

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий  
Донецкой Народной Республики

Государственное бюджетное учреждение  
«Научно-исследовательский институт «Респиратор»  
Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий  
Донецкой Народной Республики»

На правах рукописи

УДК 622.868.42:622.81

**Пефтибай Георгий Иванович**

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ  
ПЕРЕМЫЧЕК УГОЛЬНЫХ ШАХТ ИЗ МАТЕРИАЛА  
НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТНОГО ВЯЖУЩЕГО**

Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность  
(по отраслям) (технические науки)

**Диссертация**  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
Агеев Владимир Григорьевич

Идентичность всех экземпляров  
ПОДТВЕРЖДАЮ  
Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 01.027.01,  
кандидат технических наук

И.Г. Старикова

Донецк – 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	с 5
<b>ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	15
1.1 Анализ аварийности в горных выработках угольных шахт	15
1.2 Существующие способы тушения пожаров в горных выработках и конструкции изолирующих сооружений, применяемых при изоляции пожарных участков.....	20
1.2.1 Способы тушения пожаров в горных выработках шахт	20
1.2.2 Конструкции изолирующих сооружений.....	21
1.3 Материалы, применяемые для возведения изолирующих сооружений.....	23
1.4 Анализ существующих технических средств возведения изолирующих сооружений.....	28
1.5 Анализ расчетных схем и существующих методов исследований на прочность взрывоустойчивых перемычек.....	35
1.6 Цель и задачи исследований.....	48
<b>ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЫБОРУ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК</b> .....	49
2.1 Общая методика и основные методы исследований.....	49
2.2 Выбор материалов для возведения взрывоустойчивых перемычек и определение их механических характеристик.....	52
2.2.1 Методика проведения исследований .....	52
2.2.2 Результаты исследований.....	58
2.3 Методика проведения и результаты исследования по моделированию воздействия на перемычку горного давления.....	66
2.4 Исследования по определению времени возведения взрывоустойчивых перемычек с учетом условий ведения работ по изоляции пожарных участков, опасных по взрыву метано-воздушной среды.....	72

Выводы к главе 2.....	77
<b>ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК.....</b>	<b>79</b>
3.1 Выбор расчетной схемы взрывоустойчивой перемычки и метода исследований ее напряженно-деформированного состояния.....	79
3.2 Математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием горного давления.....	86
3.3 Математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием ударной волны и температуры.....	95
3.4 Результаты исследований напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивых перемычек.....	109
Выводы к главе 3.....	118
<b>ГЛАВА 4 ПАРАМЕТРЫ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ, ТЕХНОЛОГИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА И ВОЗВЕДЕНИЯ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК....</b>	<b>120</b>
4.1 Параметры взрывоустойчивой перемычки.....	120
4.2 Совершенствование технических средств возведения.....	126
4.3 Технология возведения взрывоустойчивых перемычек и изготовления сухих смесей.....	134
4.3.1 Общие положения.....	134
4.3.2 Оборудование для приготовления и перекачивания растворов..	138
4.3.3 Компонентный состав быстротвердеющих смесей с цементным вяжущим.....	139
4.3.4 Технология изготовления сухих смесей с цементным вяжущим.....	141
4.4 Расчет годового экономического эффекта от внедрения результатов работы .....	146
Выводы к главе 4.....	148

<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	150
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	152
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> Техническое задание по работе «Разработка комплекта оборудования для приготовления и перекачивания быстротвердеющих растворов» (№ ГР 0196U002685, 1929530008, 1997 г., подписные листы).....	173
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b> Техническое задание по работе «Разработать комплект оборудования для приготовления и перекачивания быстротвердеющих растворов для возведения изолирующих сооружений в угольных шахтах» (№ ГР 0101U003185, 1920130048, 2001 г., подписные листы).....	175
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В</b> СОУ 10.1-00174102-016:2011 «Вентиляционные, изолирующие и взрывоустойчивые перемычки при ликвидации аварий в угольных шахтах. Конструкция, материалы и технология возведения» (титульный лист, предисловие).....	177
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г</b> СОУ 10.1.00174102-022:2012 «Шахтные взрывоустойчивые изолирующие сооружения. Общие технические требования» (титульный лист, предисловие).....	179
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д</b> Техническое задание по работе «Разработать комплект оборудования для приготовления и перекачивания быстротвердеющих растворов во время возведения изолирующих сооружений в каналах большой протяженности» (11512048, 2015 г., подписные листы).....	181
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е</b> Техническое задание по работе «Разработать каркасные опалубки многоразового использования для быстровозводимых изолирующих сооружений» (11512049, 2015 г., подписные листы).....	183
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж</b> «Рекомендации по ведению изоляционных работ на участках с осложнившимся пожаром с использованием смесей на основе цементных вяжущих» (11712018, 2019 г., подписные листы).....	185
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ И</b> Техническое задание по работе «Разработать устройство дозирования воды для смесительно-нагнетательных установок, используемых при возведении изолирующих сооружений» (11912013, 2021 г., подписные листы).....	189
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ К</b> Справка о внедрении результатов исследований диссертационной работы.....	191
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Л</b> Акт внедрения результатов исследований диссертационной работы.....	192

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

Переход горных работ на глубокие горизонты при доминировании шахт газовых и опасных из-за взрывов угольной пыли активизирует интенсификацию газодинамических явлений, сопровождаемых внезапными выбросами газа, угля и породы. Прямым следствием этого является увеличение количества пожаров из-за взрывов газа и угольной пыли.

Взрывы газовоздушной и газопылевой смесей сопровождаются распространением вдоль горных выработок воздушных ударных волн, которые наносят существенный ущерб инфраструктуре шахты и несут угрозу здоровью и жизни шахтеров и горноспасателей.

Для защиты горных выработок, оборудования и людей от ударных волн и борьбы с осложнившимися пожарами применяют изоляцию аварийного участка взрывоустойчивыми перемычками из гипсового вяжущего, сооружаемыми гидромеханическим способом.

По результатам широкой производственной эксплуатации определились недостатки взрывоустойчивых перемычек, возводимых из гипса:

- гипсовое вяжущее обладает высокой влагопоглощающей способностью, отрицательно сказывающейся на свойствах материала и сроке его хранения в шахтных условиях;

- гипсовые взрывоустойчивые перемычки в условиях обводненных выработок шахт снижают механическую прочность моноблока даже без учета влияния горного давления и воздушной ударной волны, что приводит к возрастанию ползучести материала перемычки и повышению вероятности разгерметизации изолирующего сооружения;

- быстрая потеря текучести гипсового раствора при гидромеханическом способе сооружения перемычки может привести к закупориванию

растворопровода, выходу из строя смесительно-нагнетательного оборудования, ограничивает дальность перекачивания раствора.

Последний из указанных недостатков на практике устраняют путем увеличения водовяжущего отношения, что повышает дальность перекачивания, но значительно снижает механическую прочность материала перемычки. Например, при увеличении водовяжущего отношения на допустимые 20 % от указанного в паспорте на материал, прочностные характеристики гипса снижаются на 40 %. Кроме того, фиксировались случаи, когда внутренние слои гипсового материала не схватывались, а превращались в гелеобразную массу. Это объясняется тем, что гипсовое вяжущее – воздушное вяжущее и при увеличении водогипсового отношения твердение слоев гипса в межопалубочном пространстве замедляется, причем каждый новый слой гипса ограничивает доступ воздуха к последующему. В результате внешние слои перемычки твердеют при контакте с воздухом, а внутреннее ядро остается незатвердевшим.

Наиболее перспективным направлением совершенствования технологии возведения взрывоустойчивых сооружений гидромеханическим способом, которое может в ближайшей перспективе заменить технологию с использованием гипсового вяжущего, как основного материала для моноблока перемычки, является использование цементного вяжущего. Цементное вяжущее в отличие от гипсового является гидравлическим вяжущим, т.е. твердеет при наличии воды, что полностью исключает проблему затвердевания внутреннего слоя моноблока перемычки даже при увеличенном водовяжущем отношении.

Самыми существенными преимуществами материалов на основе цементного вяжущего являются:

- менее активное поглощение влаги из окружающего пространства;
- высокая устойчивость к минерализованной шахтной воде;
- способность быстрого набора механической прочности на раннем этапе твердения при использовании ускоряющих добавок (с последующим набором прочности при дальнейшем твердении);

– более продолжительное время потери текучести по сравнению с гипсовым материалом позволяет перекачивать цементный материал продолжительное время на дальние расстояния;

– высокая долговечность, прочность, водогазонепроницаемость.

Разработка новых цементных материалов с ускорителем твердения и наполнителем в виде отходов промышленного производства даст возможность устранить не только недостатки, свойственные гипсовым перемычкам, а и позволит решить научно-технические задачи повышения пожарной и промышленной безопасности, а также снизить себестоимость возведения защитных сооружений в шахтах.

В связи с этим, обоснование параметров взрывоустойчивых перемычек в угольных шахтах из материала на основе цементного вяжущего путем установления закономерностей напряженно-деформированного состояния (НДС) взрывоустойчивых перемычек под действием воздушных ударных волн (ВУВ), повышенной температуры и горного давления для обеспечения безопасности работ шахтеров и горноспасателей в угольных шахтах, является актуальной научно-технической задачей, требующей решения.

**Работа проведена в соответствии с планом работ НИИГД «Респиратор» на 1996-2021 гг. (приложения А-И) по темам:**

1. Разработать состав материала на основе минеральных вяжущих и промышленных отходов и исходные данные для разработки ТЗ на технологию возведения безопалубочных перемычек (№ ГР 0195U029182, 1919501040, 1996 г.);

2. Разработка комплекта оборудования для приготовления и перекачивания быстротвердеющих растворов (№ ГР 0196U002685, 1929530008, 1997 г.);

3. Разработать комплект оборудования для приготовления и перекачивания быстротвердеющих растворов для возведения изолирующих сооружений в угольных шахтах (№ ГР 0101U003185, 1920130048, 2001 г.);

4. Разработка отраслевого стандарта (СОУ) «Вентиляционные, изолирующие и взрывоустойчивые перемычки при ликвидации аварий в угольных шахтах. Конструкция, материалы и технология возведения» (№ ГР 0109U006491, 19050915000, 2010 г.);

5. Разработка отраслевого стандарта (СОУ) «Шахтные взрывоустойчивые изолирующие сооружения. Общие технические требования» (№ ГР 0108U005875, 19050808060, 2011 г.);

6. Обоснование параметров основных средств взрывозащиты в горных выработках угольных шахт (№ 1991130446, 2011 г.);

7. Разработать комплект оборудования для приготовления и перекачивания быстротвердеющих растворов во время возведения изолирующих сооружений в каналах большой протяженности (11512048, 2015 г.);

8. Разработать каркасные опалубки многоразового использования для быстровозводимых изолирующих сооружений (11512049, 2015 г.);

9. Исследовать возможность применения различных видов технологий изоляции участков с осложнившимся пожаром, в т.ч. с использованием зольно-цементных и зольно-песчано-цементных растворов (11612041, 2016 г.);

10. Разработать рекомендации по ведению изоляционных работ на участках с осложнившимся пожаром с использованием смесей на основе цементных вяжущих (11712018, 2019 г.);

11. Разработать устройство дозирования воды для смесительно-нагнетательных установок, используемых при возведении изолирующих сооружений (11912013, 2021 г.).

#### **Степень разработанности темы**

Большой вклад в разработку, создание и внедрение методов и средств защиты от взрывов при изоляции пожаров в угольных шахтах в более ранний период внесли ученые Соболев Г.Г., Чеховских А.М., Плотников В.М., Греков С.П., Доценко В.Ф., Омельченко А.С., Курбацкий Е.В.; в настоящее время – Агеев В.Г., Калякин С.А., Марийчук И.Ф. и др.

Однако следует отметить, что в проведенных работах до конца не учтено влияние НДС перемычки при совместном действии на нее горного давления, ВУВ и температуры. Так же не учтено влияние отверстий, закрепленных проемными металлическими трубами, на прочность и устойчивость перемычек, не получили должного развития исследования, связанные с выбором и изучением прочностных характеристик материалов для перемычек на основе цементного вяжущего, не установлен период их раннего твердения и время, необходимое для твердения и набора требуемой прочности.

Идея работы заключается в повышении надежности изолирующих взрывоустойчивых перемычек путем установления зависимостей прочностных свойств материала на основе цементного вяжущего в условиях напряженно-деформированного состояния перемычек под действием внешних факторов (ВУВ, горного давления и температуры), что позволит повысить пожарную и промышленную безопасность при ведении аварийно-спасательных работ.

#### **Цель и задачи исследований**

Целью работы является обоснование параметров взрывоустойчивых перемычек в угольных шахтах из материала на основе цементного вяжущего с учетом закономерностей НДС, возникающего под действием горного давления, ВУВ и температуры для повышения их прочности и надежности при выполнении аварийно-спасательных работ в угольных шахтах.

Для достижения цели необходимо решить следующие основные задачи:

- провести исследования по выбору материала взрывоустойчивых перемычек и определению его механических характеристик;
- разработать математическую модель НДС взрывоустойчивых перемычек под действием горного давления;
- разработать математическую модель НДС взрывоустойчивых перемычек под действием ВУВ и температуры;

– определить параметры взрывоустойчивых перемычек, обеспечивающие их прочность и безопасность ведения аварийно-спасательных работ при ликвидации пожаров и взрывах;

– усовершенствовать технические средства и технологию возведения перемычек.

**Объект исследований** – механические процессы во взрывоустойчивых перемычках из материала на основе цементного вяжущего и ускорителя твердения под действием горного давления, падающих ВУВ и температуры при пожарах и взрывах в выработках угольных шахт.

**Предмет исследований** – компонентный состав материала, его механические характеристики и влияние прочностных свойств материала на параметры и надежность взрывоустойчивой перемычки, обеспечивающей пожарную безопасность и взрывозащиту.

**Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые:**

1 Установлено, что зависимость прочностных свойств материала для возведения взрывоустойчивых перемычек от компонентного состава цементного вяжущего, отходов производства (шлак, зола-унос) и ускорителя твердения (хлористый кальций) и их соотношения в составе прямо пропорционально возрастает от повышения массовой доли цементного вяжущего при содержании ускорителя твердения 3-5 %, при этом обеспечивается предел прочности материала на сжатие не менее 3,0 МПа, а время твердения цементно-шлакового состава составляет 6,5...7,0 ч, цементно-зольного – 15...16 ч, в моноблоке перемычки твердение в зависимости от температуры происходит за время не более 5,0 ч и 7,0 ч соответственно.

2 На основе установленной многофакторной зависимости получено, что максимальные напряжения в перемычке с цементно-шлаковым и цементно-зольным материалами практически равны, нормальные сжимающие напряжения при действии ВУВ возникают при шарнирном креплении по ее высоте в средней части, горного давления – в нижней, суммарные напряжения при действии

горного давления и температуры от изгибных напряжений составляют примерно 43-47 %, с параболическим радиусом кривизны в 1,1-1,2 раза меньше, чем с полуокружностью, обеспечивая ее запас прочности с коэффициентом, не менее 1,7.

3 Численным экспериментом с использованием математической модели было установлено, что влиянием проемных металлических труб на НДС перемычки, ее прочность и устойчивость можно пренебречь, а принятый квадратичный закон распределения поперечных деформаций и внутренних сил позволяет определить не две, а одну функцию прогиба, что существенно упрощает решение задачи по определению взрывоустойчивости перемычки.

**Получили дальнейшее развитие** методы выбора компонентов для материала взрывоустойчивых перемычек; методы расчета на прочность взрывоустойчивых перемычек с армированием; технология возведения.

**Теоретическое значение полученных результатов:**

- установлены зависимости, позволяющие выбирать технологический состав материала для перемычки с учетом его механических характеристик, которые определяют безопасные параметры взрывоустойчивых перемычек;

- разработана математическая модель НДС взрывоустойчивых перемычек, находящихся под действием горного давления, давления во фронте ВУВ и температуры, учитывающая два вида граничных условий жесткого и шарнирного крепления по периметру выработки;

- разработанная математическая модель представлена в виде графического отображения (номограммы) многофункциональной зависимости толщины перемычки от площади сечения выработки, горного давления, температуры и давления ВУВ с учетом времени твердения цементно-шлакового и цементно-зольного материалов в лабораторных условиях и в моноблоке перемычки.

**Практическое значение полученных результатов:**

- дано обоснование времени начала безопасной эксплуатации взрывоустойчивой перемычки, возведенной из цементно-шлакового материала с

отношением компонентов 7:3 и ускорителем твердения (хлористый кальций), которое при пределе прочности материала не менее 3,0 МПа, составляет не более 5,0 ч после окончания заливки моноблока перемычки;

– разработан технологический режим, средства и технология приготовления смесей и возведения перемычек;

– установлен ожидаемый годовой экономический эффект от применения новых перемычек для цементно-шлаковой и цементно-зольной смесей 2164 тыс. руб. и 4018 тыс. руб. соответственно.

### **Методология и методы исследований**

Для достижения цели и решения поставленных задач в работе использован комплексный подход, содержащий анализ и обобщение результатов, полученных ранее другими авторами, теоретические и экспериментальные методы. Теоретические методы использованы при разработке математических моделей напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием горного давления, воздушных ударных волн и температуры с двумя видами граничных условий: жесткое и шарнирное закрепление с использованием основных законов анизотропных (изотропных) пластин; экспериментальные исследования – в лабораторных условиях при определении состава быстротвердеющих смесей и механических их характеристик с использованием методов математической обработки статистических данных.

### **Научные положения, вносимые на защиту**

1 Зависимости физико-механических характеристик состава для возведения перемычек от содержания цементного вяжущего, отходов производства и ускорителя твердения и их соотношения в составе, что позволило установить пределы прочности материала и обосновать параметры защитных свойств перемычек для обеспечения необходимой пожарной и промышленной безопасности при ведении аварийно – спасательных работ.

2 Математическая модель НДС взрывоустойчивой перемычки, учитывающая закономерности изменения ее радиуса кривизны по

параболической зависимости или полуокружности при воздействии горного давления, давления во фронте ВУВ и изменения температуры в выработке при условии жесткого и шарнирного закрепления перемычки к горной выработке. Это позволило определить взрывозащитные параметры перемычки, обеспечивающие не только ее прочность и устойчивость, но и время начала ее безопасной эксплуатации для достижения пожарной и промышленной безопасности при ведении работ.

3 Зависимость толщины взрывоустойчивой перемычки от площади сечения выработки, параметров ВУВ, температуры и горного давления с дополнительным учетом НДС в материале перемычки и его прочности, что позволило значительно повысить надежность противопожарного и взрывозащитного действия перемычки и безопасность ведения аварийно-спасательных работ.

#### **Степень достоверности и апробация результатов диссертации**

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются применением классических основ и законов теории анизотропных (изотропных) толстых пластин, одного из основных методов решения краевых задач – энергетического метода с использованием вариационного исчисления при разработке математических моделей и исследовании НДС взрывоустойчивых перемычек; физического моделирования методом эквивалентных материалов при определении влияния проемных металлических труб на НДС перемычки, их прочность и устойчивость; подтверждением результатов теоретических исследований данными экспериментов, полученными зарубежными авторами в натурных условиях.

Основные результаты диссертационной работы доложены и получили одобрение на Международных научно-практических конференциях «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» (Минск, 2005); «По проблемам пожарной безопасности», посвященная 75-ю создания ВНИИПО (Москва, 2012); «Промышленная безопасность и вентиляция подземных сооружений в XXI столетии» (Донецк, 2015); «Безопасность жизнедеятельности

предприятий в промышленно развитых регионах» (Кемерово, Россия, 2017); «Пожарная и аварийная безопасность» (Иваново, Россия, 2017); «Подземная угледобыча XXI век» (Ленинск-Кузнецкий, Россия, 2018), «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (Москва, 2020); на научно-практических конференциях «Пути повышения безопасности горных работ в угольной отрасли» (Макеевка, 2004); «Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи» (Киев, 2005); «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення боекдатності оперативно-рятувальних підрозділів» (Харьков, 2013); «Современные проблемы охраны труда и аэрологии горных предприятий» (Донецк, 2016).

**Личный вклад соискателя** состоит в анализе состояния вопроса, формулировании цели и основных задач исследований, научных положений и выводов; участии в разработке расчетных схем и анализе математических моделей НДС взрывоустойчивых перемычек, проведении экспериментальных исследований по определению состава и механических характеристик их материалов; обобщении и систематизации результатов исследований.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 33 научных работах, из них 9 работ в изданиях ВАК ДНР (1 монография), 4 работы – в изданиях ВАК РФ, 11 публикаций в других рецензируемых изданиях (1 патент на полезную модель), 9 статей – материалы научных конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников из 162 наименования на 21 странице, 10 приложений на 21 странице. Работа изложена на 193 страницах машинописного текста, в том числе 147 страниц основной части, содержит 39 рисунков и 12 таблиц.

## ГЛАВА 1

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 1.1 Анализ аварийности в горных выработках угольных шахт

Угольные шахты относятся к предприятиям с повышенной аварийной опасностью. Наиболее сложными видами аварий, которые приводят к потере здоровья, жизни шахтеров и горноспасателей, а также и значительному материальному ущербу, являются подземные пожары. Проблема повышения эффективности борьбы с подземными пожарами приобретает особую актуальность в связи с усложнившимися горнотехническими условиями ведения горнодобычных работ, связанными, в том числе и с переходом на глубокие горизонты [1].

Тушение пожаров в подземных горных выработках шахт является чрезвычайно сложным и опасным процессом. Особую сложность представляет тушение развившихся пожаров, которые не удалось ликвидировать на начальной стадии при непосредственном воздействии на очаг пожара огнетушащими средствами. Тушение таких пожаров осуществляется методом изоляции или комбинированным способом. При этом, длительность тушения подземных пожаров может достигать нескольких месяцев, а то и лет. Удельный вес сложных пожаров составляет примерно 10-12 %, однако они дают до 80 % всех убытков, связанных с их возникновением и ликвидацией. Поэтому проблема тушения таких пожаров сводится, в первую очередь, к повышению эффективности ведения горноспасательных работ по изоляции пожарных участков [2].

Аварии возникают и вследствие снижения уровня инженерно-технической работы на шахтах, а также из-за нарушения технологических процессов при ведении работ шахтерами непосредственно на рабочих местах. Горнорабочими шахт грубо нарушаются требования правил безопасности по технологии выемки

угля, эксплуатации электрооборудования, защите кабельных сетей от короткого замыкания и соблюдения паспортов крепления горных выработок.

Анализ ведения аварийно-спасательных работ показывает, что основными причинами осложнения пожаров является поздний вызов горноспасательных подразделений на шахту, что наряду с длительным отсутствием воды в пожарноросительном трубопроводе способствует быстрому распространению пожара в горных выработках. При тушении осложненных подземных пожаров увеличиваются длительность горноспасательных работ, трудозатраты на ведение работ, а их ликвидация становится сложной и дорогостоящей [3-16].

В анализе приведены статистические данные об авариях за 2007-2020 годы, в том числе количество изоляционных сооружений, возведенных при ликвидации аварий и при проведении технических работ (таблица 1.1).

Таблица 1.1

## Показатели оперативной деятельности ГВГСС за 2007-2020 годы

Показатели	Периоды		
	2007-2010 г.г.	2011-2014 г.г.	2015-2020 г.г.
Всего аварий и аварийных ситуаций	412	300	246
Всего аварий	211	149	54
в том числе подземных пожаров: всего	68	44	10
пожаров экзогенных	53	38	10
пожаров эндогенных	15	6	0
Взрывов газа и угольной пыли	19	14	6
Внезапных выбросов	11	11	0
Обрушений пород	70	44	13
Затоплений	1	4	4
Аварий на поверхности	42	32	22
Аварийных ситуаций	199	126	192
Длительность ликвидации аварий и аварийных ситуаций, час	20435	33075	2053
Экономический ущерб, млн. грн. (млн. руб.)	198,1	91,0	(20,7)
Возведено изоляционных сооружений, шт.: всего	97	126	3
в том числе: гипсовых	66	63	3
Произведено технических работ, всего	468	382	184
возведено изоляционных сооружений, шт.	74	56	9
в том числе гипсовых перемычек, шт.	21	15	2

За период с 2007 по 2010 гг. подразделениями ГВГСС ликвидировано 68 подземных пожаров, что составляет 32 % от общего количества аварий, в том числе экзогенных (78 %) и эндогенных (22 %) пожаров; взрывов газа и угольной пыли 9 %; возведено 97 изоляционных сооружений, в том числе 68 % гипсовых, и произведено технических работ с возведением 74 изоляционных сооружений, из них 28 % гипсовых, экономический ущерб от пожаров составил 198,1 млн. грн.

По сравнению с этим периодом с 2011 по 2014 гг. количество ликвидированных аварий уменьшилось в 1,37 раза, пожаров в 1,55 раза (экзогенных и эндогенных – 86 % и 14 % соответственно), однако возведено изоляционных сооружений в 1,3 раза больше, а гипсовых – в 1,05 раза меньше; произведено технических работ с возведением изоляционных сооружений в 1,32 раза меньше, из них гипсовых – в 1,4 раза меньше; экономический ущерб от пожаров уменьшился в 2,17 раза.

Для возведения изоляционных перемычек применялись 42 установки типа «Монолит» [17]. Всего было переработано 743,8 т гипсового вяжущего. Эти же установки применяли для подачи золы-уноса в выработанное пространство горных выработок аварийных участков.

По результатам работы подразделений ГВГСС было принято решение о проведении занятий с командным составом на тему «Технология возведения взрывоустойчивых гипсовых перемычек. Применение горноспасательного оборудования, используемого при изоляции пожарных участков: комплект противовзрывной быстровозводимый КПБ, агрегаты «Монолит» и «Пневмолит», так как эффективное ведение аварийно-спасательных работ по изоляции пожарных участков является одной из основных задач горноспасателей.

Прошла апробацию новая технология ликвидации аварий [18] с применением сухой минерально-цементной смеси «Би-крепь» при ликвидации экзогенного пожара в вентиляционном штреке 1 северной лавы блока № 2 пл.д<sub>4</sub> ОАО «УК «Шахта «Красноармейская-Западная № 1» 17 октября 2008 года. В связи с уменьшением площади поперечного сечения аварийной выработки

до 3 м<sup>2</sup> и встреченным обрушением пород кровли дальнейшее продвижение по выработке не представлялось возможным и как следствие невозможно было активно воздействовать на очаги пожара. На техническом совете было принято решение об изоляции выработок пятью взрывоустойчивыми перемычками с применением материала «Би-крепь» [19]. Заливка перемычек производилась при помощи насосных установок типа СО-241 (ПН-600, ПН-800) [20].

На основании анализов аварийности в 2009 и 2013 гг. было принято решение обратить особое внимание на вопросы обучения личного состава подразделений ГВГСС правилам практического применения технических средств ликвидации аварий, имеющихся на оснащении, в том числе средств изоляции пожарных участков, так как эта задача остается актуальной.

За период 2015–2020 гг. подразделениями ГВГСС ликвидировано 54 аварии, в том числе 10 подземных пожаров, 6 взрывов газа угольной пыли, 13 обрушений горных пород, 4 затопления, 22 аварии на поверхности шахты, 192 аварийные ситуации. Удельный вес пожаров от всех аварий составил 18,5 %.

Общая продолжительность ликвидации аварий составила 2053 часа. Экономический ущерб составил 20,7 млн. руб.

Анализ информации показывает, что в ГВГСС накоплен многолетний опыт возведения изолирующих сооружений гидромеханическим способом из смесей на основе вяжущих материалов. Основным применяемым оборудованием являются установки «Монолит» («Пневмолит»), а также (значительно реже) агрегаты «Темп» [21].

Следует отметить, что технология возведения изолирующих сооружений гидромеханическим способом за последние десятилетия практически не совершенствовалась, а используемое оборудование не позволяет осуществлять должный контроль над соблюдением требований технологических параметров изоляции пожарных участков, применяемое гипсовое вяжущее помимо неоспоримых достоинств имеет и ряд существенных недостатков. Таким образом, давно возникла необходимость разработки современных технологических

процессов на основе создания новых малокомпонентных составов из недорогого сырья.

Следует отметить, что за первый указанный период (таблица 1.1) при ликвидации аварий было возведено гидромеханическим способом 66 перемычек из гипсового вяжущего, а также 21 – при проведении технических работ; за второй период – 63 перемычек при ликвидации аварий и 15 – при проведении технических работ. Третий период является особым в силу различных причин – сокращения количества обслуживаемых предприятий, ликвидации аварий на пожарных участках активным способом в начальный период, усиления контроля за выполнением требований правил безопасного ведения работ на угольных предприятиях и др., а также такого немаловажного фактора как отсутствие запасов гипсового вяжущего на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС.

Всего, начиная с 2007 года, было возведено 173 гипсовые взрывоустойчивые перемычки (включая 3 перемычки по состоянию на июнь 2021 г.).

Анализ приведенных сведений, в том числе и об авариях, ликвидированных подразделениями ГВГСС за указанный период, свидетельствует о следующем:

- несмотря на существенное сокращение количества пожаров в последние годы, экономический ущерб предприятий составляет десятки миллионов рублей при значительной длительности их ликвидации;

- возведение изолирующих сооружений гидромеханическим способом при ликвидации пожаров является одним из ведущих видов деятельности подразделений ГВГСС, однако технология ведения этих работ не совершенствовалась последние 20-30 лет;

- практически отсутствуют новые разработки и их внедрение в области механизации ведения изоляционных работ, высокопроизводительных технических средств, в т.ч. контроля технологических параметров возведения;

- при ведении аварийно-спасательных работ не всегда осуществлялся должным образом контроль за соблюдением требований технологических параметров изоляции пожарных участков;

- основным материалом, допускаемым для возведения взрывоустойчивых сооружений, является гипсовое вяжущее, однако в силу ряда причин этот материал не всегда возможно применить;

- разработка новых материалов для ведения изоляционных работ гидромеханическим способом (отечественных [19] и зарубежных [22]) была сведена к созданию многокомпонентных дорогостоящих составов при полной монополии разработчика (изготовителя);

- известен опыт использования новых материалов при проведении изоляции пожарных участков [18, 23, 24], однако повсеместного применения он не получил;

- за последние несколько лет количество перемычек из гипсового вяжущего существенно уменьшилось, что связано с рядом факторов, прежде всего с отсутствием запасов гипса на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС.

## **1.2 Существующие способы тушения пожаров в горных выработках и конструкции изолирующих сооружений, применяемых при изоляции аварийных участков**

### **1.2.1 Способы тушения пожаров в горных выработках шахт**

Одним из факторов возникновения пожара в горных выработках шахт является наличие кислорода, прекращение свободного доступа которого к очагу пожара, наряду со снижением температуры горящих материалов и окружающих пород является первоочередным способом тушения подземного пожара [2, 25].

Существуют несколько способов тушения пожара. Активный способ заключается в прямом техническом воздействии на очаг пожара пожаротушащими веществами. Обычно этот способ применяется в начальный

период развития пожара, в то время, когда очаг пожара доступен для непосредственного воздействия. Способ изоляции состоит в прекращении притока свежего воздуха к очагу пожара. Это достигается путем возведения в горных выработках специальных изолирующих сооружений – перемычек. Изоляцию пожарного участка проводят в случаях, когда очаг пожара находится в недоступном (труднодоступном) месте, где непосредственно воздействовать на него активно не представляется возможным.

Комбинированные способы заключаются в сочетании вышеуказанных способов. Изоляцию пожарного участка совмещают с последующим его тушением пожаротушащими средствами. Эти способы эффективны в тех случаях, когда большая площадь охвачена пожаром, подступы к очагу пожара затруднены по различным причинам, например, из-за высокой температуры или нет в наличии достаточного количества огнетушащих средств. К комбинированным способам тушения пожаров в горных выработках шахт специалисты относят также заполнение пространства за перемычкой инертными газами, заиливание выработок или затопление их водой и др. [26].

### **1.2.2 Конструкции изолирующих сооружений**

При изоляции пожарных участков в шахтах, опасных по газу, как правило, применяют изолирующие сооружения, возводимые гидромеханическим способом, – взрывоустойчивые перемычки [27]. Изолирующие сооружения [25] по сроку службы разделяются на временные и постоянные.

Временные перемычки используют, как подготовительные сооружения, после которых возводят постоянные перемычки. При этом добиваются снижения задымленности, температуры и т. п. Временные изолирующие перемычки применяют для осуществления вентиляционных маневров, связанных с сокращением или увеличением количества поступающего на пожарный участок воздуха, местного реверсирования вентиляционной струи, выравнивания

давления и т. д. К временным изолирующим сооружениям относятся щитовые, пенопластовые, чураковые, комплектные, шлакоблочные перемычки [28].

