тестирование всей системы перед началом проведения работ.

Установка ГНБ устанавливается в точке бурения, закрепляется анкерными стойками и фиксируется упорными устройствами, рассчитанными

на двойное тяговое усилие, которое может развить установка. Закрепление буровой установки производится с наклоном рамы под углом 14°.

После анкерной фиксации установки ГНБ производится запуск двигателей установки ГНБ, миксера для приготовления суспензии, приготовление водно-бentonитовой суспензии и добавка в нее требуемого количества полимера, а также соединение шлангов гидросистемы.

На Рис. 6.6 показана схема производства работ по устройству противофильтрационного экрана, а на Рис 6.7 поперечный разрез противофильтрационного экрана.

*Бурение пилотной скважины* (Рис.6.8). Пилотное бурение осуществляется при помощи породоразрушающего инструмента – буровой головки со скосом в передней части и встроенным излучателем. Буровая головка, посредством полого корпуса соединена с гибкой приводной штангой, что позволяет управлять процессом строительства пилотной скважины и обходить выявленные препятствия в любом направлении в пределах естественного изгиба протягиваемой рабочей нити.

Буровая головка имеет отверстия для подачи специального бурового раствора, который закачивается в скважину и образует суспензию с размельчённой породой. Буровой раствор уменьшает трение на буровой головке и штанге, предохраняет скважину от обвалов, охлаждает породоразрушающий инструмент, разрушает породу и отчищает скважину от её обломков, вынося их на поверхность.

Буровой раствор приготавливается на основе бентонитового порошка Tunnel-Gel Plus фирмы Baroid с добавлением полимерной добавки Fitter-Chek.



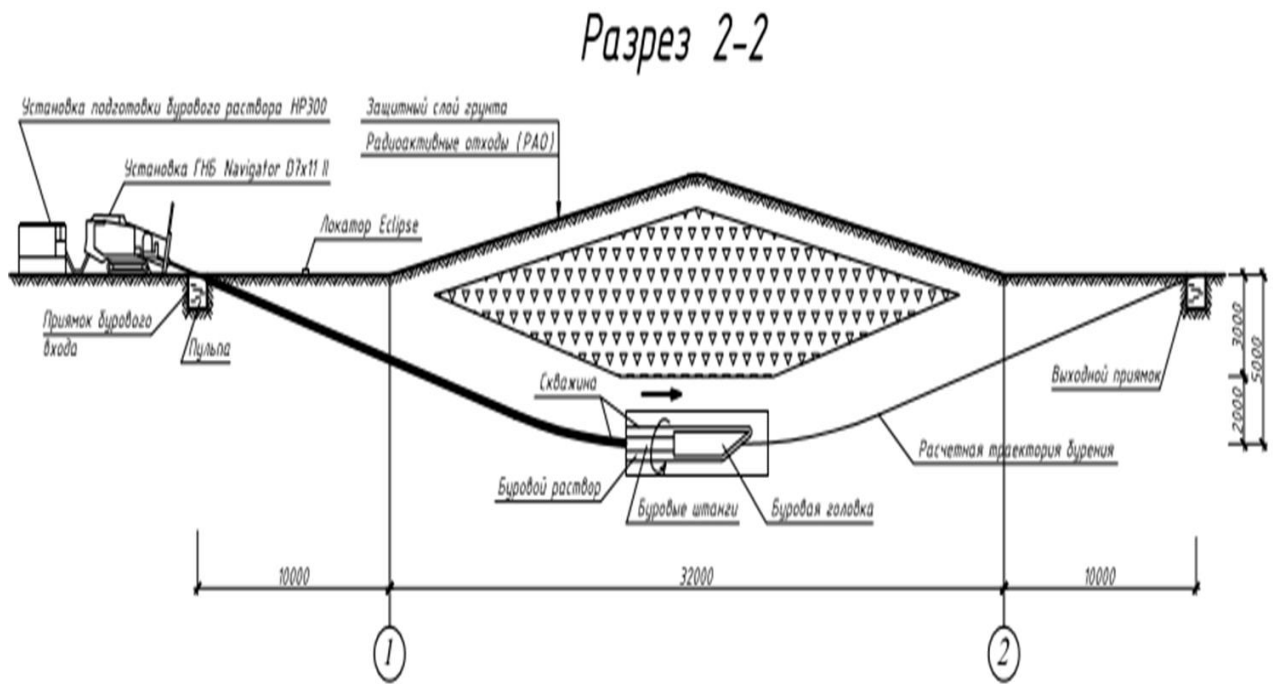


Рис. 6.8. Бурение пилотной скважины (разрез 2-2)

Для приготовления 1 м<sup>3</sup> бурового раствора плотностью от 1,03 до 1,1 г/см<sup>3</sup> необходимо:

- бентонитового порошка 25 – 35 кг;
- полимерной добавки 3 – 7 кг.

Первую буровую штангу загружают в направляющую раму и производят ее сборку с буровой головкой. Перед свинчиванием буровой штанги и буровой головки необходимо тщательно смазать резьбовые соединения, так как от этого зависит долговечность службы штанг и бура.

После выполнения операции сборки буровой штанги с буровой головкой необходимо с помощью переключателя управления подачи с насосно-нагнетательной станции буровой жидкости, пропустить жидкость через штанги в буровую штангу, ствол буровой головки, фильтр и сопла, убедившись в правильном функционировании гидросистемы и создании необходимого для выполнения бурения давления буровой жидкости.

Далее буровая головка вращательно-поступательным движением вводится в грунт и выполняется бурение по проектной траектории пилотной

скважины диаметром 90 мм. Скважину устраивают на глубину 5 м. Длина скважины составляет 53 м. Бурение производят со скоростью 3 м/мин.

Оператор установки ГНБ контролирует рычагами управления (джойстиком) поступательное и вращательное движение бура, наращивает плеть буровых штанг, с помощью загрузчика и специальных зажимов, отключая при этом давление буровой жидкости в гидросистеме.

Контроль местоположения буровой головки осуществляется с помощью приёмного устройства локатора, который принимает и обрабатывает сигналы встроенного в корпус буровой головки передатчика.

На мониторе локатора отображается визуальная информация о местоположении, уклоне, азимуте буровой головки. Также эта информация отображается на дисплее оператора буровой установки. Находясь в постоянной радиосвязи с оператором локационной системы, оператор установки ГНБ обеспечивает направление движения буровой головки по заданной траектории, путём комбинации прямых проходов бура (при его вращении) с дугообразными (рулевыми). "Руление" происходит за счёт поворота бурильной лопатки до нужной ориентации бурового скоса и последующего проталкивания бура без вращения, что приводит к нужному изменению направления движения. Первый этап "руления" выполняется для горизонтального выравнивания бура, когда буровая головка достигла необходимой глубины, определяемой локационной системой. Оператор локационной системы постоянно отмечает новую позицию, глубину и "угол атаки" бурильной головки, сверяет её местонахождение с спланированной траекторией, определяет, требуется ли дополнительное переориентирование и наносит фактическую траекторию продвижения бура на план бурения.

Оператор установки ГНБ во время бурения не только контролирует величины осевого усилия и крутящего момента, но и регулирует объем подачи бурильной жидкости в зону бурения.

Пилотное бурение завершается выходом буровой головки на поверхность почвы в заданной проектом точке. Поворот траектории горизонтального

бурения к запланированной точке выхода не должен превышать ограничений радиуса изгиба.

Когда оператор локационной системы видит, что буровая головка сориентирована вверх, необходимо обезопасить зону вокруг точки выхода и, как только головка выйдет на поверхность, оператор установки ГНБ должен отключить подачу бурильной жидкости, продвинуть плетъ вперёд, чтобы освободить бурильную головку от земли и выключить двигатель, а затем отсоединить бурильную головку и извлечь передатчик.

Расширение скважины и затягивание в неё струйного монитора (рис. 3.24) (Рис.6.9). После завершения пилотного бурения выполняется расширение скважины до диаметра 150 мм за один проход с одновременным затягиванием струйного монитора со скоростью 2 м/мин. При этом буровая головка отсоединяется от буровых штанг и вместо неё присоединяется риммер - расширитель обратного действия. За риммером, через специальный шарнир (вертлюг) и переходник, к плети подсоединяется струйный монитор, который затягивается в скважину одновременно с её расширением. Шарнирное соединение вертлюга и все резьбовые соединения, как и при пилотном бурении, должны обильно смазываться.

Приложением тягового усилия с одновременным вращением риммер протягивается через створ скважины в направлении буровой установки, расширяя пилотную скважину до необходимого для протаскивания монитора диаметра. При этом вертлюг вращается с буровой нитью и риммером, и в тоже время не передаёт вращательное движение на струйный монитор. Для обеспечения беспрепятственного протягивания объекта через расширенную скважину диаметр должен на 25-30% превышать диаметр объекта.

Подача жидкости при укладке необходима, чтобы туннель не обвалился, а укладываемый объект был взвешен в жидкости и максимально смазывался ею, уменьшая напряжения, как бурового оборудования, так и самого объекта.

Для проверки работы сопел расширителя до начала затягивания прокладываемого материала на короткий момент включается подача буровой

жидкости. Кроме того, оператор установки ГНБ должен иметь постоянную информацию от оператора локационного устройства о потоке жидкости пр начале и во время операции прокладки, для регулирования скорости затягивания и вращения расширителя.

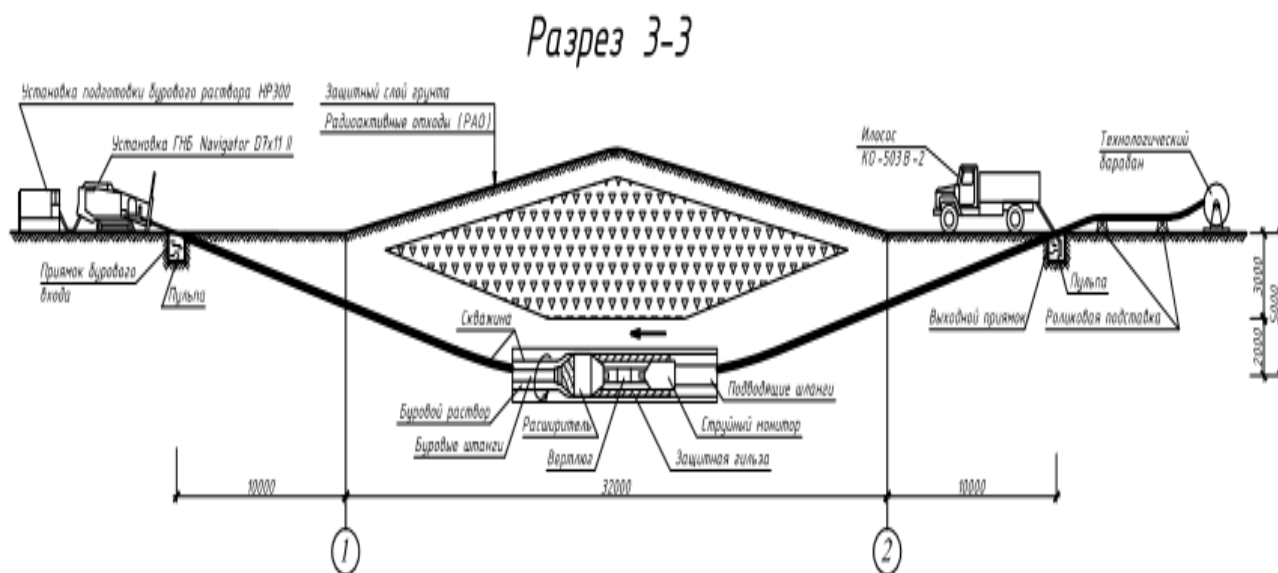


Рис.6.9. Расширение скважины и затягивание в неё струйного монитора (разрез 3-3)

При затягивании плети на длину одной буровой штанги оператор установки ГНБ отключает подачу буровой жидкости, останавливает поступательное движение и вращение, отсоединяет штангу от плети и загрузчиком перемещает ее в обойму. Эта операция повторяется до тех пор, пока расширитель не покажется у входного отверстия скважины.

После завершения операции затягивания необходимо:

- выключить двигатель установки ГНБ;
- отсоединить струйный монитор;
- убрать тянущие соединители, расширитель, фильтр и вертлюг, который очищается от земли и погружается в водостойкую смазку;
- осмотреть гидросистемы;
- произвести демонтаж оборудования;
- очистить и промыть весь инструментарий;



- отсоединить все шланги и кабели;
- промыть установку подготовки бурового раствора водой.