Постоянные перемычки используют при ведении аварийно-спасательных работ при изоляции пожарных участков. Они рассчитаны на длительный срок службы, поэтому обладают хорошей стойкостью к горному давлению, огнестойкостью, высокой герметичностью. К ним относят чураковые, брусчатые, кирпичные, блочные, бетонитовые, бетонные. Эти сооружения возводят как с проемами, так без них.

Противопожарные арки (брусчатые, кирпичные, бетонитовые, железобетонные) возводят в различных горных выработках, таких как откаточные, вентиляционные штреки, промежуточные квершлагги, пересекающие самовозгорающиеся пласты угля, а также в местах, предусмотренных планом ликвидации аварий. Эти сооружения возводят перед началом очистных работ.

Изолирующие рубашки предназначены для ликвидации подсосов и утечек воздуха через трещины во вмещающих породах и угле из соседних выработок через разделяющие их целики угля, а также через породы, вмещающие изолирующее сооружение.

В то же время следует отметить, что в сложных геологических и горнотехнических условиях применение изолирующих сооружений и дополнительных средств изоляции (тампонажа, покрытия и т.д.) не гарантирует предотвращения проникновения воздуха в изолированное пространство. Кроме того, изолирующие сооружения могут подвергаться различным нагрузкам (воздействие напорных вод, сейсмических, взрывных волн). В этих случаях применяют специальные средства изоляции [25], к которым относят перемычки с подливанием, фильтрующие, водоупорные, динамические устойчивые сооружения и др.

К перемычкам специального назначения относят водоналивные перемычки [29], надувные изоляционные перемычки [30], устройства парашютного типа [31], парашютные вентиляционные перемычки [32] и др.

Для локализации взрывов в изолированном пространстве и сохранения в рабочем состоянии изолирующих сооружений при изоляции пожаров в шахтах, опасных по газу, сооружают взрывоустойчивые перемычки [33-35], такие как (гипсовые [2, 25, 36, 37], шпренгельные [25, 38], баррикадные [38, 39], барьерные [25, 40], а также комплект противовзрывной быстровозводимый (КПБ) [16, 41] и др. [42] в качестве дополнительного оборудования).

Исходя из анализа вышеизложенной информации, следует отметить:

- одним из важных способов борьбы с осложнившимися подземными пожарами является способ их изоляции;
- изоляция пожаров в шахтах, опасных по газу, производится взрывоустойчивыми перемычками;
- шпренгельные, баррикадные и барьерные перемычки имеют ряд существенных недостатков, не всегда способны эффективно противостоять давлению воздушной ударной волны, на их сооружение затрачивается много времени, сил и средств;
- анализ конструкций изолирующих сооружений, возводимых в шахтах, показывает, что наиболее рациональным способом возведения взрывоустойчивой перемычки является гидромеханический.

### **1.3 Материалы, применяемые для возведения изолирующих сооружений**

Технология строительства монолитных сооружений гидромеханическим способом, высокие изолирующие свойства, несгораемость и технологичность процесса возведения предопределили широкое распространение различных марок гипсового вяжущего при сооружении взрывоустойчивых перемычек [43-47].

Наряду с неоспоримыми преимуществами гипсовый материал [48] имеет ряд недостатков, основными из которых являются крайне малая длительность транспортирования раствора по трубопроводу, которая является результатом быстрого процесса перехода в твердое состояние, что затрудняет эксплуатацию

смесительно-нагнетательного оборудования; низкая водостойкость и повышенная ползучесть; при увлажнении конструкции прочность моноблока из гипса значительно снижается по сравнению с прочностью моноблока в сухом состоянии, а ползучесть возникает, в том числе, и под действием собственного веса, что может привести к разрушению моноблока и разгерметизации изолированного участка; на практике для обеспечения подачи раствора гидромеханическим способом увеличивают водогипсовое отношение, что зачастую приводит к недопустимому снижению прочности взрывоустойчивых перемычек [49, 50].

Для устранения этих недостатков и с целью совершенствования технологии создания быстротвердеющих растворов наиболее эффективным является применение смесей на основе цементного вяжущего с ускорителями твердения, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- легко готовиться и транспортироваться существующими смесительно-нагнетательными установками;
- обладать требуемой механической прочностью, в том числе при воздействии высоких температур;
- быть стойкими к воздействию агрессивных шахтных вод;
- быть доступными в процессе приготовления и иметь невысокую стоимость.

Наиболее вышеперечисленным требованиям соответствуют смеси [51-53], полученные на основе цементного вяжущего с использованием различного вида добавок [54], которые, с одной стороны, ускоряют процесс раннего набора прочности материала, с другой – обеспечивают необходимое время для его качественного транспортирования на требуемое расстояние.

Одним из известных быстротвердеющих материалов, получивших широкое распространение, является «Текбленд» (или его аналог «Эльбленд») [22, 24, 55]. Следует отметить, что специалистами была проведена лабораторная проверка [18, 56] прочностных характеристик этого материала, что показала определенное

несоответствие заявленных характеристик полученным в ходе исследования. Кроме того, в шахтных условиях «Текбленд» проявил высокие показатели по водопоглощению, в результате чего данный материал в определенный момент времени может оказаться в пластическом состоянии.

По данным лабораторных исследований созданного в Германии быстротвердеющего материала «Промонд РН-61» определено [56], что образцы, изготовленные из него, не достигают заявленной прочности, растворы из этого материала по своим характеристикам подобны растворам из гипсового вяжущего, то есть в состоянии повышенной влажности теряют в прочности (более чем в 2 раза).

Цементные смеси «Барьер» и «Барьер-КР» [57] разработаны для сооружения изолирующих и взрывоустойчивых перемычек в горных выработках шахт, используются также для заполнения пустот, куполов в горном массиве, бутовых полос, герметизации закрепного пространства.

Цементная смесь «Распор» используется для заполнения свободного пространства между изолирующими сооружениями [58].

Смесь УГМ-П [59] разработана на основе активированных цементов и служит для возведения изолирующих перемычек, упрочнения и уплотнения массива горных пород, подвергшегося нарушению.

Цементная смесь «Текфом» [60] используется для возведения изолирующих сооружений и заполнения пустот пространства горного массива. Смеси «Текхард» и «Текхард Т» [61] применяют для изоляции выработанного пространства, горных выработок, укрепления и герметизации возведенных изолирующих перемычек. Для создания вентиляционных перемычек применяется однокомпонентное вяжущее «Дюрафом» [62].

Известен состав [63], предназначенный для использования при возведении изолирующих перемычек в определенных условиях – с воздействием горного давления и наличии водопритоков. В состав содержатся цемент и летучая зола, а также наполнитель с пластификатором и вода. Летучая зола представляет собой

цементно-зольное вяжущее, пластификатор – минерально-химическая добавка КМХ, а наполнитель – песок. Компоненты приняты в следующем соотношении в массовых %: цементно-зольное вяжущее – 20-25, добавка КМХ – 0,2-0,4, песок – 41-66, вода – оставшееся до 100. Заявленный результат – увеличение прочности.

Цементные смеси «БИ-Крепль» [19] и «Берасит-Крепль» [64] применяют для возведения литых околострековых полос.

Исходя из области применения, рассмотренные выше смеси можно разделить на несколько групп материалов:

- материалы, предназначенные для сооружения взрывоустойчивых перемычек, – «Текбленд», «Барьер», «Барьер-КР», УГМ-П, «Промонд РН-61»;
- материалы, используемые для возведения изолирующих сооружений, – «Распор», «Текфам», «Техкард», «Дюрафом».

На материал «Текбленд» существует проектно-испытательная документация [65], созданная в главном институте горного дела Польши. Документация составлена по результатам исследований на опытно-экспериментальной шахте «Барбара» в 1997 г. Согласно выводам комиссии, «Текбленд» признан пригодным для сооружения изолирующих взрывоустойчивых перемычек в горных выработках шахт на основании того, что экспериментальная перемычка испытала давление ударной волны до 0,85 МПа и не разрушилась. Разработана инструкция по применению этого материала на шахтах Кузбасса [66]. Однако, следует отметить, что согласно нормативной документации [67] материал должен иметь прочностные характеристики, которые позволяют сооружать взрывоустойчивые перемычки, выдерживающие давление во фронте ударной волны не менее чем 2,8 МПа.

На основании этого материалы из группы «Текбленд» (также как и смесь УГМ-П) не могут считаться пригодными для возведения взрывоустойчивых сооружений без дополнительных испытаний. Другими факторами, ограничивающими применение «Текбленд» являются нестабильность прочностных характеристик с акцентом в сторону снижения, повышенная

водопоглотительная способность в шахтных условиях, что может привести к тому, что материал придет в пластическое состояние, а также высокая стоимость. Аналогичными недостатками обладает и материал «Промонд РН-61» – нестабильность заявленных характеристик, высокая стоимость. Дополнительным недостатком является снижение прочностных показателей в 2 раза в состоянии водонасыщения, что не позволяет его применять на обводненных участках, а также использовать способ подтопления при тушении пожаров.

Смесь УГМ-П создана на основе микроцемента, а в качестве вяжущего для этого материала используют полимер на эпоксидной основе. Другой особенностью микроцемента является использование наполнителя мелких фракций. Количество компонентов данной смеси в литературных источниках не приведено, однако можно сделать вывод – смесь УГМ-П является многокомпонентной, кроме того, можно предположить, что для ее подготовки необходимо провести ряд дополнительных работ, например, измельчение исходных материалов.

Материалы «Распор», «Текфам», «Дюрафом» разработаны для возведения только изолирующих перемычек или заполнения пространства между изолирующими сооружениями, они имеют низкую прочность на сжатие в пределах (0,1...1,0) МПа.

Смеси «Текхард Т» и «Текхард» используются, в основном, для герметизации и укрепления уже возведенных изолирующих сооружений.

Смесь «БИ-Крепь» разработана специально для создания охранных полос, целью ее применения является поддержание горных выработок. Однако, известны примеры применения смеси «БИ-Крепь» для возведения изолирующих и взрывоустойчивых перемычек при ликвидации аварийных ситуаций, однако, как и в случае с «Текбленд» и УГМ-П нельзя считать ее пригодной для возведения взрывоустойчивых сооружений без проведения дополнительных испытаний.

Выполненными исследованиями установлено, что существующие составы смесей имеют ограниченное применение в условиях угольных шахт ввиду

нестабильности физико-механических свойств и высокой стоимости. В то же время, с целью снижения стоимости материала целесообразным является использование в качестве заполнителя в цементном смеси отходов местного производства, например, золы-уноса тепловых электростанций и доменного шлака металлургического завода [68], что, помимо выполнения основной задачи, также будет способствовать решению вопросов по охране окружающей среды.

Разработка малокомпонентных и составов с невысокой стоимостью на основе цементного вяжущего и промышленных отходов является актуальной, а быстротвердеющий материал является востребованным и имеет широкую область применения, в том числе и на обводненных участках горных выработок.

Кроме этого, важным вопросом является создание готовых к употреблению быстротвердеющих смесей без использования жидкого ускорителя твердения, что позволит существенно упростить эксплуатацию имеющихся смесительно-нагнетательных установок и повысить оперативность ведения аварийно-спасательных работ при возведении взрывоустойчивых перемычек.

Актуальным вопросом также является определение максимальных значений пределов прочности материала на сжатие (растяжение) при минимальном времени их достижения, а также установление концентрации химических ускорителей твердения цементно-шлаковых, цементно-зольных смесей и определение минимального времени достижения необходимой механической прочности моноблока взрывоустойчивого сооружения.

#### **1.4 Анализ существующих технических средств возведения изолирующих сооружений**

Изоляция пожарных участков в горных выработках угольных шахт согласно нормативной документации должна выполняться изолирующими взрывоустойчивыми перемычками из гипсового материала, которые возводятся гидромеханическим способом при помощи смесительно-нагнетательного

оборудования комплексов «Темп» [21], агрегатов «Монолит» («Пневмолит») [13, 17]. На оснащении горноспасательных подразделений на 01.01.2015 г. находилось 20 агрегатов «Монолит» и 6 агрегатов «Пневмолит». Кроме того, незначительное количество такого оборудования находится в эксплуатации на предприятиях угольной отрасли при выполнении технологического цикла работ (для возведения изолирующих сооружений, заполнения пустот и т.п.).

Как показал многолетний опыт эксплуатации, применение вышеуказанных смесительно-нагнетательных установок является малоэффективным ввиду ограничения дальности подачи раствора и невозможности приготовления в смесительной камере существующей конструкции растворов требуемого качества из гипсовых вяжущих существующих марок, у которых значения стандартных консистенций ниже 40 %, и снижения надежности оборудования в эксплуатации.

Проведенный анализ эксплуатации смесительно-нагнетательных установок показал, что для сооружения изолирующих перемычек гидромеханическим способом работа этих машин наиболее эффективна при приготовлении и подаче растворов из гипсового непластифицированного вяжущего только при значении водовяжущего отношения не менее 0,60.

Наиболее надежная работа этих установок выполняется при применении гипсовых вяжущих с вышеуказанными значениями стандартных консистенций и сроками начала схватывания до 6 мин, окончания – до 18 мин [2].

Верхний предел водогипсовых отношений производимых растворов определяется их значениями, когда прочность моноблока перемычки после затвердевания превышает 3,0 МПа. Для гипсов марок от Г-5 до Г-7 при невысоких значениях стандартных консистенций до 45 % рабочие величины водовяжущих отношений будут в пределах до 0,54. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что приготовление растворов с такими показателями смесительно-нагнетательными установками типа «Монолит» затруднительно [50].

Работа смесительно-нагнетательного оборудования при небольших водовязущих отношениях гипсовых растворов, которые имеют низкие стандартные консистенции, определяется, прежде всего, малоэффективной работой смесительного узла установки, который может обеспечить качественное производство растворов только при подаче воды в него более  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Согласно техническим характеристикам в смесительную камеру поступает около  $10,0 \text{ т/ч}$  сухого материала (при непрерывной загрузке). В зависимости от объема воды, подаваемой в смеситель, производительность смесительно-нагнетательного оборудования достигает  $9 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Объем смесительной камеры – не более  $2,5 \text{ л}$ , а объем узла, где происходит непосредственно смешивание гипсового вяжущего с водой, – не более  $1 \text{ л}$ . При небольших расходах воды затворения (до  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и времени смешивания (до  $1 \text{ с}$ ) не происходит качественно полного смешивания гипса с водой. При исследовании работы смесительно-нагнетательного оборудования в пробах, отобранных в начале трубопровода, отмечалось присутствие значительного количества гипсового вяжущего, незатворенного водой. При попадании в насосный узел этого незатворенного должным образом гипсового раствора существенно увеличивается трение винта по обойме, что вызывает значительное повышение потребляемой мощности, и, как итог, преждевременный износ насоса (прежде всего обоймы). Эта ситуация может привести к остановке насосного агрегата из-за заклинивания винта. Кроме того, незатворенный гипс, попадая через насос в трубопровод, приводит к быстрому схватыванию раствора в нем (частицы сухого вещества становятся центрами кристаллизации), что вызывает закупорку растворопровода вне зависимости от его длины. Все вышеуказанные факторы существенно снижают эффективность ведения аварийно-спасательных работ.

Анализ подконтрольной эксплуатации смесительно-нагнетательного оборудования и полученных при подготовке и подаче гипсовых растворов

результатов показывает, что значительные потери мощности связаны с малоэффективной работой смесительного узла, что в диапазоне водогипсовых отношений до 0,54 достигают 10 кВт. В работе [69] представлена зависимость мощности, потребляемой оборудованием, от водовяжущих отношений гипсовых растворов.

Следует отметить, что конструкция смесительного узла в существующем на вооружении подразделений ГВГСС оборудовании длительный период не подвергалась усовершенствованию, а повышение надежности установок проводили за счет повышения мощности привода (от 13 до 22 кВт).

В современных смесительно-нагнетательных агрегатах снижение энергопотерь, повышение качества растворов можно достичь за счет внедрения высокопроизводительных насосных узлов, тщательного контроля за расходом воды и применения конструкции высокоэффективного смесительного узла, обеспечивающего качественное и полное затворение гипса с водой при различных водовяжущих отношениях.

В странах с развитой горной промышленностью при возведении в шахтах изолирующих взрывоустойчивых сооружений используют специализированное оборудование. Наиболее работоспособными с точки зрения эксплуатации можно считать «Монолит-3» (ВНПО «Респиратор»), «Моно WT.820» (ООО «Минова»), ОПР1 (НИИГД «Респиратор»), «Монолит-1М» (ОАО «КЭЗСБ», Россия).

Агрегат «Монолит-3» [14] используется для возведения изолирующих и взрывоустойчивых перемычек из материалов на основе гипсового вяжущего при проведении изоляционных работ в горных выработках в шахтах, опасных по газу, а также заполнения куполов и пустот в горном массиве.

Насосное оборудование «Mono WT 820» [70] разработано для заполнения пустот, сооружения изолирующих взрывоустойчивых перемычек, тампонажа выработанного пространства, создания охранных полос и т.п.

Оборудование ОНР 1 [71-76] предназначено для возведения изолирующих взрывоустойчивых перемычек и обеспечивает качественное приготовление различных гипсовых растворов, что достигается с помощью высокоэффективного смесительного узла, обеспечивающего наиболее полное затворение гипса с водой.

Установка «Монолит-1М» [77] используется для получения и транспортирования различных быстротвердеющих растворов при возведении взрывоустойчивых сооружений в горных выработках шахт, при заполнении куполов, пустот за крепью выработок.

Изучение конструктивных параметров современных установок для сооружения в шахтах изолирующих взрывоустойчивых перемычек в направлении контроля подачи материала и воды, увеличения производительности показало, что каждое оборудование имеет свои преимущества и недостатки.

К достоинствам оборудования «Монолит-3» можно отнести компоновку установки и надежную конструкцию, находящуюся в эксплуатации длительный период. Существенными недостатками являются наличие лишь визуального контроля за дозировкой сухого материала, подаваемого в установку, быстрый износ деталей насоса установки.

Среди достоинств «Mono WT 820» – постоянный контроль за подачей воды за счет использования современного расходомера ротаметрического типа. К недостаткам этой установки следует отнести возможность приготовления и перекачивания преимущественно только цементных растворов, отсутствие контроля за дозировкой сухого вяжущего (кроме визуального), недостаточную производительность.

В конструкции оборудования ОНР1 имеется шнековый питатель с отдельным двигателем, дозирующий подачу сухого вяжущего, что существенно

улучшает качество приготавливаемого раствора. К достоинствам также можно отнести возможность подачи в растворную смесь пластифицирующих добавок с целью увеличения дальности подачи. К недостаткам следует отнести контроль подачи воды только косвенным методом, габаритные размеры по длине.

Оборудование «Монолит 1М» (по аналогии с оборудованием ОПР 1) конструктивно имеет шнековый питатель с приводом, улучшающий качество раствора путем контроля за дозировкой сухого вяжущего, конструкция позволяет напрямую контролировать расход воды за счет применения ротаметрического расходомера. «Монолит 1М» имеет наибольшую производительность (среди всех аналогов) по цементным растворам, что можно считать определенным преимуществом установки. Основной недостаток – способность оборудования перекачивать растворы на основе гипсовых вяжущих на малые расстояния.

В условиях горных выработок шахт используют и материалы на основе цементного вяжущего. Для проведения работ с бетонами и цементными смесями в подземных условиях применяют следующее оборудование.

Бетононасос БН-1 («Станкомаш», Российская Федерация) [78] используют для транспортирования бетонных смесей и их подачи в труднодоступные места горных выработок шахт.

Насос пенобетонный НПБС-1 («ЭКОС-С», Российская Федерация) [79] применяют при возведении изолирующих, взрывоустойчивых перемычек, укладке бутовых полос и для заполнения пустот в горном массиве.

Оборудование UELMAT S30L-E401L (Uelzener Maschinen GmbH, Федеративная Республика Германия) [80] предназначено для приготовления и транспортирования смесей из различных материалов.

Насос пенобетонный ПБН-15КПС («КПС», Российская Федерация) [81] используют при возведении изолирующих сооружений, для заполнения пустот, тампонажа в кровле выработок и др.

Пневмонагнетательная установка СО-241 и ее аналоги (ПН-500, ПН-600, ПН-800) (Украина, Российская Федерация) [20] является типично строительным агрегатом для подготовки, приготовления и транспортирования бетонов, различных растворов на основе цементного вяжущего.

Насосное оборудование КТХ 80 P2 V (КОЕКСПРО, Чешская Республика) [82] разработан для подготовки и транспортировки различных смесей (гипсовых, цементно-зольных и т.д.) по трубопроводной линии к месту проведения работ.

Анализ конструктивных решений показал, что вышеприведенное оборудование имеет определенные недостатки – прежде всего, большая масса и повышенное энергопотребление (бетононасос БН-1), малая производительность по растворам на основе цемента (установка UELMAT S30L-E401L, насосы НПБС-1, ПБН-15КПС), применение одного вида энергии (пневматической) (насос КТХ 80 P2 V), дискретная подача раствора (пневмонагнетатель СО-241 и аналоги). В то же время следует отметить, что указанное оборудование отличается достаточно высокими эксплуатационными показателями и его использование допускает выполнение требуемых задач по возведению изолирующих сооружений гидромеханическим способом при ликвидации пожаров в горных выработках шахт.

Анализ существующих средств возведения изолирующих сооружений позволяет сделать вывод, что основным направлением развития оборудования данного вида является повышение качества растворов, которое возможно достичь за счет интенсивного смешивания компонентов (воды и сухого материала) растворной смеси, отдозированных согласно требований технологии возведения гидромеханическим способом, обеспечивающей достижение необходимых прочностных параметров моноблока перемычки после его затвердевания [83].

## 1.5 Анализ расчетных схем и существующих методов исследований на прочность взрывоустойчивых перемычек

В работе [2] приведен анализ основных существующих до настоящего времени принятых расчетных схем перемычек и методов их расчета на прочность, позволяющие определить основную их техническую характеристику – толщину.

В ней сказано, что в большинстве из них приняты простые расчетные схемы и методы расчета на прочность перемычек, в которых рассмотрены одномерные или двумерные системы с использованием методов сопротивления материалов, они не отвечают реальным трехмерным телам, а, следовательно, сложным напряженным состояниям. Это подтверждают противоречивые значения толщины перемычек, полученные по приведенным зависимостям.

Анализ зависимостей для определения толщины взрывоустойчивой перемычки из гипса работы [84], которые не приведены в работе [2], показывает следующее.

В ней сказано, что толщина перемычки  $H$  зависит от максимального давления, действующего на нее от ударной волны взрыва  $\Delta P_{\phi}$ , предела прочности материала на растяжение ( $R_p \sim 0,1R_{сж}$ ) и на сдвиг ( $R_c = 0,2R_{сж}$ ), определяется по зависимостям при изгибе и растяжении.

Приведем, в частности, результаты испытаний сплошной перемычки в штольне Карагайлы (Казахстан) [84] со следующими исходными данными:  $\Delta P_{\phi} = 1,36$  МПа,  $b=2,5$  м,  $h = 1,6$  м,  $R_{сж} = 3,0$  МПа (для строительного гипса),  $R_p = 0,3$  МПа,  $K_d = 1,8$  (в упругой стадии),  $\phi = 0,64$ . В результате, используя приведенные в [84] зависимости, получим, что толщина перемычки при изгибе равна 10,6 м, при растяжении – 35,0 м. В то же время, при испытаниях ее толщина равнялась 0,55 м и она не разрушилась.

При давлении  $\Delta P_{\phi} = 2,8$  МПа толщина перемычки значительно увеличится, следовательно, эти зависимости явно не отражают ее напряженного состояния, а поэтому их нельзя использовать в дальнейшем.

Следует отметить, что основные результаты теоретических и экспериментальных исследований взрывоустойчивых перемычек получены во ВНИИГД «Респиратор» (в настоящее время НИИГД «Респиратор»), а также данные экспериментальных исследований, проведенных в натурных условиях (в штольне) – в Караганде. Остановимся на некоторых работах, посвященных исследованиям в данной области.

Следует отметить, что в работе [85] при расчете по определению толщины перемычки с учетом коэффициента динамичности  $K_d = 0,58$  нагрузка уменьшается по сравнению с давлением отраженной воздушной ударной волны (3,8 МПа), принимая значение 2,2 МПа, причем во всех работах принимаются ее крепления по контуру в виде шарнирной опоры.

Горноспасатели при возведении перемычек проводят углубление (врубы) в их плоскостях до твердых пород на расстояние (0,3...0,5) м, то есть, в нормальном направлении они сопряжены с относительно непрочными породами, что можно считать шарнирным граничным условием. Кроме этого, для граничного условия в виде защемления необходимо, чтобы размер закрепленных краев был соизмерим с размером остальной части. Однако, несмотря на это, рассмотрим два вида граничных условий, сравним, в первую очередь, возникающие при них максимальные напряжения, затем проведем исследования напряженно-деформированного состояния перемычек с теми или иными, при которых они будут превалирующими.

На основании ранее проведенных экспериментальных исследований в работе [86] приведены зависимости для определения коэффициента динамичности нагрузки  $K_d$ , вызванной воздушной ударной волной от характера изменения нагрузки во времени и частоты собственных колебаний перемычки. При наличии этих данных можно принять то или иное значение  $K_d$ .

Согласно нормативной документации [27] в случае, когда суммарная длина выработки  $\bar{L} \geq 65$ , а выработка загромождена оборудованием, крепежными материалами или нет достоверных сведений о ее состоянии, при  $\bar{L} \geq 15$  давление во фронте ударных волн, действующих на перемычку, следует принимать 2,8 МПа [87].

На основании вышеизложенного, в работе [2] сделан вывод, что до настоящего времени не разработаны достаточно адекватная расчетная схема и научно обоснованный метод исследования напряженно-деформированного состояния перемычек, на основании результатов которого можно определить основную их техническую характеристику – толщину.

В работе [2] впервые принята расчетная схема перемычки, материалом для которой является строительный и высокопрочный гипсы, проведены теоретические исследования и получены результаты ее напряженно-деформированного состояния.

В качестве расчетной схемы рассматривается толстая пластина (плита) с отверстиями и радиусом кривизны, меняющимся по параболической зависимости или полуокружности, с защемленными краями по основному контуру и свободным краем в верхней ее части под действием нормальной нагрузки  $q_z$  от ударных волн и сжимающей  $q_x$  – разрушенных горных пород.

Полные компоненты напряжений, в общем виде,  $\sigma$  и  $\tau$ , МПа, представлены в виде суммы напряжений для сплошной перемычки и с отверстиями.

Задача решена в два этапа: на первом рассматривалась сплошная, на втором – перемычка с отверстием без учета крепления проемных металлических труб.

На первом этапе приведены основные зависимости для перемещений, деформаций, внутренних усилий и моментов, используемых в теории трехмерных пластин. При этом использован прием, состоящий в представлении полного прогиба  $w$  в виде суммы двух составляющих – за счет изгиба  $w_0$  и сдвига  $w_1$  [88].

На втором этапе использован энергетический метод, в соответствии с которым вариация полной энергии деформированной пластины равна нулю в состоянии равновесия [89].

Неизвестные функции  $w_0(x, y)$ ,  $w_1(x, y)$  и усилий  $\Phi(x, y)$  представлены в виде суммы произведений неопределенных параметров на координатные функции, зависящие от граничных условий.

Используя зависимости для внутренних сил и моментов, выражая функцию усилий в срединной поверхности через нагрузку, переходя к безразмерным величинам и константам, получена система линейных алгебраических уравнений относительно неопределенных параметров и уравнений для определения двух нормальных и трех касательных напряжений с выбором координатных функций, удовлетворяющих граничным условиям по методу Ритца и Бубнова-Галёркина.

Следует отметить, что в последние годы вариационные методы при использовании процессов Ритца и Бубнова-Галёркина, линейного или квадратичного распределения касательных напряжений, под действием различных нагрузок и с граничными условиями изложены в работах [90-97]. Это относится к решению задач о напряженно – деформированном состоянии таких основных подземных объектов как: непосредственно верхней части основной кровли горной выработки, периметр которой меняется по параболической зависимости, монтажного ходка, шахтного ствола, причем, за исключением первого объекта, остальные закреплены анкерами.

В дальнейшем, в работе [2], рассматривая плоскую задачу, определены компоненты напряжений с учетом проемных труб, используя работы [98-100], где исследования напряженного состояния пластины приведены к определению комплексных потенциалов из соответствующих граничных условий на контурах отверстий.

В качестве условия прочности использованы первая и вторая теории прочности, согласно которым максимальные значения нормальных и касательных напряжений не должны превышать их предельных значений.

На основании разработанной программы получены распределения напряжений в перемычках в относительных координатах для различных данных механических характеристик гипсов, сечений выработок и их глубины при действии постоянной нормальной нагрузки, равной 2,8 МПа, приведенной в нормативном документе [27]. При этом получено, что максимальными напряжениями являются нормальные сжимающие, которые возникают в верхней свободной части, на которую, в том числе, действует нагрузка от разрушенной горной породы, а для формы перемычки в виде полуокружности сказано, что напряжения увеличиваются на 10 %, не приводя их выражения.

В конечном счете, для оперативного определения горноспасателями толщины гипсовых перемычек, разработана номограмма в зависимости от площади сечения выработки  $S$ , глубины возведения  $H$ , предельного напряжения на прочность материала  $\sigma_n$ .

Согласно нормативному документу [38] следует применять в перемычке не более трех проемных труб на высоте не менее 0,7 м для прохождения необходимого объема воздуха в изолированное пространство выработки, а также подачи инертных газов. При установке двух проемных труб диаметром 0,8 м расстояние между ними должно быть не менее 0,6 м по горизонтали.

Однако, при полном соблюдении технологических параметров возведения перемычки предлагаемое в [38] крепление проемных труб к крепи выработки с помощью канатов, цепей и уголков не имеет практического значения, следовательно, не будет учтено в расчетной схеме перемычки по следующей причине. Известно, что тела, состоящие из двух элементов, воспринимают нагрузку пропорционально их сечениям, а на растяжение, сжатие, сдвиг – их жесткостям.

Известен случай, когда, согласно выводам комиссии, не была должным образом соблюдена технология возведения перемычки на шахте им. А.Ф. Засядько 01.12.2007 года, проемные трубы были вынесены ударной волной из межопалубочного пространства. В связи с этим, в НИИГД

«Респиратор» совместно с Центральным штабом ГВГСС разработали различные способы крепления проемных труб в моноблоке перемычки с расчетом элементов их крепления [101].

В некоторых работах, в частности в [102], приведена информация о нагревании взрывоустойчивых перемычек, в т.ч. и при действии воздушной ударной волны, однако в теоретических исследованиях температурный фактор на напряженно-деформированное состояние не учитывается.

В работе [103] приведены зависимости конечных температур продуктов взрыва метановоздушной среды на участке выработки с концентрацией метана 9,5% при адиабатическом расширении.

Рассматриваются два случая: отсутствие детонации и детонация метановоздушной среды в забое горной выработки. В первом случае показано, что температура продуктов взрыва падает медленно и при их давлении расширения до атмосферного, без учета теплообмена с окружающей средой (крепью и стенками выработки) может достигнуть 2000 К. Во втором случае при детонации продуктов взрыва на границе ее раздела с воздухом она снижается и может достичь значения около 1500 К. Эти температуры зависят от относительной длины выработки, на которую действуют ударные волны.

Для случая, когда сечение выработки по всей длине постоянное, получена зависимость относительной длины от отношения максимального к атмосферному давлению смеси.

Отмечено, что ударные волны перемешиваются с большим количеством воздуха, которые движутся вместе, причем максимальное давление в этом случае может быть меньше атмосферного за счет значительной скорости их движения и резкого расширения смеси, снижая ее температуру.

Показано, что при изменении атмосферного давления (5,0...0,1) МПа, относительной длины на этом участке выработки (16...366), температура продуктов взрыва принимает значения примерно (1000...460) К. На основании этих результатов приведена зависимость температуры от относительной длины.

Отмечено, что конечная температура продуктов взрыва в смеси с воздухом после их дальнейшего расширения будет значительно ниже за счет теплообмена с более прохладным воздухом, который ударная волна не смогла сжать до высоких давлений, вследствие затухания ее скорости на больших расстояниях от границы раздела «детонирующая метановоздушная среда – воздух».

В заключение сказано, что, зная начальную температуру продуктов взрыва, воздуха, теплоемкости и коэффициенты теплопередачи, можно определить температуру, воздействующую на перемычку.

В работе [2] приведены зависимости количества выделившегося метана от количества выброшенного угля в тупиковых выработках и лавах, длины выработки, загазованной также до концентрации метана 9,5 %. Предложена формула для определения скорости при взрыве в зависимости от скорости звука при нормальных условиях, давлений и плотностей воздуха в выработке до взрыва и после него.