Устройство горизонтального ПФЭ (Рис. 6.10) (рис. 3.25). Создание противофильтрационного экрана под сооружением производят с применением технологии струйной цементации грунтов. Сущность ее заключается в использовании энергии высоконапорной струи раствора для разработки грунта и одновременного заполнения полости противофильтрационным материалом, при этом происходит перемешивание грунта с раствором. Для этой цели

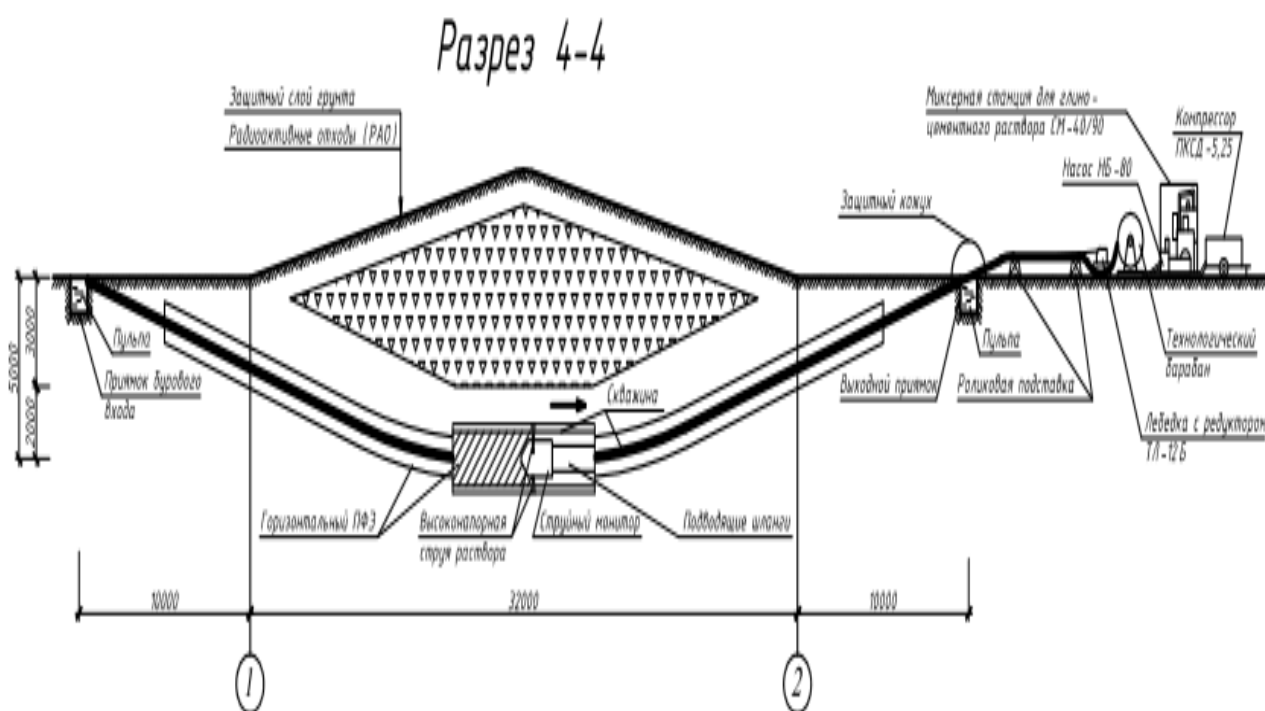


Рис. 6.10. Устройство горизонтального ПФЭ (разрез 4-4)

применяется оборудование, основную часть которого составляет струйный монитор с размещёнными на его поверхности жидкостными насадками (соплами). Назначение сопел – преобразование высокого давления раствора, развиваемого цементировочным насосом, в кинетическую энергию струи. К верхнему торцу монитора подсоединяются подводящие трубопроводы. Для повышения эффективности действия струи раствора мониторы оснащаются дополнительным соплом. Оно выполняется в виде кольцевого зазора вокруг водяного сопла. Через этот зазор-насадку подаётся сжатый воздух.

Образующаяся при этом воздушная рубашка отделяет струю от подземной воды и бурового раствора и тем самым увеличивает дальность её действия.

На рис. 6.11 показана конструкция двухкомпонентного струйного монитора.

Перед началом работ с применением струйной технологии должно быть

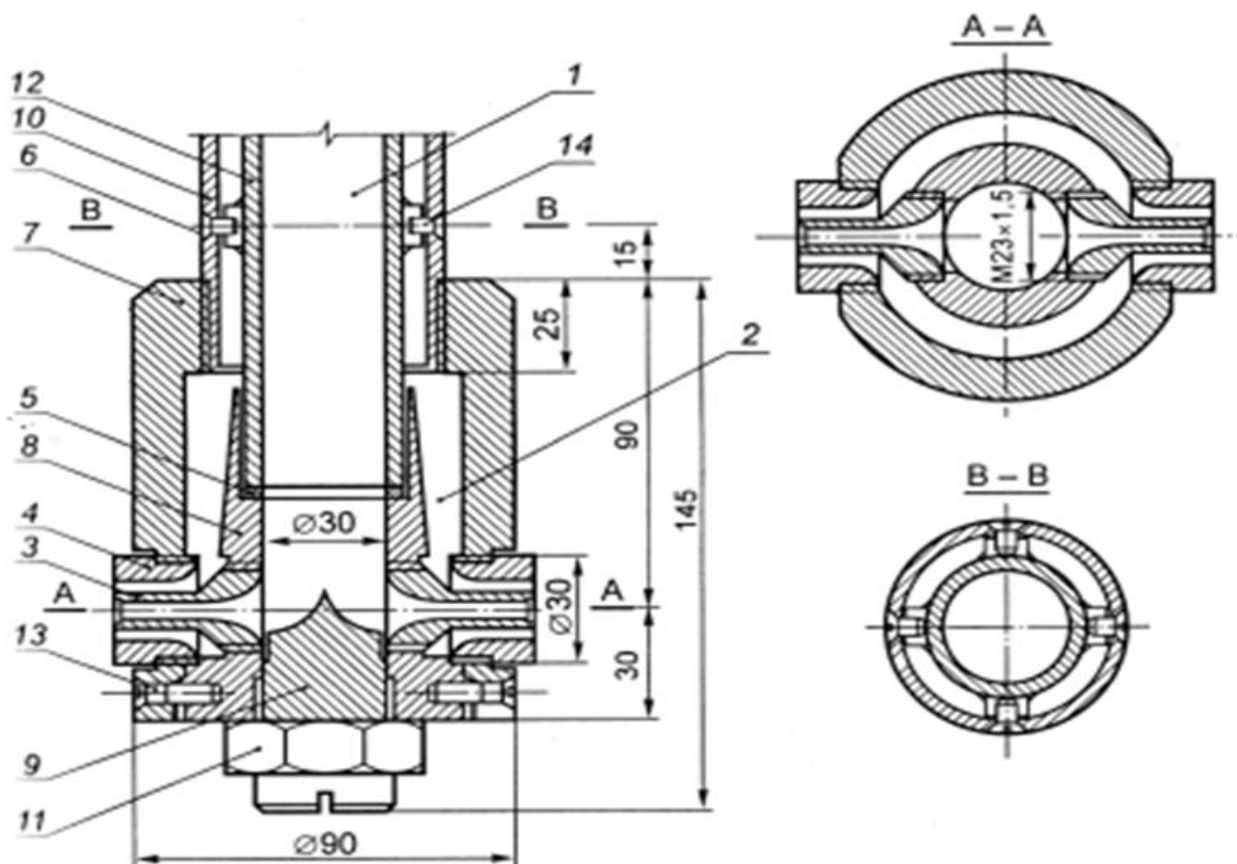


Рис. 6.11. Двухкомпонентный струйный монитор:

- 1 – канал для подачи размывающей жидкости; 2 – канал для сжатого воздуха;
- 3 – насадка (сопло) для размывающей жидкости;
- 4 – воздушная насадка (сопло); 5 – уплотняющее кольцо;
- 6 – гнездо крепёжного винта; 7 – внешний корпус; 8 – внутренний корпус;
- 9 – направляющая для потока жидкости;
- 10 – внешняя подводная труба для сжатого воздуха; 11 – гайка;
- 12 – внутренняя подводная труба для размывающей жидкости;
- 13 – регулирующий винт; 14 – крепёжный винт

установлены и подготовлены к работе все необходимые механизмы и оборудование, а также приготовлен глиноцементный раствор.

Основные параметры струйной технологии:

- портландцемент – М400;

- бентонитовый порошок – ПБМ-16;
  - водоцементное отношение раствора – от 0,8 до 1,0;
  - давление нагнетания раствора – 6-10 МПа;
  - производительность подачи цементного раствора – 7-10 м<sup>3</sup>/ч;
  - давление сжатого воздуха – 0,7 МПа;
  - производительность подачи сжатого воздуха – 5,25 м<sup>3</sup>/мин;
  - количество сопел для раствора – 2 шт;
- диаметр сопел – 3-5 мм;
- скорость протягивания монитора – 0,2-1 м/мин.

Основные параметры струйной цементации должны быть откорректированы в процессе выполнения опытных работ на начальном участке.

Для приготовления 1 м<sup>3</sup> глиноцементного раствора необходимо:

- цемента 300 – 450 кг;
- бентонитового порошка 30 – 50 кг.

Комплект механизмов и оборудования включает:

- струйный монитор, предназначенный для разработки грунта и заполнения полости противодиффузионным материалом;
- шланги высокого давления, предназначенные для подачи к струйному монитору твердеющего раствора и сжатого воздуха;
- тяговое устройство для протягивания струйного монитора в скважине;
- поршневой насос, предназначенный для подачи твердеющего раствора;
- компрессор, предназначенный для подачи сжатого воздуха с целью создания искусственного воздушного потока;
- миксерная станция, предназначенная для приготовления твердеющего раствора.

Устройство экрана в грунте производят протягиванием струйного монитора в направляющей скважине с помощью лебёдки с одновременной

подачей твердеющего раствора. Струйный монитор оснащён двумя диаметрально противоположными жидкостными соплами, что позволяет производить размыв грунта в двух противоположных направлениях. Таким образом две высоконапорные струи раствора под защитой сжатого воздуха размывают в грунте полость и одновременно заполняют её противодиффузионным материалом. После твердения раствора в грунте образуется секция противодиффузионного экрана толщиной 10 – 20 см и шириной до 4 м.

Горизонтальный ПФЭ устраивают отдельными секциями от скважины к скважине. Всего необходимо устроить 18 секций. Устройство экрана требуется производить по двусторонней тупиковой схеме, т.е. для устройства одной секции необходима одна скважина, из которой размыв грунта производится в двух диаметрально противоположных направлениях. Смежные секции следует располагать под углом друг к другу  $140^\circ$ . Это необходимо для обеспечения надёжного смыкания секций. Расстояние между технологическими скважинами в карте принято равным 3 м, расчётная длина секции – 3,2 м.

Экран по двусторонней тупиковой схеме выполняется в две очереди и в первую очередь выполняются все нечётные секции, а во вторую – чётные, что обеспечивает хорошую стыковку между секциями и предотвращает вынос раствора из готовых секций.

Во избежание выхода высоконапорной струи раствора на дневную поверхность выходной приямок необходимо накрыть защитным металлическим кожухом, а горизонтальный ПФЭ необходимо устраивать с расчётом, чтобы расстояние от струи раствора до дневной поверхности составляло не менее 0,5 м. Для этих целей раствор в струйный монитор необходимо начинать подавать на расстоянии 5 м от начала скважины и прекращать подачу раствора на расстоянии 5 м от её окончания. Для замыкания горизонтального ПФЭ с дневной поверхностью устраивают замыкающие элементы противодиффузионного экрана.

Устройство вертикальных элементов ПФЭ (Рис.6.12). Следующим этапом работ является устройство вертикальных элементов противофильтрационного экрана в его торцах. Вертикальные элементы выполняют с применением струйной технологии с такими же параметрами, как и для горизонтального экрана:

- портландцемент – М400;
- бентонитовый порошок – ПБМ-16;
- водоцементное отношение раствора – от 0,8 до 1,0;
- давление нагнетания раствора – 6-10 МПа;
- производительность подачи цементного раствора – 7-10 м<sup>3</sup>/ч;
- давление сжатого воздуха – 0,7 МПа;
- производительность подачи сжатого воздуха – 5,25 м<sup>3</sup>/мин;
- количество сопел для раствора – 2 шт;
- диаметр сопел – 3-5 мм;
- скорость протягивания монитора – 0,2-1 м/мин.

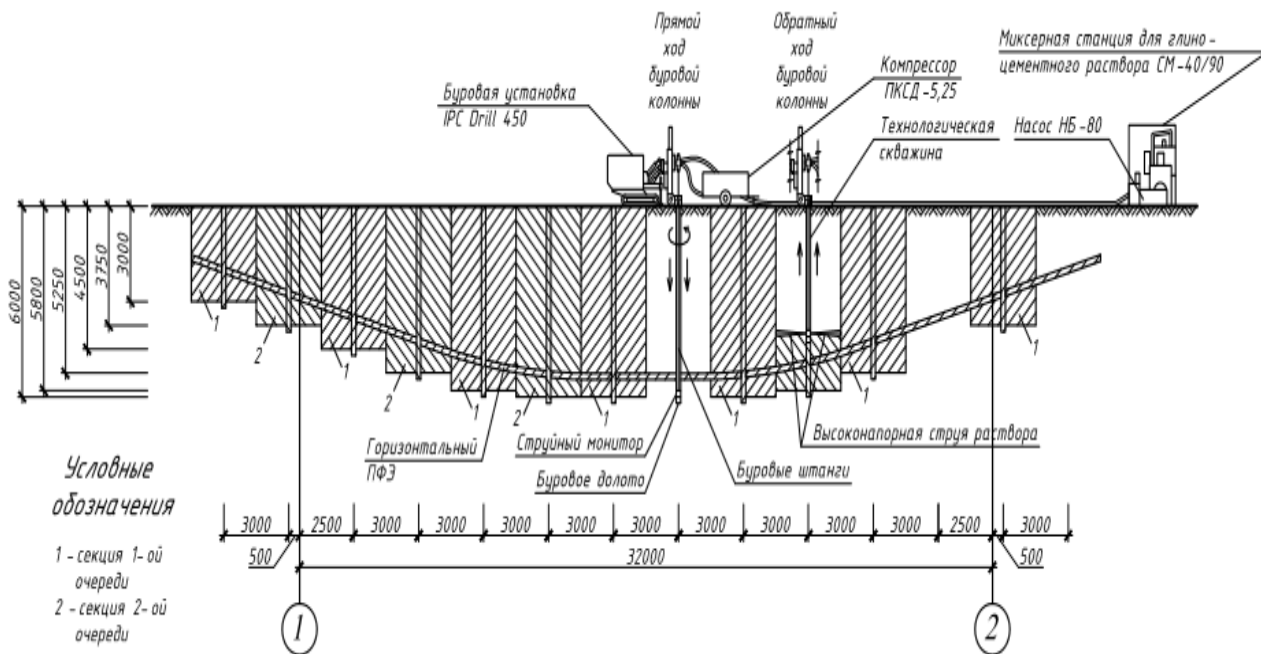


Рис. 6.12. Схема устройства вертикального ПФЭ

Горизонтальный ПФЭ устраивают отдельными секциями по двусторонней тупиковой схеме в две очереди. Смежные секции следует располагать под углом друг к другу  $140^\circ$ , расстояние между технологическими скважинами – 3 м, расчётная длина секции – 3,2 м.