В дальнейшем, используя величину полной энергии потока газов как сумму тепловой и кинетической энергий [104], получено уравнение для определения температуры торможения потока  $T_1$  (К) в зависимости от начальной температуры в выработке  $T_0$  (К) и скорости смеси газов  $u$  (м/с) при воздействии на перемычку [2]

$$T_1 = T_0 + u^2 / 2000. \quad (1.1)$$

Так, при начальной температуре  $T_0 = 300$  К и скорости движения потока воздуха (дозвуковой и сверхзвуковой)  $u = 100, 200, 350, 400$  м/с температура торможения потока при воздействии на перемычку будет равна соответственно  $T_1 = 305, 320, 363, 380$  К.

Наиболее вероятными скоростями движения потока при длине загазованной выработки от места взрыва до перемычки возможны эти значения, а следовательно, перепады температур при различных значениях начальных

температур  $T_0$  в горных выработках будут использованы для определения температурных напряжений, возникающих в перемычке.

Рассмотрим существующие зарубежные источники, в которых описаны технология возведения изолирующих сооружений и методы их расчета.

В работе [105] представлена блок-схема, которая отражает ключевые решения при выборе между контролируемым или неконтролируемым планируемыми подходами и включает три расчетных графика «давления-времени».

Отмечено, что у неконтролируемой перемычки, рассчитанной на длину перемещения взрыва более 50 м, существует возможность детонации или возникновения ударных волн и их отражений. В этом случае избыточное давление взрыва возрастает до 4,4 МПа, а затем снижается до 800 кПа при постоянном объеме. Для неконтролируемых перемычек, рассчитанных на длину перемещения взрыва менее 50 м, такая возможность менее вероятна. Может быть использован менее строгий расчетный график «давления-времени», который просто возрастает до величины 800 кПа избыточного давления взрыва. Для контролируемых перемычек можно использовать график «давления-времени», рассчитанный на 345 кПа, если мониторинг может гарантировать, что, во-первых, максимальная длина участка с взрывчатой смесью за перемычкой не превышает 5 м и, во-вторых, объем взрывчатой смеси не превышает 40 % от всего объема изолированного участка перемычкой. Использование этого графика, рассчитанного на 345 кПа, требует мониторинга и активного управления средой на участке, изолированном перемычкой.

Анализ взрывов в горных выработках шахт США, Австралии и Европы, повлекших за собой тяжелые последствия, данные о давлении ударных волн приведены в работах [106-113], а методы защиты перемычками, возведенными из различных материалов, модельные испытания и их характеристики – [114-128]. При этом в работе [123] отмечено влияние температуры и давления на характеристики взрывов смесей, а также приведены наиболее вероятные скорости

движения потока при длине загазованной выработки от места взрыва до перемычки, которые находятся в интервале (100...350 м/с), и будут использованы в дальнейшем при определении перепада температур для различных значений начальных температур в горных выработках, а, следовательно, – температурных напряжений.

В Великобритании рекомендуют принимать расчетное давление взрыва, равным 524 кПа, а формула для расчета необходимой толщины взрывоустойчивой перемычки имеет вид

$$t = \frac{H + W}{2} + 0,6, \quad (1.2)$$

где  $t$  – требуемая толщина перемычки, м;

$H$  – высота выработки, м;

$W$  – ширина выработки, м.

При этом сказано, что в любом случае минимальная толщина перемычки должна быть равной 3 м. Эта формула допускает использование для перемычки, возведенной из гипса, с прочностью порядка 4,0 МПа спустя 2 ч и (12,0...14,0) МПа – 24 ч. Отмечено, что последние экспериментальные взрывы перемычек в натуральную величину подтвердили эту расчетную формулу и показали, что ее результаты имеют запас прочности не менее 2.

Подобно стандартам Великобритании на разработку перемычек стандарт Германии также включает формулу для расчета требуемой толщины перемычки в виде

$$t = \frac{0,7a}{\sqrt{\sigma_{bz}}}, \quad (1.3)$$

где  $a$  – наибольший размер штрека (ширина или высота), м;

$\sigma_{bz}$  – прочность на растяжение при изгибе материала перемычки, МПа.

Из результатов исследований о данных взрывов на изолированных участках в угольных шахтах США следует, что за период с 1986-2006 годы разрушено 37 перемычек, расчетное давление взрыва, как правило, считают меньшим 1,0 МПа и только одно значение – 6,9 МПа, определенное в 1992 году, для участка выработки у ствола, а для различного материала, в том числе гипса, толщина перемычек меняется в пределах (0,3...6,0) м при сечениях выработок (12...30) м<sup>2</sup>. При этом, формула 1.2 для ее расчета применима при давлении взрыва 0,524 МПа и зависит только от геометрических размеров выработки (высоты и ширины), формула 1.3 – от наибольшего размера штрека (ширины или высоты) и предела прочности на растяжение при изгибе материала перемычки.

Анализ приведенных толщин перемычек в таблице 1.2 показывает следующее.

1. При одинаковых нагрузках 0,5 МПа и сечениях выработок с использованием формул 1.2 и 1.3 толщины принимают завышенные или заниженные значения, изменяясь в широком диапазоне при расчетных их значениях 3,0 и 6,0 м соответственно.

2. Существенно занижены значения толщин перемычек (от 0,3 до 1,5 м) по сравнению с расчетными, которые должны меняться от 3,0 до 4,6 м.

3. В качестве критерия прочности используют его предел на растяжение  $\sigma_{bz}$ , равный примерно 0,3 МПа, определяемый при изгибе образца-балки, который значительно меньше предела прочности на сжатие (3,0 МПа), в итоге существенно увеличивая толщину перемычки.

4. Отмечают, что температура от воздушной ударной волны влияет на напряженно-деформированное состояние перемычки, однако ее не учитывают, просто увеличивая коэффициент запаса прочности.

5. Не известны расчетные схемы перемычек и не учтено их объемное напряженно-деформированное состояние.

Таким образом, из анализа состояния вопроса следует:

– несмотря на сравнительно небольшое количество пожаров, потушенных способом изоляции взрывоустойчивыми перемычками или комбинированным способом, они приводят по сравнению с общим их количеством к значительно большему ущербу предприятиям, потере здоровья и жизни людей;

– возведение изолирующих сооружений гидромеханическим способом при ликвидации пожаров является одним из основных видов деятельности подразделений ГВГСС, однако технология ведения этих работ не совершенствовалась последние (20...30) лет;

– практически отсутствуют новые разработки и их внедрение в области механизации ведения изоляционных работ, высокопроизводительных технических средств, в т.ч. контроля технологических параметров возведения;

– при ведении аварийно-спасательных работ не всегда осуществляется требуемый контроль технологических параметров изоляции пожарных участков;

– основным материалом, допускаемым для возведения взрывоустойчивых сооружений, является гипсовое вяжущее, однако в силу ряда причин (быстрое схватывание раствора, низкая водостойкость и др.) его применение является неэффективным, в т.ч. и в обводненных выработках и при затоплении выработки;

Таблица 1.2

## Сравнительные параметры перемычек в Европе, США и Австралии

Страна	Система разработки	Расчетная нагрузка	Год	Результаты	Формула расчета, вид испытаний	Размеры (ширина x высота)	Толщина	Материал	Использование инертизации	Контроль
Великобритания	Длинный забой с единственным входом	0,5 МПа	1960	Отсутствие разрушенных перемычек	$t = \frac{H + W}{2} + 0,6$	6 x 3 м	4...5 м	Гипс	Подготовить к инертизации	По трубам
Германия	Длинный забой с единственным входом	0,5 МПа	1960	Отсутствие разрушенных перемычек	$t = \frac{0,7a}{\sqrt{\sigma_{bz}}}$	6 x 5 м	3...6 м	2/3 летучей золы, 1/3 цемента	Нет	В начале, при необходимости
Польша	Длинный забой с единственным входом	0,5 МПа	1960	Отсутствие разрушенных перемычек	Натурное испытание	6 x 5 м	3...6 м	Различный	Реактивный двигатель GAG	При необходимости
Австралия	Длинный забой	0,140 или 0,345 МПа	1999	Шахта Moura № 2 (1994)	Расчет	6 x 3 м	0,3...1,5 м	Различный	Многие шахты	По трубам
США	Длинными столбами и камерно-столбовая	0,5 МПа	1971	Разрушенные перемычки	Натурное испытание	6 x 2 м	0,5...1,0 м	Различный	1 шахта	1 шахта

– разработка новых материалов для ведения изоляционных работ гидромеханическим способом была сведена к созданию многокомпонентных дорогостоящих составов при полной монополии разработчика (изготовителя) на ценовые характеристики;

– известен опыт использования новых материалов при проведении изоляции пожарных участков, однако повсеместного применения он не получил;

– за последние годы возведение перемычек из гипсового вяжущего практически не проводили, ввиду отсутствия его запасов на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС;

– не рассмотрена возможность применения материалов для возведения взрывоустойчивых перемычек смесей доступных, недорогих и с необходимыми механическими характеристиками;

– не учтено влияние на напряженно-деформированное состояние перемычек действия горного давления, шарнирного их крепления в виде другого граничного условия и температуры;

– не обосновано влияние на напряженно-деформированное состояние перемычек отверстий, закрепленных проемными трубами, с учетом действующих на них нагрузок и жесткости, не определена их прочность и устойчивость, что существенно усложняет решение задачи;

– технологически не обосновано применение креплений металлических труб различными элементами к горной выработке;

– в теоретических исследованиях напряженно-деформированного состояния перемычек принят линейный закон распределения поперечных касательных сил и напряжений, что приводит к определению трех независимых функций и к усложнению решения задачи;

– зависимости для определения толщин перемычек, приведенные в зарубежных источниках, не могут быть использованы, так как не учитывают объемное их напряженно-деформированное состояние, действие горного давления и температуры.

## **1.6 Цель и задачи исследований**

На основании вышеизложенного, целью работы является раскрытие закономерностей напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивых перемычек, возведенных из материала на основе цементного вяжущего и отходов местного производства, под действием горного давления, воздушной ударной волны и температуры для обоснования параметров, обеспечивающих их прочность и безопасность ведения аварийно-спасательных работ при ликвидации пожаров и взрывах в угольных шахтах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Провести исследования для выбора материала взрывоустойчивых перемычек и определения их механических характеристик;
2. Разработать математическую модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивых перемычек под действием горного давления;
3. Разработать математическую модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивых перемычек под действием воздушной ударной волны и температуры;
4. Определить параметры взрывоустойчивых перемычек, обеспечивающих их прочность и безопасность ведения аварийно-спасательных работ;
5. Усовершенствовать технические средства и технологию возведения перемычек.

## ГЛАВА 2

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЫБОРУ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

#### 2.1 Общая методика и основные методы исследований

В процессе выполнения работы разработаны общая методика, основные методы исследований (рисунок 2.1), на основании которых определены объект и предмет исследований.

Рассмотрена наиболее адекватная расчетная схема перемычки, учитывающая условия ее применения и использованы следующие критерии прочности. Максимальные нормальные (на растяжение, сжатие)  $\sigma$  и касательные  $\tau$  напряжения на сдвиг не должны превышать допустимых значений [129],

$$\sigma_{\max(p, \text{сж})} = [\sigma]/n \leq \sigma_{\Pi(p, \text{сж})}, \quad \tau_{\max} = [\tau]/n \leq \tau_{\Pi}. \quad (2.1)$$

Максимальные напряжения, в общем, представлены в виде функциональной зависимости

$$\sigma_{\max(p, \text{сж})}, \tau_{\max} = F(B, f, h, R, E, \nu, q_i, n, T, \Gamma Y), \quad (2.2)$$

где  $B, f$  – геометрические размеры выработки (ширина и высота), м;

$h, R$  – толщина перемычки и радиус ее кривизны, м;

$E, \nu$  – модуль упругости, МПа, и коэффициент Пуассона;

$q_i$  – нагрузки от воздействия внешних сил, МПа;

$T$  – температура, °К;

$n$  – коэффициент запаса прочности;

$\Gamma Y$  – граничные условия.

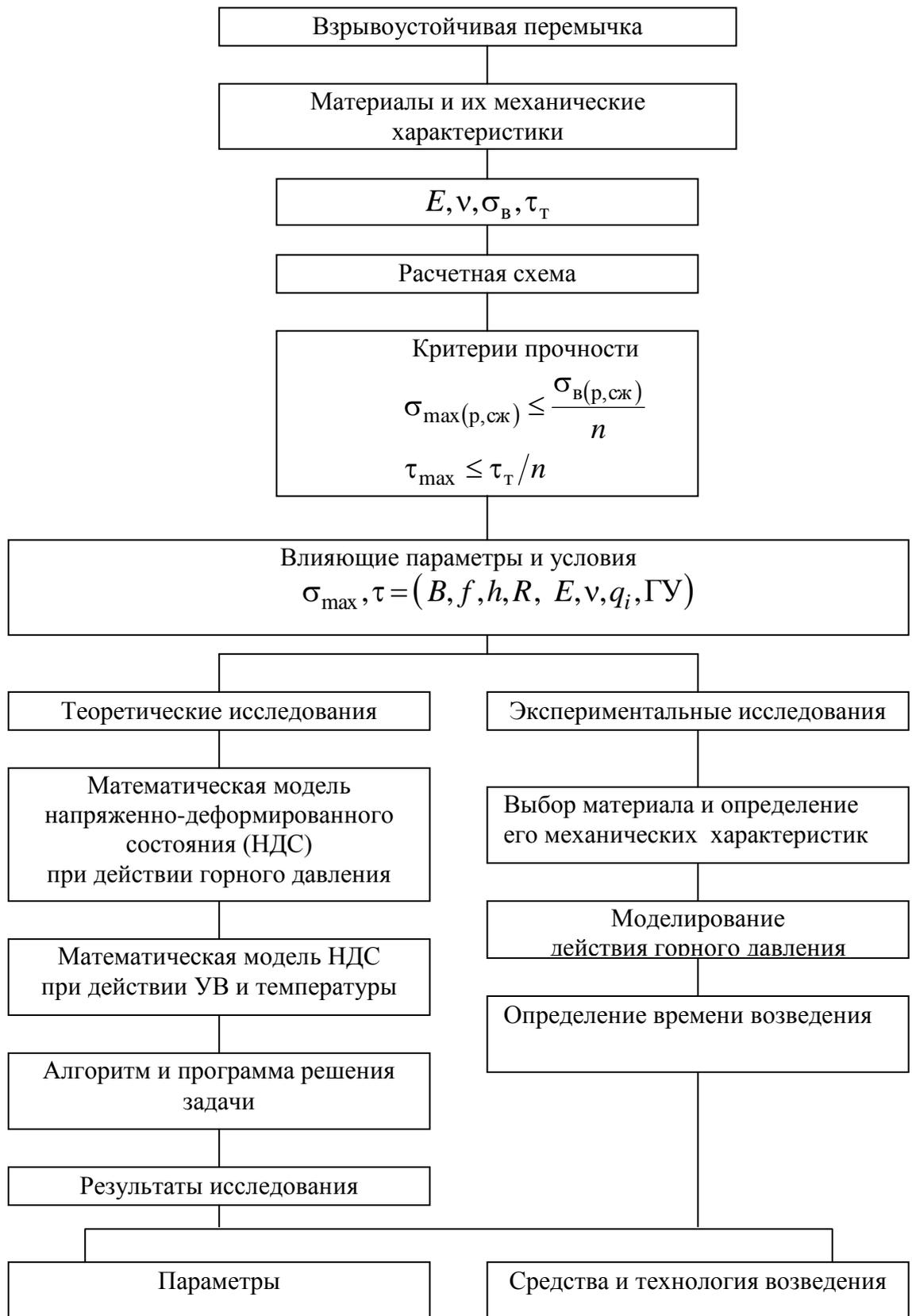


Рисунок 2.1 – Структурная схема общей методики и основных методов исследований взрывоустойчивой перемычки

Максимальные напряжения равны сумме напряжений, возникающих в данном сечении при воздействии внешних нагрузок – воздушной ударной волны (ВУВ), горного давления и температуры.

Для исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) перемычки необходимо выбрать один из основных методов решения краевых задач. При теоретических исследованиях НДС перемычки следует разработать математическую модель, которая включает в себя следующее – основные соотношения теории толстых пластин (плит), систему разрешающих уравнений, решение с учетом граничных условий (условий крепления перемычки в горной выработке) и др.

На основании разработанных алгоритма и программы решения задач необходимо получить результаты исследований НДС перемычки и определить основную характеристику (толщину) в зависимости от исходных данных: сечения выработки, глубины возведения, механических характеристик (модуля упругости и коэффициента Пуассона) для выбранного материала.

Работа выполнена таким образом. В первую очередь были проведены экспериментальные исследования по определению наиболее рациональных составов материалов, их механических характеристик (предельных значений напряжений на сжатие (растяжение) и сдвиг, модулей упругости и коэффициентов Пуассона), влияния проемных металлических труб на ее НДС, что необходимо для проведения исследований.

В теоретической части были приняты расчетные схемы перемычек, представляющие собой анизотропные (изотропные) толстые пластины, с радиусом, меняющимся по параболе или полуокружности, под действием горного давления, воздушной ударной волны и температуры, контур пластин жестко или шарнирно закреплены; разработаны математические модели НДС перемычек; разработан алгоритм и составлена программа решения задачи; получены результаты исследований НДС перемычек из различных составов материалов под воздействием горного давления, ВУВ и температуры; определены максимальные

напряжения в зависимости от геометрических параметров, механических характеристик, граничных условий. Далее разработана номограмма для определения параметров перемычек, усовершенствованы технические средства и технология их возведения, определен экономический эффект от внедрения результатов работы.

## **2.2 Выбор материалов для возведения взрывоустойчивых перемычек и определение их механических характеристик**

### **2.2.1 Методика проведения исследований**

Для исследования НДС перемычек, определения их прочности необходимо знать механические характеристики материала, предполагаемого для их возведения (модули упругости, коэффициенты Пуассона, предельные значения на прочность при сжатии (растяжении)).

Как отмечено в п. 1.3 (глава 1), актуальным направлением в усовершенствовании технологии возведения взрывоустойчивых перемычек является использование минеральных цементных составов, имеющих преимущества по сравнению с гипсовым вяжущим, поэтому, в первую очередь, проведены экспериментальные исследования по определению величины прочности на сжатие (предельные значения), на основании результатов которых разрабатывались составы, необходимые для возведения перемычек. Известно, что из всех составляющих напряжений максимальные их значения возникают именно при сжатии [2], однако, в ходе выполнения экспериментальных работ проведены исследования по определению предела прочности и на растяжение при изгибе.

В процессе проведения исследований растворы тщательно перемешивали и уплотняли в специальных быстроразъемных формах ФБС (рисунок 2.2) для изготовления образцов квадратного поперечного сечения (40x40x160 мм). После хранения в закрытом объеме с влажностью не менее 90 % образцы подвергали испытаниям.

Поскольку одной из задач работы является разработка быстротвердеющих составов с требуемой прочностью в течение минимально возможного времени, основной объем испытаний составили образцы со сроком твердения до 24 ч.

Основным критерием для разработки состава смесей является достижение прочности на одноосное сжатие образцов на уровне не менее 3,0 МПа (как для строительного гипса).



Рисунок 2.2 – Специальные быстроразъемные формы ФБС

Определение предела прочности на одноосное сжатие, а также отбор проб, изготовление образцов и их размеры, определяли согласно требованиям нормативной документации [130].

Для определения предельных значений на сжатие испытания образцов при одноосном НДС проводили на гидравлическом прессе (ПСУ-10), при объемном – на установке УНТН (неравнокомпонентного трехосного нагружения), предназначенной для выполнения статических кратковременных и длительных испытаний на сжатие (растяжение) при изгибе.

Определение механических характеристик при объемном НДС проводилось на образцах-кубиках размерами 55x55x55 мм [131].

Образцы цементно-шлакового и цементно-золяного составов изготовили несколькими партиями по три образца в каждой.

При определении механических характеристик (модуля упругости и коэффициента Пуассона) шкалу пресса для измерения нагрузки выбрали, исходя

из того, что значение разрушающей нагрузки  $P$  ожидается в пределах (70 ... 80) % от максимальной, допускаемой выбранной шкалой.

При обжатии образца начальное усилие, принятое в последующем за условный нуль, равнялось примерно 2 % от ожидаемого разрушающего нагружения.

При размещении приборов на боковых поверхностях исследуемых образцов провели разметку центральных линий с целью центрирования образцов по оси пресса для последующего определения деформаций.

В начале исследования при центрировании образцов от условного нуля до нагрузки, равной (35...45 %)  $P$ , зафиксировали, что отклонения деформаций по каждой грани не превышали 15 % от их среднего арифметического значения.

При определении модуля упругости и коэффициента Пуассона нагружение на образцы до уровня (35...45 %)  $P_p$ , проводили ступенями (10 % от ожидаемой разрушающей нагрузки), соблюдая в пределах каждой из них скорость нагружения (0,4...0,8) МПа/с. После этого приборы снимали с образца. Дальнейшее нагружение проводили непрерывно с постоянной скоростью.

На каждой ступени проводили определенную выдержку нагрузки в течение 240...300 с, затем фиксировали отсчеты по приборам (в начале и конце выдержки ступени нагрузки). Результаты заносили в журнал.

Данная установка была оборудована шарниром, который устанавливался на образец сверху, с целью обеспечения равномерности передачи нагрузки на торец образца. Это выполнено ввиду возможной незначительной непараллельности противоположных граней образца, возникшей в процессе твердения образцов. Конструктивные размеры шарнира соответствовали параметрам торцевых граней образцов.

С целью измерения деформаций образцов при сжатии применяли индикаторы (часового типа, цена деления 0,01 мм). Индикаторы устанавливали на стальную рамку, которая фиксировалась на образце винтами. На противоположной грани образца был закреплен упорный элемент в виде рамки.

С целью обеспечения сохранности приборов в момент разрушения испытываемого образца в рамках использовали алюминиевые уголки.

Нагрузку на образцы осуществляли в несколько этапов. На каждом этапе величина приращения нагрузки составляла около 10% от предполагаемой прочности данного образца (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Общий вид установки УНТН для испытаний кубиков на сжатие

После центровки образца выполняли поэтапное нагружение (с определенной выдержкой при постоянной нагрузке) вплоть до достижения разрушения.

На всех образцах фиксировалось появление трещин и сколов (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Разрушение образца при испытании на сжатие

Для каждой серии образцов-балочек предварительно проводили испытания на изгиб на испытательной машине для определения предела прочности при изгибе МИИ-100.

Образцы при испытании на изгиб нагружали постепенно до разрушения, после чего фиксировали величину нагрузки. Разрушение образцов характеризовалось достаточно ровным разломом (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Общий вид образца после испытания на растяжение (при изгибе)

Затем образцы устанавливали в пресс для определения предела прочности на сжатие (рисунок 2.6).



а



б

а – до испытаний, б – после испытаний

Рисунок 2.6 – Общий вид образца

При определении механических характеристик вышеприведенных материалов в журнале фиксировали следующие данные: номер ступени нагрузки; время ее приложения, мин; нагрузка на образец, МПа; показание приборов при измерении продольных и поперечных деформаций (отсчет, приращение); среднее их приращение.

Кроме этого, в журнале указывалось следующее:

– температура и относительная влажность воздуха помещения, в котором производили испытания;

– состав смеси;

– значения модуля упругости отдельных образцов и их среднее значение, МПа;

– значение коэффициента Пуассона отдельных образцов и их среднее значение.

Модуль упругости  $E$ , МПа, для каждого образца определяли при нагрузке, равной 30 % от разрушающей, согласно

$$E = \sigma_1 / \varepsilon_1; \quad \sigma_1 = P_1 / F,$$

где  $\sigma_1$  – напряжение, МПа;

$\varepsilon_1$  – приращение мгновенной относительной продольной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки;

$P_1 = \sim 0,3P$  и измеренное в начале каждой ступени ее приложения, Н;

$P$  – приращение внешней нагрузки, Н;

$F$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

Для каждого образца коэффициент Пуассона  $\nu$  определяли по формуле

$$\nu = \varepsilon_2 / \varepsilon_1,$$

где  $\varepsilon_2$  – приращение мгновенной относительной поперечной деформации образца, 1.

Приращения относительных продольных и поперечных деформаций определяли как среднее арифметическое показаний приборов по четырем граням образца

$$\varepsilon_1 = \Delta l_1 / l_0; \quad \varepsilon_2 = \Delta b_1 / b_0,$$

где  $\Delta l_1, \Delta b_1$  – абсолютные приращения продольной и поперечной деформаций образца, вызванные соответствующим приращением напряжений;

$l_0, b_0$  – фиксированные базы измерения продольной и поперечной деформации образца, мм.

Предел прочности  $\sigma_{п(сж)}$ , МПа, определяли для каждого образца по выражению

$$\sigma_{п(сж)} = P_p / F,$$

где  $P_p$  – разрушающая нагрузка, измеренная по шкале измерителя прессы, Н.

Шкалы индикаторов были проградуированы в относительных единицах деформаций, поэтому величины  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  определи непосредственно по шкалам измерительных приборов.

В результате получили графическую зависимость напряжений от деформаций, то есть  $\sigma = f(\varepsilon)$ , откуда определили модуль упругости.

### 2.2.2 Результаты исследований

При проведении исследований были учтены результаты ранее выполненных работ [68]. В качестве исходных компонентов для получения быстротвердеющих смесей приняты: цементное вяжущее марки ПЦ-I-500, доменный шлак ДМЗ (г. Донецк), зола-унос с Зуевской теплоэлектростанции. В качестве ускоряющих твердение добавок были приняты  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  (жидкое стекло) и гранулированный  $\text{CaCl}_2$  (хлористый кальций). Мелкозернистую структуру смеси обеспечили за счет отсева фракций доменного шлака диаметром более 2 мм. Испытания лабораторных образцов быстротвердеющего материала, определяющие прочность

при одноосном сжатии, проводили по стандартной методике на образцах-балочках (40x40x160 мм).

Вначале проводили исследования образцов-балочек с ускоряющей добавкой жидкое стекло. Компонентный состав смесей с ускорителем твердения в виде жидкого стекла и результаты испытаний при твердении в течение 24 ч приведены в таблице 2.1.

Состав смеси приведен в буквенном обозначении – ПЦ : ШЛ : ЖС : В, где ПЦ – портландцемент, ШЛ – шлак, ЖС – жидкое стекло, В – вода. В круглых скобках указано количественное отношение между компонентами составов.

Таблица 2.1

Компонентный состав смесей с ускорителем твердения в виде жидкого стекла и результаты испытаний при твердении в течение 24 ч

Состав	Результаты (величина предела прочности на одноосное сжатие), МПа
ПЦ : ШЛ : В (6 : 4 : 0,35) – база	5,95
ПЦ : ШЛ : ЖС : В (6 : 4 : 0,02 : 0,35)	2,50
ПЦ : ШЛ : ЖС : В (6 : 4 : 0,03 : 0,35)	3,50
ПЦ : ШЛ : ЖС : В (6 : 4 : 0,04 : 0,35)	3,70
ПЦ : ШЛ : ЖС : В (6 : 4 : 0,05 : 0,35)	4,20
ПЦ : ШЛ : ЖС : В (6 : 4 : 0,07 : 0,35)	3,80
ПЦ : ШЛ : В (6 : 4 : 0,3) – база	6,50
ПЦ : ШЛ : ЖС : ВД (6 : 4 : 0,05 : 0,3)	5,20

Результаты экспериментальных исследований прочностных свойств, представленные в таблице 2.1, показывают неэффективность применения жидкого стекла для ускорения твердения цементно-шлаковой смеси с соотношением компонентов 6 : 4 [132]. Поэтому в последующих опытах массовое отношение цемента к шлаку увеличили до 7 : 3 и повторили цикл измерений на прочность при одноосном сжатии.

Результаты экспериментальных исследований по определению зависимости предела прочности на одноосное сжатие цементно-шлаковой смеси от доли

$\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$  (жидкое стекло) при составе компонентов ПЦ : ШЛ : ЖС : В (7 : 3 : ЖС : 0,35) при твердении в течение 24 ч приведены на рисунке 2.7.

График, представленный на рисунке 2.7, имеет максимум, соответствующий концентрации жидкого стекла равной 5 %. Это говорит о том, что при массовом соотношении ЦМ : ШЛ  $\geq 7 : 3$  наблюдается положительное влияние добавок  $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$  на прочность цементно-шлаковой смеси.

С учетом оптимальной концентрации жидкого стекла проведена серия опытов для определения минимального времени набора прочности, удовлетворяющей требованиям устойчивости материала перемычки при воздействии фронта ударной волны (2,8 МПа).

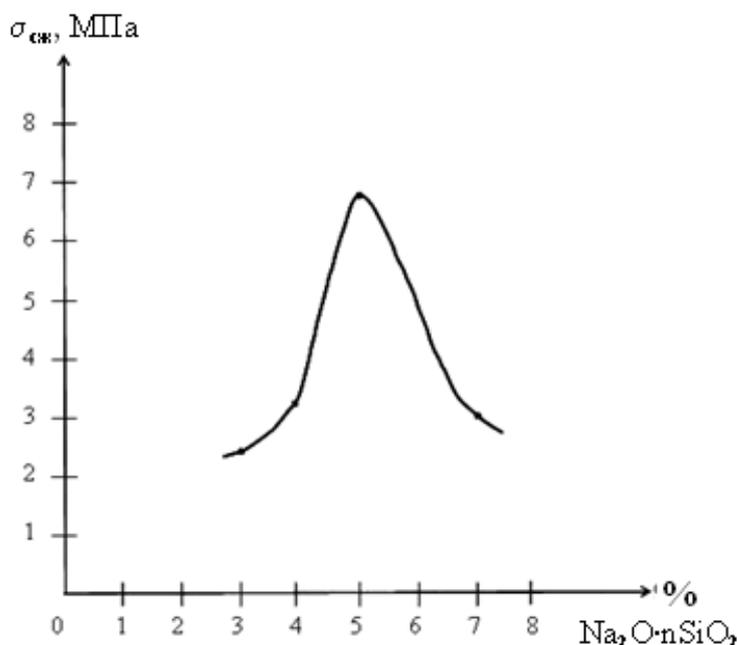


Рисунок 2.7 – Зависимость предела прочности на одноосное сжатие цементно-шлаковой смеси от доли  $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$  (жидкое стекло) при составе компонентов ПЦ : ШЛ : ЖС : В (7 : 3 : ЖС : 0,35) при твердении в течение 24 ч

На рисунке 2.8 представлена кинетика твердения цементно-шлаковой смеси при добавке жидкого стекла (5 %).

Из графика следует, что прочность цементно-шлакового материала с ускоряющей твердение добавкой (жидким стеклом) в оптимальной концентрации

достигает величины 3,0 МПа через 10 ч твердения. Путем математической обработки экспериментальных данных в интервале отрезка времени твердения 5 - 12 ч получено эмпирическое выражение зависимости прочности твердения цементно-шлаковой смеси от времени  $\sigma_{сж} = -3,96 + 0,72t$ , где  $t$  – время твердения, ч.

Эффективность ускоряющего твердение хлористого кальция провели на смесевых составах ПЦ : ШЛ = 7:3; ПЦ : ШЛ = 6:4 и ПЦ : ЗУ = 7:3, где ЗУ – массовая доля золы-уноса.

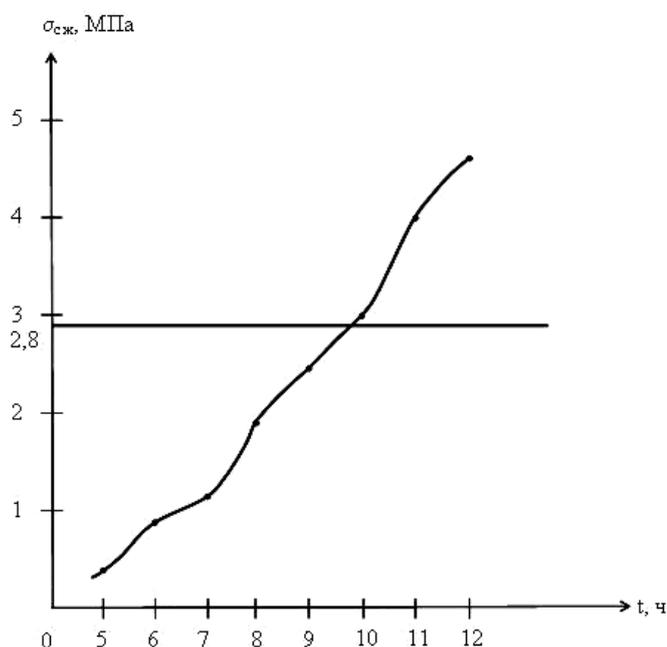


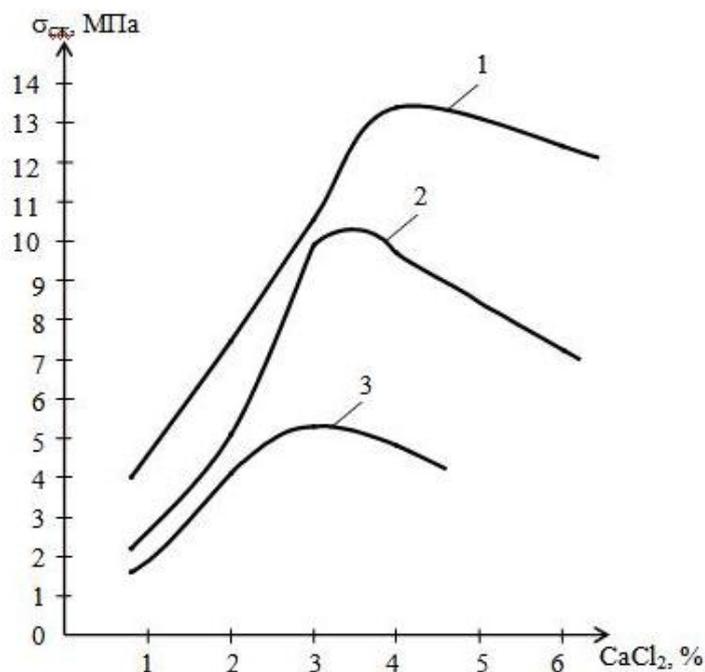
Рисунок 2.8 – Кинетика твердения цементно-шлаковой смеси при добавке жидкого стекла (5 %)

Результаты проведенных экспериментальных работ по определению оптимальной концентрации хлористого кальция в смесевых составах представлены в виде графиков. На рисунке 2.9 представлены зависимости прочности на одноосное сжатие цементно-зольного и цементно-шлакового материалов от массовой доли  $\text{CaCl}_2$  (хлористый кальций) при твердении в течение 24 ч.

Анализ зависимостей прочности на одноосное сжатие от массовой доли хлористого кальция показывает, что все кривые имеют экстремумы – максимумы, а, следовательно, соответствующая максимуму массовая доля  $\text{CaCl}_2$  является

оптимальной для соответствующего смесового состава и с полным основанием может быть отобрана для последующих экспериментов. Так, для состава ЦМ : ШЛ = 7 : 3 оптимальная массовая доля хлористого кальция составляет 4 % от массы цемента, а оптимальная доля  $\text{CaCl}_2$  для составов ПЦ : ШЛ = 6:4, ЦМ : ЗУ = 7 : 3 – 3 %.

Экспериментальные исследования по изучению времени набора прочности на одноосное сжатие материалов, изготовленных из смесовых составов ПЦ : ШЛ : КХ : В (7 : 3 : 0,04 : 0,3); ПЦ : ШЛ : КХ : В (6 : 4 : 0,03 : 0,3); ПЦ : ЗУ : КХ : В (7 : 3 : 0,03 : 0,4) (с оптимальным содержанием хлористого кальция) проводили во временном интервале от 6 до 24 ч [133, 134].



1 – отношение ПЦ : ШЛ = 7:3; 2 – отношение ПЦ : ШЛ = 6:4;

3 – отношение ПЦ : ЗУ = 7: 3

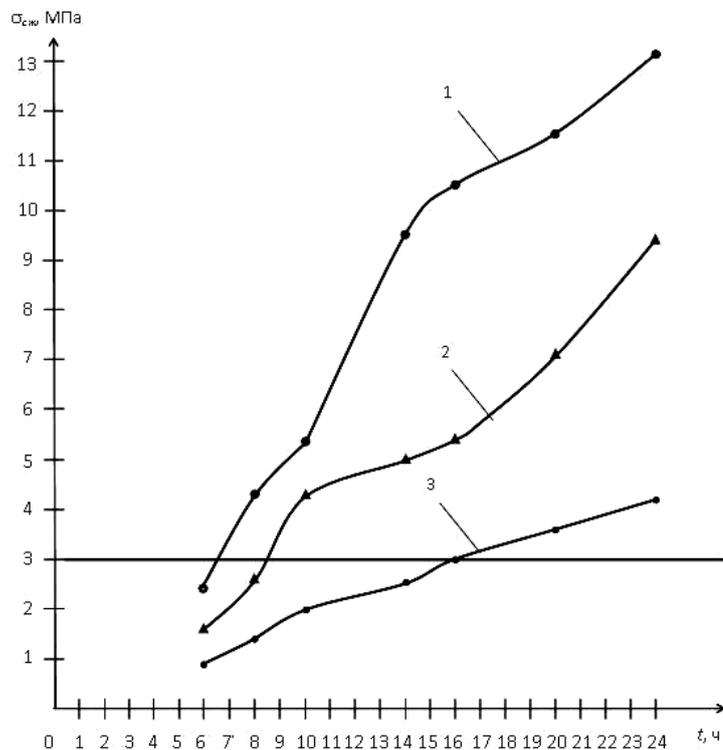
Рисунок 2.9 – Зависимость прочности на одноосное сжатие цементно-зольного и цементно-шлакового материалов от массовой доли  $\text{CaCl}_2$  (хлористый кальций) при твердении в течение 24 ч

По полученным экспериментальным данным построены графики, отражающие кинетику твердения смесовых составов (рисунок 2.10).

При математической обработке эмпирических данных получили следующие уравнения: 1 –  $\sigma_{сж} = -0,025t^2 + 1,37t - 5,27$ ,  $R = 0,994$ ; 2 –  $\sigma_{сж} = 0,394t - 0,448$ ,  $R=0,985$ ; 3 –  $\sigma_{сж} = 0,181t - 0,05$ ,  $R = 0,992$ .

Анализируя графики, приведенные на рисунке 2.10, приходим к выводу, что наименьшее время набора прочности равной 3 МПа достигается через 6,5 – 7 ч в смесевом составе ПЦ : ШЛ : КХ : В (7 : 3 : 0,04 : 0,3).

Для смесевых составов ПЦ : ШЛ : КХ : В (6 : 4 : 0,03 : 0,3) и ПЦ : ЗУ : КХ : В (7 : 3 : 0,03 : 0,4) аналогичная прочность на одноосное сжатие достигается за 8,5 и 16 ч твердения соответственно.



- 1 ● – состав ПЦ : ШЛ : КХ : В (7 : 3 : 0,04 : 0,3);  
 2 ▲ – состав ПЦ : ШЛ : КХ : В (6 : 4 : 0,03 : 0,3);  
 3 ● – состав ПЦ : ЗУ : КХ : В (7 : 3 : 0,03 : 0,4)

Рисунок 2.10 – Кинетика твердения смесевых составов

Таким образом, действие  $\text{CaCl}_2$ , ускоряющее твердение исследуемого материала, проявляется (в отличие от жидкого стекла) не только в смесевых составах с отношением ПЦ : ШЛ = 7 : 3, но и для составов с отношениями ЦМ :

ШЛ = 6 : 4, ЦМ : ЗУ = 7 : 3, т. е. является более эффективным. Например, цементно-шлаковый состав с ускоряющей добавкой в виде хлористого кальция набирает прочность равную 3 МПа на 30 % быстрее по сравнению с ускоряющей добавкой в виде жидкого стекла. Следовательно, можно считать, что ускоряющая твердение добавка  $\text{CaCl}_2$  более эффективна по сравнению с  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  в цементно-шлаковом и цементно-зольном смесевых составах. Согласно данным работы [54] ускоряющая добавка хлористого кальция является одной из наиболее эффективных. Одним из известных способов дальнейшего уменьшения времени набора прочности цементного материала является добавка гипса. Однако, добавка гипсового вяжущего в цементное вяжущее приводит к образованию гидросульфатоалюмината кальция, который в присутствии определенного количества гипса увеличивается в объеме и разрывает цементный монолит.

Проведенные экспериментальные исследования лабораторных образцов соответствовали условиям стандартной методики испытаний на прочность, предусматривающие определенную температуру окружающей среды (от 18 до 22 °С). В реальных условиях горных выработок шахт температура может существенно превышать вышеуказанную. Кроме того, за счет экзотермических процессов гидратации цемента и хлористого кальция температура цементного материала в массивном моноблоке перемычки может достигать 50 °С и выше [102].

Поскольку повышение температуры ускоряет химические реакции, включая и процесс твердения цементного материала, то полученные в лабораторных условиях экспериментальные данные можно считать нижним пределом [135], который гарантировано выполняется.

Для дальнейшего повышения механической прочности цементных смесей, включая повышение ударной прочности и уменьшение усадки моноблока перемычки, может быть использована армирующая добавка – фиброволокно, например, полипропиленовое. Поведение цементных смесей с такой добавкой при возведении шахтных перемычек требует дополнительного изучения.

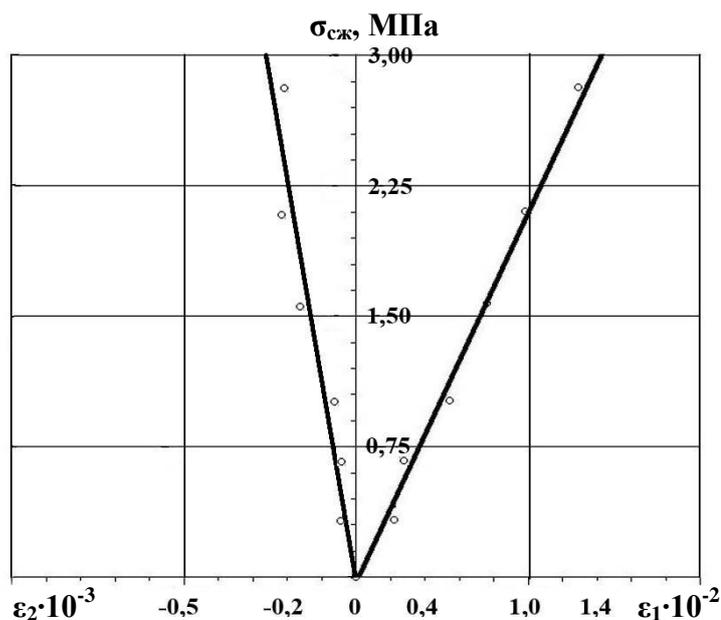
По аналогии с предыдущими испытаниями, с учетом объемного НДС перемычки, были проведены испытания образцов-кубиков (55x55x55 мм).

При дальнейших исследованиях в качестве критерия предела прочности на сжатие принято  $\sigma_{п(сж)} = 3,0$  МПа (как у строительного гипса), а предельные напряжения на растяжение  $\sigma_{п(р)}$ , полученные при испытаниях образцов на изгиб, учитываем, как справочную информацию.

В целом, суммарный объем испытаний составил более 250 образцов. На прочность каждого образца влияет множество случайных разнонаправленных и независимых факторов (колебания температуры и давления, погрешности измерения массы компонентов, нестабильность марочной прочности цемента, изменение условий твердения и др.). Согласно теории вероятностей случайная величина, например, прочность образца на одноосное сжатие при воздействии на нее разнонаправленных и независимых факторов имеет нормальное распределение. Согласно работе [136] среднеарифметическое значение выборки при  $N \geq 20$  стремится к неслучайной величине – математическому ожиданию. Поэтому в настоящей работе в качестве истинного значения прочности на одноосное сжатие образцов принято среднее арифметическое значение, а число опытных данных по каждому смесевому составу превышает 20.

На рисунке 2.11 приведена зависимость полученных напряжений от деформаций при испытании образца-кубика из цементно-шлакового материала (соотношение компонентов 7:3, размер 55x55x55 мм) при времени твердения 6,0 ч при достигнутом пределе прочности (4,8 МПа).

Из данной зависимости следует, что материал перемычки относится к упругим (т.к. зависимость линейная), модуль упругости (начальный) – 215 МПа, коэффициент Пуассона равен 0,22. По аналогии проведены испытания на цементно-зольных образцах, в результате получено, что при достигнутом пределе прочности на сжатие (3,0 МПа), модуль упругости (начальный) – 145 МПа, коэффициент Пуассона равен 0,18.



○ – значения деформаций (средние)

Рисунок 2.11 – Зависимость полученных напряжений от деформаций при испытании образца-кубика из цементно-шлакового материала (соотношение компонентов 7:3, размер 55x55x55 мм) при времени твердения 6,0 ч при достигнутом пределе прочности (4,8 МПа)

### 2.3 Методика проведения и результаты исследования по моделированию воздействия на перемычку горного давления

Как отмечено в первой главе, в работе [2] не обосновано влияние на НДС отверстий, закрепленных металлическими трубами, с учетом действующих на них нагрузок и жесткости, что существенно усложнило решение задачи.

Для решения этого вопроса используем один из основных методов моделирования физических процессов – метод эквивалентных материалов (МЭМ).

Этот метод широко применяют для исследования вопросов, связанных с проявлением горного давления в выработках при разработке месторождений полезных ископаемых; при изучении вопросов, связанных с породами, перемещениями массивов и других физических процессов, происходящих в связи с проведением в них горных работ [137].

В основе метода лежит теория механического подобия Ньютона, которая предполагает геометрическое, кинематическое и динамическое подобия модели (индекс – м) и природы (индекс – н).

При подборе материалов-эквивалентов в качестве определяющих характеристик прочности будем пользоваться совокупностью значений напряжений перемишки на сжатие  $\sigma_{сж}$ . В данном случае соблюдены следующие равенства:

условие подобия внешних сил и напряжений при сжатии соответственно

$$Q_m = \frac{\gamma_m \ell_m^3}{\gamma_n \ell_n^3} Q_n; \quad \sigma_{сж м} = \frac{\ell_m \gamma_m}{\ell_n \gamma_n} \sigma_{сж н}, \quad (2.3)$$

а критерием подобия является безразмерное число

$$K = \frac{\sigma_{сж м}}{\gamma_m \ell_m} = \frac{\sigma_{сж н}}{\gamma_n \ell_n} = idem, \quad (2.4)$$

где  $\gamma$  – объемный вес материала, Н/м<sup>3</sup>;

$\ell$  – линейный размер, м.

В качестве линейного размера  $\ell$  используем радиус  $R$  перемишки, который меняется по параболической зависимости, причем начало координат расположено в левой нижней ее части

$$R = R_0 \bar{R}; \quad R_0 = \frac{B^2}{8f}; \quad \bar{R} = (1 + 16t^2(1 - 2\bar{y})^2)^{\frac{3}{2}}; \quad t = \frac{f}{B}, \quad (2.5)$$

где  $\bar{R}$  – безразмерная величина, а  $\bar{y}$  меняется в пределах от 0 до 1;

$B, f$  – ширина и максимальная высота перемишки соответственно, м.

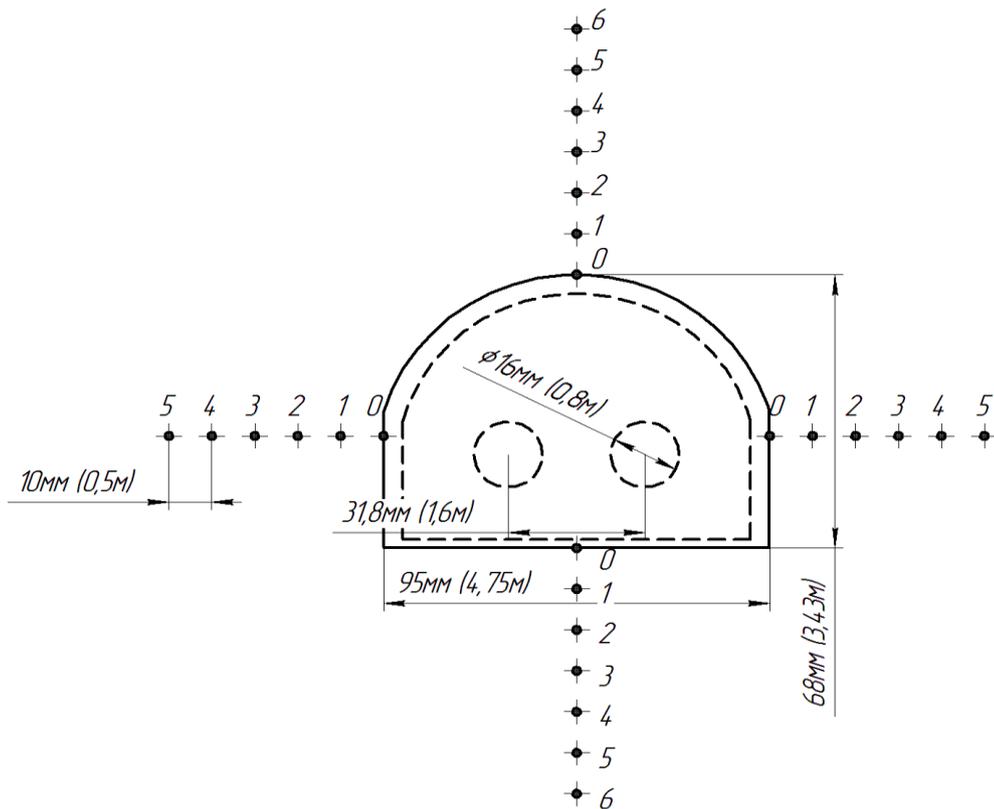
Тогда выражение (2.3) примет вид

$$\sigma_{сж м} = \frac{B^2_{м} f_{н} \gamma_{м}}{B^2_{н} f_{м} \gamma_{н}} \sigma_{сж н}. \quad (2.6)$$

Для подобия процессов в области упругих деформаций соблюдаем равенства соответственно модулей упругости и коэффициентов Пуассона

$$\left. \begin{aligned} E_{м} &= \frac{\gamma_{м} B^2_{м} f_{н}}{\gamma_{н} B^2_{н} f_{м}} E_{н} \\ v_{м} &= v_{н} \end{aligned} \right\}. \quad (2.7)$$

Схема расположения реперов в моделях приведена на рисунке 2.12.



(0...5) – номера реперов

Рисунок 2.12 – Схема расположения реперов в моделях

Параметры материалов моделей и натурной перемычки представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Параметры материалов моделей и натурной перемычки

Модели	Ширина выработки, $B$ , м		Высота выработки, $f$ , м		Толщина перемычки, $h$ , м		Значение нагрузки, МПа
	натуры	модели	натуры	модели	натуры	модели	
Монолитная и с проемными трубами	4,75	0,095	3,44	0,068	1,0	0,02	0,18
С проемными трубами	Параметры проемных труб						
	натуры		модели		натуры		модели
	Внутренний диаметр, м		Внутренний диаметр, м		Жесткость на сжатие, $E_n H_0$ , МПа·м		Жесткость на сжатие, $E_m H_0$ , МПа·м
	0,8		$1.6 \cdot 10^{-2}$		$10^3$		20

Здесь  $H_0$  – толщина проемной трубы, м

Механические характеристики материалов двух моделей перемычек приведены в таблице 2.3.

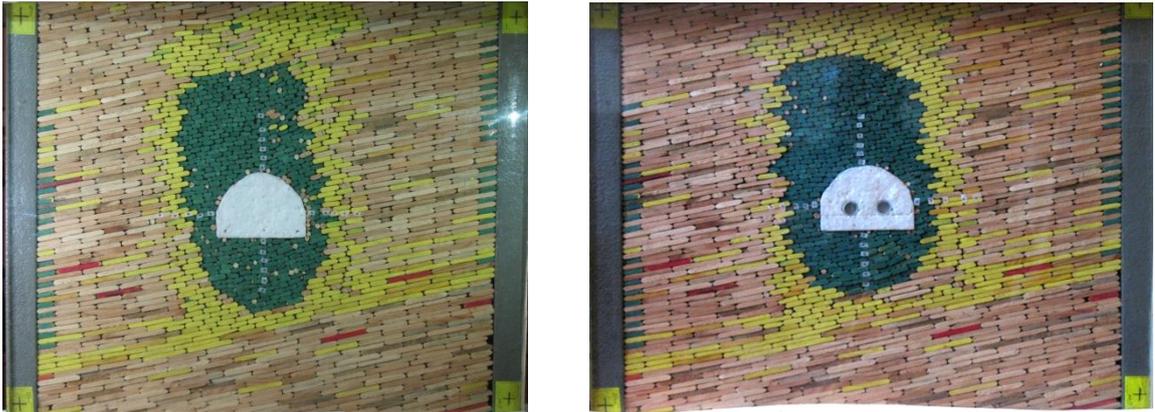
Таблица 2.3

Механические характеристики материалов моделей и натурной перемычки

Наименование материала	Модуль упругости $E$ , МПа		Коэффициент Пуассона, $\nu$	Примечание
	модели	натуры		
Пенопласт П35			0,34	Основная часть перемычки
		$0,6 \cdot 10^2$		
Полиэтилен НД ВП	$6 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^5$	0,32	Проемные трубы

В связи с тем, что не удалось обеспечить масштабность по модулям упругости полиэтилена, это условие выполнили по жесткости на сжатие проемной трубы, которое она воспринимает при действии нагрузки.

Схема расположения реперов в моделях и начальное состояние выработки с моделями без проемных труб и с ними приведено на рисунках 2.12 и 2.13.



а

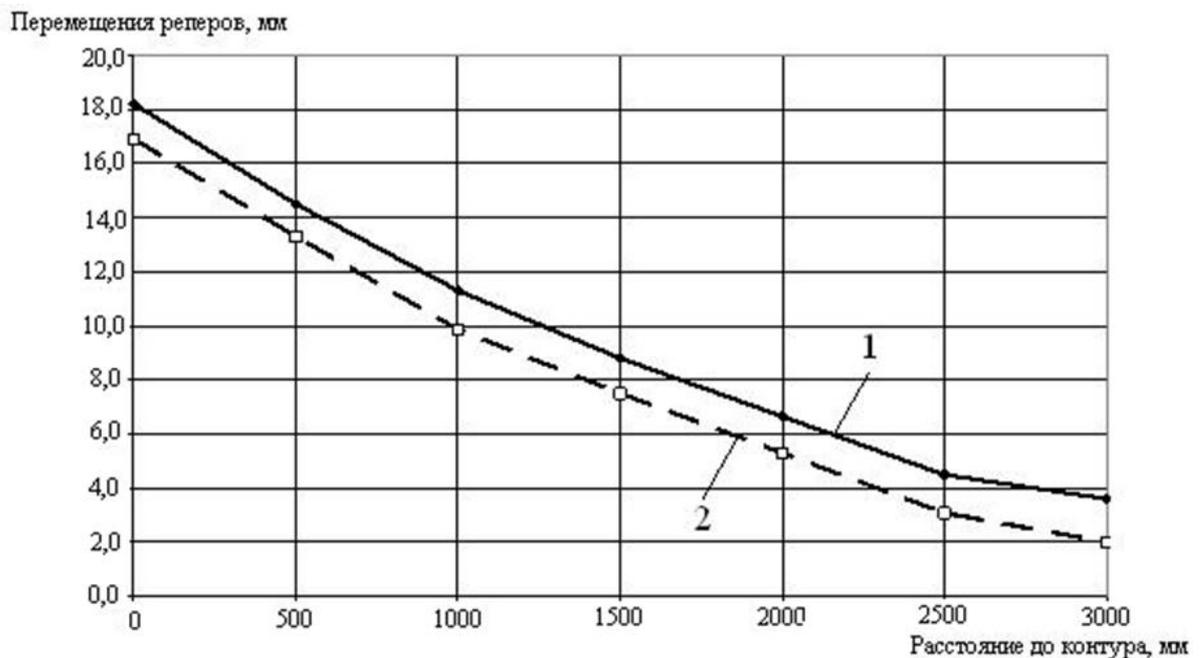
б

а – без проемных труб; б – с проемными трубами

Рисунок 2.13 – Состояние выработки с моделями до испытаний

Используя данные перемещений в перемычках, определены деформации.

В частности, результаты моделирования максимальных перемещений глубинных реперов в перемычке у кровли выработки без проемных труб и с ними приведены на рисунке 2.14.



1 – без труб, 2 – с трубами

Рисунок 2.14 – Зависимости перемещений глубинных реперов в кровле выработки от расстояния до ее контура в моделях

Сравнение приведенных выше результатов по перемещениям и деформациям перемычек (таблица 2.4) показывают, что максимальные погрешности первых не превышают 7,1%, вторых – 6,1%.

Таблица 2.4

Результаты перемещений и деформаций моделей перемычек без проемных труб  
и с ними

Перемещение, мм						Деформации·10 <sup>-3</sup>					
Расположение реперов						Расположение реперов					
Кровля (по вертикали)		Левая, правая боковая поверхность (по горизонтали)		Почва (по вертикали)		Кровля (по вертикали)		Левая, правая боковая поверхность (по горизонтали)		Почва (по вертикали)	
Без труб	С трубами	Без труб	С трубами	Без труб	С трубами	Без труб	С трубами	Без труб	С трубами	Без труб	С трубами
0,34	0,36	0,20	0,21	0,13	0,14	6,6	6,8	3,1	3,3	2,4	2,5
Погрешность, %											
5,6		4,8		7,1		3,0		6,1		4,0	

Следовательно, с помощью физического моделирования перемещений и деформаций в моделях перемычек установлено, что при рассмотрении расчетных схем их можно считать монолитными [138, 139].

В данном случае нельзя определить напряжения в перемычке без проемных труб с переходом к натуре и последующего сравнения с результатами теоретических исследований их НДС по зависимости (2.6) в виду следующих основных недостатков:

- выполнить условия подобия внешних сил является затруднительным;
- мелкомасштабные модели позволяют определить перемещения и деформации перемычек для их сравнения в некоторых точках и в одном из направлений.

## **2.4 Исследования по определению времени возведения взрывоустойчивых перемычек с учетом условий ведения работ по изоляции пожарных участков, опасных по взрыву метано-воздушной среды**

Время возведения взрывоустойчивой перемычки зависит от многих факторов: выбора и подготовки места возведения, доставки материалов и оборудования к месту работ, устройство вруба, монтажа оборудования, коммуникации энерго- и водоснабжения и др., но основными из них являются сооружение опалубки, непосредственно заливка перемычки и набор необходимой прочности материала моноблока. Только после осуществления всего комплекса работ перемычка сдается в эксплуатацию.

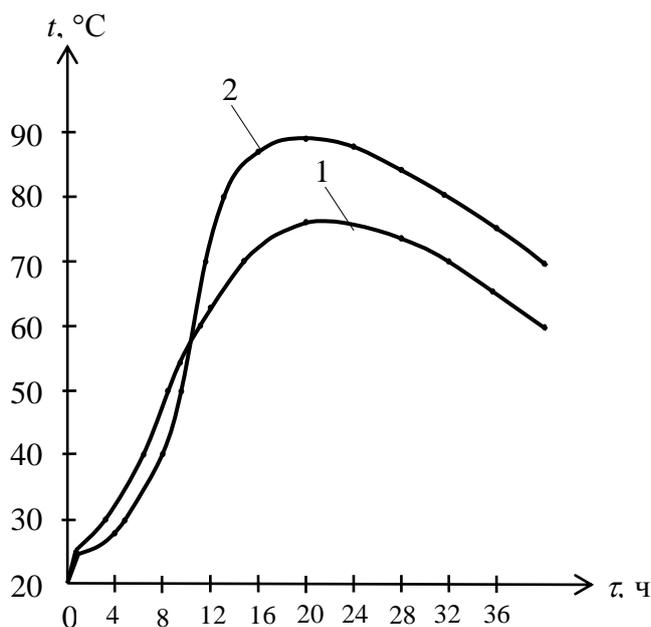
Согласно нормативной документации [27] опалубку взрывоустойчивых перемычек изготавливают из строительных материалов (бетонитов, досок с мешковиной и т.п.), опалубка может иметь сборную каркасную конструкцию. В НИИГД «Респиратор» разработан комплект каркасных опалубок многоразового использования ОК [140], состоящий из унифицированных металлических конструкций. Актуальность разработки состояла в сокращении времени ведения аварийно-спасательных работ, повышении эффективности и безопасности работы горноспасателей. На приемочных испытаниях опытного образца исследовано время установки опалубки – до 2,5 ч (в зависимости от сечения выработки), что в (2...4) раза меньше по сравнению со временем возведения деревянной или бетонитовой опалубки.

Заливку перемычки цементно-шлаковыми и цементно-зольными растворами возможно производить с помощью различного оборудования. Приготовление и перекачивание цементно-зольных растворов может быть осуществлено с помощью оборудования типа «Монолит» и ОПР1. Наиболее полно требованиям по работе с цементно-шлаковыми растворами соответствует пневмонагнетательная техника (например, ПН-500). Зная производительность оборудования («Монолит» и ОПР1 – до 10 м<sup>3</sup>/ч, ПН-500 – 5-8 м<sup>3</sup>/ч), можно

рассчитать номинальное время заливки перемычки с учетом объема межопалубочного пространства (зависит от сечения выработки).

Следующий вопрос, который изучался в процессе выполнения работы, – время набора минимально необходимой прочности моноблока перемычки.

Более ранними экспериментальными исследованиями, проведенными ВНПО «Респиратор», получены зависимости нагревания термоизолированного цементного моноблока с аналогичными пропорциями цементного вяжущего и заполнителя от времени. Измерения проводили с помощью двух термодатчиков и аппаратуры «ТЭТА» для дистанционного контроля температуры. Результаты измерений температуры в моноблоке показаны на рисунке 2.15. Точке, соответствующей времени твердения, равном 24 ч, соответствует температура 74,5 °С на кривой 1, что подтверждает достоверность приведенных расчетов.

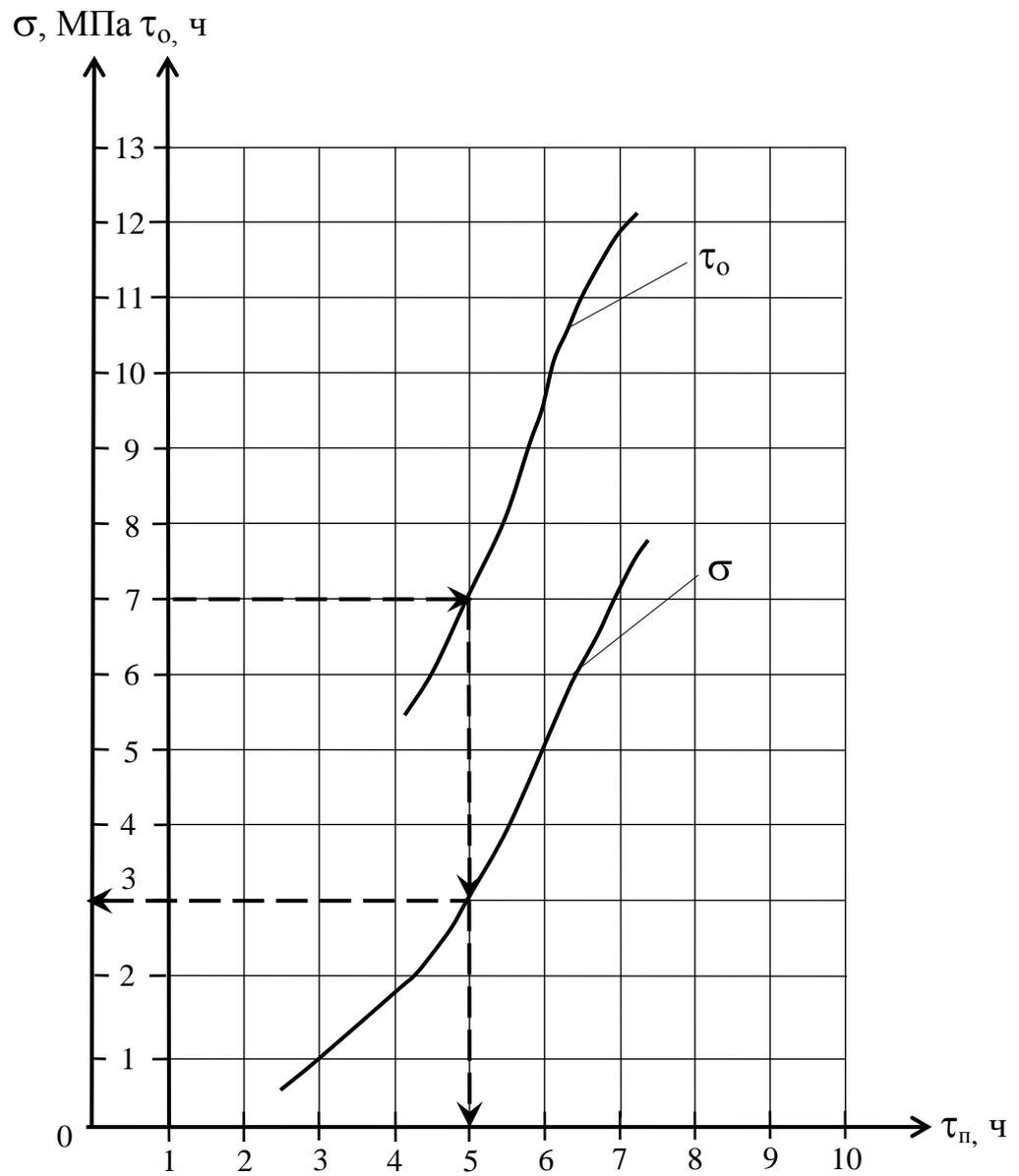


1 – бетонные смеси с содержанием 70 % цемента и 30 % минерального заполнителя; 2 – бетонные смеси с содержанием 70 % цемента и 30 % золы  
Рисунок 2.15 – Зависимость температуры в моноблоках из цементных смесей различных составов от времени

Экспериментальные данные подтверждают, что температурные условия твердения цементного материала в моноблоке перемычки существенно отличаются от нормальных условий твердения образцов-балочек согласно нормативным документам [130]. Прочность образцов-балочек ниже прочности материала в моноблоке перемычки. Таким образом, получение необходимой прочности материала перемычки (3,0 МПа) достигается за более короткий интервал времени твердения по сравнению с материалом, твердевшим в нормальных условиях.