Всего необходимо устроить два вертикальных элемента по обоим торцам с расчётом, чтобы смыкание секций осуществлялось на расстоянии 0,5 м до расчётной границы горизонтального ПФЭ. В каждом вертикальном элементе необходимо устроить 14 секций. Глубина секций колеблется от 3 до 6 м.

Работы по устройству секций выполняют в два этапа – производство прямого и обратного хода буровой колонны.

В процессе прямого хода производят бурение лидерной скважины диаметром 112 мм до проектной отметки. На нижнем конце буровой колонны устанавливается технологическое и проходческое оборудование (сверху – вниз): монитор, прямой клапан, переходник с обратным клапаном, породоразрушающий инструмент – двухлопастные долота, шарошки и т.п.

При низком давлении прямой клапан находится в открытом положении. В этом случае буровой раствор поступает в отверстия бурового наконечника для удаления шлама в процессе бурения.

Обратный клапан служит для предотвращения обратного проникновения бурового шлама в монитор и засорения сопел а случае остановки бурения, например, в процессе наращивания буровой колонны. Уровень давления, при котором происходит закрытие клапана, устанавливается выше уровня гидростатического давления в грунтовом массиве.

В качестве бурового раствора используется вода, бентонитовый раствор. Однако практический опыт показывает, что с целью устранения дополнительного технологического оборудования, а также операций по переключению трубопроводов в качестве бурового раствора экономически целесообразно использовать рабочий раствор.

В процессе обратного хода производят подъем колонны. При этом поднимают давление глиноцементного раствора до рабочего уровня. При

создании высокого давления прямой клапан закрывается, преграждая проникновение цементного раствора в буровой наконечник. В этом случае весь глиноцементный раствор поступает исключительно в сопла монитора.

*Устройство замыкающих элементов ПФЭ* (Рис. 6.13). Устройство замыкающих элементов противofильтрационного экрана производят буровой машиной, которая выполняет нарезание щели в грунте длиной 54 м, шириной 0,28 м и глубиной 2,5 м для последующего заполнения глиноцементным раствором.

Всего необходимо устроить два замыкающих элемента вдоль горизонтального ПФЭ на расстоянии 0,5 м до расчётной границы горизонтального ПФЭ.

Заполнение траншеи противofильтрационным материалом необходимо производить путем закачки его цементировочным насосом через трубу диаметром 50 – 60 мм, опущенную до дна траншеи.

*Завершающий этап работ.* После завершения операций по устройству противofильтрационного экрана необходимо:

- произвести демонтаж оборудования;
- заровнять все проделанные экскавации грунта;
- убрать ограждения.

*Требование к качеству и приёмке работ.* Высокое качество и надёжность сооружаемого противofильтрационного экрана должны обеспечиваться строительной организацией путём осуществления комплекса технических, экономических и организационных мер эффективного контроля на всех стадиях сооружения экрана.

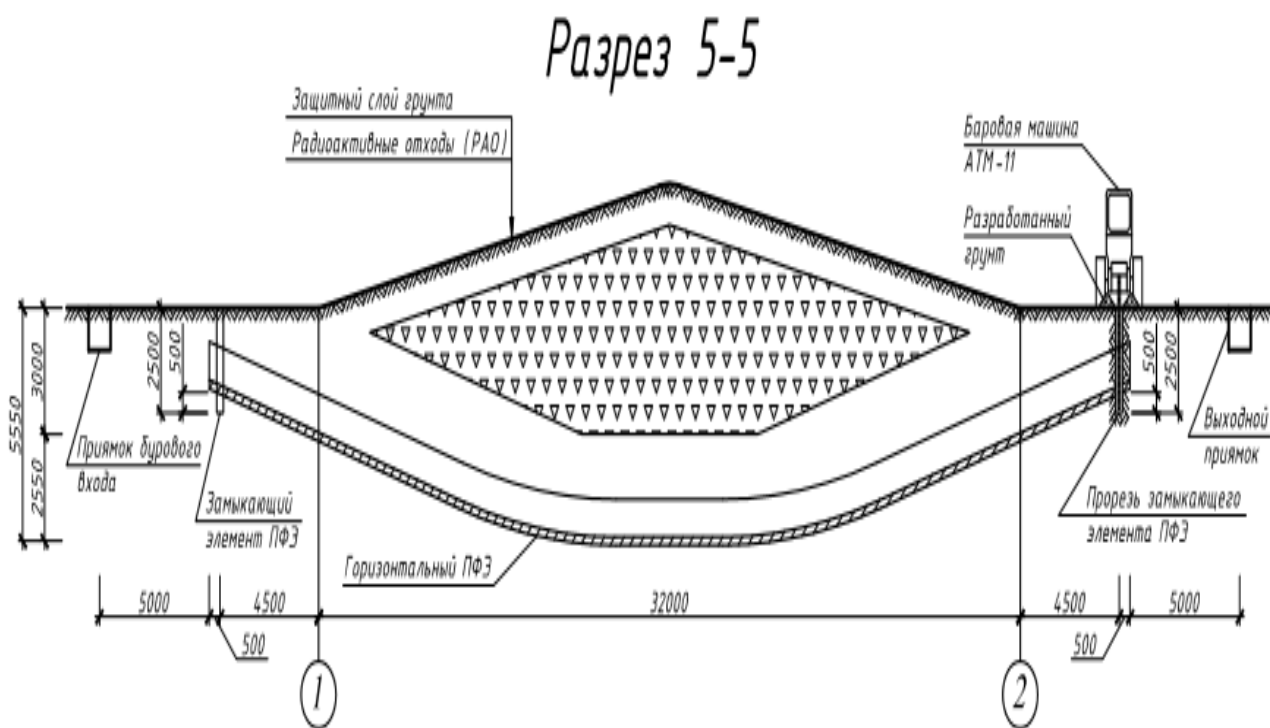


Рис.6.13. Устройство замыкающих элементов ПФЭ (разрез 5-5)

Контроль качества выполняемых работ должен осуществляться специалистами или специальными службами, оснащёнными техническими средствами обеспечивающими необходимую достоверность и полноту контроля и возлагается на руководителя производственного подразделения (прораба, мастера), выполняющего данные работы.

Производственный контроль качества строительно-монтажных работ должен включать входной контроль рабочей документации и оборудования, операционный контроль отдельных строительных процессов или производственных операций в процессе их выполнения и по завершении и оценку соответствия выполненных работ, результаты которых становятся недоступными для контроля после начала выполнения последующих работ.

При входном контроле проектной документации должна производиться проверка её комплектности и достаточности содержащейся в ней технической информации для производства работ.

Поступающие на строительную площадку изделия, материалы и



оборудование должны пройти входной контроль. Данный контроль проводится с целью выявления отклонений от требований проекта и соответствующих стандартов. Входной контроль осуществляется путём проверки внешним осмотром и замерами, а также контрольными испытаниями в случаях сомнений в правильности характеристик или отсутствии необходимых данных в сертификатах и паспортах заводов-изготовителей. Результаты входного контроля оформляются Актами входного контроля.

Операционный контроль должен осуществляться в ходе выполнения строительных процессов или производственных операций и обеспечивать своевременное выявление дефектов и принятие мер по их устранению и предупреждению. Контроль проводится под руководством мастера или прораба.

Схема операционного контроля качества устройства противодиффузионного экрана приведена в табл. 6.6.

В ходе выполнения работ необходимо вести журналы бурения и цементации.

Таблица 6.6

Схема операционного контроля качества работ по устройству противодиффузионного экрана

Наименование технологических процессов	Предмет контроля	Способы и средства контроля	Время проведения контроля	Ответственный за контроль
1	2	3	4	5
Бурение пилотной скважины	Угол наклона рамы буровой установки	Угломер	Перед бурением	Оператор установки ГНБ
	Угол наклона, положение и глубина расположения буровой головки	Локатор	При производстве работ	То же

Продолжение таблицы 6.6.

1	2	3	4	5
	Скорость проходки	Измеритель буровой установки	То же	То же
	Состав и качест-во бурового раствора	Отбор проб, полевая лаборатория	То же	То же
	Давление и расход бурового раствора	Манометр, расходомер	То же	Операторы буровой и смесительной установок
Расширение скважины и затягивание в нее струй- ного монито- ра	Скорость расширения и затягивания	Измеритель буровой установки	При производстве работ	Оператор установки ГНБ
	Состав и качест-во бурового раствора	Отбор проб, полевая лаборатория	То же	То же
	Давление и расход бурового раствора	Манометр, расходомер	То же	Операторы буровой и смесительной установок
	Тяговое усилие	Измеритель буровой установки	То же	Оператор установки ГНБ
Устройство горизонталь- ного ПФЭ	Давление и расход воздуха и раствора	Манометр, расходомер	При производстве работ	Мастер, прораб
	Скорость перемещения струйных мониторов	Тахометр	То же	То же
	Состав и качество раствора	Отбор проб, полевая строительная лаборатория	То же	Мастер

Продолжение таблицы 6.6.

1	2	3	4	5
Бурение вертикальной скважины	Диаметр, глубина и вертикальность скважины	Рулетка, отвес	При производстве работ	Оператор буровой установки
Устройство вертикального элемента ПФЭ	Давление и расход воздуха и раствора	Манометр, расходомер	При производстве работ	Мастер, прораб
	Скорость подъема монитора	Измеритель буровой установки	То же	Оператор буровой установки
	Состав и качество раствора	Отбор проб, полевая строительная лаборатория	То же	Мастер
Нарезка прорези в грунте	Глубина и ширина прорези	Отвес, рулетка	При производстве работ	Мастер, прораб
Заполнение прорези противодиффузионным материалом	Глубина погружения иньектора	По меткам на иньекторе	При производстве работ	Мастер, прораб
	Состав и качество раствора	Отбор проб, полевая строительная лаборатория	То же	Мастер
	Выход раствора на поверхность	По цвету раствора на поверхности	То же	То же

Контроль качества готового сооружения включает в себя бурение исследовательских скважин, выбуривание образцов для определения прочности грунтобетона и водонепроницаемости, проверку сплошности противодиффузионного экрана.

Цемент должен соответствовать требованиям ДСТУ Б В.2.7-46-96 "Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови".

Вода для приготовления цементного раствора должна соответствовать требованиям ГОСТ 23732-79 "Вода для бетонов и растворов. Технические условия".

Физические свойства материалов для бурового раствора должны соответствовать следующим показателям:

- вода с кислотностью  $pH = 7 - 9$ , минерализацией  $Ca^+$  меньше 500 мг/л;
- бентонитовый порошок TUNNEL-GEL PLUS светло-коричневого цвета и влажностью не более 10%,  $pH = 10,4$ ;
- полимерная добавка FITER-CHEK – порошок белого цвета с показателем кислотности  $pH = 11,5$ .

Параметры качества бурового раствора должны отвечать следующим требованиям:

- плотность 1,03 – 1,1 г/см<sup>3</sup>;
- водоотдача не более 17 см<sup>3</sup> за 30 мин;
- суточный отстой воды не более 4%;
- содержание песка не более 2%.

*Калькуляция трудовых затрат* (табл. 6.7), которая может быть использована при выдаче нарядов-заданий рабочим, составляется в соответствии с требованиями ДБН А.3.1-5-96 "Организация строительного производства" и Пособием к ДБН А.3.1-5-96 по разработке ПОС и ППР.

Примечание: в связи с отсутствием норм в современной нормативной базе на выполнение работ 2,4,6,7 в технологической карте приняты условные нормы времени, которые должны быть уточнены в процессе работ.