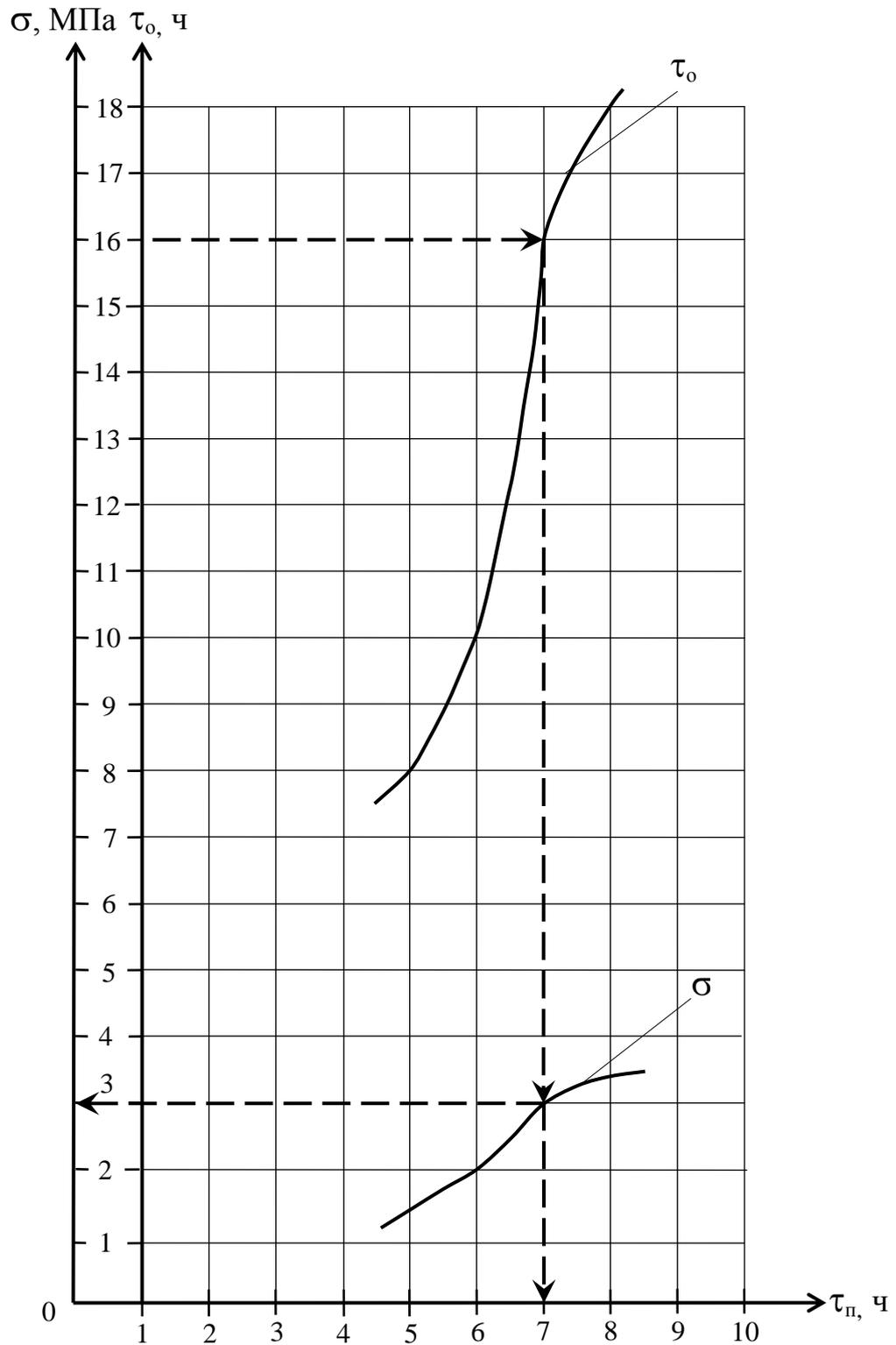
Для определения влияния температуры нагревания перемычки на набор ранней прочности использовали данные по кривым 1, 2 (рисунок 2.15) для задания закона измерения температуры в термостате ТС-80М-2. В него помещали формы ФБС с залитыми образцами-балочками, а температуру твердения в моноблоке перемычки регулировали с помощью органов управления термостата.

Прочность 3,0 МПа достигается в цементно-шлаковом материале через (4,5...5) ч, а в цементно-зольном материале – через (6,5...7) ч. Ранее было установлено, что аналогичная прочность образцов-балочек, твердевших в нормальных условиях достигается для цементно-шлаковых смесей за (6,5...7) ч, цементно-зольных смесей за 16 ч. Следовательно, твердение цементного материала в моноблоке перемычки ускоряется за счет тепловыделения при гидратации цемента для цементно-шлакового материала в 1,42 раза, для цементно-зольного – в 2,37 раза (рисунки 2.16, 2.17). Например, если время твердения цементно-шлакового образца в лабораторных условиях  $\tau_0 = 7$  ч, то это время материала перемычки  $\tau_{\Pi} = 5$  ч. При таком времени твердения получается материал с  $\sigma = 3,0$  МПа, что можно считать достаточным для ввода в эксплуатацию взрывоустойчивой перемычки.



$\tau_0, \tau_n$  – время твердения образцов в лабораторных условиях и в моноблоке перемычки соответственно

Рисунок 2.16 – Номограмма для определения времени твердения и предела прочности на сжатия цементно-шлакового материала



$\tau_{о}, \tau_{п}$  – время твердения образцов в лабораторных условиях и в моноблоке перемычки соответственно

Рисунок 2.17 – Номограмма для определения времени твердения и предела прочности на сжатия цементно-зольного материала

Во время ведения аварийно-спасательных работ по изоляции пожарного участка горноспасатели руководствуются нормативной документацией [27]. В частности, проводят расчет времени загазования метаном аварийного участка после его изоляции (приложение 21 [27]). Итогом расчета является определение кратности обмена воздуха на выемочном участке при его изоляции и расчет времени загазования метаном аварийного участка. Основным требованием к введению перемычки в эксплуатацию по фактору времени является следующее. Закрытие проемов перемычки осуществляется после истечения времени набора минимально необходимой прочности всего моноблока перемычки (3 МПа) по окончании работы смесительно-нагнетательного оборудования, которое должно быть меньше расчетного времени загазования метаном аварийного участка.

## **Выводы к главе 2.**

1 Разработана общая методика и основные методы исследований при выполнении данной работы в виде структурной блок-схемы, откуда следует объект и предмет исследований.

2 Проведены исследования по определению составов быстротвердеющих материалов для возведения взрывоустойчивых сооружений на основе цементного вяжущего и заполнителей – промышленных отходов местного производства – с различной массовой долей и водотвердым отношением, что позволило разработать оптимальный состав по количеству компонентов, величине их массовой доли с учетом стоимостных параметров.

3 Добавка ускорителя твердения – жидкого натриевого стекла – неэффективна в цементно-шлаковых составах с массовым отношением 6 : 4. Влияние жидкого стекла на увеличение предела прочности на сжатие смесей начинает проявляться при повышении концентрации цемента до соотношения 7 : 3. Исходя из этого, было принято решение использовать другие ускорители твердения.

4 Максимальные массовые доли хлористого кальция для цементно-шлаковых смесей составляют 4 и 3 % для отношений вяжущего к наполнителю 7 : 3 и 6 : 4 соответственно, его массовая доля в цементно-зольной смеси с отношением компонентов 7 : 3 составляет 3 %, что позволяет более эффективно применить ускоритель твердения.

5 Установлено, что пределы прочности на сжатие и растяжение образцов из цементно-шлаковой смеси равны 3,0 МПа и 1,8 МПа соответственно, начальный модуль упругости равен 215 МПа, коэффициент Пуассона – 0,22, из цементно-зольного материала при пределе прочности на сжатие  $\sigma_{п(сж)} = 3,0$  МПа, 145 МПа и 0,18 соответственно, что будет учтено в теоретических исследованиях.

6 На основании результатов физического моделирования, методом эквивалентных материалов, установлено, что максимальная погрешность перемещений и деформаций перемычек с проемными трубами и без них составляет около 7 % и 6 % соответственно, что позволило влияние отверстий, как концентраторов напряжений перемычки, в дальнейшем не учитывать.

7 Исследования прочностных характеристик показывают, что время твердения цементного материала в моноблоке перемычки ускоряется за счет тепловыделения при гидратации цемента, которое для цементно-шлакового материала в 1,42 раза, цементно-зольного – в 2,37 раза меньше по сравнению с лабораторными образцами и равно примерно 5,0 ч и 7,0 ч соответственно при обеспечении предела прочности на сжатие 3,0 МПа, что позволяет сократить время ввода перемычек в эксплуатацию.

### ГЛАВА 3

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК

### 3.1 Выбор расчетной схемы взрывоустойчивой перемычки и метода исследований ее напряженно-деформированного состояния

Допустим, что перемычка (как трехмерное тело) относится к триортогональной системе декартовых координат  $(x, y, z)$  и под воздействием внешнего нагружения получит соответствующие перемещения  $(u, v, w)$ . Тогда примем положительными те перемещения, что направлены в сторону положительных изменений координат.

Деформированное состояние перемычки в трехмерном виде характеризуется такими составляющими деформаций:  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$ . Три первые представляют относительные деформации удлинения соответственно по направлениям  $x, y, z$ , которые взаимно перпендикулярны, а три остальные – деформации сдвига в данных плоскостях, которые являются касательными плоскостями к координатам поверхности ( $x = \text{const}, y = \text{const}$  и  $z = \text{const}$ ).

Напряженное состояние перемычки охарактеризовано тензором напряжений, состоящим (учитывая парность касательных напряжений) из шести составляющих (согласно [141]), где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные напряжения, у которых подстрочные индексы указывают направления внешней нормали к данной площадке, к которой эти напряжения относятся; а  $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$  являются касательными напряжениями (первые подстрочные индексы указывают направления действия данной касательной напряжения, а вторые индексы – направления внешней нормали к площадке, к которой приложено это напряжение).

Все напряжения считают положительными, если они, приложенные к площадкам с положительными нормальными, действуют в направлении соответствующих положительных внешних нормалей (рисунок 3.1).

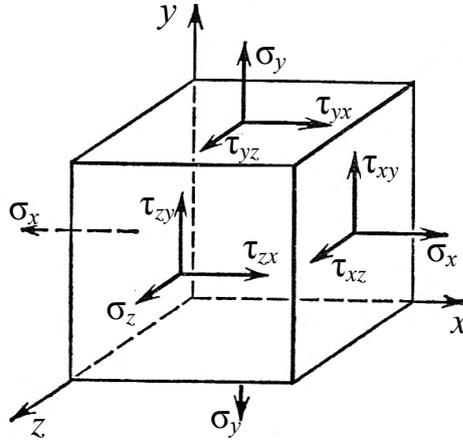


Рисунок 3.1– Напряженное состояние элемента перемычки

В трехмерном теле (из условия статической эквивалентности) возникают внутренние тангенциальные силы ( $T_1, T_2, T_{12}, T_{21}$ ) и поперечные силы ( $N_1, N_2$ ), а также изгибающие моменты ( $M_1, M_2$ ) и крутящие моменты ( $H_{12}, H_{21}$ ), которые отнесены к единице длин соответствующих координатных линий.

Силы тангенциальные  $T_1, T_2$  и  $T_{12}, T_{21}$  – соответственно нормальные и сдвигающие силы. Нормальные силы считаются положительными, если они – растягивающие, а сдвигающие силы, если они действуют в направлении соответствующих касательных к координатным линиям  $x = \text{const}$ ,  $y = \text{const}$ , если они приложены к площадкам с положительными внешними нормальными. Положительными принимаем такие поперечные силы  $N_1$  и  $N_2$ , которые будут направлены в сторону положительной нормали к координатной поверхности, будучи приложенными к площадкам с положительными внешними нормальными, изгибающие моменты  $M_1$  и  $M_2$  принимают положительными, когда они увеличивают кривизну координатной поверхности перемычки.

В дальнейшем крутящими моментами будем пренебрегать (ввиду их отсутствия). Срединной выберем ту поверхность, которая проходит через

середину перемычки (пластины) в целом. При выборе основных уравнений исходим из:

- рассматривается общий изгиб;
- рассматриваются малые деформации пластины;
- внешние слои подчиняются гипотезе Кирхгофа-Лява (нормаль по толщине пластины (до деформации) остается нормалью и при действии нагрузки;
- при определении деформации сдвига  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ , считается, что они не отличаются от соответствующих напряжений, найденных при наличии гипотезы недеформируемых нормалей (напряжений классической теории изгиба пластин);
- при выводе основных уравнений используем техническую теорию пластин;
- влиянием металлических труб на НДС перемычки пренебрегаем.

Особенностью исследований НДС трехмерных тел, таких, как пластин, оболочек, является учет влияния поперечных сил ( $N_1$ ,  $N_2$ ) на изгибающие моменты и касательные напряжения ( $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ ), которые возникают в плоскостях ( $xoy$ ,  $yoz$ ).

Известны следующие основные подходы, которые чаще всего применяются в расчетах на прочность пластин (оболочек), с учетом поперечного сдвига.

Автор работы [142] считает, что деформации и касательные напряжения меняются по ломаной кривой, но эта теория не применялась для изотропных пластин.

В работе [143] представлены выражения для касательных напряжений, которые изменяются по квадратичной зависимости. Данный подход к определению влияния сдвига на прочность пластин или оболочек – более эффективный, используется, в общем случае, при многослойном их строении (учитывая анизотропию слоев).

Для решения такого рода задач предлагается прием [88], который состоит в представлении полного прогиба  $w$  как суммы двух составляющих (за счет изгиба  $w_0$  и сдвига  $w_1$ ). Данный прием (для учета явления сдвига) использован в [2].

При решении задачи по определению прочностных параметров перемычки необходимо принять соответствующую расчетную схему перемычки. Требуется определить, что данное тело представляет с точки зрения геометрической – пластина (оболочка), тело двухмерное (трехмерное), параметры в плане, по нормали и с точки зрения механической, то есть анизотропию материала (коэффициенты Пуассона, модули упругости, предельные значения напряжений), внешнюю нагрузку, действующую на тело, а также граничные условия (условия крепления).

Как сказано в главе 1, горноспасатели возводят перемычки в выработках различных сечений, представляющие собой толстые пластины (плиты), имеющие (в основном) форму параболы или полуокружности. По периметру выработки выполняют врубы на глубину от 0,3 до 0,5 м (с целью крепления моноблока перемычки с твердыми породами выработки).

Чаще всего возводят перемычку с проемными металлическими трубами (одной или двумя), которые используются для проветривания выработки. Конструкция проемных труб предусматривает наличие люка (большой жесткости), которым по окончании работ по возведению перемычки закрывают проемы.

Таким образом, можно считать, что перемычка по периметру жестко закреплена (как и в [2]). Однако многие авторы при определении толщины перемычки принимают шарнирную опору (как граничные условия). На основании анализа эксплуатации перемычек следует отметить, что после первичного воздействия ударной волны нередко фиксируются изменения их граничных условий. Это приводит к тому, что при повторном их применении происходит перераспределение НДС.

Исходя из вышеизложенного, рассмотрим наиболее обобщенную расчетную схему перемычки (с проемными трубами), в виде толстой пластины с радиусом кривизны, который меняется по полуокружности и параболической зависимости,

с заземленными или шарнирно опертыми по контуру краями, под воздействием нормальной нагрузки  $q_z$ , сжимающей нагрузки  $q$  и температуры  $T$ .

Толщина (основная техническая характеристика) перемычки определяется при исследованиях на прочность при суммарном воздействии внешнего нагружения и температуры с вышеуказанными граничными условиями.

В [2] отмечено, что задачи об НДС пластин в замкнутом виде обычно сводятся к выбору решения, которое удовлетворяет дифференциальному уравнению равновесия, а также условиям совместности деформаций (записанным в дифференциальной форме), а также граничным условиям по контуру.

В этом случае для решения задачи необходимо применить, так называемые, приближённые методы расчета. Наиболее целесообразно применить один из таких методов — энергетический — с использованием вариационного метода исчисления [89].

В работе приведены две группы приближенных вариационных методов. Одна из них основана на применении вариационных теорем (вариационных принципов) о минимуме энергии (теоремы Лагранжа, Кастильяно). Вторая группа методов основана на использовании уравнений возможных работ (по Лагранжу или Кастильяно), применяемая при любом физическом законе. Упрощение решения в приближенных вариационных методах достигается тем, что взамен дифференциальных уравнений с частными производными, которые требуются при удовлетворении всем уравнениям деформирования сплошного твердого тела, составляются либо обыкновенные дифференциальные уравнения, либо алгебраические.

Получение алгебраических уравнений достигается представлением искомой функции в виде ряда с неопределенными коэффициентами (способ Ритца), или в дискретной форме, т.е. значениями функций в отдельных точках (способ Эйлера). Уравнения, из которых определяются функции, в обоих методах удовлетворяются сплошь в пределах всего тела. Возможен также метод, когда эти уравнения

удовлетворяются в отдельных точках, а функция с неопределёнными коэффициентами ищется в аналитической форме.

При использовании вариационных теорем коэффициенты ряда или дискретных значений функций определяются из условия минимума энергии сил, которые играют роль функционала в данном случае (понятие о нем дается в вариационном исчислении). Когда говорят о функционале, то имеется в виду число, которое поставлено в зависимость от функции одной или нескольких переменных.

Следует отметить, что методы Бубнова-Галёркина и Ритца – распространённые вариационные методы решения краевых задач [2].

При расчёте по методу Бубнова-Галёркина пластин (оболочек) прогиб и функция усилий (напряжений) представлены в виде произведений неопределённых параметров на заданные координатные функции.

Подставляя в вариационное уравнение выражения для прогиба и функции усилий (напряжений) и приравнявая нулю, производные по параметрам от интеграла по срединной поверхности, получают систему линейных алгебраических уравнений относительно параметров. Решая систему, определяют прогиб и функцию усилий (напряжений) в зависимости от внешней нагрузки, а затем по известным формулам – напряжения.

Метод Бубнова-Галёркина предпочтителен перед другими методами в том случае, когда удаётся найти координатные функции, которые удовлетворяют всем граничным условиям.

Метод Ритца отличается тем, что представляет удовлетворение координатных систем только геометрическим граничным условиям относительно функции (прогиба) и ее производной (угла поворота).

Схема расчёта по методу Ритца достаточно проста, она позволяет исследовать пластины с различными граничными условиями и любой жёсткости, под воздействием произвольного внешнего нагружения и, в общем, рассчитать пластины (оболочки) с любыми условиями крепления.

Для того, чтобы приближённые решения (по методу Ритца), сходились с точными (при увеличении количества параметров), необходимо найти систему координатных функций, которая обладает определенными свойствами.

Координатные функции должны удовлетворять:

- кинематическим условиям закрепления пластины;
- быть линейно независимыми (взяты в любом конечном числе);
- быть непрерывными вместе с первыми производными;
- иметь интегрируемые квадраты вторых производных;
- принадлежать к классу функций с конечной нормой по энергии.

Особое значение (при использовании большого количества параметров) приобретают те условия, которым необходимо подчинить координатные системы, для устойчивого решения линейных алгебраических уравнений. Рост погрешности решения по сравнению с погрешностью коэффициентов уравнений является следствием малости определителя системы, которая, в свою очередь, есть следствие недостаточно линейной независимости координатных функций.

Во избежание неустойчивости решения системы линейных алгебраических уравнений относительно параметров к малым изменениям элементов матрицы и правой части системы, координатные функции желательно подчинить ещё одному условию:

$$\iint Z_i Z_j ds = \begin{cases} 0, & \text{при } i \neq j \\ 1, & \text{при } i = j \end{cases} \quad (3.1)$$

Здесь под  $Z$  имеются в виду системы координатных функций.

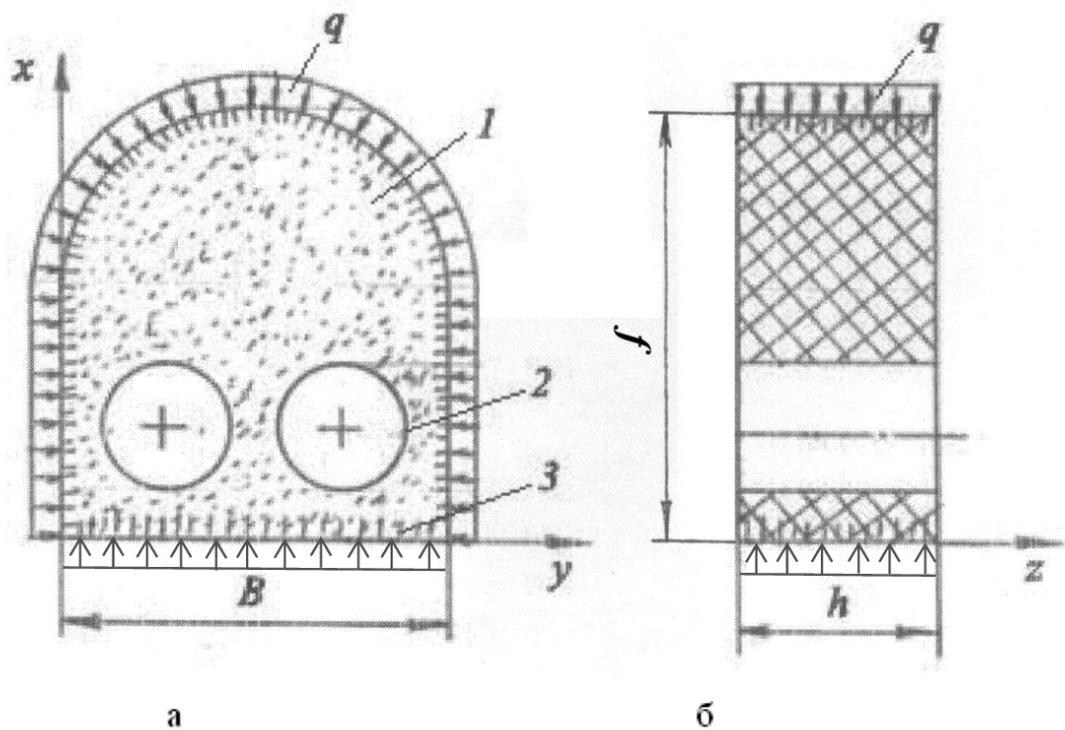
В теории пластин и оболочек (при использовании вариационных методов) в качестве координатных функций принимаем степенные полиномы [2].

С учетом вышеизложенного, в этом случае для решения задачи об НДС перемычки будем использовать вариационные методы Ритца и Бубнова-Галёркина.

После возведения взрывоустойчивой перемычки на нее начнет действовать нагрузка от горного давления. Сначала рассмотрим этот вариант с двумя вышеприведенными граничными условиями.

### 3.2 Математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием горного давления

При расчете схему перемычки рассмотрим в общем виде как анизотропную (армированную) и, в частном виде, как изотропную пластину. Радиус кривизны данной пластины меняется по зависимости параболической (либо по полуокружности), под воздействием нагрузки от горного давления (рисунок 3.2).



а – в плане; б – вид сбоку; 1 – перемычка; 2 – труба проемная;  
3 – крепление (жесткое или шарнирное);  $q$  – внешняя нагрузка

Рисунок 3.2 – Расчетная схема взрывоустойчивой перемычки

Следует принять такие предположения:

- в пластине рассматриваются малые упругие деформации;
- внешние слои подчиняются гипотезе Кирхгофа-Лява и не сближаются;

– влиянием проемных труб пренебрегаем.

Представим основные соотношения теории, которые необходимы для исследований НДС пластины анизотропной, где главные направления координатных линий в каждой точке совпадают с направлениями упругости, то есть координатная поверхность пластины параллельна одной плоскости упругой симметрии, при том радиус пластины изменяется по параболе (п. 2.3).

В данном случае деформация в любой точке будет равна деформации в срединной поверхности пластины, которая находится в средней части толщины. Деформации приведены в виде [143]

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (3.2)$$

где  $u, v$  – перемещения срединной поверхности соответственно в направления  $x$  и  $y$ .

Для деформаций закон Гука представлен в виде

$$\varepsilon_x = \sigma_x/E_x - \nu_x \sigma_y/E_y; \quad \varepsilon_y = \sigma_y/E_y - \nu_x \sigma_x/E_x; \quad \varepsilon_{xy} = \sigma_{xy}/G_{xy}. \quad (3.3)$$

Относительно напряжений решаем систему уравнений (3.3) и, учитывая соотношение (3.2), получим

$$\sigma_x = B_{11}\varepsilon_1 + B_{12}\varepsilon_2; \quad \sigma_y = B_{12}\varepsilon_1 + B_{22}\varepsilon_2; \quad \tau_{xy} = B_{12}^*\varepsilon_{12}. \quad (3.4)$$

Добавим следующие обозначения:

$$B_{11} = E_x/\Delta; \quad B_{22} = E_y/\Delta; \quad B_{12} = \nu_y E_x/\Delta; \quad B_{12}^* = G_{12}; \quad \Delta = \nu_x \nu_y. \quad (3.5)$$

Интегрируем уравнения (3.4) по толщине пластины и получим выражения для внутренних усилий в срединной поверхности

$$T_1 = C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2; \quad T_2 = C_{12}\varepsilon_1 + C_{22}\varepsilon_2; \quad T_{12} = C_{12}^*\varepsilon_{12}. \quad (3.6)$$

Решаем соотношения (3.3) относительно деформаций, получая

$$\varepsilon_1 = A_{11}T_1 + A_{12}T_2; \quad \varepsilon_y = A_{12}T_1 + A_{22}T_2; \quad \varepsilon_{12} = A_{12}^*T_{12}. \quad (3.7)$$

В соотношениях (3.4)-(3.7) введем следующие обозначения:

$$C_{jk} = B_{jk}h; \quad A_{11} = C_{22}/\Delta_1; \quad A_{22} = C_{11}/\Delta_1; \quad A_{12} = -C_{22}/\Delta_1; \quad (3.8)$$

$$A_{12}^* = (G_{12})^{-1}; \quad \Delta_1 = C_{11}C_{22} - C_{12}^2.$$

Вариация полной энергии пластины в состоянии деформации в состоянии равновесия будет равна нулю (на основании принципа возможных перемещений), то есть

$$\delta\mathcal{E} = \delta U + \delta V = 0, \quad (3.9)$$

где  $\delta U, \delta V$  – вариация потенциальной энергии, потенциала внешней нагрузки соответственно.

Вариацию потенциала внешней нагрузки представим

$$\delta V = -\delta \iint qu ds, \quad (3.10)$$

где пределы вычисления интегралов

$$0 \leq x \leq f; \quad 0 \leq y \leq B. \quad (3.11)$$

Вариация потенциальной энергии деформации срединной поверхности представлена так

$$\delta U = \iint (T_1\delta\varepsilon_1 + T_2\delta\varepsilon_2 + T_{12}\varepsilon_{12}) ds. \quad (3.12)$$

Представим интеграл в выражении (3.12) так

$$\delta U = \delta \iint (T_1 \varepsilon_1 + T_2 \varepsilon_2 + T_{12} \varepsilon_{12}) ds + \iint (\varepsilon_1 \delta T_1 + \varepsilon_2 \delta T_2 + \varepsilon_{12} \delta T_{12}) ds. \quad (3.13)$$

Подставим деформации в срединной поверхности согласно (3.2) и интегрируем по частям, преобразуя выражение

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \delta \iint (T_1 \varepsilon_1 + T_2 \varepsilon_2 + T_{12} \varepsilon_{12}) ds - \iint q u ds = \\ &= -\delta \iint (T'_{1(x)} + T'_{12(y)}) v ds - \delta \iint (T'_{2(y)} + T'_{12(x)} + q) u ds. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Здесь штрихами обозначены первые краткие производные по осям координат  $x$  и  $y$ .

Контурные интегралы в (3.14) равны нулю, т. к. отсутствуют в двух направлениях перемещения на заземленных краях пластины, а в случае шарнирного крепления – усилия.

Функцию усилий  $\Phi$  в срединной поверхности введем при помощи следующих выражений

$$T_1 = \Phi''_{yy} + U^*, \quad T_2 = \Phi''_{xx} + U^*, \quad T_{12} = -\Phi''_{xy}. \quad (3.15)$$

Здесь использованы краткие обозначения вторых производных в прямоугольных координатах – функция  $U^*$ , которая является потенциалом внешней нагрузки и удовлетворяет соотношению

$$q = \frac{dU^*}{dx} = \frac{dU^*}{dy}. \quad (3.16)$$

Подставляя (3.15) в (3.14), при этом первый и второй интегралы будут равны нулю. Выражение (3.14) примет вид

$$\begin{aligned}\delta U_2 &= \iint (\varepsilon_1 \delta T_1 + \varepsilon_2 \delta T_2 + \varepsilon_{12} \delta T_{12}) ds = \\ &= 1/2 \delta \iint (A_{11} T_1^2 + 2A_{12} T_1 T_2 + A_{22} T_2^2 + A_{12}^2 T_{12}^2) ds. \quad (3.17)\end{aligned}$$

Учитываем соотношения (3.12), (3.17) и заменяем усилия в срединной поверхности через функцию усилий по формулам (3.15), получая вариацию полной энергии пластины

$$\delta \mathcal{E} = 1/2 \delta \iint [Lu(\Phi, \Phi) - Lu(\Phi, U^*)] ds. \quad (3.18)$$

Введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned}A_{11} &= c_{22}, A_{22} = c_{11}, A_{12}^*/2 = c_{12}^*, \\ Lu(\Phi, \Phi) &= c_{11} \Phi''_{xx} + 2c_{12} \Phi''_{yy} + c_{22} \Phi''_{yy} + c_{12} \Phi''_{xy}, \\ Lu(\Phi, U^*) &= U^* [c_{11} (2\Phi''_{xx} + U^*) + 2c_{12} \Phi''_{yy}].\end{aligned} \quad (3.19)$$

Представим искомую функцию как

$$\Phi(x, y) = \sum_{j=1}^m b_j p_j(x) q_j(y), \quad (3.20)$$

где  $b_j$  – неопределенные параметры;

$p_j, q_j$  – заданные координатные функции, которые зависят от граничных условий.

Далее вводим безразмерные величины и константы согласно формулам

$$x = f\bar{x}, y = B\bar{y}, \Phi = \Phi_0 \bar{\Phi}, \Phi_0 = E_{\Pi} h, \bar{\Phi} = 1, U^* = U_0 \bar{U}^*, U_0 = \frac{qB}{8t},$$

$$\bar{U}^* = [1 + 16t^2(1 - 2\bar{y})^2]^{3/2}, C_{jk} = C_0 \alpha_{jk}, C_{12}^* = C_0 C_{12}^*, \beta_{jj} = \alpha_{jj} / \Delta_2, \quad (3.21)$$

$$\beta_{12} = -\alpha_{12}/\Delta_2, \beta_{12}^* = 1/\alpha_{12}, \Delta_2 = \alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}^2, t = \frac{f}{B}, c_1 = -12\Delta_2 \frac{f^2}{h^2},$$

где  $E_{II}$  – модуль упругости (приведенный), МПа.