График производства работ. При составлении календарного графика учитывалась разбивка всего объёма работ на захватки, технологические

ярусы и т.п., а также требование нормативных документов о необходимости организации поточных методов работ. График производства работ приведён в табл. 6.8

## Калькуляция трудовых затрат

№ п/п	Обоснование нормы	Наименование работы	Ед. изм.	Объем работ		Норма времени на ед. изм. <i>чел.-ч.</i> <i>маш.-ч.</i>	Затраты труда, <i>чел.-дн.</i> <i>маш.-см</i>		Состав звена по норме
				На захватку	На весь объем		На захватку	На весь объем	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Е2-1-11 табл.7, п.1а	Устройство приямков экскаватором	100м <sup>3</sup>	0,02	0,36	$\frac{4,5}{4,5}$	$\frac{0,01}{0,01}$	$\frac{0,2}{0,2}$	Маш. 5р-1 Экскаватор ЭО-2621
2	Согласно нормам предприятия-производителя работ	Бурение пилотной скважины, расширение и затягивание струйного монитора, передвижение и монтаж буровой установки	1м скважины	53	954	$\frac{0,4}{0,2}$	$\frac{2,66}{1,33}$	$\frac{47,7}{23,85}$	Маш. 6р-2 Цем. 5р -1 Цем. 4р -1 Буровой комплекс Vermeer Navigator D7x11 Series II
3	Применительно Е14-23, п.4в	Приготовление и очистка бурового раствора	1 м <sup>3</sup>	1,33	23,94	$\frac{1,68}{0,42}$	$\frac{0,28}{0,07}$	$\frac{5,03}{1,26}$	Маш. 4р-1 пом.маш. 3р-2 Смесительная установка Vermeer HP300
4	Согласно нормам предприятия-производителя работ	Откачка буровой пульпы из приямка	1м скважины	53	954	$\frac{0,16}{0,14}$	$\frac{1,06}{0,93}$	$\frac{19,08}{16,7}$	Маш. 5р-1 Цем. 5р-1 Машина илососная КО-503В-2

5	Применительно Е4-1-47, п.4а	Приготовление глиноцементного раствора	1 м <sup>3</sup>	–	239,7	$\frac{0,11}{0,11}$	–	$\frac{3,3}{3,3}$	Маш. 3р-1 Миксерная станция СМ-40/90
6	Согласно нормам предприятия	Устройство горизонтального ПФЭ	1м сква- жины	53	954	$\frac{0,08}{0,04}$	$\frac{0,53}{0,27}$	$\frac{9,54}{4,77}$	Маш. 4р-2 Цем. 5р -1 Цем. 4р -1
7	Согласно нормам предприятия	Устройство вертикальных элементов ПФЭ	1м сква- жины	68,6	137,2	$\frac{0,32}{0,16}$	$\frac{2,74}{1,37}$	$\frac{5,49}{2,74}$	Маш. 5р-1 Маш. 4р-2 Цем. 5р -1 Цем. 4р -1
8	Е2-1-4, п.8а	Нарезка прорезей в грунте буровой машиной	100 м	0,54	1,08	$\frac{4,4}{4,4}$	$\frac{0,3}{0,3}$	$\frac{0,6}{0,6}$	Маш. 5р-1 Баровая машина АТМ-11
9	Применительно Е4-1-48 табл.4, п.1	Заполнение прорезей противофильтрационным материалом	100м <sup>3</sup>	0,38	0,76	$\frac{27}{13,5}$	$\frac{1,28}{0,64}$	$\frac{2,56}{1,28}$	Маш. 4р-1 Бет. 2р-1 Поршневой насос НБ-80
10	Е2-1-34 п.1а	Засыпка бульдозером	100м <sup>3</sup>	–	0,36	$\frac{0,66}{0,66}$	–	$\frac{0,03}{0,03}$	Маш. 5р-1 Экскаватор ЭО- 2621

=  $\frac{99,53}{54,73}$





Материально-технические ресурсы. Потребность в машинах, механизмах и оборудовании приведена в табл. 6.9.

Потребность в технологической оснастке, инвентаре, инструментах и приспособлениях приведена в табл. 6.10.

Потребность в основных материалах приведена в табл. 6.11.

Таблица 6.9

Потребность в машинах, механизмах и оборудовании.

№ п/п	Наименование	Тип, марка, ГОСТ	Краткая техническая характеристика	Назначение	Кол-во
1	2	3	4	5	6
1	Экскаватор-бульдозер	ЭО-2621	Вместимость ковша - 0,25 м <sup>3</sup> ; наибольшая глубина копания - 4,6 м; мощность - 44 кВт	Разработка и засыпка грунта	1
2	Автосамосвал	МАЗ-5549	Вместимость кузова - 5,1 м <sup>3</sup> ; грузоподъемность - 8 т;	Транспортировка грунта	1
3	Установка ГНБ	Vermeer Navigator D7x11 Series II	Тяговое усилие - 4082 кг; мощность двигателя - 34,6 кВт; буровые штанги - длина 1,83 м, Ø 42 мм, радиус изгиба 29 м; макс. длина бурения - 110 м; макс расширение - 300 мм	Бурение пилотной скважины, расширение и затягивание струйного монитора	1
4	Установка подготовки бурового раствора	Vermeer HP300	макс. производительность насоса - 68.1 л/мин; макс. давление - 4,9 МПа; емкость бака - 1135 л; мощность двигателя - 18,6 кВт.	Приготовление и перекачивание бентонитового раствора	1
5	Система локации	DigiTrak Eclipse	Радиус действия телеметрии - 610 м; макс. глубина - 42 м.	Отслеживание траектории бурения, отображение информации о буровой	1

				головке	
6	Блок очистки бурового раствора	–	–	Очистка бурового раствора	1
7	Машина илососная	КО-503В-2	Вместимость цистерны - 3,75 м <sup>3</sup> ; максимальная глубина всасывания - 4 м; производительность вакуум-насоса - 240 м <sup>3</sup> /ч; максимальное разрежение в цистерне 0,08 МПа; время наполнения цистерны 3-6 мин.	Откачка буровой пульпы	1
8	Миксерная станция	СМ-40/90 "Вихрь"	Макс. производительность - 10 м <sup>3</sup> /ч; объем бака смесителя - 400 л; объем бака накопителя - 900 л; общая мощность 10,8 кВт.	Приготовлен ие глиноцемент-ного раствора	1
9	Поршневой насос	НБ-80	Наибольшее давление - 10 МПа; макс. производительность - 19,8 м <sup>3</sup> /ч; мощность - 80 кВт.	Подача глиноцемент-ного раствора	1
10	Компрессор	ПКСД-5,25	Производительность - 5,25 м <sup>3</sup> /мин; давление - 0,7 МПа; мощность - 33 кВт.	Подача сжатого воздуха	1
11	Буровая установка	IPC Drill 450	Глубина бурения до 16 м; длина штанг - 750 мм; мощность - 35,9 кВт.	Бурение вертикальных скважин, струйная цементация	1
12	Баровая машина	АТМ-11	Глубина прорезаемой щели - до 2,7 м; ширина прорезаемой щели - 0,28 мм; мощность - 176 кВт.	Выполнение прорезей в грунте	1
13	Лебедка с редуктором	ТЛ-12Б	Тяговое усилие - 200 кг; мощность 1,5 кВт.	Протягивание струйного монитора	1
14	Генератор	Atlas Copco QAS 14-100	Мощность - 100 кВт.	Источник электроэнергии	1

Таблица 6.10

Потребность в технологической оснастке, инвентаре, инструментах и приспособлениях.

№ п/п	Наименование	Тип, марка, ГОСТ	Назначение	Кол-во
1	2	3	4	5
1	Комплект гибких буровых штанг	Firestick, Ø 43, мм L=1,83 м	Оснащение для проходки	1
2	Буровая головка	Стандартная, Ø 70 мм	Оснащение для проходки	1
3	Ример-расширитель	Ø 150 мм	Оснащение для протягивания	1
4	Защитная гильза	–	Оснащение для протягивания	1
5	Вертлюг	–	Оснащение для протягивания	1
6	Захват для струйного монитора	–	Для присоединения монитора с расширителем	1
7	Роликовые опоры	–	Регулирование угла захода трубопровода в скважину	2
8	Струйный монитор	Двухкомпонентный (Jet 2)	Разработка грунта струей раствора	1
9	Шланги высокого давления	–	–	–
10	Технологический барабан	–	–	1
11	Комплект буровых штанг	Двухкомпонентные (Jet 2)	Оснащение для проходки	1
12	Буровое долото	Ø 112 мм	Оснащение для проходки	
13	Труба	Ø 50 мм	Заполнение прорези раствором	1
14	Полевая лаборатория	–	Определение свойств бентонитового раствора	1
15	Полевая строительная лаборатория	–	Определение свойств глиноцементного раствора	1
16	Рулетка 10 м	ГОСТ 7502-98	Для линейных измерений	1

1	2	3	4	5
17	Рукавицы строительные	ГОСТ 12.04.010-75	Для защиты рук	6
18	Каска строительная	ГОСТ 12.4.087-84	Для защиты головы	6

Таблица 6.11

Потребность в основных материалах

№ п/п	Наименование материалов	Марка, тип	Единица измерения	Количество
1	Цемент	ПЦ 400	т	89,9
2	Бентонитовый порошок	ПБМ-16	т	9,6
3	Бентонитовый порошок	Baroid Tunnel-Gel Plus	кг	718
4	Полимерная добавка	Baroid Fitter-Chek	кг	119,7

*Техника безопасности и охрана труда.* Работы по устройству противофильтрационного экрана должны выполняться в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:

- СНиП Ш-4-80\* "Техника безопасности в строительстве";
- НПАОП 45.24-1.08-69 "Правила безопасности при строительстве подземных гидротехнических сооружений";
- НПАОП 0.00-1.07-94 "Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением";
- НАПБ А.01.001-2004 "Правила пожежної безпеки в Україні".

Радиационную безопасность необходимо обеспечивать в соответствии с требованиями НРБУ-97 "Норми радіаційної безпеки України" и ОСПУ-2005 "Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України", СанПиН 42-129-11-3938-85 "Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-85)".

Работы по устройству противофильтрационного экрана должны выполняться под руководством ответственных руководителей работ (начальника участка, прораба, мастера), назначенных приказом. На них также

возлагается ответственность за выполнение мероприятий по безопасности работ и промсанитарии, охране труда, экологической и пожарной безопасности.

К выполнению работ допускаются лица старше 18 лет, прошедшие соответствующее обучение, проверку знаний требований безопасности, инструктаж в соответствии с требованиями СНиП Ш-4-80\*, ДБН А.3.2-2-2009 и НПА ОП 0.00-4.12-05 "Типовое положение про порядок проведения обучения и проверки знаний по вопросам охраны труда" и получившие удостоверения на право производства конкретного вида работ.

Охрана труда рабочих должна обеспечиваться выдачей администрацией необходимых средств индивидуальной защиты (специальной одежды, обуви и др.), выполнением мероприятий по коллективной защите рабочих (ограждения, освещение, вентиляция, защитные и предохранительные устройства и приспособления и т.д.), санитарно-бытовыми помещениями и устройствами в соответствии с действующими нормами и характером выполняемых работ. Рабочим должны быть созданы необходимые условия труда, питания и отдыха. Работы выполняются в спецобуви и спецодежде. Все лица, находящиеся на строительной площадке, обязаны носить защитные каски.

Санитарно-бытовые помещения, автомобильные и пешеходные дороги должны размещаться вне опасных зон. В вагончике для отдыха рабочих должны находиться и постоянно пополняться аптечка с медикаментами, носилки, фиксирующие шины и другие средства для оказания первой медицинской помощи. Все работающие на строительной площадке должны быть обеспечены питьевой водой.

Все опасные зоны работ должны быть обозначены предупредительными и указательными знаками, хорошо видимыми в любое время суток.

Все используемое оборудование и инструменты должны быть в исправном состоянии. Работа на неисправном оборудовании или с использованием неисправных инструментов запрещается. Все открытые и движущиеся части механизмов и машин должны быть снабжены средствами защиты, исключающими возможность попадания в механизмы и машины

посторонних предметов и травмирования людей. Электродвигатели и пусковая аппаратура должны быть защищены от попадания на них воды и раствора. Корпусы всех механизмов, ручных электрических машин должны быть заземлены. Места соединений кабелей должны быть заизолированы.

При монтаже и эксплуатации оборудования должны выполняться требования безопасности, указанные в технических инструкциях по эксплуатации, монтажу и ревизии оборудования, разработанные заводами-изготовителями.

Лица, ответственные за содержание строительных машин в работоспособном состоянии, обязаны обеспечивать техническое обслуживание и ремонт в соответствии с требованиями эксплуатационных документов завода-изготовителя.

Наладка, смазка и ремонт механизмов без их остановки запрещается.

После окончания монтажа все трубопроводы работающие под давлением, должны быть испытаны при давлении, в 1,5 раза превышающем максимальное рабочее давление.

Пуск насосов должен производиться при полностью открытом кране растворорода.

Соединения напорных рукавов должны производиться с использованием быстроразъёмных элементов.

Разработка магистралей, насосов должна производиться только после полного снятия давления в системе.

Во избежание выхода высоконапорной струи раствора на дневную поверхность выходной приемок необходимо накрыть защитным металлическим кожухом, а горизонтальный ПФЭ экран необходимо устраивать с расчетом, чтобы расстояние от струи раствора до дневной поверхности составляло не менее 0,5 м.

Членам буровой бригады запрещается:

- передавать управление и обслуживание механизмов и оборудования лицам, не имеющим на это права, а также оставлять работающие механизмы,

требующие присутствия людей, без присмотра;

- допускать присутствие людей непосредственно у ротора во время работы бурового станка;
- переключать скорости, включать и выключать муфты механизмов при включенном фрикционе двигателя;
- находиться в радиусе действия ключа при развинчивании труб ротором и гидрораскрепителем;
- чистить резьбовые соединения труб руками (нужно щетками!), навинчивать и отвинчивать породоразрушающий инструмент на весу (следует применять специальные доски);
- задействовать в работу трубы с недовернутыми резьбовыми соединениями;
- продавливать давлением из насоса образовавшиеся во время бурения в буровом стае и магистралях “пробки” (они ликвидируются путем разборки бурового става и магистралей);

Буровую установку следует заземлять до установки анкерных якорей. При установке заземляющих штырей и анкерных якорей необходимо пользоваться диэлектрическими перчатками и резиновыми сапогами. Анкерные и упорные устройства, фиксирующие положение бурильной установки, должны быть рассчитаны на двойное тяговое усилие, которое может развить установка.

Перед началом работы необходимо проверить исправность звуковой аварийной системы бурильной установки.

При повреждении силового электрического кабеля, находящегося под напряжением, запрещается:

- оператору - покидать установку (маты), рассоединять штанги;
- рабочим - двигаться с места, касаться находящихся рядом установки, смесителя и других механизмов.

При повреждении силового электрического кабеля оператор должен:

- при бурении пилотной скважины - вытащить одну штангу назад;
- при обратном расширении - подать одну штангу вперед.

К продолжению работ приступать только после получения разрешения организации – владельца электрического кабеля. Перед тем как продолжить бурение необходимо проверить работоспособность аварийной системы. В случае неисправности аварийной системы приступать к работе запрещается.

Если при работе на установке произошло повреждение других смежных коммуникаций, необходимо сообщить их владельцу о происшедшей аварии и прекратить работу до получения разрешения на производство работ.

При повреждении действующего газопровода необходимо:

- прекратить бурение, выключить установку и покинуть рабочее место;
- не курить;
- срочно эвакуировать всех людей, находящихся в опасной зоне;
- вызвать по телефону представителя организации, эксплуатирующей газопровод;
- приступить к продолжению работы после разрешения организации - владельца газопровода.

По окончании работ бурильщик обязан:

- снять давление на нагнетательной линии, промыть (в случае большого перерыва в работе) нагнетательные и сбросные линии чистой водой;
- выключить приводы всех механизмов, повесить табличку "не включать";
- осмотреть все механизмы, подтянуть необходимые детали, крепежные болты, сальники и др.;
- убрать рабочее место, очистить все подходы, сложить инструмент;
- закрыть на замок электропусковую аппаратуру, произвести запись в журнале о проделанной работе, обнаруженных неполадках и неисправностях в работе механизмов, оборудования.

*Технико-экономические показатели* приведены в табл. 6.12.



## Технико-экономические показатели

№ п/п	Наименование показателя	Ед.изм.	Количество
1	Общая трудоемкость производства работ	чел.-дн	99,53
2	Затраты труда на единицу объема	чел.-дн./м <sup>2</sup>	0,031
3	Выработка на одного рабочего в смену	м <sup>2</sup> /см	35,4
4	Общая продолжительность строительства	дни	23

**Выводы по разделу 6**

1. Разработаны две базовые технологии устройства горизонтальных противofильтрационных экранов, позволяющие устраивать экраны под существующими сооружениями при отсутствии водоупора в грунтах с твердыми включениями.

2. Для обеспечения базовых технологий в качестве ведущей машины следует принять установку горизонтально-направленного бурения с тяговым усилием не менее 200кН (20т), максимальным диаметром разбуриваемой скважины не менее 100мм и длиной бурения не менее 50м.

3. Предлагаемый основной комплект машин, механизмов и оборудования позволяет реализовать разработанные базовые технологии устройства горизонтальных экранов под сооружением.

4. Сочетание разработанных технологии устройства горизонтальных противofильтрационных экранов с вертикальными экранами, совмещенных с дренажем, обеспечивает замкнутый цикл защиты подземного пространства и позволяет решить задачу комплексной локализации источников загрязнения и подтопления подземного пространства.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В работе решена поставленная проблема защиты подземного пространства от загрязнений, в том числе, при наличии в грунте твердых включений, путем теоретических исследований и анализа процессов инъекции грунта, разработки технологических основ устройства горизонтальных водонепроницаемых композитных экранов, изучения процессов инъекции грунтов, экспериментально-статистического моделирования влияния технологических факторов на исследуемые показатели, а также разработки технологических регламентов новых способов производства работ с заданными показателями качества.
2. Анализ известных результатов теоретических, практических и экспериментальных исследований, методик и технологических решений позволил составить классификацию существующих технологий устройства противofильтрационных экранов и завес, а также определил области эффективного применения разработанной технологии.
3. Разработанная методика и методы выполнения отдельных задач направлены на решение поставленной проблемы.
4. Принятая физическая модель распространения инъекции в пористом твердом теле в виде усеченной конусообразной струи позволяет проанализировать ее давление, оказывающее влияние на изменение радиуса распространения струи. Предложенные физико-математические зависимости распространения жидкостей в грунт позволяют сформировать теоретические предпосылки, на основе которых возможно спрогнозировать и сравнить результаты, полученные расчетным и опытным путем.
5. В результате экспериментально-теоретических исследований технологии устройства противofильтрационного экрана по инъекционной технологии выявлены закономерности изменения коэффициента фильтрации экрана под влиянием технологических факторов (концентрация бентонита, давление инъекции и время инъекции). Для

экрана на основе глинопорошков получены изменения коэффициента фильтрации в интервале от 0,026 м/сут. до 0,4 м/сут. Природное значение коэффициента фильтрации песка равно 6 м/сут., снижено до значения 0,026 м/сут., то есть в 223 раза.

6. В качестве основных материалов для создания горизонтального экрана на основе твердеющих составов были выбраны, цементно-глинистые, силикатно-натриевые и мягко-эластичные гидроизолирующие растворы. Экран на основе мягко-эластичного гидроизолирующего раствора показал наименьшее значение коэффициента фильтрации равно 0 м/сут., что может быть определено как полностью водонепроницаемый экран.
7. Разработанные технологии устройства горизонтальных противofильтрационных экранов обеспечивают защиту подземного пространства при наличии в грунте твердых включений и отсутствии водоупора на достигаемой глубине.
8. Достоверность результатов исследований подтверждена их апробацией при разработке: 2-х технологических карт на устройство горизонтальных противofильтрационных экранов для защиты грунта от могильников радиационных отходов по инновационным технологиям, так же апробация основных результатов выполнена на научно-практических конференциях, а также путем публикации в специализированных сборниках научных трудов в Украине и за ее пределами.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адамович А. Н. Закрепление грунтов и противодиффузионные завесы в гидроэнергетическом строительстве / А. Н. Адамович. – М. : Энергия, 1980. – 320 с.
2. Алавердян Р. А. Исследование полимерных пленочных экранов водоемов и водохранилищ: автореф. дис. на соиск. науч.ст. канд. техн. наук / Р. А. Алавердян. – Л. : ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 1976. – 25 с.
3. Алимов А. Г. Противодиффузионная защита каналов и водоемов / А. Г. Алимов // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 4. – С. 36-42.
4. Аммосова Я. М. Охрана почв от химических загрязнений / Я. М. Аммосова, Д. С. Орлов, Л. К. Садовникова. – М. : МГУ, 1989. – 96 с.
5. Бабиченко В. Я. Струменева технологія бетонування із застосуванням еластичних металевих пристроїв: автореф. дис. на соиск. науч.ст. д-ра техн. наук: спец. 05.23.08 «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва» / В. Я. Бабиченко. – Одеса, 2011. – 38 с.
6. Баглай А. П. Новые материалы и технологии устройства гидрозащиты / А. П. Баглай, А. И. Гармаш // Аналитический обзор. – М. : ВНИИЭСМ, 1991. - 33 с.
7. База данных Роспатента [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://ru.espacenet.com/>.
8. База данных Укрпатента [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://ukrpatent.org/>.
9. База патентов СССР [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://patents.su/>.
10. Балицкий В. С. Типовая технология реконструкции промышленных предприятий / В. С. Балицкий, О. Б. Белостоцкий, Т. П. Третьяк и др. – К.: Будивэльник, 1988. – 98 с.
11. Белов В. А. Противодиффузионные мероприятия на малых водоемах / В. А. Белов. - Ростов-на-Дону : СКНЦВУ, 2000. - 192 с.

12. Бестраншейная прокладка коммуникаций с применением микротоннелепроходческих комплексов и реконструкция трубопроводов с применением специального оборудования : МГСН 6.01-03. - ТСН 40-303-2003. - Москва, 2004.
13. Богов С. Б. Глубинное закрепление глинистых грунтов [Электронный ресурс] / С. Б. Богов // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2002. – №5. – Режим доступа до журн.: <http://www.georec.spb.ru/journals/05/9/9.htm>.
14. Бойко Г. А., Азбель Г. Г., Никольская Г. Н. Применение тонких противofильтрационных диафрагм в условиях Белоруссии. Строительство и архитектура Белоруссии / Г. А. Бойко, Г. Г. Азбель, Г. Н. Никольская. - 1980. - № 4. - С. 31.
15. Большаков В. А. Загрязнение почв [Электронный ресурс] / В. А. Большаков. – Режим доступа: [http://science.viniti.ru/index.php?&option=com\\_content&task=view&Itemid=171&Section=Экология&id=316&id\\_art=H003760](http://science.viniti.ru/index.php?&option=com_content&task=view&Itemid=171&Section=Экология&id=316&id_art=H003760).
16. Большаков Ю. В., Кацов К. П., Морозов А. А. Исследование фofильтрационных свойств заполнителя грунтовых противofильтрационных диафрагм. Основания, фундаменты и механика грунтов / Ю. В. Большаков, К. П. Кацов, А. А. Морозов. - 1982. - № 1. - С. 19-20.
17. Большаков Ю. В. Совершенствование технологии устройства противofильтрационных завес способом "стена в грунте" : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Ю. В. Большаков. - М., 1982. - 20 с.
18. Будников М. С. Технология и организация возведения зданий и сооружений / М. С. Будников, А. П. Обозный. – К. : Будивэльнык, 1964. – 304 с.
19. Бунтман А. Д. Об использовании противofильтрационных завес для защиты котлованов от притока грунтовых вод / А. Д. Бунтман // Энергетическое строительство. - 1978. - № 2. - С. 86-87.

20. Бунтман А. Д. Противофильтрационные завесы, сооружаемые способом "стена в грунте" / А. Д. Бунтман // Энергетическое строительство. - 1981. - № 4. - С. 42-46.
21. Вайсман Я. И., Глушанкова И. С. Условия образования и очистка фильтрационных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов / Я. И. Вайсман, И. С. Глушанкова. — Пермь : Пермский государственный технический университет, 2003. — 168 с.
22. Вальков В. Ф. Экология почв : учебное пособие для студентов вузов / В. Ф. Вальков, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников // Загрязнение почв. – Ростов-на-Дону : УПЛ РГУ, 2004. - Ч. 3. – С. 54.
23. Венцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Венцель, Л. А. Овчаров. – М. : Наука, 1988. – 479 с.
24. Ветров Ю. А. Машины для земляных работ / Ю. А. Ветров. – Киев : Вища школа, 1981. – 346 с.
25. Возведение сооружений методом "стена в грунте" / Под общ. ред. А. Л. Филахтова. - Киев : Будивельник, 1976. - 204 с.
26. Временные указания по возведению заглубленных насосных станций и водозаборов способом "сборная стена в грунте" // РСН 272-74. - Киев : НИИСП Госстоя УССР, 1975. – 82 с.
27. Геосинтетические материалы. Термины и определения : ISO 10318:2005. - (Госстандарт Республики Беларусь).
28. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов / М. Н. Гольдштейн. - М.: Стройиздат, 1971. - Т. 1. Механические свойства грунтов / М. Н. Гольдштейн. - М.: Стройиздат, 1973. - Т. 2. Механические свойства грунтов / М. Н. Гольдштейн. - М.: Стройиздат, 1979.
29. Гончаренко Д. Ф. Методы формирования инженерной подготовки реконструкции промышленных предприятий: дис. на здобуття наук. ступ. доктора техн. наук: 05.23.08 / Гончаренко Дмитрий Федорович. – М., 1991. – 486 с.