Опускаем в дальнейшем черту в обозначениях безразмерных величин и получаем линейное алгебраическое уравнение относительно  $b_j$

$$c_1 \sum_{j=1}^m b_j \iint \sum_{r=1}^5 P_r Q_r ds + \iint \sum_{r=1}^2 T_r^* ds = 0. \quad (3.22)$$

Входящие величины имеют вид

$$P_1 = p_i'' p_j'', P_2 = p_i'' p_j, P_3 = p_i p_j'', P_4 = p_i p_j, P_5 = p_i' p_j',$$

$$Q_1 = \beta_{11} q_i g_j, Q_2 = t^2 \beta_{12} q_i g_j'', Q_3 = t^2 \beta_{12} q_i'' g_j, Q_4 = t^4 \beta_{12} q_i'' g_j'', \quad (3.23)$$

$$Q_5 = 4\beta_{12}^* q_i' g_j', T_1^* = t^2 \beta_{12} U^* p_j q_i'', T_2^* = \beta_{11} U^* p_i'' q_j.$$

Интегралы в уравнении (3.22) вычислим в пределах

$$0 \leq x \leq 1; 0 \leq y \leq 1. \quad (3.24)$$

Подставляем выражения (3.7), (3.8), (3.15), (3.23) в (3.4), учитывая (3.21), получаем уравнения для напряжений пластины

$$\sigma_x = \left[ \sum_{j=1}^m b_j (t^2 \beta_1 p_j q_j'' + \beta_2 p_j'' q_j) + 1/2 C_0 \beta_2 U^* \right],$$

$$\sigma_y = \left[ \sum_{j=1}^m b_j (\beta_3 p_j q_j'' + t^2 \beta_4 p_j'' q_j) + 1/2 C_0 \beta_4 U^* \right], \quad (3.25)$$

$$\tau_{xy} = tB_{12}^* \sum_{j=1}^m b_j p'_j q'_j,$$

где

$$\begin{aligned} \beta_1 &= B_{11}\beta_{22} + B_{12}\beta_{12}, & \beta_2 &= B_{11}\beta_{12} + B_{12}\beta_{11}, \\ \beta_3 &= B_{12}\beta_{22} + B_{22}\beta_{12}, & \beta_4 &= B_{12}\beta_{12} + B_{22}\beta_{11}. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Знак «минус» значит в данном случае, что нормальные напряжения являются сжимающими, и сдвиг в плоскости происходит в направлении  $yOx$ .

Выражения (3.5) для изотропной пластины имеют такой вид

$$\begin{aligned} B_{11} = B_{22} &= \frac{E}{\Delta}, B_{12} = \frac{\nu E}{\Delta}, B_{66} = G, B_{16} = B_{26} = 0, \\ \Delta &= 1 - \nu^2, a_{44} = a_{55} = \frac{1}{G}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

В таком случае алгебраическое уравнение принимает вид

$$c_0 \sum_{j=1}^m b_j \iint \sum_{r=1}^5 P_r Q_r ds + \iint \sum_{r=1}^2 T_r^* ds = 0, \quad (3.28)$$

где входящие величины

$$P_1 = p_i'' p_j'', P_2 = p_i'' p_j, P_3 = p_i p_j'', P_4 = p_i p_j, P_5 = p_i' p_j',$$

$$Q_1 = q_i q_j, Q_2 = \nu q_i q_j'', Q_3 = \nu q_i'' q_j, Q_4 = q_i'' q_j'', Q_5 = 2(1 - \nu) q_i' q_j', \quad (3.29)$$

$$T_1^* = p_i'' p_i U^*, T_2 = q_i'' q_i U^*, c_0 = \frac{\Phi_0}{U_0}.$$

Пределы интегрирования определяют по формулам

$$0 \leq \bar{x} \leq 1; \quad 0 \leq \bar{y} \leq 1. \quad (3.30)$$

Уравнения для определения напряжений такие

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{U_0^*}{\Delta \cdot h} \left\{ \left[ (1 - \nu^2) c_0 \sum_{j=1}^m b_j p_j q_j'' \right] + U^* \right\}; \\ \sigma_y &= \frac{U_0^*}{\Delta \cdot h} \left\{ \left[ (1 - \nu^2) c_0 \sum_{j=1}^m b_j p_j'' q_j \right] + U^* \right\}; \\ \tau_{xy} &= \frac{1}{h} \Phi_0 \sum_{j=1}^m b_j p_j' q_j'. \quad U_0 \dots \end{aligned} \quad (3.31)$$

Для формы анизотропной пластины с радиусом  $R$  (как полуокружность) используем выражения для напряжений (3.25), пределы интегрирования определяем по формулам

$$0 \leq x \leq \sqrt{R^2 - (R - y)^2}; \quad 0 \leq y \leq 2R, \quad (3.32)$$

где безразмерные координаты (в отличие от (3.22)) имеют такой вид

$$x = R\bar{x}; \quad y = 2R\bar{y}, \quad (3.33)$$

а

$$U^* = U_0^* = qR. \quad (3.34)$$

Примут такой вид выражения (3.23) и напряжения (3.29) соответственно

$$P_1 = p_i p_j; P_2 = p_i'' p_j; P_3 = p_i p_j''; P_4 = p_i'' p_j''; P_5 = p_i' p_j'; \quad (3.35)$$

$$Q_1 = q_i'' q_j''; Q_2 = a_1 q_i q_j''; Q_3 = a_1 q_i''; Q_4 = a_2 q_i q_j; Q_5 = a_3 q_i q_j''.$$

$$\sigma_x = \beta_5 \Phi_0 [\sum_{j=1}^m b_j (p_j q_j'' + a_1 p_j'' q_j + b_1 p_j q_j'' + a_2 p_j'' q_j)];$$

$$\sigma_y = \beta_6 \Phi_0 [\sum_{j=1}^m b_j (p_j q_j'' + a_1 p_j'' q_j + b_1 p_j q_j'' + a_2 p_j'' q_j)]; \quad (3.36)$$

$$\tau_{xy} = -\beta^* \Phi_0 \sum_{j=1}^m b_j p_j' q_j',$$

где

$$\beta_5 = B_{11} A_{11}; a_1 = \frac{A_{12}}{A_{11}}; a_2 = \frac{A_{22}}{A_{11}}; a_3 = \frac{B_{12}}{B_{11}}; \beta_6 = B_{12} A_{11}; \beta^* = B_{12}^* A_{12}^*. \quad (3.37)$$

Для напряжений при изотропии пластины, используя уравнения (3.31), заменим в нем  $U^*$  по формуле (3.34).

Представим координатные функции по методу Ритца (или Бубнова-Галёркина).

Для жесткого крепления пластины в качестве координатных функций приняты полиномы с коэффициентами, приведенными в таблице 3.1 (для шарнирного крепления приведены в таблице 3.2).

Таблица 3.1

Коэффициенты полиномов  $p_j, q_j$  (жесткое крепление пластины)

$p_j, q_j$	$x^0, y^0$	$x^1, y^1$	$x^2, y^2$	$x^3, y^3$	$x^4, y^4$	$x^5, y^5$	$x^6, y^6$
$p_1, q_1$	1	-6	6	-	-	-	-
$p_2, q_2$	-1	12	-30	20	-	-	-
$p_3, q_3$	1	-20	90	-140	70	-	-
$p_4, q_4$	-1	30	-210	560	-630	252	-
$p_5, q_5$	1	-42	420	-1680	3150	-2772	924

Таблица 3.2

Коэффициенты полиномов  $p_j, q_j$  (шарнирное крепление пластины)

$p_j, q_j$	$x^0, y^0$	$x^1, y^1$	$x^2, y^2$	$x^3, y^3$	$x^4, y^4$	$x^5, y^5$	$x^6, y^6$
$p_1, q_1$	1	- 1	1	–	–	–	–
$p_2, q_2$	1	-1	-	1		–	–
$p_3, q_3$	1	-1	-	-	1	–	–
$p_4, q_4$	1	-1	-	-	-	1	–
$p_5, q_5$	1	-1	-	-	-	-	1

Таким образом, рассмотрена расчетная схема перемычки, в общем (анизотропная пластина) и, в частности, изотропной пластины с радиусом, который меняется по зависимости параболической или по полуокружности, с креплением жестким или шарнирным, под воздействием нагрузки от горного давления, которая равномерно распределена по основному контуру [144].

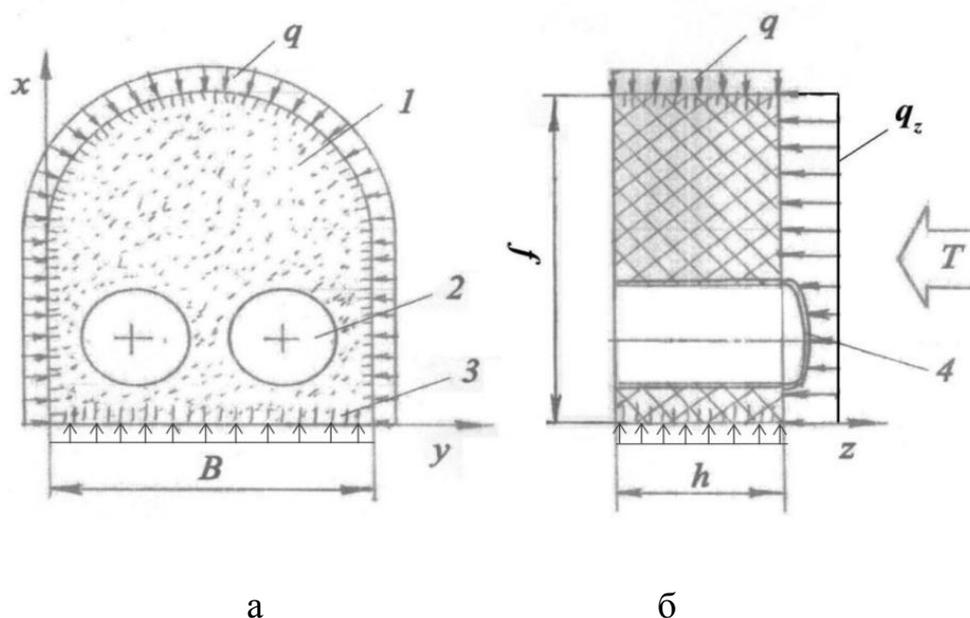
Разработана математическая модель, представляющая первоначальное НДС перемычки в зависимости от ее геометрических параметров, механических характеристик материала перемычки и горного давления (глубины возведения). Результаты исследований данной математической модели позволят в дальнейшем определить толщину перемычки (основную характеристику).

### **3.3. Математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием ударной волны и температуры**

Разработанная в п. 3.2 математическая модель начального НДС перемычки под действием горного давления и полученные зависимости для напряжений являются первой составляющей для решения поставленной задачи.

Далее рассмотрим расчетную схему перемычки, которая представлена в виде анизотропной (армированной) и, в частности, изотропной пластины, с радиусом кривизны, меняющимся по зависимости параболической или по полуокружности, под действием температуры и сжимающей и нормально

приложенной нагрузок  $q$ ,  $q_z$ . При том края перемишки жестко закреплены, как в работе [2] или шарнирно оперты (рисунок 3.3).



а – в плане; б – вид сбоку; 1 – перемишка; 2 – труба проемная; 3 – контур шарнирного крепления или защемления; 4 – люк;  $q$  – нагрузка от горного давления;  $q_z$  – нагрузка от ВУВ;  $T$  – температура

Рисунок 3.3 – Расчетная схема взрывоустойчивой перемишки

При выводе основных уравнений (кроме приведенных двух первых) примем следующие предположения:

- пренебрегаем влиянием проемных металлических труб на НДС взрывоустойчивой перемишки (в связи с результатами, полученными в п. 2.3);
- внутренние силы и поперечные деформации сдвига меняются по квадратичному закону [143].

Координату  $z$  расположим в середине толщины пластины, являющейся нейтральной поверхностью, не воспринимающей деформации.

Деформации изгиба и сдвига пластины имеют соответственно вид (в отличие от представленных в [2]),

$$\varepsilon_x = z\chi_1; \quad \varepsilon_y = z\chi_2, \quad (3.38)$$

$$\varepsilon_{xy} = 2z\tau; \quad \varepsilon_{xz} = \frac{a_{55}}{2} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) \varphi; \quad \varepsilon_{yz} = \frac{a_{44}}{2} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) \psi, \quad (3.39)$$

где функции меняются по зависимостям

$$\varphi = - \left[ B_{11} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right]; \quad (3.40)$$

$$\psi = - \left[ B_{22} \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right]. \quad (3.41)$$

Параметры изменения кривизны, а также поперечные силы, изгибающие моменты, крутящий момент соответственно запишем в виде

$$\chi_1 = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \chi_2 = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \tau = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (3.42)$$

$$N_1 = \frac{h^3}{12} \varphi; \quad N_2 = \frac{h^3}{12} \psi. \quad (3.43)$$

$$M_1 = D_{11}\chi_1 + D_{12}\chi_2; \quad M_2 = D_{12}\chi_1 + D_{22}\chi_2; \quad M_{12} = 2D_{12}^*\tau. \quad (3.44)$$

Компоненты тензора напряжений представлены в виде

$$\sigma_x = z \left( B_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + B_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{R} B_{12} w. \quad (3.45)$$

$$\sigma_y = z \left( B_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + B_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{R} B_{22} w. \quad (3.46)$$

$$\tau_{xy} = 2zB_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}; \quad \tau_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) \varphi; \quad \tau_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) \psi, \quad (3.47)$$

где  $R$  – радиус пластины (выработки), м, меняющийся по параболическому закону, имеющему вид (2.5).

Входящие параметры в уравнениях (3.39-3.41), (3.44)-(3.47) для анизотропной пластины представлены в работе [2], в частности, для изотропной пластины (для дальнейшего использования), они имеют вид

$$B_{11} = B_{22} = \frac{E}{\Delta}; \quad B_{12} = \frac{\nu E}{\Delta}; \quad B_{66} = G; \quad B_{16} = B_{26} = 0; \quad \Delta = 1 - \nu^2; \quad (3.48)$$

$$a_{44} = a_{55} = \frac{1}{G}; \quad D_{11} = D_{22} = \frac{Eh^3}{12\Delta}; \quad D_{12} = \nu D_{11}; \quad D_{12}^* = G \frac{h^3}{12}.$$

По аналогии, вариация полной энергии деформированной пластины в состоянии равновесия равна нулю и представлена в виде (3.12).

Вариацию потенциальной энергии внешних сил представим так

$$\delta V = -\delta \iint q_z w \, ds. \quad (3.49)$$

Интегралы в этом выражении вычисляются в пределах:

$$0 \leq x \leq f; \quad 0 \leq y \leq B; \quad ds = dx dy, \quad (3.50)$$

где  $f, B$  – максимальные размеры выработки (высота и ширина) соответственно, м.

Вариация потенциальной энергии оболочки может быть представлена как сумма вариаций энергии деформации изгиба  $\delta U_{\text{и}}$  и деформации сдвига  $\delta U_{\text{сд}}$

$$\delta U = \delta U_{\text{и}} + \delta U_{\text{сд}}, \quad (3.51)$$

где

$$\delta U_{\text{и}} = \iint (M_1 \delta \chi_1 + M_2 \delta \chi_2 + 2M_{12} \delta \tau) ds; \quad (3.52)$$

$$\delta U_{\text{сд}} = \iint (N_1 \delta \varepsilon_{xz} + N_2 \delta \varepsilon_{yz}) ds. \quad (3.53)$$

Преобразуем выражение (3.52), учитывая соотношения (3.5), а (3.52) – с (3.42), получаем

$$\delta U_{\text{и}} = \frac{1}{2} \delta \iint (D_{11}\chi_1^2 + 2D_{12}\chi_1\chi_2 + D_{22}\chi_2^2 + 4D_{12}^*\tau^2) ds. \quad (3.54)$$

$$U_{\text{сд}} = \frac{h^3}{48} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) \delta \iint (a_{55}\varphi^2 + a_{44}\psi^2) ds. \quad (3.55)$$

С учетом соотношений (3.53), (3.54) и заменяя изменения кривизны функциями прогибов  $w$  и, учитывая зависимости (3.39), (3.40) вариацию полной энергии пластины получим в виде

$$\delta \mathcal{E} = \delta \iint \left[ \frac{1}{2} L_1(w) + \frac{h^3}{48} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) L_2(w) + \frac{1}{2} L_3(\Phi) - (q_z)w \right] ds = 0. \quad (3.56)$$

Введены следующие обозначения

$$L_1(w) = D_{11}(w''_{xx})^2 + 2D_{12}w''_{xx}w''_{yy} + D_{22}(w''_{yy})^2 + 4D_{66}(w''_{xy})^2; \quad (3.57)$$

$$L_2(w) = a_{55} [B_{11}w'''_{xxx} + (B_{12} + 2B_{66})w'''_{xyy}]^2 + a_{44} [B_{22}w'''_{yyy} + (B_{12} + 2B_{66})w'''_{xxy}]^2;$$

В отличие от представленного в [2] не две, а одну неизвестную функцию  $w(x, y)$  будем искать в виде

$$w = \sum_{j=1}^n a_j f_j(x) g_j(y). \quad (3.58)$$

Подставим выражения (3.57) в (3.55) и приравняем к нулю производные от интеграла по параметрам  $a_l$ , так получим алгебраическое уравнение относительно  $a_l (l = \overline{1, n})$ .

$$\frac{\partial \iint \left[ \frac{1}{2} L_1(w) + \frac{h^3}{48} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) L_2(w) (-q_z) w \right] ds}{\partial a_l} = 0. \quad (3.59)$$

Найдем производные по параметрам от каждого слагаемого в (3.58) по отдельности с учетом (3.57)

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_1(w)}{\partial a_l} = & 2D_{11} f_l'' g_l \sum_{j=1}^n a_j f_j'' g_j + 2D_{12} \left( f_l'' g_l \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j'' + f_l g_l'' \sum_{j=1}^n a_j f_j'' g_j \right) + \\ & + 2D_{22} f_l g_l'' \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j'' + 8D_{12}^* f_l' g_l' \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'; \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_2(w)}{\partial a_l} = & 2B_{11}^2 f_l''' g_l \sum_{j=1}^n a_j f_j''' g_j + 2B_{11}(B_{12} + 2B_{66}) \left( f_l'' g_l \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'' + f_l' g_l'' \sum_{j=1}^n a_j f_j''' g_j \right) + \\ & + 2(B_{12} + 2B_{66})^2 f_l' g_l'' \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'' + 2B_2^2 f_l g_l''' \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j''' + \\ & + 2B_{11}(B_{12} + 2B_{66}) \left( f_l g_l''' \sum_{j=1}^n a_j f_j'' g_j' + f_l'' g_l' \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j''' \right) + \\ & + 2(B_{12} + 2B_{66})^2 f_l'' g_l' \sum_{j=1}^n a_j f_j'' g_j'. \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\frac{\partial (-q_z) w}{\partial a_l} = (-q_z) f_l g_l. \quad (3.62)$$

Вводим безразмерные величины и константы по формулам

$$x = f \bar{x}; \quad y = B \bar{y}; \quad z = h \bar{z}; \quad t = \frac{f}{B}; \quad s = \frac{h}{B}; \quad w = f \bar{w}; \quad ; \quad d_{12} = \frac{D_{12}}{D_{11}};$$

$$d_{22} = \frac{D_{22}}{D_{11}}; \quad d_{12}^* = \frac{D_{12}^*}{D_{11}}; \quad r_0 = -\frac{q_z}{D_{11}} f^3; \quad h_1 = \frac{h^2}{f^2} - \frac{4s^2 \bar{z}^2}{t^2}; \quad h^* = \frac{h^3 h_1 a_{55} B_{11}^2}{96 D_{11}};$$

$$b_1^* = \frac{B_{11} + 2B_{66}}{B_{11}}; \quad b_2^* = \frac{B_{22}}{B_{11}}; \quad a^* = \frac{a_{44}}{a_{55}}; \quad a_2^* = \frac{A_{12}}{A_{11}}; \quad a_2^* = \frac{A_{22}}{A_{11}}; \quad a_3^* = \frac{A_{12}^*}{A_{11}} \quad (3.63)$$

и подставим (3.59)-(3.61) в (3.55), получаем алгебраическое уравнение относительно  $a_i$  ( $i = \overline{1, n}$ )

$$\sum_{j=1}^n a_j \iint \sum_{r=1}^{13} F_r G_r ds = r_0 \iint f_i g_i ds, \quad (3.64)$$

где

$$F_1 = f_l'' f_j''; \quad F_2 = f_l'' f_j; \quad F_3 = f_l f_j''; \quad F_4 = f_l f_j; \quad F_5 = f_l' f_j'; \quad F_6 = f_l''' f_j'';$$

$$F_7 = f_l''' f_j';$$

$$F_8 = f_l' f_j'''; \quad F_9 = f_l' f_j'; \quad F_{10} = f_l f_j; \quad F_{11} = f_l'' f_j; \quad F_{12} = f_l f_j''; \quad F_{13} = f_l'' f_j'';$$

$$G_1 = g_l g_j; \quad G_2 = t^2 d_{12} g_l g_j''; \quad G_4 = t^4 d_{22} g_l'' g_j''; \quad G_5 = 4t^2 d_{12}^* g_l' g_j'; \quad G_6 = h^* g_l g_j;$$

$$G_7 = t^2 h^* b_1 g_l g_j''; \quad G_8 = t^2 h^* b_1 g_l'' g_j; \quad G_9 = t^4 h^* b_1^2 g_l'' g_j''; \quad G_{10} = t^6 h^* b_2^2 a^* g_l''' g_j'';$$

$$G_{11} = t^4 b_1 b_2 a^* g_l' g_j'''; \quad G_{12} = t^4 b_1 b_2 a^* g_l''' g_j'; \quad G_{13} = t^2 h^* b_1^2 a^* g_l' g_j'. \quad (3.65)$$

Подставим выражение (3.57) в (3.44) - (3.46) и, учитывая (3.62), получим

$$\begin{aligned} \sigma_x = & \frac{\bar{z} s}{t} \sum_{j=1}^n a_j (B_{11} f_j'' g_j + t^2 B_{12} f_j g_j'') + \\ & + \frac{8t^2}{(1 + 16t^2(1 - 2\bar{y})^2)^{\frac{3}{2}}} B_{12} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j; \end{aligned} \quad (3.66)$$

$$\sigma_y = \frac{\bar{z} s}{t} \sum_{j=1}^n a_j (t^2 B_{22} f_j'' g_j + B_{12} f_j g_j') + \frac{8t^2}{(1 + 16t^2(1 - 2\bar{y})^2)^{\frac{3}{2}}} B_{22} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j; \quad (3.67)$$

$$\tau_{xy} = 2B_{66} s \bar{z} \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'; \quad (3.68)$$

$$\tau_{xz} = \frac{1}{8} h_1 \left( B_{11} \sum_{j=1}^n a_j f_j''' g_j + t^2 (B_{12} + 2B_{66}) \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'' \right); \quad (3.69)$$

$$\tau_{yz} = \frac{1}{8} h_1 \left( t^3 B_{22} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j''' + t (B_{12} + 2B_{66}) \sum_{j=1}^n a_j f_j'' g_j' \right). \quad (3.70)$$

Все приведенные выше выражения справедливы для случая, когда крепь выработки имеет форму параболическую. Если она имеет другую форму (полуокружности), то вместо выражений (3.49) пределы интегрирования определяем по

$$0 \leq x \leq \sqrt{R^2 - (R - y)^2}; \quad 0 \leq y \leq 2R; \quad ds = dx dy \quad (3.71)$$

Формулы (3.62) и (3.64) имеют вид

$$x = R\bar{x}; \quad y = 2R\bar{y}; \quad z = h\bar{z}; \quad w = R\bar{w}; \quad d_{12} = \frac{D_{12}}{D_{11}}; \quad d_{22} = \frac{D_{22}}{D_{11}};$$

$$d_{12}^* = \frac{D_{12}^*}{D_{11}}; \quad r_0 = -\frac{q_z R^3}{D_{11}}; \quad h_1 = \frac{h^2}{R^2} - 4\bar{z}^2; \quad h^* = \frac{h^3 h_1 a_{55} B_{11}^2}{96 D_{11}}; \quad (3.72)$$

$$b_1^* = \frac{B_{11} + 2B_{66}}{B_{11}}; \quad b_2^* = \frac{B_{22}}{B_{11}}; \quad a^* = \frac{a_{44}}{a_{55}}; \quad a_1^* = \frac{A_{12}}{A_{11}}; \quad a_2^* = \frac{A_{22}}{A_{11}}; \quad a_3^* = \frac{A_{12}^*}{A_{11}}$$

и

$$F_1 = f_l'' f_j''; F_2 = f_l'' f_j; F_3 = f_l f_j''; F_4 = f_l f_j; F_5 = f_l' f_j'; F_6 = f_l''' f_j'';$$

$$F_7 = f_l''' f_j'; F_8 = f_l' f_j''; F_9 = f_l' f_j'; F_{10} = f_l f_j; F_{11} = f_l'' f_j; F_{12} = f_l f_j'';$$

$$F_{13} = f_l'' f_j''; G_1 = g_l g_j; G_2 = \frac{1}{4} d_{12} g_l g_j''; G_3 = \frac{1}{4} d_{12} g_l'' g_j; G_4 = \frac{1}{16} d_{22} g_l'' g_j'';$$

$$G_5 = d_{12}^* g_l' g_j'; G_6 = h^* g_l g_j; G_7 = \frac{1}{4} h^* b_1 g_l g_j''; G_8 = \frac{1}{4} h^* b_1 g_l'' g_j; \quad (3.73)$$

$$G_9 = \frac{1}{16} h^* b_1^2 g_l'' g_j''; G_{10} = \frac{1}{64} h^* b_2^2 a^* g_l''' g_j'''; G_{11} = \frac{1}{16} h^* b_1 b_2 a^* g_l' g_j'';$$

$$G_{12} = \frac{1}{16} h^* b_1 b_2 a^* g_l''' g_j'; G_{13} = \frac{1}{4} h^* b_1^2 g_l' g_j'.$$

Интегралы в уравнении (3.63) определяем в пределах  $0 \leq \bar{x} \leq 2\sqrt{\bar{y} - \bar{y}^2}$ ;  $0 \leq \bar{y} \leq 1$ , а производные берем по переменным  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  соответственно для функции  $f_j$  и  $g_j$ .

Уравнения для напряжений в этом случае примут вид

$$\sigma_x = h\bar{z} \sum_{j=1}^n a_j \left( \frac{B_{11}}{R} f_j'' g_j + \frac{B_{12}}{R} f_j g_j'' \right) + B_{12} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j; \quad (3.74)$$

$$\sigma_y = h\bar{z} \sum_{j=1}^n a_j \left( \frac{B_{12}}{R} f_j'' g_j + \frac{B_{22}}{R} f_j g_j'' \right) + B_{22} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j; \quad (3.75)$$

$$\tau_{xy} = \frac{h}{R} \bar{z} B_{66} \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'; \quad (3.76)$$

$$\tau_{xz} = \frac{1}{8} h_1 \left( B_{11} \sum_{j=1}^n a_j f_j''' g_j + \frac{1}{4} (B_{12} + 2B_{66}) \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'' \right); \quad (3.77)$$

$$\tau_{yz} = \frac{1}{16} h_1 \left( \frac{1}{4} B_{22} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j''' + (B_{12} + 2B_{66}) \sum_{j=1}^n a_j f_j'' g_j' \right). \quad (3.78)$$

Определяем нормальные напряжения при условии, что деформации в направлении пластины  $\varepsilon_z = 0$ , тогда

$$\sigma_z = (\nu_x \sigma_x + \nu_y \sigma_y). \quad (3.79)$$

При параболическом изменении радиуса для изотропной пластины выражения для напряжений примут такой вид:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \bar{z} \frac{s E}{t \Delta} \sum_{j=1}^n a_j (f_j'' g_j + t^2 \nu f_j g_j'') + \frac{8t^2}{R} \nu \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j; \\ \sigma_y &= \bar{z} \frac{s E}{t \Delta} \sum_{j=1}^n a_j (t^2 f_j'' g_j + \nu f_j g_j'') + \frac{8t^2}{R} \nu \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j; \\ \tau_{xy} &= \bar{z} \frac{E}{1 + \nu} s \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'; \end{aligned} \quad (3.80)$$

$$\tau_{xz} = \frac{1}{8} h_1 \frac{E}{\Delta} \left[ \sum_{j=1}^n a_j f_j''' g_j + t^2 \nu (1 - \nu) \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'' \right];$$

$$\tau_{yz} = \frac{1}{8} h_1 \left[ t^2 \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j''' + \nu (1 - \nu) \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'' \right],$$

при  $R = \text{const}$

$$\sigma_x = \frac{E}{\Delta} \left[ \bar{z} \frac{h}{R} \sum_{j=1}^n a_j (f_j'' g_j + \nu f_j g_j'') + \nu \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j \right];$$

$$\sigma_y = \frac{E}{\Delta} \left[ \bar{z} \frac{h}{R} \sum_{j=1}^n a_j (\nu f_j'' g_j + f_j g_j'') + \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j \right];$$

$$\tau_{xy} = \bar{z} \frac{h}{R} \frac{E}{1+\nu} \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'; \quad (3.81)$$

$$\tau_{xz} = \frac{1}{8} h_1 \frac{E}{\Delta} \left[ \sum_{j=1}^n a_j f_j''' g_j + \frac{1}{4} \nu (1-\nu) \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'' \right];$$

$$\tau_{yz} = \frac{1}{8} h_1 \frac{E}{\Delta} \left[ \frac{1}{4} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j''' + \nu (1-\nu) \sum_{j=1}^n a_j f_j'' g_j' \right].$$

Координата  $\bar{z}$  при этом меняется в пределах

$$-1/2 \leq \bar{z} \leq 1/2,$$

то есть максимальные нормальные напряжения на растяжение и сжатие в (данном случае) равны по модулю и возникают на наружной и внутренней поверхностях пластины, а касательные поперечные напряжения возникают в срединной поверхности.

Выберем координатные функции по методу Ритца и Бубнова-Галёркина.

Для жестко закрепленных краев пластины по методу Ритца координатные функции имеют вид (таблица 3.3).

Таблица 3.3

Коэффициенты степенных полиномов  $f_i, g_i$  для граничных условий  
(пластина с защемленными краями)

$f_i, g_i$	$x^2, y^2$	$x^3, y^3$	$x^4, y^4$	$x^5, y^5$	$x^6, y^6$	$x^7, y^7$	$x^8, y^8$
$f_1, g_1$	1	-2	1				
$f_2, g_2$	-1	4	-5	2			
$f_3, g_3$	1	-8	19	-18	6		
$f_4, g_4$	-1	14	-55	92	-70	20	
$f_5, g_5$	1	-22	131	-340	440	-280	70

По методу Бубнова-Галёркина в данном случае используем степенные полиномы вида

$$f(x) = (x^4 - 2x^3 + x^2)/24; \quad g(y) = (y^4 - 2y^3 + y^2)/24. \quad (3.82)$$

Для граничных условий при шарнирном закреплении по контуру пластины по методу Ритца они имеют вид (таблица 3.4).

Таблица 3.4

Коэффициенты полиномов  $f_i, g_i$  для граничных условий  
(пластина с шарнирными краями)

$f_i, g_i$	$x^0, y^0$	$x^1, y^1$	$x^2, y^2$	$x^3, y^3$	$x^4, y^4$	$x^5, y^5$
$f_1, g_1$	-1	2				
$f_2, g_2$	1	-6	6			
$f_3, g_3$	-1	12	-30	20		
$f_4, g_4$	1	-20	90	-140	70	
$f_5, g_5$	-1	30	-210	560	-630	252

Соответственно, по методу Бубнова-Галёркина имеем

$$f(x) = (8x^3 - 4x^4 + x)/96; \quad g(y) = (8y^3 - 4y^4 + y)/96. \quad (3.83)$$

При воздействии установившейся в перемычке распределенной равномерно температуры температурные напряжения, возникающие при сжатии, в связи с отсутствием перемещений ее краев в плоскости (за счет ограничения о твердые породы) согласно существующей технологии возведения определим по зависимости

$$\sigma_{T(x,y)} = -\alpha_{(x,y)} \cdot E_{(x,y)} \cdot \Delta t / (1 - \nu_{(x,y)}), \quad \Delta t = T_1 - T_0, \quad (3.84)$$

где  $\alpha_{(x,y)}$  – коэффициент линейного расширения материала в направлениях  $x, y$ ,  $1/K$ ; ( $T_1, T_0$  – соответственно температура перемычки после воздействия ударной волны и температура в горной выработке вначале,  $K$ ).

Следовательно, в отличие от представленного в [2], общие напряжения, возникающие в перемычке, в данном случае состоят из напряжений при воздействии на нее горного давления, ударной волны и температуры [145] с двумя видами крепления. Решение задачи упрощается за счет использования двух, вместо трех, неизвестных функций.

Для перехода от геометрических параметров (как и в [2]), используем следующие зависимости для определения сечения  $S$  выработки, м<sup>2</sup>:

$$S = 0,88f \cdot B, S = 1,76f \cdot R.$$

Разработан алгоритм (рисунок 3.4) и составлена программа решения задачи о НДС перемычки.



Рисунок 3.4 – Алгоритм решения задачи

### 3.4 Результаты исследований напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивых перемычек

В работе [2], как отмечалось в главе 1, представлены рекомендации для крепления проемных труб к крепи горной выработки при помощи различных элементов. Рассмотрены различные варианты крепления проемных труб, в т. ч. с помощью канатов, металлических прутков; цепей; уголков.