30. Гумеров И. А. Обтекание цилиндра неустановившимся потоком вязкой несжимаемой жидкости при малых числах Рейнольдса / Гумеров И. А. - М. : Вест. Моск. ун-та, 1983. - Сер. I, № 2. - С. 79-83.
31. Дмитриев Н. В., Хейфец В. Б. Противофильтрационные и несущие конструкции, сооружаемые способом "стена в грунте" / Н. В. Дмитриев, В. Б. Хейфец // Энергетическое строительство. - 1981. - № 4. - С. 40-42.
32. Завальный А. П. Влияние накопителей промышленных отходов на окружающую среду / А. П. Завальный // Вісник Харківського національного університету імені В. М. Карамзіна. – Х., 2003. – № 604 "Геологія – Географія – Екологія". – С. 217-223
33. Завальный А. П. Мероприятия по охране подземных вод при эксплуатации накопителей промышленных отходов / А. П. Завальный // Вісник Харківського національного університету імені В. М. Карамзіна. – Х., 2013. – № 1084. – С.217-223.
34. Задгенидзе В. А. Защита территорий от подтопления / Задгенидзе В. А. // Практикум : метод. пособие. – Одесса : ОГАСА, 2005. – 120 с.
35. Зархин Б. М., Разумный В. В. Устройство противофильтрационных стенок способом экскаваторного черпания под глинистым раствором / Б. М. Зархин, В. В. Разумный // Экспресс-информация.: Строительство электростанций, 1965. - Р. 195. - 27 с.
36. Зеленин А. Н. Физические основы теории резания грунтов / А. Н. Зеленин. - М. : Изд-во АН СССР, 1950. - 353 с.
37. Земельна реформа в Україні в контексті розвитку аграрної економіки та розвитку сільських територій [Електронний ресурс] / Інститут розвитку аграрних ринків, 2013. - С. 8. Режим доступу: [http://www.amdi.org.ua/docs/broshura\\_1.pdf](http://www.amdi.org.ua/docs/broshura_1.pdf)
38. Измаилов А. Ф. Численные методы оптимизации: Учебное пособие / А. Ф. Измаилов, М. В. Солодов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 304 с.
39. Измайлова Р. А., Кричевский И. Е., Рельтов Б. Ф. О повреждаемости полиэтиленовых экранов при их устройстве / Р. А. Измайлова, И. Е.

Кричевский, Б. Ф. Рельтов // Гидротехническое строительство. - 1965. - № 7. - С. 38-42.

40. Інженерні вишукування для будівництва: ДБН А.2.1–1-2008.

41. Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення: ДБН В.1.1–24–2009.

42. Инструкция по проектированию и строительству противодиффузионных устройств из полиэтиленовой пленки для искусственных водоемов : СН 551-82. - М.: Стройиздат, 1983.

43. Инструкция по технологии и механизации строительства противодиффузионных диафрагм и монолитных несущих стен методом "стена в грунте" : РСН 316-79. - Киев : НИИСП Госстроя УССР, 1980. - 102 с.

44. Камбефор А. Инъекция грунтов / А. Камбефор. – М. : Энергия, 1971. – 334 с.

45. Карамян Г. А. Опыт применения полимерных пленок для борьбы с фильтрацией из водоемов / Г. А. Карамян // Гидротехника и мелиорация. - 1964. - № 1. - С. 34-38.

46. Карта хвостохранилищ Украины, ранжированных в соответствии с рассчитанным индексом опасности хвостохранилищ (ИОХ) / [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=z3Wlu5VKPhek.ks440CdkfiR8&hl=en\\_US](https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=z3Wlu5VKPhek.ks440CdkfiR8&hl=en_US).

47. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел / Клейн Г. К. - М. : Стройиздат, 1977. – 256 с.

48. Клиопа, Г. И. Изменение механических свойств материалов ножей бульдозеров и автогрейдеров в процессе их работы / Г. И. Клиопа, Э. Д. Браун, Т. И. Заболеева // Труды Союздорнии. - Вып. 104: Вопросы механизации дорожно-строительных работ. - 1978. - С. 36-43.

49. Кованько В. В. Наукові основи створення підземно рухомих біонічно-синтезованих пристроїв підвищеної ефективності: автореф. дис. на здобуття наук. ст. д-ра. техн. наук; спец.: 05.05.04 / В. В. Кованько. – К., 2007. – 40с.



50. Колесников В. С. Возведение подземных сооружений методом "стена в грунте" / В. С. Колесников, В. В. Стрельникова // Технология и средства механизации: учебное пособие : ISBN 5-85534-236-0. - Волгоград : Изд-во ВолГУ, 1999. – 144 с.
51. Контролируемый гидравлический разрыв грунта / [Электронный ресурс] / ТД "Аумас". – Режим доступа : <http://www.drillings.ru/razrivgrunt>.
52. Концепція Національної програми ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи і соціального захисту громадян на 1994-1995 роки та період до 2000 року. - (Постанова ВР України № 3421-ХІІ від 02.09.1993 р.).
53. Косиченко Ю. М. Надежность каналов и водоемов с облицовкой из пленочных материалов и геомембран / Ю. М. Косиченко, М. А. Чернов // Мелиорация и водное хозяйство. — 2011. — № 3. — С. 37-40.
54. Кравець С. В. Грунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій / С. В. Кравець. Рівне: Видавництво РДТУ, 1999. - 277 с.
55. Кравчуновська Т. С. Розвиток наукових основ організаційно-технологічного проектування комплексної реконструкції житлової забудови: автореф. дис. на здобуття наук. ступ. д-ра. техн. наук: 05.23.08 / Т. С. Кравчуновська. – Дніпропетровськ, 2009. – 40 с.
56. Кричевский И. Е. Вопросы применения полиэтилена в конструкциях противодиффузионных устройств плотин из местных материалов / И. Е. Кричевский. - Л. : Энергия, 1967. - 92 с.
57. Кричевский И. Е. Полиэтиленовые противодиффузионные экраны земляных хранилищ производственных сточных вод / И. Е. Кричевский // Труды координационных совещаний по гидротехнике. - ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева, 1972. - Вып.74. - С. 98-105.
58. Куприна Г. А. Создание водонепроницаемых экранов из гидратированной силикат-глины / Г. А. Куприна // Материалы совещания по закреплению и уплотнению грунтов. - Тбилиси, 1964. - С. 421-427.

59. Куранов Н. П., Муфтахов А. Ж. Проблема подтопления грунтовыми водами территорий больших городов / Н. П. Куранов, А. Ж. Муфтахов // Обзорная информация. Сер. Проблемы больших городов. - 1986. - Вып. 17. - С. 28.
60. Лапина О. Ю. Геосинтетика: материалы с уникальным сочетанием характеристик / О. Ю. Лапина, А. С. Бовыкин // Красная линия. – 2009. – № 38.
61. Ляпидевский В. В. Комплексная защита подземной части зданий и сооружений / В. В. Ляпидевский. - КДТУБА, ПГС, 1998. - № 9. - С. 35.
62. Ляшенко Т. В. Концепция полей свойств – методическая основа извлечения информации из ЭС-моделей в компьютерном материаловедении / Т. В. Ляшенко // Вісник ОДАБА. – Одеса, Місто майстрів, 2003. – Вип. 12. – С. 171-179.
63. Малинин А. Г. Применение струйной цементации грунтов в подземном строительстве / А. Г. Малинин // Подземное пространство мира. – 2000. – № 2.
64. Малинин А. Г. Устройство горизонтальной противofильтрационной завесы с помощью струйной цементации грунта / А. Г. Малинин // Метро и тоннели. – 2003. – № 3.
65. Малышев Л. И. Филтpационная прочность противofильтрационных стенок / Л. И. Малышев // Труды Гидропроекта. - 1979. - Вып. 71. - С. 17-25.
66. Малышев Л. И., Хасин М. Ф., Бройд И. И. О способе сооружения противofильтрационных завес с образованием прорези водовоздушной струей / Л. И. Малышев, М. Ф. Хасин, И. И. Бройд // Труды Гидропроекта. - 1979. - Вып. 71. - С. 36-42.
67. Малышев Л. И., Хасин М. Ф., Логинов К. А. Лабораторные исследования структурообразования и филтpационных свойств тела противofильтрационной стенки из комовой глины / Л. И. Малышев, М. Ф. Хасин, К. А. Логинов // Труды Гидропроекта. М., 1976. - Вып. 49. Специальные гидротехнические работы. - С. 17-34.
68. Маслов Н. Н., Казарновский В. Д. Определение сопротивляемости грунтов сдвигу методом плотности-влажности / Н. Н. Маслов, В. Д. Казарновский // Автомобильные дороги. - 1962. - № 12.

69. Матвеев Ю. Б, Пухнюк А. Ю. Полигоны бытовых отходов: ситуация и перспективы / [Электронный ресурс] / Ю. Б. Матвеев, А. Ю. Пухнюк - Режим доступа: <http://www.uabio.org/img/files/news/pdf/msw-landfills-situation-matveev-pukhniuk.pdf>.
70. Математическое моделирование проникания стальных ударников в гранулированную сыпучую среду / [Белов Н. Н., Югов Н. Т., Афанасьева С. А., Югов А. А.] // Механика композиционных материалов и конструкций. - 2004. - №1. - Т. 10. - С. 108
71. Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций / [Кравец С. В., Каслин Н.Д., Руднев В.К., Супонев В.Н.] ; под ред.В.К. Руднева. – Харьков : ООО "Фавор", 2008. – 256 с.
72. Машины для горизонтального направленного бурения. Терминология и эксплуатационные показатели : ГОСТ Р ISO 2146-7:2011. - М. : Стандартиформ, 2012. - 9 с.
73. Меньлюк А. И. Разработка теоретических основ, исследование и внедрение инноваций при строительстве методом "стена в грунте" : Дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук: 05.23.08 / А. И. Меньлюк. – Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры. - Х., 2001. - 340 л.
74. Меньлюк А. И. Теоретические основы использования направленных колебаний при бетонировании стен в грунте : [Монография] / Александр Иванович Меньлюк. – Одесса: Астропринт, 2000. – 124 с.
75. Меньлюк А. И. Технологические резервы повышения эффективности метода "Стена в грунте" : [Монография] / Александр Иванович Меньлюк. – Одесса : Астропринт, 2000. – 96 с.
76. Методика визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства / Міністерство охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України, 1997. - (Наказ № 171 від 27.10.1997 р.).
77. Методические рекомендации по применению экспериментально-

статистических моделей для анализа и оптимизации состава, технологии и свойств композиционных материалов на основе щелочных вяжущих систем / [Вознесенский В. А., Ляшенко Т. В., Савченко С. В. и др.]. - ОГАСА, НИИВМ - Киев, 1996. - 105 с.

78. Методические рекомендации по проектированию и строительству монолитных заглубленных частей гидротехнических сооружений и противофильтрационных завес способом "стена в грунте". - М. : НИИОСП имени Н. М. Герсевича. - 1981. - 121 с.

79. Методичні рекомендації з улаштування горизонтальних екранів / О. М. Галінський (науковий керівник), О. М. Чернухін // Методичні рекомендації. - Київ : НДІБВ, 2011. - 20с.

80. Михеев В. Л. Технологические свойства буровых растворов / Михеев В. Л. - М. : Недра, 1979. - 239 с.

81. Мишаков В. А. Исследование и расчет несущей способности инъекционных грунтовых анкеров / В. А. Мишаков, В. Ф. Раюк // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М. : 1989. – № 2. – С. 6-8.

82. Мишин А. В. Наукові дослідження в галузі технології будівельного виробництва. Конспект лекцій / А. В. Мишин. – К. : КНУБА, 2000. – 16 с.

83. Млодецький В. Р. Організаційно-технологічна та управлінська надійність функціональної системи будівельної організації: автореф. дис. на здобуття наук. ст. д-ра техн. наук: спец. 05.23.08 «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва» / В. Р. Млодецький. – Дніпропетровськ, 2005. – 39 с.

84. Мосолов Г. В. Исследования взаимодействия головной секции и грунтового массива при производстве работ по продавливанию тоннелей / [Электронный ресурс] / ОАО ЦНИИС грунта. – Режим доступа : <http://217.70.24.186/mosolov/>.

85. Никитенко М. И. Буроинъекционные анкеры и сваи при возведении и реконструкции зданий и сооружений / М. И. Никитенко. - Минск, 2007. - 529 с.

86. Никитенко М. И. Проектирование и устройство подпорных стен и креплений котлованов: пособие П17-02 к СНБ 5.01.01-99 / М. И. Никитенко. – Минархстрой, 2003. – 95с.
87. Николаевский В. Н., Сырников И. Н. О плоском предельном течении сыпучей дилатирующей среды / В. Н. Николаевский, И. Н. Сырников // Механика твердого тела. – М. : АН СССР, 1970. – 159-166 с.
88. Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд. – К.: Держбуд України, Держнаглядохоронпраці України, 2003. – 144 с.
89. Норми освітлення будівельних майданчиків : ДСТУ Б А. 3.2-15:2011.
90. Нормирование труда рабочих в строительстве / [Е. Ф. Балова, Р. С. Бекерман, Н. Н. Евтушенко и др.] ; Под ред. Е. Ф. Баловой. – М. : Стройиздат, 1985. – 440 с.
91. О взаимодействии глинисто-силикатных растворов с поверхностью пространства закрепляемых песков. Материалы УН Всесоюзного совещания по закреплению и уплотнению грунтов / В. Е. Соколович , Е. Л. Арджеванидзе. - Л. : Энергия, 1971. - 200-204 с.
92. Общая биология : [учеб. пособие для 11-го кл. 11-летней общеобразоват. шк. для базового и повыш. уровней] / Н. Д. Лисов, Л. В. Камлюк, Н. А. Лемеза и др. ; Под ред. Н. Д. Лисова. – Мн.: Беларусь, 2002. – 279 с. – ISBN 985-04- 0553-8.
93. Овчинникова М. Ф. Химия гербицидов в почве МГУ. - М., 1987. - 108 с.
94. Орлов В. А., Хантаев И. С., Орлов Е. В. Бестраншейные технологии / В. А. Орлов, И. С. Хантаев, Е. В. Орлов // Учебник. - М., 2011. - 224 с.
95. Орнатский Н. В., Сергеев Е. М., Шехтман Ю. М. Исследование процесса кольматации песков / Н. В. Орнатский, Е. М. Сергеев, Ю. М. Шехтман. - М. : Изд. МГУ, 1955. - 181 с.
96. Освоение подземного пространства. Прокладка подземных инженерных коммуникаций методом горизонтального направленного бурения : Стандарт организации. СТО НОСТРОЙ 2.27.17-2011. - 135 с.

97. Основания и фундаменты / [Смородинов М. И., Федоров Б. С., Вканицын Б. А. и др.] ; Под общ. ред. М. И. Смородинова. ; Изд. 3-е, доп. и перераб. / Справочник строителя / - М. : Стройиздат, 1983. - 367 с.
98. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Лабораторні випробування. Загальні положення : ДСТУ Б В.2.1-3-96 (ГОСТ 30416-96).
99. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Класифікація : ДСТУ Б В.2.1-2-96 (ГОСТ 25100-95).
100. Печенежская И. А. Водопроницаемость полимерных противофильтрационных экранов для условий установившегося и неуставившегося характера фильтрации : автореф. дис. на соиск. науч. ст. канд. техн. наук. / И. А. Печенежская. - Новочеркасск, 1998. - 17 с.
101. ПЗРО и ПВЛРО в зоне ликвидации последствий аварии / [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.pripyat-city.ru/main/42-pzro-i-pvlro-v-zone-likvidacii-posledstviy-avarii.html>.
102. Пленочные противофильтрационные устройства гидротехнических сооружений ; Под ред. И. Е. Кричевского. - М. : Энергия, 1976. - 207 с.
103. Подземные сооружения возводимые способом "стена в грунте" ; Под ред. В. М. Зубкова. - Л. : Стройиздат, 1977. - 200 с.
104. Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию / СНиП 2.01.28-85 / - М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985.
105. Поляков С. А. Надежность противофильтрационных облицовок и экранов и применением пленочных материалов на оросительных каналах и водоемах : автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. / С. А. Поляков – Новочеркасск, 1993. — 26 с.
106. Порошок бентонитовый из глины Черкасского месторождения : ТУ 3.58–14310589–103–97.
107. Порядок виконання будівельних робіт. / Кабінет Міністрів України, 2011. - (Постанова Кабінету Міністрів України № 466 від 13.04.2011).

108. Порядок здійснення авторського та технічного нагляду під час будівництва об'єкта архітектури. / Кабінет Міністрів України, 2007. - (Постанова Кабінету Міністрів України № 903 від 11.07.2007).
109. Пособие по проектированию полигонов по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. (к СНиП 2.01.28–85). – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 48 с.
110. Правила пожежної безпеки в Україні : НАПБ А.01.001-2004.
111. Применение метода конечных элементов при выполнении курсовых работ по строительным дисциплинам : учебное пособие / [Фадеев А. Б., Парамонов В. Н., Репина П. И. и др.]. - СПб. : СПб гос. архит.-строит. ун-т, 1997. - 60 с.
112. Про Загальнодержавну програму поводження з токсичними відходами : Закон України № 1947-111 от 14.09.2000 р.
113. Про Загальнодержавну програму подолання наслідків Чорнобильської катастрофи на 2006-2010 роки : Закон України № 3522-IV від 14.03.2006 р.
114. Про затвердження Загальнодержавної цільової програми розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року : Закон України № 4836-VI від 24.05.2012 р.
115. Про національну програму екологічного оздоровлення басейну Дніпра та поліпшення якості питної води. / Верховна Рада України, 1997. - (Постанова Верховної Ради України № 123/97–ВР від 27.02.1997 р).
116. Про статус і соціальний захист громадян, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи : Закон України № 796-XII від 28.02.1991 р.
117. Проектирование и устройство свайных фундаментов : Учебное пособие / [Беленький С. Б., Дикман Л. Г., Косоруков И. И. и др.]. – М. : Высшая школа, 1983. – 328 с.
118. Проектирование и устройство траншейных и свайных стен методом "стена в грунте". – Минск : РСН 20-87. / БПИ, Госстрой БССР, 1987. – 102 с.

119. Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях. (Справочное пособие к СНиП) / – М. : ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР : Стройиздат, 1991. – 272 с.
120. Протипожежний захист. Знаки безпеки. Форма та колір (ISO 6309:1987, IDT) : ДСТУ ISO 6309:2007.
121. Пшинько О. М. Основи технології підводного бетонування при ремонті штучних транспортних споруд: автореф. дис. на здобуття наук. ст. д-ра техн. наук : спец. 05.23.08 / О. М. Пшинько. – Харків, 2001. – 40 с.
122. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними / [Ключников А. А., Пазухин Э. М., Шигера Ю. М., Шигера В. Ю.] - К. : Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2005. - 487 с.
123. Рекомендации по возведению заглубленных сооружений и конструкций методом "стена в грунте". - Киев, 1973. - 156 с.
124. Рекомендации по расчету противодиффузионных стенок и подбору материалов для их заполнения / - М. : НИИОСП имени Н. М. Герсевича, 1973. - 31 с.
125. Рекомендации по струйной технологии сооружения противодиффузионных завес, фундаментов, подготовки оснований и разработки мерзлых грунтов / Под общей редакцией Королькова В.Н. и Хасина М.Ф. - М. : ВНИИ оснований и подземных сооружений имени Н.М.Герсевича, 1989. - 90 с.
126. Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи / Збірник 5. Пальові роботи. Опускні колодязі. Закріплення ґрунтів : ДСТУ Б Д. 2.2.5:2012.
127. Ресурсні елементні кошторисні норми на прокладання полімерних трубопроводів методом горизонтально спрямованого буріння : СОУ Д.2.2-30312094:2007.
128. Ретхати Л. Грунтовые воды и строительство / Ретхати Л. ; пер. с англ. ; Под ред. В. А. Кирюхина. - М. : Стройиздат, 1989. - 432 с.
129. Ржаницын Б. А. Противодиффузионные завесы, создаваемые химическими методами / Ржаницын Б. А. // Закрепление и уплотнение грунтов.



- Л. : Энергия, 1973. - 42-46 с.

130. Ржаницын Б. А. Тампонажные растворы для создания противодиффузионных завес / Ржаницын Б. А. // Материалы к совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. - Новосибирск, 1966. - 470-474 с.

131. Ржаницын Б. А. Химическое закрепление грунтов в строительстве / Ржаницын Б. А. - М. : Стройиздат, 1986. - 264 с.

132. Розроблення науково-обґрунтовуючих пропозицій та типового проекту по створенню захисних протифільтраційних дренажних конструкцій навколо регіональних полігонів (сховищ) довгострокового зберігання або захоронення токсичних відходів (ТВ) / Науковий керівник **О. М. Галінський** // Звіт про науково-дослідну роботу. Шифр П-3-1-04. № держ. реєстрації 0104U007712. – Київ : НДІБВ, 2006. – 102 с.

133. Руководство по проектированию стен сооружений и противодиффузионных завес, устраиваемых способом “стена в грунте” / НИИОСП им. Н. М. Герсеева. – М. : Стройиздат, 1977. – 128 с.

134. Руководство по производству и приемке работ при устройстве оснований и фундаментов / НИИОСП имени Н. М. Герсеева. - М. : Стройиздат, 1977. - 240 с.

135. Рыбальский В. И. Автоматизированные системы управления строительством / Рыбальский В. И. – К. : Выща школа, 1979. – 479 с.

136. Савйовський В. В. Методологічні принципи організаційно-технологічного проектування реконструкції цивільних будівель: автореф. дис. на здобуття наук. ст. д-ра техн. наук : спец. 05.23.08 / В. В. Савйовський / Харьк. держ. техн. уні-т будів. і арх. – Х., 2011. – 44 с.

137. Савйовский В. В. Технология возведения и ремонта сооружений. Учебное пособие. / Савйовский В. В. – К. : Фарт, 2014. - 256 с.

138. Сайт газеты "Новости Днепродзержинска. Кстати+" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kstati.dp.ua/content/yadernymi-hvostami-dneprodzerzhinska-zaymetsya-pecialnaya-komissiya>.

139. Сайт компании “Евроизол Геосинтетикс” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geosvit.net>.
140. Сайт компании “ИнжПроектСтрой” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jet-grouting.ru>.
141. Сайт фирмы "Bauer" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bauer.de/ru/bma/products>.
142. Сайт фирмы "Casagrande" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.casagrandegroup.com>.
143. Сайт фирмы "Soilmec" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.soilmec-spb.ru](http://www.soilmec-spb.ru).
144. Скуеро А. М., Васкетти Г. Геомембраны, хорошо зарекомендовавшие себя водонепроницаемые системы на гидротехнических сооружениях / А. М. Скуеро, Г. Васкетти // Международный дайджест по гидроэнергетике и плотинам. – 2007. – с. 5968.
145. Смирнов И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / И. В. Смирнов., И. В. Дунин-Барковский. – М. : Наука, 1969. – 512 с.
146. Смородинов М. И., Андреев В. М., Большаков Ю. В. Исследование технологии устройства тонких противофильтрационных завес / М. И. Смородинов, В. М. Андреев, Ю. В. Большаков // Устройство фундаментов и заглубленных сооружений в условиях реконструкции действующих предприятий и стесненных условиях строительства. - Л.: 1983, 74-76 с.
147. Смородинов М. И. Устройство фундаментов и конструкций способом “стена в грунте” / М. И. Смородинов, Б. С. Федоров. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 216 с.
148. Смородинов М. И., Федоров Б. С. Устройство фундаментов и конструкций способом "стена в грунте" / М. И. Смородинов, Б. С. Федоров. - М. : Стройиздат, 1976. - 128 с.
149. Снісаренко В. І. Наукові основи та методи удосконалення технологій будівництва заглиблених в ґрунт споруд і конструкцій: автореф. дис. на

здобуття наук. ст. д-ра техн. наук : спец. 05.23.08, 05.23.02 / В. І. Снісаренко. – К., 1994. – 49 с.

150. Снісаренко В. І. Методические рекомендации по рас чету конструктивно-технологических решений заглубленных сооружений, возводимых методом "стена в грунте" в водоносных пластах неограниченной мощности / В. И. Снісаренко. – К. : НИИСП, 1986. – 41 с.

151. Собрание сочинений [Горячкин В. П.] – М. : Колос, 1965. – Т. 2. – 460 с.

152. Совершенствование технологии устройства противofильтрационных завес способом "стена в грунте" / [Буров Ю. Е., Киселев В. И., Михлин А. Л., Смирнов Ю. С.] // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1979. - Р. 6. - С. 5-8.

153. Современные технологии в строительстве : [учебник] / А. И. Менеїлюк, В. С. Дорофеев, Л. Е. Лукашенко и др. – [3-е изд., доп. и пер.]. – К. : Освіта України, 2011. – 534 с.

154. Соколович В. Е. Силикатизация лессовых грунтов / Соколович В. Е. - М. : Госстройиздат, 1959. - 79 с.

155. Стандарт ISO 10318:2005 : Геосинтетические материалы. Термины и определения.

156. Струйная технология сооружения противofильтрационных завес / [Н. В. Дмитриев, А. В. Попов, Л. И. Малышев, М. Ф. Хасин]. // Гидротехническое строительство. - 1980. - № 3. - С. 5-9.

157. Сукач М. К., Филонов Ю. П., Литвиненко И. Н. Модель косоугольного щелевого резания грунта широким острым ножом / М. К. Сукач, Ю. П. Филонов, И. Н. Литвиненко // Техніка будівництва. – К. : КНУБА, 2005. – Вип. 18. – С. 4–11 .

158. Тагилов М. А. Противofильтрационная защита оснований полигонов захоронения твердых бытовых отходов : автореф. дис. на соиск. науч.ст. канд. техн. наук. - Пермь : Пермский государственный технический университет, 2002.

159. Теличенко В. И. Технология строительных процес сов : [В 2 ч. : учеб. для строит. вузов] / В. И. Теличенко, О. М. Терентьев, А. А.Лапидус. – [2-е изд., испр. и доп.]. – М.: Высш. шк., 2005. – 784 с.
160. Тер-Мартirosян З. Г. Механика грунтов [Учебное пособие] / Тер-Мартirosян З. Г. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005.
161. Техника и технология горизонтального направленного бурения для бестраншейного строительства подземных коммуникаций в экстремальных условиях. - Казань: ООО "Эс-Ай-Ви Интертрэйд", 2003. - 24 с.
162. Технология горизонтально-направленного бурения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.yarpodvodnik.ru/pages/tech/HDD.html>.
163. Технология и механизация строительства противofильтрационных завес и монолитных несущих стен способом "стена в грунте". Киев : РСН 316-88. / НИИСП Госстроя УССР, 1989. - 49 с.
164. Технологія монтажу будівельних конструкцій / [В. К. Черненко, О.Ф. Осипов, М. Г. Тонкачєєв, Є.Г.Романушко, І.І.Назаренко] ; під ред. В. К. Черненко. – [2-е вид.]. – К. : Горобець, 2011. – 371 с.
165. Технология, механизация и автоматизация строительства : [учеб. для строит. вузов] / С. С. Атаев, В. А. Бондарик, И. Н. Громов и др.; под ред. С. С. Атаева, С. Я. Луцкого. – М. : Высшая школа, 1990. – 592 с.
166. Технология строительного производства / [Литвинов О. О., Беляков Ю. И., Батура Г. М. и др.] ; под ред. профессоров О. О. Литвинова и Ю. И. Белякова. – К. : Выща школа, 1984. – 479 с.
167. Технология строительных процес сов : [учеб. для строит. вузов] / С. С. Атаев, Н. Н. Данилов, Б. В. Прыкин и др. ; под ред. Н. Н. Данилова. – М. : Высшая школа, 2001. – 464 с.
168. Тимошенко В. К. Исследование процесса прокола грунтов при закрытой прокладке трубопроводов : автореф. на здобуття наук. ст. канд. техн. наук : спец. 05.05.04 / В. К. Тимошенко. – К., 1969. – 16 с.
169. Траншейные стенки в грунтах / [Круглицкий Н. Н., Мильковицкий С. И., Скворцов В. С. и др.]. - Киев : Наукова думка, 1973. - 304 с.