Максимальную нагрузку от воздействия ударной волны на проемные трубы принято считать равным 2,8 МПа.

Решение этого вопроса представим с точки зрения, в частности, теории упругости (механики сопряженного твердого тела).

Согласно [141], два сопряженных тела нагрузку воспринимают в пропорции к своим площадям сечения.

Допускаем следующее, металлические жесткие люки проемных труб (в виде сферы) воспринимают нагрузку и полностью передают ее непосредственно на сами проемные трубы.

Рассмотрим пример. Исходные данные следующие. Внешняя нагрузка  $q_z = 2,8$  МПа, площадь перемычки (минимальная)  $S_{\Pi} = 4,0$  м<sup>2</sup>, площадь проходного сечения проемной трубы  $S_o = 0,5$  м<sup>2</sup>, площадь самой проемной трубы (толщина  $5 \cdot 10^{-3}$  м) равна  $S_T = 1,3 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>, таким образом площадь всей перемычки равна  $S_c = 3,487$  м<sup>2</sup>, получаем, что отношение площадей  $S_c / S_T = 268$ , то есть проемная труба будет воспринимать нагрузку 0,01 МПа, а при рассмотрении примеров с перемычками с большей площадью она должна пропорционально уменьшиться на рассчитанную величину.

Вычислим напряжения проемных труб и их перемещения, исходя из их прочности и устойчивости.

Напряжения радиальные  $\sigma_R$  и тангенциальные  $\sigma_{\theta}$ , радиальные перемещения  $U$ , которые возникают в трубе под воздействием внешней нагрузки  $q$ , получим из формул [141]

$$\sigma_R = -\frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}\right) q; \quad \sigma_\theta = -\frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 + \frac{R_1^2}{R_2^2}\right) q; \quad (3.85)$$

$$U = -q \left( \frac{1 - \nu}{E} \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} r - \frac{1 + \nu}{E} \frac{R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r} \right),$$

где  $R_1, R_2$  – радиусы проемной трубы (внутренний, наружный), м;  
 $r$  – текущий радиус, м.

У внутренней поверхности трубы (при  $R = R_1$ )

$$\sigma_R = 0; \quad \sigma_\theta = -\frac{2}{1 - k^2} q; \quad U = -\frac{2}{E} \frac{R_1}{(1 - k^2)} q. \quad (3.86)$$

У наружной поверхности трубы (при  $R = R_2$ )

$$\sigma_R = -q; \quad \sigma_\theta = -\frac{1 + k^2}{1 - k^2} q; \quad U = -\frac{R_2}{E} \left( \frac{1 + k^2}{1 - k^2} - \nu \right) q; \quad k = \frac{R_1}{R_2}. \quad (3.87)$$

Из (3.86) и (3.87) следует, что максимальные значения напряжений  $\sigma_\theta$  и перемещений  $U$  возникают в первом случае, т.е. у внутренней поверхности трубы.

Используем следующие исходные данные:  $R_1 = 0,4$  м,  $R_2 = 0,405$  м,  $k = 0,987$ ,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа и, проведя расчет, получаем  $\sigma_\theta = -0,77$  МПа,  $U = -1,53 \cdot 10^{-8}$  м.

Таким образом, выполнены условия прочности, устойчивости для проемной трубы во взрывоустойчивой перемычке. С учетом того, что проемные трубы имеют жесткое крепление (при помощи металлических ребер) с моноблоком перемычки после затвердевания материала, то единственный вариант их перемещения в осевом направлении возможен при ее разрушении.

Для расчета площади сечения выработки, используя данные по геометрическим размерам (максимальная высота, ширина), радиусам кривизны,

которые меняются по зависимости параболической или в виде полуокружности, используем выражения, представленные в работе [2].

Программа реализована следующим образом. Сначала проверяем адекватность метода, разработанного при исследовании перемычек в США, разрушенные при реальных испытаниях, и перемычек в Польше (при отсутствии разрушения) согласно исходным данным по таблице 1.3. Потом приведем результаты исследований НДС в перемычках с параболической кривизной, сооруженных из разработанного материала (цементно-шлаковая смесь) под воздействием ударной волны при различных площадях сечений (минимальная и максимальная) и толщинах для двух граничных условий, вычислим их максимальные значения.

Далее приведем НДС перемычек при действии факторов горного давления и температуры, затем суммируя их с максимальными напряжениями от ударной волны в данном сечении, в итоге, учитывая коэффициент запаса прочности, сопоставим их с предельными значениями. В результате в зависимости от сечения, глубины возведения и температуры получим толщину перемычки (минимальную и максимальную). Толщину перемычки с радиусом-полуокружностью вычислим при максимальных данных.

Результаты распределения нормальных напряжений (максимальных) в безразмерных координатах для максимума толщины перемычки в 1,0 м (США) при различных условиях крепления представлены на рисунках 3.5-3.8.

Можно сделать вывод, что максимальными напряжениями при указанных граничных условиях являются  $\sigma_x$ , которые возникают по высоте перемычки, при этом с шарнирными краями они превышают более, чем в шесть раз напряжения при жестком креплении. Как и ожидалось, в первом случае, напряжения возникают в средней части с превышением предельных значений для гипса строительного, во втором случае – на краях. И напряжения на сжатие превышают предельные значения (2,8 МПа) согласно рисунку 3.7, то есть перемычка будет разрушена при указанной толщине.

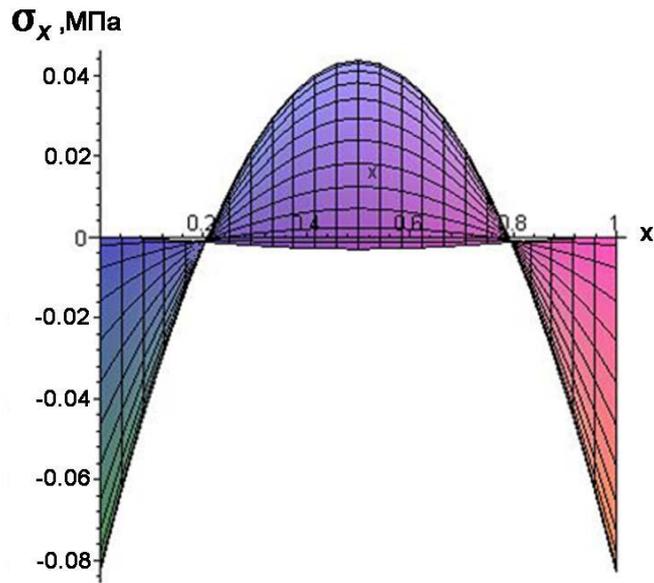


Рисунок 3.5 – Распределение нормальных напряжений  $\sigma_x$  в перемычке с параболической кривизной, из строительного гипса, с защемленными краями при максимальной высоте  $f = 2,0$  м, ширине  $B = 6,0$  м, толщине  $h = 1,0$  м, модуле упругости  $E = 3 \cdot 10^3$  МПа, коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,32$ , нагрузке  $q_z = 0,5$  МПа (США)

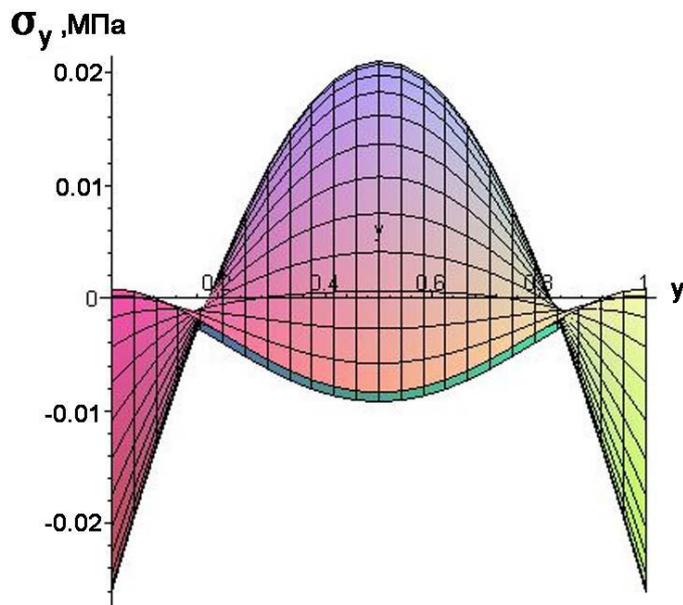


Рисунок 3.6 – Распределение нормальных напряжений  $\sigma_y$  в перемычке с параболической кривизной, из строительного гипса, с защемленными краями при максимальной высоте  $f = 2,0$  м, ширине  $B = 6,0$  м, толщине  $h = 1,0$  м, модуле упругости  $E = 3 \cdot 10^3$  МПа, коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,32$ , нагрузке  $q_z = 0,5$  МПа (США)

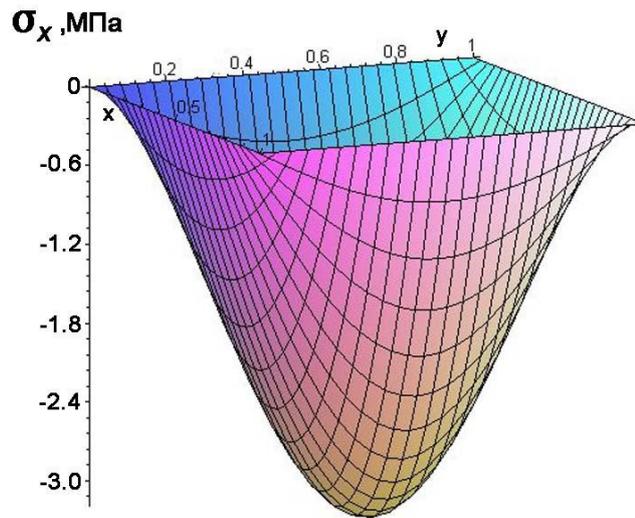


Рисунок 3.7 – Распределение нормальных напряжений  $\sigma_x$  в перемычке с параболической кривизной, из строительного гипса, с шарнирными краями при максимальной высоте  $f = 2,0$  м, ширине  $B = 6,0$  м, толщине  $h = 1,0$  м, модуле упругости  $E = 3 \cdot 10^3$  МПа, коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,32$ , нагрузке  $q_z = 0,5$  МПа (США)

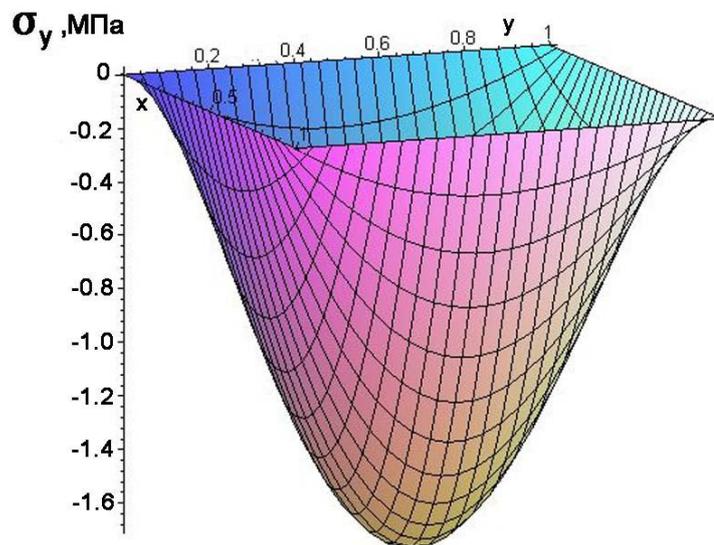


Рисунок 3.8 – Распределение нормальных напряжений  $\sigma_y$  в перемычке с параболической кривизной, из строительного гипса, с шарнирными краями при максимальной высоте  $f=2,0$  м, ширине  $B = 6,0$  м, толщине  $h = 1,0$  м, модуле упругости  $E = 3 \cdot 10^3$  МПа, коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,32$ , нагрузке  $q_z = 0,5$  МПа (США)

Нормальные напряжения (максимальные) в перемычке с шарнирными краями, возведенной в Польше, не превышают предельных значений согласно рисунку 3.9, в результате чего она разрушена не была.

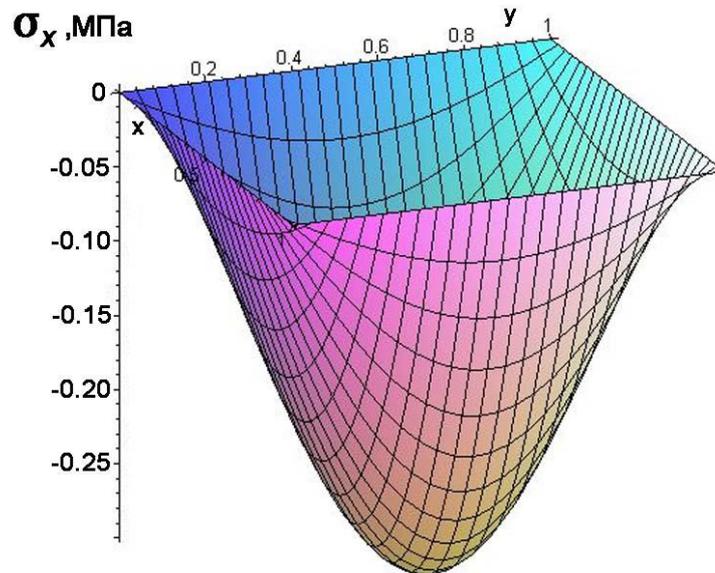


Рисунок 3.9 – Распределение нормальных напряжений  $\sigma_x$  в перемычке с параболической кривизной, из строительного гипса, с шарнирными краями при максимальной высоте  $f = 5,0$  м, ширине  $B = 6,0$  м, толщине  $h = 3,0$  м, модуле упругости  $E = 3 \cdot 10^3$  МПа, коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,32$ , нагрузке  $q_z = 0,5$  МПа (Польша)

Рассмотрим перемычку с параболической кривизной и шарнирными краями, возведенную из цементно-шлаковой смеси. Распределение нормальных напряжений  $\sigma_x$  при различных (минимальных и максимальных) значениях площади сечения, горного давления (глубины возведения) и нагрузке от ударной волны ( $q_z = 2,8$  МПа) представлено на рисунках 3.10 и 3.11. Распределение нормальных напряжений при максимальной глубине возведения (при величине горного давления  $q = 3,5$  МПа) – на рисунке 3.12. Следует учитывать, что нагрузка от воздействия горного давления изменяется в зависимости от глубины возведения перемычки – от 400 до 1400 м.

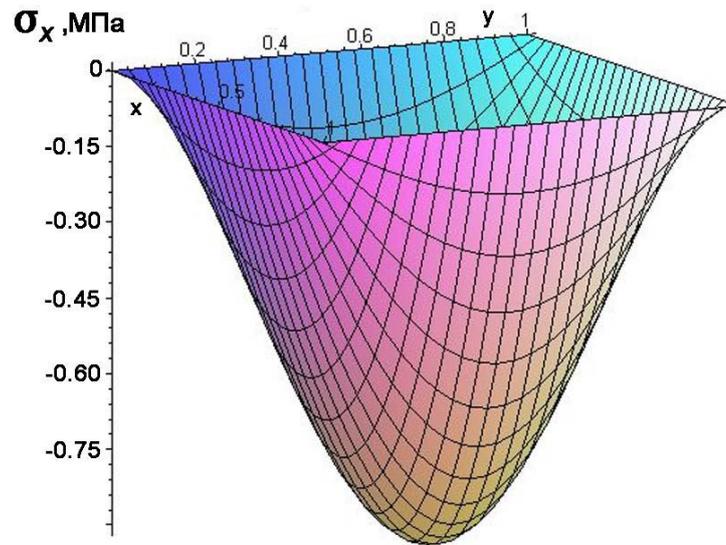


Рисунок 3.10 – Распределение нормальных напряжений  $\sigma_x$  в перемычке с параболической кривизной, из цементно-шлаковой смеси, с шарнирными краями при площади сечения  $S = 4 \text{ м}^2$ , глубине возведения  $H = 400 \text{ м}$ , толщине  $h = 2,0 \text{ м}$ , начальном модуле упругости  $E = 2,15 \cdot 10^2 \text{ МПа}$ , коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,22$ , нагрузке  $q_z = 2,8 \text{ МПа}$

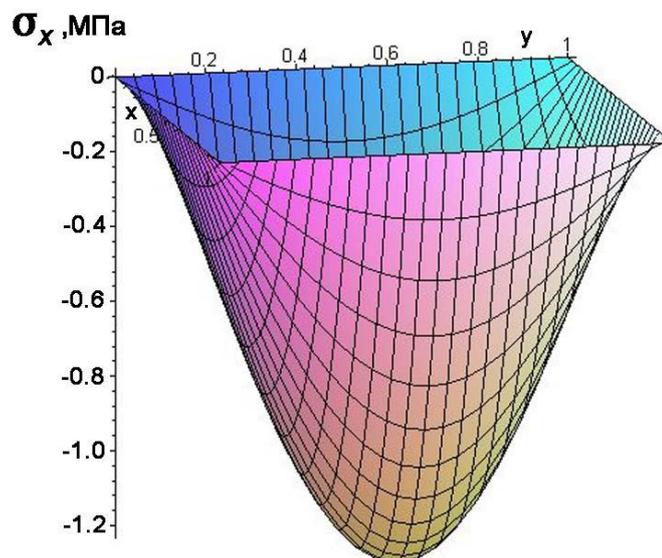


Рисунок 3.11 – Распределение нормальных напряжений  $\sigma_x$  в перемычке с параболической кривизной, из цементно-шлаковой смеси, с шарнирными краями при площади сечения  $S = 30 \text{ м}^2$ , глубине возведения  $H = 1400 \text{ м}$ , толщине  $h = 5,5 \text{ м}$ , начальном модуле упругости  $E = 2,15 \cdot 10^2 \text{ МПа}$ , коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,22$ , нагрузке  $q_z = 2,8 \text{ МПа}$

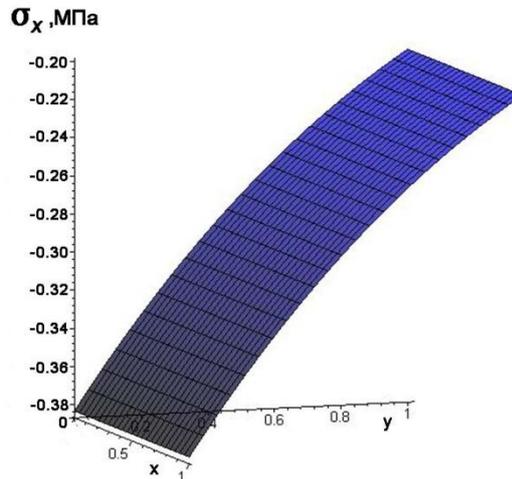


Рисунок 3.12 – Распределение нормальных напряжений  $\sigma_x$  в перемычке с параболической кривизной, из цементно-шлаковой смеси, с шарнирными краями при площади сечения  $S = 30 \text{ м}^2$ , глубине возведения  $H = 1400 \text{ м}$ ,  $h = 2,0 \text{ м}$ , начальном модуле упругости  $E = 2,15 \cdot 10^2 \text{ МПа}$ , коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,22$

Используя уравнение (1.1), получили зависимость для определения температуры, воздействующей на перемычку, от начальной температуры ВУВ и скорости воздушных газов (рисунок 3.13), а также зависимость напряжений от перепада температур (рисунок 3.14).

Анализируя результаты исследований НДС перемычки, возведенной из материала на основе цементного вяжущего [146], можно сделать вывод:

- максимальные напряжения в одинаковых условиях, при различных (минимальной и максимальной) площадях сечениях выработки, воздействии нагрузки от ударной волны практически одинаковы (см. рисунки 3.10, 3.11), при этом, имея равные величины на сжатие и растяжение, они не достигают предельных значений (1,8 и 3,0 МПа);

- максимальные напряжения при воздействии горного давления по высоте возникают в средней части, от температурных воздействий – в нижней части перемычки;

- суммарные напряжения при действии горного давления и максимальной температуры от максимальных напряжений изгиба (при действии ударной волны) составляют для цементно-шлакового материала около 43-47 %, для цементно-зольного – около 42 %;

- нормальные (максимальные) напряжения во взрывоустойчивой перемычке, сооруженной в виде полуокружности, выше в 1,1-1,2 раза, чем в такой же перемычке, сооруженной по параболе.

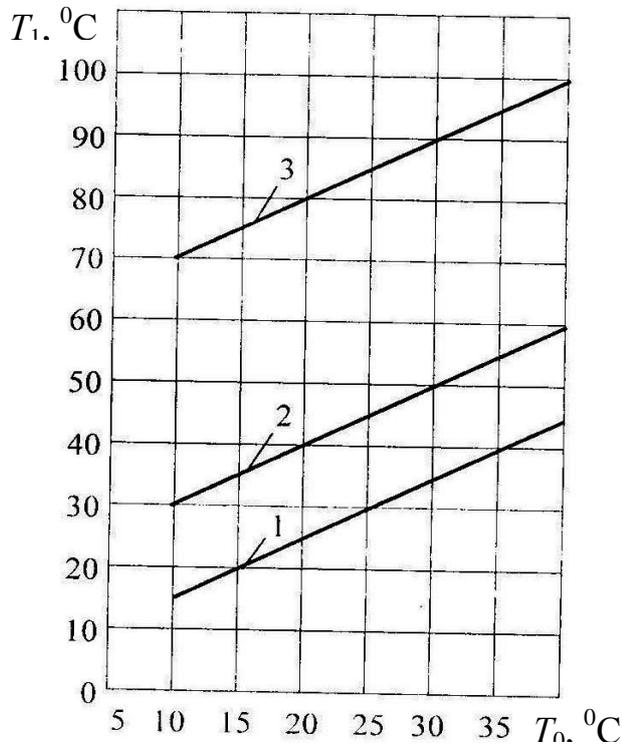


Рисунок 3.13 – Зависимость температуры торможения потока  $T_1$  от начальной температуры в выработке  $T_0$  и скорости смеси газов  $u$  (1 – 100 м/с; 2 – 200 м/с; 3 – 350 м/с) при воздействии на перемычку

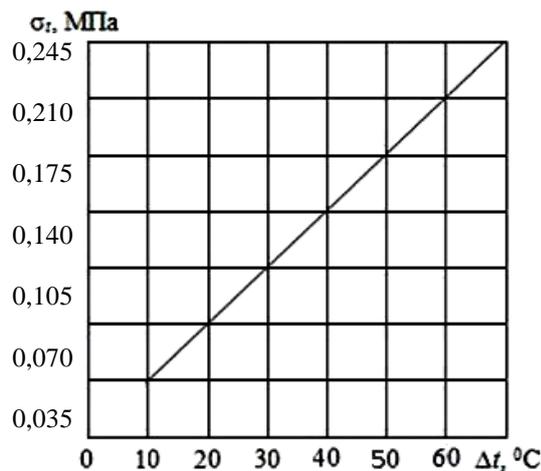


Рисунок 3.14 – Зависимость напряжений от перепада температур в результате воздействия ВУВ при коэффициенте линейного расширения материала цементно-шлаковой смеси  $\alpha = 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ , начальном модуле упругости  $E = 2,15 \cdot 10^2$  МПа, коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,22$

Разработанные математические модели НДС перемычки под воздействием горного давления, ударной волны и температурных перепадов, с учетом радиусов кривизны, которые меняются по зависимости параболической и полуокружности, механических характеристик используемого материала, различных условий крепления, глубины возведения, позволяют определить параметры, которые обеспечивают ее прочность и, в итоге, безопасную работу горноспасателей при ведении работ по ликвидации аварий в угольных шахтах.

### **Выводы к главе 3.**

1 Принята наиболее адекватная расчетная схема перемычки в виде анизотропной (армированной) и, в частности изотропной толстой пластины с радиусом кривизны, меняющимся по параболической зависимости или полуокружности, под действием сжимающей и нормально приложенной нагрузок от горного давления, ВУВ и температуры, края которой жестко или шарнирно закреплены по периметру выработки.

2 При исследованиях НДС перемычки использованы критерии прочности: максимальные нормальные (на растяжение, сжатие) и касательные напряжения на сдвиг не должны превышать своих допустимых напряжений с учетом коэффициента запаса на прочность. При этом максимальные напряжения представлены в виде функциональной зависимости от геометрических параметров, механических характеристик материалов, действующих нагрузок, площади сечения выработок, глубины возведения и граничных условий.

3 Разработаны математические модели НДС перемычки, находящейся под действием горного давления, нормально приложенной нагрузки от ВУВ и температуры, первые две из которых основаны на использовании вариационного метода, методов Ритца и Бубнова-Галёркина при выборе координатных функций в виде степенных полиномов для жесткого и шарнирного условий ее крепления.

4 В отличие от ранее разработанной математической модели, в данной не учитывается влияние на НДС перемычки проемных металлических труб,

прочность которых обеспечена, вместо двух функций отыскивается одна, что значительно упрощает решение задачи.

5 Разработан алгоритм в виде структурной блок-схемы и составлена программа решения задачи для определения отдельно напряжений в перемычке под действием горного давления, ВУВ, температуры и суммарных их значений.

6 Сравнительные результаты теоретических исследований при исходных данных и действии на перемычку нагрузки от ВУВ по данному методу и натурных экспериментов, проведенных в США и Польше, показывают, что в первом случае максимальные напряжения превосходят предельные их значения и перемычки разрушены, во втором, наоборот, что подтверждает достоверность разработанной математической модели.

7 Напряжения в перемычке с цементно-шлаковым и цементно-зольным материалами практически равны, максимальные нормальные сжимающие напряжения при действии ВУВ возникают при шарнирном креплении по ее высоте в средней части, горного давления – в нижней, суммарные значения максимальных напряжений при действии горного давления (глубины возведения) и температуры от максимальных изгибных напряжений составляют примерно 43-47 %, с параболическим радиусом кривизны в 1,1-1,2 раза меньше, чем с полуокружностью, обеспечивая ее запас прочности с коэффициентом 1,7.

8 Предложенные ранее способы крепления проемных труб к горной выработке являются излишними, исключение этого вида работ позволит снизить материалоемкость сооружения перемычки и трудоемкость ее возведения.

9 Полученные результаты исследований позволили разработать номограмму для оперативного определения основной характеристики взрывоустойчивой перемычки – толщины – в зависимости от площади сечения выработки, глубины ее возведения (горного давления), перепада температур при нагрузке от ВУВ  $q_z = 2,8$  МПа (приведена ниже).

## ГЛАВА 4

### ПАРАМЕТРЫ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ, ТЕХНОЛОГИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА И ВОЗВЕДЕНИЯ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК

#### 4.1 Параметры взрывоустойчивой перемычки

В п. 3.4 главы 3 приведены некоторые результаты исследований напряженного состояния перемычки, возведенной из цементно-шлакового и цементно-зольного материалов, определены отдельно напряжения, возникающих при действии ВУВ, горного давления и перепада температур, а также ее суммарные максимальные значения напряжений для шарнирного крепления при совместном их действии с учетом коэффициента запаса прочности. При этом определены минимальная и максимальная толщина перемычки в зависимости от сечения выработки, глубины возведения (горного давления) и перепада температур.

Результаты исследований промежуточных расчетов показали, что толщины перемычки линейно зависят от этих факторов, в связи с этим разработана номограмма для оперативного их определения, приведенная на рисунке 4.1. При этом для определения перепада температур использована зависимость (3.84), отображенная на рисунке 3.13.

Проведем анализ результатов расчета толщин перемычек при действии ВУВ, полученных зарубежными авторами и по разработанному выше методу.

По выражениям (1.2) и (1.3) толщины перемычек за рубежом в первом случае определяются в зависимости только от геометрических параметров: высоты  $H$ , ширины  $W$  с коэффициентом 0,6, во втором – ширины  $a$  и предела прочности на растяжения при изгибе  $\sigma_{bz}$ , то есть

$$t = \frac{H + W}{2} + 0,6; \quad t = \frac{0,7a}{\sqrt{\sigma_{bz}}}$$

При минимальных размерах перемычки  $H = 1,6$  м,  $W = a = 2,4$  м и  $\sigma_{bz} = 0,6$  МПа (для высокопрочного гипса) получим  $t = 2,6$  м и  $t = 2,2$  м.

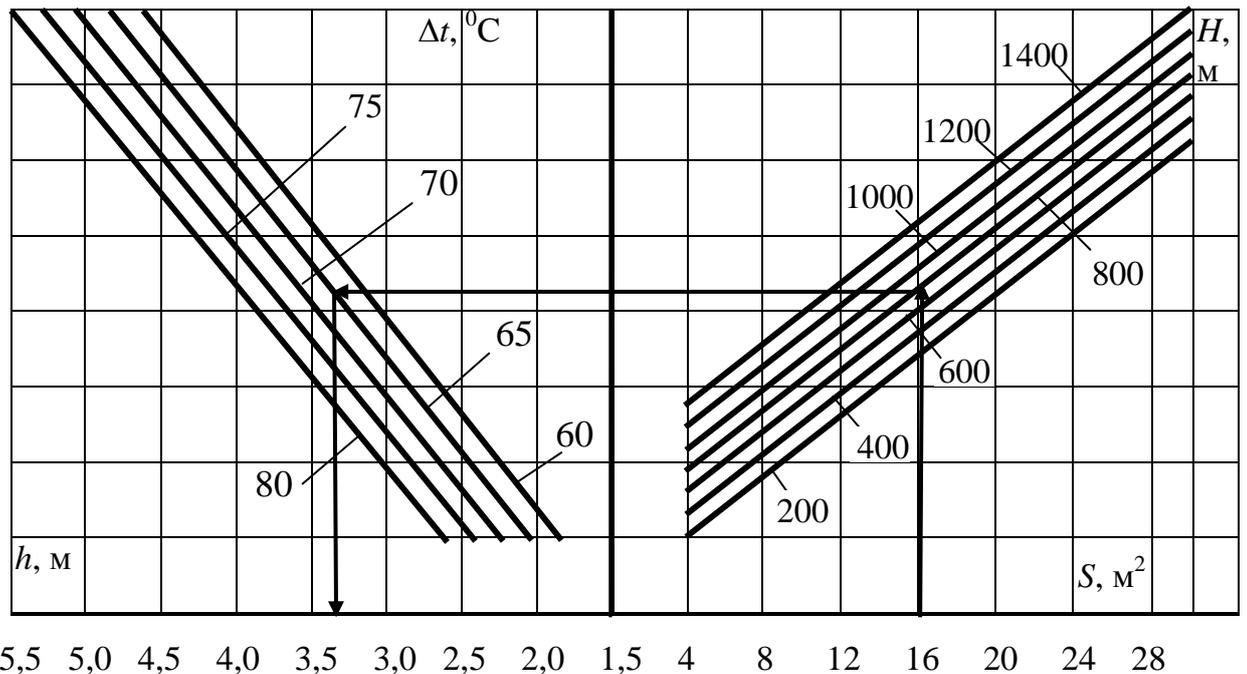


Рисунок 4.1 – Номограмма для определения толщины взрывоустойчивой перемычки  $h$ , возведенной с использованием смесей на основе цементных вяжущих, в зависимости от площади сечения выработки  $S$ , глубины возведения  $H$ , перепада температур  $\Delta t$  (между конечной температурой  $T_1$ , воздействующую на перемычку, и начальной  $T_0$  в горной выработке) при нагрузке от воздушной ударной волны  $q_z = 2,8$  МПа

Однако в таблице 1.2 также приведен различный материал. В нашем случае материал (цементно-шлаковая смесь) имеет более высокий предел прочности на растяжение ( $\sigma_{bz} = 1,8$  МПа). Тогда толщина по второй зависимости  $t = 1,3$  м является неизменной и по ее первой. Из приведенной номограммы следует, что при минимальных значениях площади сечения, глубины возведения и перепада

температур толщина перемычки примерно равна 2,0 м, что является среднеарифметическим значением от трех вышеприведенных толщин.

При максимальных значениях  $H = 5,0$  м,  $W = a = 6,0$  м и  $\sigma_{bz} = 0,6$  МПа для гипса получим  $t = 6,1$  м и  $t = 5,4$  м соответственно, для цементно-шлаковой смеси  $t = 3,2$  м, а согласно номограмме при минимальных значениях глубины возведения и перепада температур  $h = 3,8$  м.

Определяют толщину взрывоустойчивой перемычки  $h$  по номограмме следующим образом. На правой стороне оси абсцисс выбирают площадь сечения выработки  $S$ , в которой возводят перемычку. От этой точки поднимают перпендикуляр до линии, определяющей глубину возведения  $H$  перемычки, затем проводят горизонталь влево до линии перепада температур  $\Delta t$  (определяют, как разность между температурой  $T_1 = 100$  °С и начальной температурой в горной выработке  $T_0 = (20...40)$  °С с интервалом 5 °С). Затем опускают перпендикуляр на левую сторону оси абсцисс, где и определяют толщину взрывоустойчивой перемычки  $h$ .

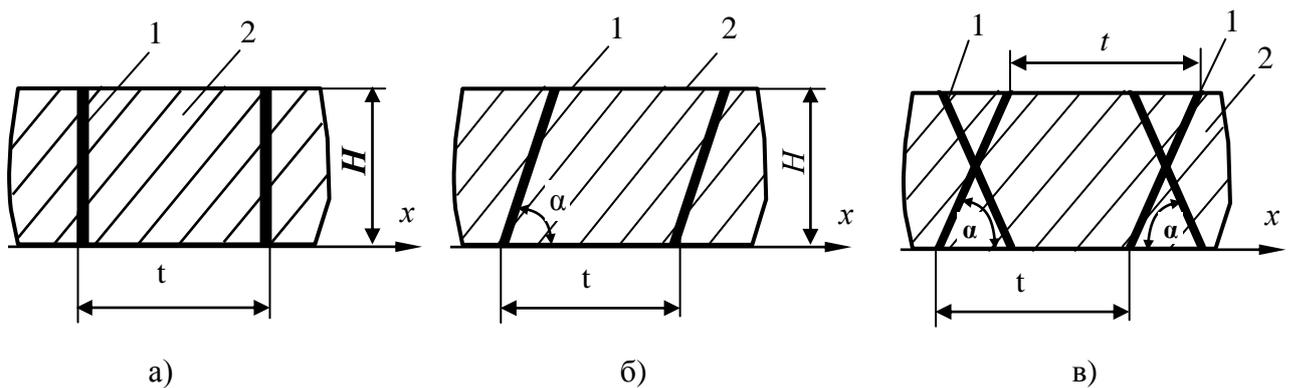
Таким образом, разработана наиболее адекватная расчетная схема взрывоустойчивой перемычки в виде толстой пластины, возведенной из нового материала на основе цементного вяжущего и отходов местного производства, с использованием одного из основных современных методов решения краевых задач теории упругости – энергетического метода, на основании результатов которого обоснована ее основная техническая характеристика – толщина в зависимости от площади сечения, действия нагрузок ВУВ, глубины возведения и перепада температур. Это позволит обеспечить ее прочность и безопасность горноспасателей при ликвидации подземных пожаров и взрывах в угольных шахтах.

При этом необходимо отметить следующее. Математические модели НДС рассматриваемой перемычки разработаны, в общем случае, с учетом анизотропии (армирования) ее материала, то есть, его механические характеристики (модули

упругости  $E_x, E_y, G_{12}, G_{xz}, G_{yz}$ , коэффициенты Пуассона  $\nu_x, \nu_y$  (см. главу 3), пределы прочности на растяжение и сжатие) различны в двух направлениях.

Известны применяемые в авиационной, судостроительной, кораблестроительной, ракетостроительной промышленности и трехслойные конструкции с различного рода заполнителями (складчатый, сотовый, в виде отдельных ребер и т. д.) [129], а также армированные бетонно-металлические строительные изделия [147], в частности плиты, которые значительно прочнее, выдерживая аналогичные нагрузки при минимальной толщине. Это достигается за счет увеличения жесткости на растяжение, сжатие, сдвиг, предельных их значений.

В данном случае эффективным является применение армированного цементно-шлакового материала с заполнителями, в частности, металлическими стержнями. Отличием от данного изотропного материала здесь вводят понятие, так называемых, приведенных модулей упругости, сдвига и коэффициентов Пуассона, которые, в частности, в зависимости от схемы армирования (рисунок 4.2) можно определить по зависимостям [96]



а – вертикальная; б – под углом; в – двойное расположение под углом;  
1 – стержень; 2 – цементно-шлаковый состав;  $t$  – расстояние между осями диаметров стержней в направлении  $x$ .

Рис. 4.2 – Способы армирования перемычки стержнями

Схема «а»:

$$E_{npx}^1 = E_x^1 = \frac{E_a + (t - d_a)E_n}{t}; E_{npy}^1 = E_y^1 = \frac{E_a + (t_1 - d_a)E_n}{t_1}; \quad (4.1)$$

$$G_{xz}^1 = \frac{G_a d_a + (t - d_a)G_n}{t}; G_{yz}^1 = \frac{t_1}{\frac{d_a}{G_a} + \frac{(t_1 - d_a)}{G_n}}; G_{12}^{*1} = G_n^1; \quad (4.2)$$

$$G_a = \frac{E_a}{2(1 - \nu_a)^2}; G_n = \frac{E_n}{2(1 - \nu_n)^2} \quad (4.3)$$

$$\nu_x^1 = \frac{\nu_a d_a + (t - d_a)\nu_n}{t}; \quad (4.4)$$

$$G_a = \frac{E_a}{2(1 - \nu_a)^2}; G_n = \frac{E_n}{2(1 - \nu_n^i)^2}. \quad (4.5)$$

В выражениях (4.1- 4.5) введены следующие обозначения:

$E_a, E_n$  – модули упругости материала стержня и цементно-шлакового состава, МПа;

$d_a$  – диаметр стержня, м;

$t, t_1$  – расстояние между осями стержней в двух направлениях, м;

$G_a, G_n$  – модули сдвига материала стержня и цементно-шлакового состава, МПа;

$\nu_a, \nu_n$  – коэффициенты Пуассона материала стержня и цементно-шлакового состава.

Коэффициенты Пуассона  $\nu_x$  и  $\nu_y$  в данном случае получают экспериментальным путем.

Схема «б»:

$$E_{npx}^2 = E_x^2 = \frac{E_a d_a \sin \alpha + (t - d_a) E_n}{t}; E_{npy}^2 = E_y^2 = \frac{E_a d_a \sin \alpha + (t_1 - d_a) E_n}{t_1}; \quad (4.6)$$

$$G_{xz}^2 = \frac{G_a d_a \sin \alpha + (t - d_a) G_n}{t}; \quad G_{yz}^2 = \frac{t_1}{\frac{d_a \sin \alpha}{G_a} + \frac{(t_1 - d_a)}{G_n}}; G_{12}^* = G_n; \quad (4.7)$$

$$v_x^2 = \frac{v_a d_a + (t - d_a) v_n}{t}; \quad v_y^2 = \frac{v_a d_a + (t_1 - d_a) v_n}{t_1}; \quad (4.8)$$

Схема «в»:

$$E_{npx}^3 = E_x^3 = \frac{2[E_a d_a \sin \alpha + (t - d_a) E_n]}{t}; \quad E_{npy}^3 = E_y^3 = \frac{2[E_a d_a \sin \alpha + (t_1 - d_a) E_n]}{t_1}; \quad (4.9)$$

$$G_{xz}^3 = \frac{2[G_a d_a \sin \alpha + (t - d_a) G_n]}{t}; \quad G_{yz}^3 = \frac{2t_1}{\frac{d_a \sin \alpha}{G_a} + \frac{(t_1 - d_a)}{G_n}}; \quad (4.10)$$

$$v_x^3 = \frac{v_a d_a \sin \alpha + (t - d_a) v_n}{t}; \quad v_y^3 = \frac{v_a d_a \sin \alpha + (t_1 - d_a) v_n}{t_1}; \quad (4.11)$$

Выражения для модули сдвига материала стержня и цементно-шлакового состава в схемах «б» и «в» аналогичны (4.5).

Кроме этого, необходимо в дальнейшем уточнить влияние температуры ударной волны на НДС перемычки.

Таким образом, по вышеизложенным выражениям можно определить приведенные механические характеристики в зависимости от механических

характеристик материала цементно-шлакового состава и металлических стержней, расстояния между ними, угла их наклона, используя математические модели, аналогично получить распределения максимальных напряжений и определить минимальные толщины перемычек. При этом, необходимо дополнительно экспериментальным путем определить предельные значения напряжений образцов на сжатие. Это позволит существенно сократить затраты и время возведения перемычек.

#### **4.2 Совершенствование технических средств возведения**

Основные направления развития указанного вида оборудования заключаются в:

- повышении качества приготавливаемых растворов за счет интенсивного смешивания отдозированных компонентов растворной смеси (воды и сухого вяжущего), обеспечивающего требуемые реологические характеристики перекачиваемых растворов и прочностные параметры их затвердевания;
- повышении надежности работы смесительных агрегатов;
- повышении удобства эксплуатации и ремонтпригодности оборудования за счет компоновки его из отдельных быстроразборных узлов;
- упрощении управления оборудованием за счет применения контроля процессов приготовления и перекачивания растворов.

Исходя из вышеуказанного, первостепенной задачей является [83]:

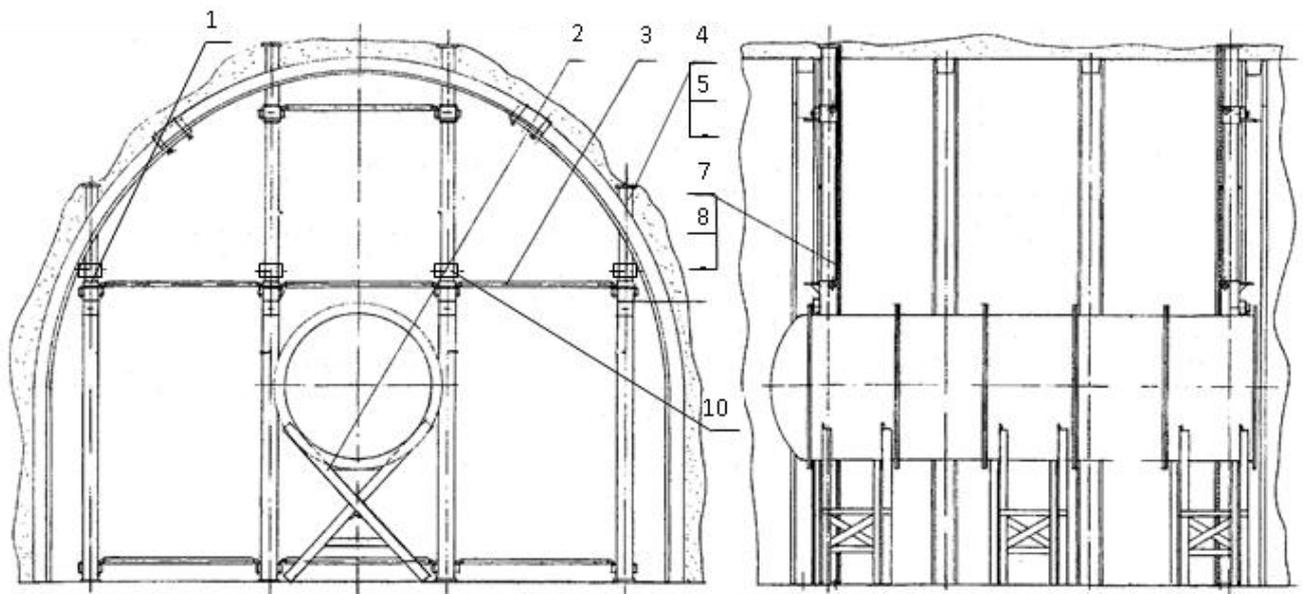
- использование эффективного высокопроизводительного смесителя с дозированной загрузкой сухого гипсового вяжущего для приготовления растворов с требуемыми реологическими характеристиками;
- постоянный контроль расхода воды с целью повышения качества возводимых сооружений и эксплуатационной надежности оборудования;
- применение современных насосных агрегатов.

Для существующего оборудования по приготовлению и перекачиванию быстротвердеющих смесей важнейшим вопросом является его модернизация,

основными направлениями которой должны быть, прежде всего, повышение точности дозирования сыпучих материалов и поддержания водотвердого отношения.

Как отмечено в п. 2.4 главы 2, в НИИГД «Респиратор» на протяжении длительного времени ведутся работы по совершенствованию технических средств возведения изолирующих и взрывоустойчивых сооружений гидромеханическим способом. Так был разработан комплект каркасных опалубок многоразового использования ОК [140].

Целью разработки являлось создание оборудования многоразового использования, которое обеспечит эффективное возведение перемычек с наименьшими затратами времени при возведении изолирующих сооружений гидромеханическим способом в подземных условиях (рисунок 4.3).



1 – хомут; 2 – опора проемной трубы; 3 – стяжка; 4, 5, 6 – стойка раздвижная; 7 – ограждение (металлическая сетка); 8 – штора; 9 – проволока; 10 – хомут упорный

Рисунок 4.3 – Каркасная опалубка

использования для возведения изолирующих перемычек в горных выработках шахт состоит в необходимости сокращения времени ведения аварийно-

спасательных работ, повышения эффективности и безопасности работы горноспасателей.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: простота конструкции, небольшой вес, возможность сокращения времени на ведение монтажа (демонтажа), взаимозаменяемость элементов, многократное использование.

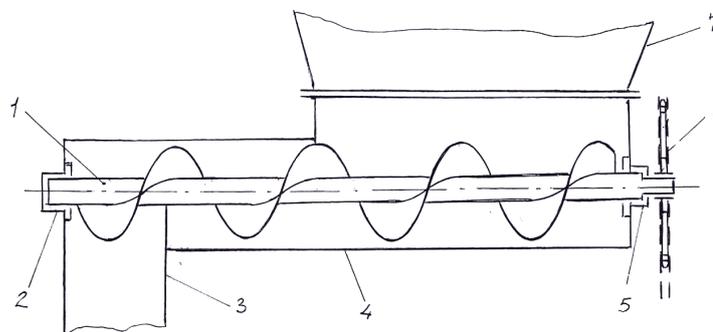
Разработанный комплект опалубок состоит из трех типоразмеров для сечения выработки: от 4 м<sup>2</sup> до 10 м<sup>2</sup>; от 10 м<sup>2</sup> до 16 м<sup>2</sup>; от 16 м<sup>2</sup> до 30 м<sup>2</sup>.

Приемочные испытания подтвердили работоспособность ОО опалубки.

Внедрение опалубок позволит значительно сократить время ведения аварийно-спасательных работ, повысить эффективность и безопасность работы горноспасателей.

Проведены работы по усовершенствованию смесительно-нагнетательного оборудования [71], описанные в работах [43, 47, 69, 72-77, 83, 148-153].

В разработанном НИИГД "Респиратор" комплекте оборудования снижение его энергоемкостей и повышение качества приготавливаемых растворов достигнуто за счет применения шнекового питателя для дозировки сухого вяжущего (рисунок 4.4) и высокоэффективного смесителя (рисунок 4.5), обеспечивающего подачу в насосный агрегат вяжущего полностью затворенного водой.

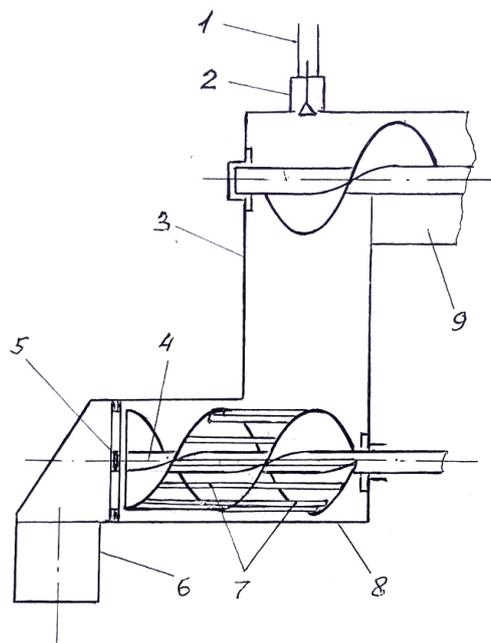


1 – винт; 2, 5 – подшипники опорные; 3 – патрубок выпускной;  
4 – корпус; 6 – звездочка приводная; 7 – бункер

Рисунок 4.4 – Питатель шнековый

Основной параметр питателя шнекового – диаметр шнека  $D$ , м, – определен по формуле [154]. Мощность  $N_{ш}$ , кВт, затрачиваемая на выгрузку вяжущего из бункера приводом для питателя шнекового с горизонтальным расположением шнека, и скорость движения вяжущего в обойме  $V_g$ , м/с, определены по зависимостям [155].

Для приготовления качественных растворов применен смеситель роторного типа (рисунок 4.5).



1 – патрубок для подачи воды; 2 – форсунка; 3 – патрубок входной; 4 – вал смесителя; 5 – диск перфорированный; 6 – патрубок выпускной; 7 – переборки; 8 – корпус; 9 – питатель шнековый

Рисунок 4.5 – Смеситель

Выбранная конструкция смесителя позволяет получать растворы с требуемыми параметрами за счет регулирования частоты вращения вала, формы лопаток смесительного органа и длины смесительного участка. Во избежание отложений твердеющего раствора на стенках смесительной камеры, вал роторного смесителя выполнен в виде шнека, что обеспечивает полную выгрузку

из нее готового раствора. Для интенсификации процесса смешивания вяжущего с водой на шнеке смесителя вдоль его образующей закреплены переборки.

Мощность привода смесителя  $N_c$ , кВт, определена по формуле [156]. Полученные параметры шнекового питателя и смесителя непрерывного действия обеспечат требуемую производительность и позволяют выбрать необходимые параметры его привода.

Согласно расчетам, суммарная мощность привода, необходимая для обеспечения дозировки и выгрузки сухого вяжущего из бункера в смеситель, приготовления и подачи раствора в насосный агрегат, не превышает 1,1 кВт, что значительно меньше потребляемых мощностей на смешивание для смесительно-нагнетательных установок оборудования типа комплексов "Темп" или агрегатов "Монолит".

Внедрение разработанного комплекта оборудования позволит повысить качество приготавливаемых растворов, что непосредственно влияет на характеристики возводимого сооружения и эффективность работы горноспасателей.

Одним из важных технологических параметров возведения изолирующих сооружений гидромеханическим способом является водовязущее отношение. Точное соблюдение этого отношения при работе смесительно-нагнетательного оборудования является гарантией качества возведения перемычек с требуемыми прочностными характеристиками [157], что всегда было актуально. Это требование относится к любым вяжущим (гипсовому, «Текбленд», цементному) вне зависимости от применяемого оборудования.

Для точного дозирования воды затворения в агрегатах «Монолит», комплексах «Темп», в комплекте оборудования ОПР1 разработано новое автоматическое дозирующее устройство (рисунок 4.6) [158]. Устройство включает последовательно соединенные компенсатор давления 3 и регулятор расхода 5 с рукояткой 7, подводом 8 и отводом 4 воды, трубки 1, 2, 6.

В корпусе 12 компенсатора давления 3 выполнена осевая расточка, в которой расположен подпружиненный пружиной 17 аксиально подвижный плунжер 13, противоположный конец которого соединен с упругой мембраной 10. Конический затвор плунжера 13 и острая кромка корпуса 12 образуют регулируемый кольцевой зазор 14. Поток воды последовательно проходит от подвода 8 через регулируемый кольцевой зазор 14, канал 15, расходную щель 19 к отводу 4. Проходное сечение расходной щели 19 регулируется путем вращения рукоятки 7, при котором шток 18, смещаясь вдоль своей продольной оси, изменяет площадь сечения расходной щели 19.

Принцип работы устройства основан на стабилизации компенсатором давления 3 перепада давления на расходной щели 19 регулятора расхода 5. Согласно формуле

$$Q = \mu S \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (4.19)$$

где  $Q$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с (зависит от двух переменных  $S$  и  $\Delta P$ );

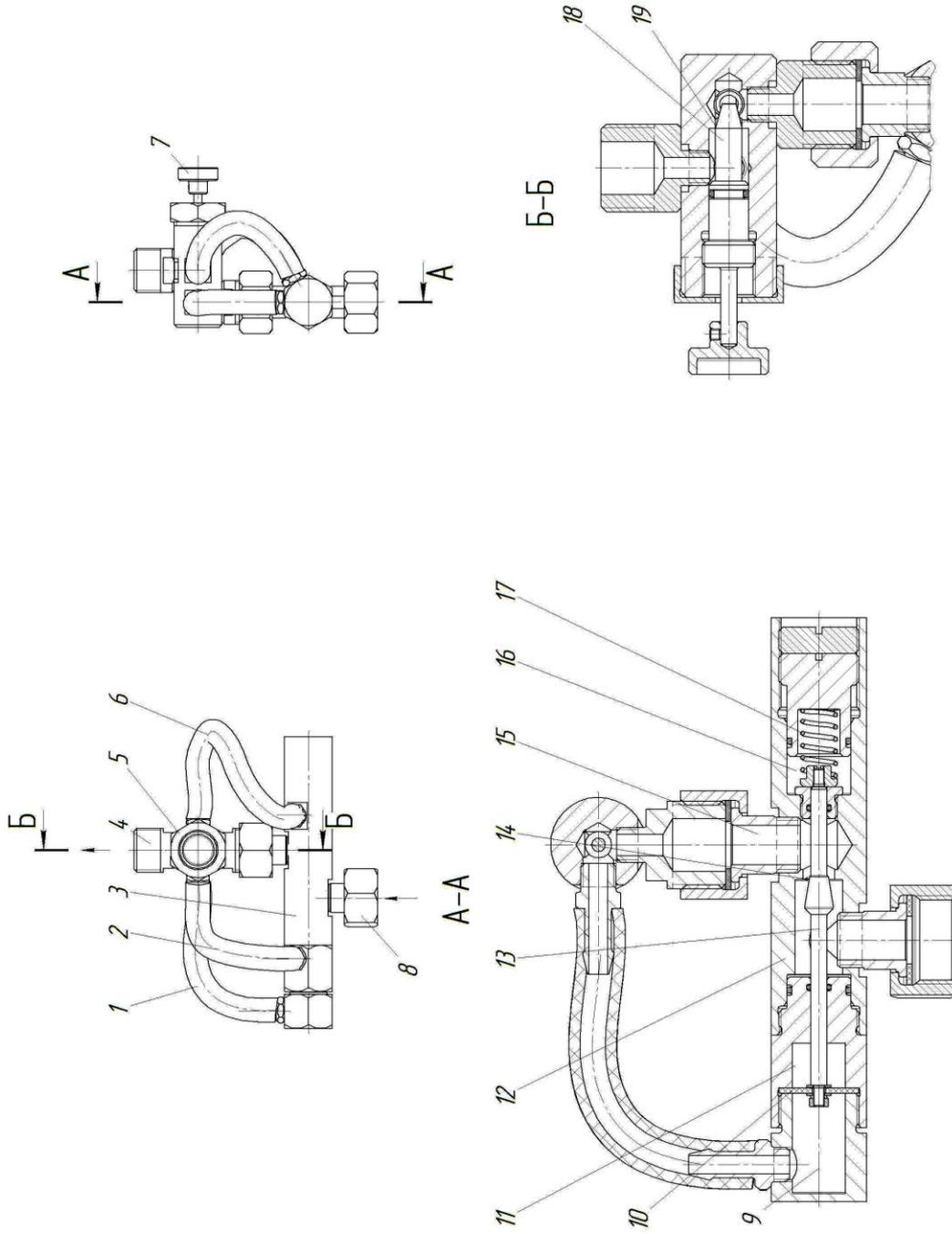
$\mu$  – коэффициент расхода;

$S$  – площадь щели, м<sup>2</sup>;

$\Delta P$  – перепад давления на щели, Па;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Площадь сечения  $S$  расходной щели 19 настраивается рукояткой 7 на требуемый расход, однако в процессе работы смесительно-нагнетательной установки не изменяется (то есть  $S = \text{const}$ ). Перепад давления  $\Delta P$  является переменной величиной, зависящей от давления в пожарно-оросительном трубопроводе, которое может изменяться, например, в зависимости от числа подключенных потребителей, глубины выработки, длины трубопровода и других факторов. Поэтому стабилизацию параметра  $\Delta P$  осуществляет компенсатор давления 3.



1, 2, 6 – трубки; 3 – компенсатор давления; 4 – отвод воды; 5 – регулятор расхода; 7 – рукоятка; 8 – подвод воды;  
 9, 11, 16 – камера; 10 – упругая мембрана; 12 – корпус компенсатора давления; 13 – подвижный плунжер;  
 14 – кольцевой зазор; 15 – канал; 17 – пружина; 18 – шток; 19 – расходная щель

Рисунок 4.6 – Автоматическое дозирующее устройство

В простейшем виде уравнение статического равновесия плунжера 13 компенсатора давления 3 запишем в виде

$$\Delta P S_M = F_0 + kx, \quad (4.20)$$

где  $S_M$  – площадь упругой мембраны 10, м<sup>2</sup>;

$F_0$  – усилие первоначальной затяжки пружины 17, Н;

$k$  – модуль упругости пружины 17, Н/м;

$x$  – смещение плунжера 13, м.

Отсюда находим

$$\Delta P = F_0/S_M + (k/S_M) x. \quad (4.21)$$

Учитывая, что смещение  $x$  плунжера 13 составляет доли миллиметра, получаем приближенное уравнение  $\Delta P \approx F_0/S_M$ , из которого следует постоянство  $\Delta P$ , а, следовательно, и постоянство  $Q$ .

Работает устройство следующим образом. Вначале устанавливается рукояткой 7 требуемый расход воды путем совмещения отметки на рукоятке 7 с круговой шкалой, закрепленной на корпусе регулятора расхода 5 (на рисунке не показаны). При этом в отводе 4 устанавливается расход воды, соответствующий показанию, установленному на круговой шкале. При увеличении расхода (например, за счет увеличения давления в пожарно-оросительном трубопроводе) увеличивается перепад давления  $\Delta P$  на расходной щели 19. Одновременно в камеру 9 по трубке 1 передается давление, действующее на входе в расходную щель 19, а в камеры 11 и 16 по трубкам 2 и 6 соответственно передается давление, действующее на выходе из расходной щели 19. На упругой мембране 10 выделяется разностный сигнал давлений, то есть  $\Delta P$ , который воздействует на левый торец плунжера 13. Под действием перепада давления плунжер 13 смещается в сторону закрытия регулируемого кольцевого зазора 14, сжимая

пружину 17 до установления равновесия, что согласно (4.21) приводит к стабилизации расхода. Если давление в пожарно-оросительном трубопроводе снижается, то снижается и расход в отводе 4. Снижение расхода в отводе 4 означает снижение перепада давления  $\Delta P$  на расходной щели 19. Аналогично ранее рассмотренному случаю перепад давления  $\Delta P$  передается на упругую мембрану 10. Уменьшенный перепад давления на упругой мембране 10 вызывает смещение плунжера 13 в сторону открытия регулируемого кольцевого зазора 14 под действием пружины 17 до установления нового равновесного положения, что означает согласно (4.21) стабилизацию расхода воды.

Внедрение разработанного устройства позволит производить подачу требуемого количества воды для затворения сухого вяжущего (от 15 до 65 л/мин) в зависимости от реальных технических характеристик конкретного смесительно-нагнетательного оборудования, находящегося на оснащении подразделений ГВГСС, и требуемого водовяжущего отношения.

### **4.3 Технология возведения взрывоустойчивых перемычек и изготовления сухих смесей**

#### **4.3.1 Общие положения**

Применение сухих смесей на основе цементного вяжущего для возведения взрывоустойчивых перемычек позволяет устранить ряд недостатков, присущих гипсовому вяжущему: низкую влагостойкость и, как следствие, повышенную ползучесть материала перемычки даже без учета действия различных факторов (горного давления, ударной волны и температуры); быструю схватываемость, ограничивающую дальность перекачивания и приводящую к аварийным остановкам. Стремление снизить скорость твердения гипсового вяжущего за счет увеличения подачи воды приводит к потере прочности гипсового материала или даже к утрате способности к схватыванию.

Основным недостатком цементных материалов, ограничивающим их применение, является низкая скорость набора механической прочности.

В главе 2 приведены рецептуры цементно-шлаковой и цементно-зольной смесей с модифицирующей добавкой – ускорителем твердения в виде хлористого кальция. Основной акцент при разработке сухих смесей на основе цементного вяжущего сделан на малокомпонентность состава, низкую стоимость, применение промышленных отходов региона.

Выбор места для возведения перемычки из материалов на основе цементного вяжущего и монтажа смесительно-нагнетательной установки, возведение опалубки, обеспечение взрывоустойчивости перемычки с заданной прочностью материала и монолитностью взрывоустойчивого сооружения осуществляется аналогично соответствующим требованиям для гипсовых перемычек, которые подробно изложены в нормативной документации [27, 38, 67].

Заданная прочность материала перемычки при заданном времени твердения обеспечивается за счет качественного компонентного состава сухих смесей, строгого соблюдения водотвердого отношения, равномерной ритмичной подачи сухой смеси, тщательного перемешивания затворенной смеси.

Для обеспечения нормального режима приготовления и перекачивания цементного раствора необходимо заранее (при получении задания на возведение перемычки) выдать в письменной форме ответственному лицу следующие данные:

- прочность на сжатие при стандартной консистенции;
- стандартную консистенцию;
- плотность раствора при стандартной консистенции.

Ответственный за возведение перемычки определяет:

- производительность оборудования (путем выбора скорости подачи сухой смеси в загрузочное устройство и подачу соответствующего количества воды затворения);
- настройку требуемого расхода воды;

– дозирование подачи сухой смеси в смеситель и дозирование подачи воды затворения.

Перед началом заливки цементного материала в межопалубочное пространство переемычки отбирается проба раствора из рукава длиной не менее 50 м. При этом производится два замера плотности набранной пробы с помощью ареометра, например, АБР-1М. Если измеренные значения плотности больше, чем значения плотности, указанной в паспорте на материал, то уменьшают подачу воды, добиваясь точного совпадения.

Для контроля прочности материала переемычки необходимо при ее возведении отобрать не менее двух проб раствора и залить его в специальные формы типа ФБС размером 40х40х160 мм.

Первую пробу отбирается при заполнении переемычки на 1/3 ее высоты, а вторая – на 2/3 высоты переемычки. После заполнения формы и затвердевания раствора ее необходимо поместить в полиэтиленовый мешок, завязать его (с целью исключения высыхания образцов) и доставить в лабораторию для определения прочности на сжатие, а также плотности образцов. Каждую форму ФБС снабжают точным временем взятия пробы с указанием температуры окружающей среды.

При возведении переемычки необходимо вести журнал учета работы и проверок оборудования (например, установки «Монолит» или пневмонагнетателя ПН-500).

Результаты лабораторных испытаний цементного вяжущего необходимо хранить в горноспасательном подразделении в течение года после возведения взрывоустойчивой переемычки.

Особое внимание следует обращать на точность подачи объема воды затворения в смеситель. Увеличение объема воды выше допустимой нормы приводит к снижению скорости набора прочности и увеличению времени твердения, что эквивалентно снижению доли цементного вяжущего в растворе.

Водотвердое отношение играет определяющую роль в скорости набора прочности материала взрывоустойчивой перемычки. При увеличении количества воды улучшаются условия транспортировки и растекаемость, но уменьшается скорость твердения. Поэтому критически важным является соблюдение точности дозирования воды затворения и недопущение отклонения водотвердого отношения от рабочего значения.

Масса раствора  $m_p$ , кг, необходимая для возведения перемычки, определяется по формуле

$$m_p = \rho_p \cdot K_y \cdot K_n \cdot S \cdot h, \quad (4.22)$$

где  $\rho_p$  – плотность раствора, кг/м<sup>3</sup>;

$K_y = 1,05$  – коэффициент усадки, 1;

$K_n = 1,2$  – коэффициент потерь, 1;

$S$  – площадь сечения перемычки, м<sup>2</sup>;

$h$  – толщина перемычки, м.

Плотность цементно-шлакового раствора составляет 1910 кг/м<sup>3</sup>, а цементно-зольного раствора – 1258 кг/м<sup>3</sup>.

Масса сухой смеси  $m_c$ , кг, необходимая для возведения перемычки (доставляемая в шахту), рассчитывается по формуле

$$m_c = m_p / (1 + В/Т),$$

где  $В/Т$  – водотвердое отношение, 1.

Для цементно-шлаковой смеси  $В/Т = 0,3$ , а для цементно-зольной -  $В/Т = 0,4$ . Поэтому массу сухой цементно-шлаковой смеси,  $m_{сш}$ , кг, определяют по формуле  $m_{сш} = 0,769m_p$ , а массу цементно-зольной смеси,  $m_{сз}$ , кг, – по формуле  $m_{сз} = 0,714m_p$ .

### 4.3.2 Оборудование для приготовления и перекачивания растворов

Наиболее полно требованиям по работе с абразивным наполнителем (доменный шлак) соответствует пневмонагнетательная техника (например, пневмонагнетатель ПН-500).

Точное дозирование сухой смеси обеспечивается стандартной массой одного мешка, равной 30 кг для цементно-шлаковой смеси и 16 кг для цементно-зольной смеси.

Максимальное количество смеси, закладываемой в смеситель на один замес, определяют по формулам

– для цементно-шлаковой смеси

$$\frac{30n}{\rho_{\text{сш}}} + \frac{0,3 \cdot 30n}{\rho_b} = 0,8V, \quad (4.23)