170. Тугай О. А. Система адаптації організації будівництва до євро стандартів : автореф. дис. на здобуття наук. ступ. д-ра техн. наук : спец. 05.23.08 / О. А. Тугай. – К., 2008. – 31 с.
171. Тянь Р. Б. Организация производства / Р. Б. Тянь, Н. М. Чернышук. – Днепропетровск : Наука и просвещение, 1994. – 254 с.
172. Ушацкий С. А. Информационные основы управления строительным производством / С. А. Ушацкий. – К. : Будівельник, 1977. – 168 с.
173. Федоров В. С., Гаража Б. М. Перспективы применения способа "стена в грунте" в строительстве / В. С. Федоров, Б. М. Гаража // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1978. - № 1, С. 1-3.
174. Федоров Д. И. Рабочие органы землеройных машин / Федоров Д. И. – М.: Машиностроение, 1990. – 360 с.
175. Феоктистова Н. В. Исследование свойств глинистых растворов, применяемых при строительстве способом "стена в грунте" / Феоктистова Н. В. // Труды ВНИИГС. - Вып. 35. - Л. : Стройиздат, 1973.
176. Филяков А. Б. Исследование состояния сыпучей среды при интенсивном внедрении в нее деформатора / А. Б. Филяков // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1974. – № 9. – С. 140-144.
177. Химерик Ю. А. Защита зданий и сооружений от грунтовых вод: [изд. 2-е, перераб. и доп.] / Химерик Ю. А. - Киев: Будівельник, 1976. - 140 с.
178. Храменков С. В., Примин О. Г., Орлов В. А. Бестраншейные методы восстановления трубопроводов / С. В. Храменков, О. Г. Примин, В. А. Орлов. – М.: Прима-Пресс, 2002. - 283 с.
179. Цытович Н. А. Механика грунтов. Краткий курс. / Цытович Н. А. - М. : "Высшая школа", 1973.
180. Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов: [изд. 4-е., исправл. и доп. ] / Чаповский Е. Г. - М. : Недра, 1975. - 304 с.
181. Чернобыльская катастрофа / [гл. ред. Барьяхтар В. Г.] – К. : НАН Украины : Наук. думка, 1995. – 560 с.
182. Чернов М. А. Обоснование противодиффузионной

эффективности облицовок каналов, с применением полимерных материалов / Чернов М. А. // Известия вузов. Сев.-Кав. регион, Техн. науки. - 2011. - № 2. - С. 108-114.

183. Чернухин А. М., Галинский А. М. Новая технология устройства тонкого противofильтрационного экрана под картой полигона токсичных отходов с поврежденной гидроизоляцией / А. М. Чернухин, А. М. Галинский // Наукoво-технічний журнал "Нові технології в будівництві". - Київ : НДІБВ, 2001. - №1. - С. 51-53.

184. Чернухин А. М., Галинский А. М. Применение способа “стена в грунте” для локализации пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) / А. М. Чернухин, А. М. Галинский // Строительное производство: Межведомственный научно-технический сборник. – К. : АП НИИСП, 1997. – Вып. 37. - С. 36-40.

185. Черный И. П. Исследование экранирующих свойств противofильтрационных стенок из глинистых грунтов : автореф. дис. на соиск. науч. ст. канд. техн. наук / Черный И. П. - М., 1979. - 174 с.

186. Черный И. П. Технология сооружения тонких противofильтрационных стенок / Черный И. П. // Материалы УП Всесоюзного совещания по закреплению и уплотнению грунтов. - Л. : Энергия, 1971. - 124-128 с.

187. Чернышевская И. Е. Создание водосберегающих конструкций каналов оросительных систем : автореф. дис. на соиск. науч. ст. докт. техн. наук / И. Е. Чернышевская. - Киев, 2006.

188. Чорнобиль. Післяаварійна програма будівництва. Монографія. – К. : "Іван Федорів", 1998. – 456 с.

189. Шавва К. И. Методы определения оптимальных параметров и их выгоднейших сочетаний проектируемых схем использования водоземельных ресурсов бассейнов рек и оросительных систем : автореф. дис. на соиск. науч. ст. д-ра техн. наук: 05.23.08 / К. И. Шавва. – М., 1975. – 43 с.

190. Штоль Т. М. Технология возведения подземной части зданий и сооружений : [учеб. пособие для вузов] / Т. М. Штоль, В. И. Теличенко, В. И. Феклин. – М. : Стройиздат, 1990. – 288 с. – ISBN 5-274-00998-0.

191. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / [Вознесенский В. А., Ляшенко Т. В., Иванов Я. П., Николов Н. И.]. - Киев : Будівельник, 1989. - 240 с.
192. Boyes R. G. H., Miles M. M. Slurry trenching developments / R. G. H. Boyes, M. M. Miles. - Civil Engineering, April, 1982. - p. 51-52.
193. Boyes R. G. H. Structural and Cut-Off Diaphragm Walls / Boyes R. G. H. - Halsted Press : New York, N. Y., 1975.
194. Burton S. Handbook of Sustainable Refurbishment : Housing / Simon Burton. – Routledge, 2011. – 192 p.
195. D'Appolonia D. I. Soil-Bentonite slurry trench cutoffs. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Vol. 106. - No. GT4, April, 1980. - p. 399-417.
196. Lorenz H. Erfahrungen mit thixotropen Flüssigkeiten in Grundbau / Lorenz H. - Die Bautechnik, 1953. - n. 8 - p. 232-236.
197. Lorenz H. Über die Verwendung thixotroper Flüssigkeiten in Grundbau / Lorenz H. - Bautechnik, 1950. - nMO - p. 351-356.
198. Millet R. A., Jean-Yves Perez. Current USA Practice: Slurry Wall Specifications / R. A. Millet, Perez Jean-Yves // Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proc. ASCE, August, 1981. - Vol. 107. - № GT8. - p. 1041-1056.
199. Simerman M. H. Infiltration – Pressurization Correlation: Similar Physical Modeling / M. H. Simerman, D. T. Grimsrud // ASHRAE Transactions. - Vol. 86. - Part 2. - 1980. – P. 778-807.
200. А. с. 1148926 СССР. М. Кл<sup>3</sup> Е 02 В 1/00, 3/16. Устройство для укладки вертикального противофильтрационного экрана из пленочного материала в траншею / В. И. Снисаренко, А. Л. Филахтов, Н. А. Великодный, Г. Ф. Костюченко ; заявл.13.12.83 ; опубл. 07.04.85, Бюл. № 13.
201. А. с. 1271946 СССР. М. Кл<sup>3</sup> Е 02 F 5/20. Устройство для строительства подземных противофильтрационных экранов / А. Ф. Бабешко, В. С. Дудник, А.

- И. Копыл, А. И. Мельников, С. М. Новак, В. И. Снисаренко, Р. Н. Ткаченко, А. Л. Филахтов, М. Г. Янкулин ; заявл. 11.06.85 ; опубл. 23.11.86, Бюл. № 43.
202. А. с. 1286693 СССР. М. Кл<sup>3</sup> Е 02 F 5/20. Траншеекопатель / А. М. Галинский ; заявл. 02.04.85 ; опубл. 30.01.87, Бюл. № 4.
203. Пат. 2015248 С1 Российская Федерация, МПК<sup>5</sup> Е 02 D 3/12. Способ создания противодиффузионной завесы в лессовом грунте / В. И. Осипов, С. Д. Филимонов, Б. Н. Мельников, Е. В. Кайль ; заявл. 27.12.91 ; опубл. 30.06.94.
204. Пат. 2039150 С1 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> Е 02 В 3/16. Способ создания противодиффузионной завесы / В. Н. Бакулин, А. В. Бакулин ; заявл. 24.05.1991 ; опубл. 09.07.1995.
205. Пат. 2183273 С2 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Е 21 D 1/16, 20/00. Способ тампонажа горных пород с неоднородной трещиноватостью / В. А. Хамяляйнен, В. М. Пампура, В. Д. Богатырев ; заявл. 14.06.2000 ; опубл. 10.06.2002.
206. Пат. 2206663 С1 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Е 02 D 5/56, 5/20, 7/22. Способ возведения ограждающей противодиффузионной инженерно-защитной конструкции (варианты) / А. Н. Басиев, М. В. Зелов, А. Г. Икусов ; заявл. 21.12.2001 ; опубл. 20.06.2003.
207. Пат. 2211283 С1 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Е 02 D 5/56, 5/20, 7/22. Способ возведения противодиффузионной инженерно-защитной конструкции / А. Н. Басиев, М. В. Зелов, А. Г. Икусов ; заявл. 21.12.2001 ; опубл. 27.08.2003.
208. Пат. 2304195 С2 Российская Федерация, МПК Е 02 D 5/18. Стена в грунте и способ ее возведения / Эрвин Штётцер ; заявл. 25.07.2005 ; опубл. 10.08.2007, Бюл. № 22.
209. Пат. 2316068 С1 Российская Федерация, МПК G 21 F 9/20. Способ защиты природных вод от радиоактивных и токсичных веществ из хранилищ жидких отходов / Е. В. Захарова, Е. П. Каймин, Л. И. Константинова, А. А. Зубков и др. ; заявл. 16.03.2006 ; опубл. 27.01.2008, Бюл. № 3.
210. Пат. 2342484 С1 Российская Федерация, МПК Е 02 В 3/16. Способ изготовления водонепроницаемого экрана в грунтовых материалах элементов



гидротехнического сооружения / Н. К. Васильев, В. В. Сокуров, А. А. Иванов и др. ; заявл. 15.05.2007 ; опубл. 27.12.2008, Бюл. № 36.

211. Пат. 2347034 С1 Российская Федерация, МПК Е 02 В 3/16. Способ защиты водных ресурсов с помощью горизонтальных (межпластовых) противofiltrационных завес и технология их сооружения / Ю. В. Пономаренко, А. А. Изотов, В. С. Кузькин, Н. А. Клименко ; заявл. 30.07.2007 ; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5.

212. Пат. 2349710 С1 Российская Федерация, МКИ Е 02 D 29/00. Способ строительства противofiltrационной завесы на застроенных территориях / Ю. В. Пономаренко, А. А. Изотов, Н. А. Клименко, В. С. Кузькин ; заявл. 30.08.2007 ; опубл. 20.03.2009, Бюл. № 5.

213. Пат. 2375580 С1 Российская Федерация, МКИ Е 21 F 17/00, Е 02 D 31/00. Способ сооружения подземной непроницаемой завесы / М. Н. Климентов, А. Н. Петин, С. В. Сергеев, В. С. Дрямов, Ю. В. Пономаренко ; заявл. 01.08.2008 ; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 8.

214. Пат. 24792 Україна, МПК Е02В 3/16. Спосіб будівництва протифільтраційно-дренажної конструкції / О. М. Галінський, О. М. Чернухін, О. П. Федченко ; заявл. 06.10.1998 ; опубл. 25.12.1998, Бюл. № 6.

215. Пат. 35065 А Украина, МПК Е 02 D 29/00. Способ устройства экрана под сооружением / А. М. Чернухин, А. М. Галинский ; заявл. 05.08.1999 ; опубл. 15.03.2001, Бюл. № 2.

216. Пат. 65550 Україна на корисну модель, МПК Е 02 D 29/00. Спосіб улаштування екрана під спорудою / О. М. Галінський, О. М. Менейлюк ; заявл. 12.05.2011 ; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23.

217. Пат. 73600 Україна на корисну модель, МПК Е 02 Р 29/00. Спосіб улаштування екрана під спорудою / О. М. Галінський, О. М. Менейлюк, А. Ф. Петровський ; заявл. 13.04.2012 ; опубл. 25.09.2012, Бюл. № 18.

Наукове видання

**Менейлюк Олександр Іванович  
Петровський Анатолій Францович  
Борисов Олександр Олександрович**

**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ІН'ЄКЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ  
ПІДЗЕМНОГО ПРОСТОРУ**

**Монографія**  
(російською мовою)

Підписано до друку 3.01.2017 р.  
Формат 60×84/16 Папір офсетний Гарнітура Times  
Друк-різографія. Ум.-друк. арк. 15,92.  
Наклад 300 прим. Зам. №17-2Р

Видавець і виготовлювач:  
**Одеська державна академія будівництва та архітектури**  
**Свідоцтво ДК № 4515 від 01.04.2013 р.**  
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.  
тел.: (048) 729-85-34, e-mail: [rio@ogasa.org.ua](mailto:rio@ogasa.org.ua)

---

Надруковано з готового оригінал-макету  
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА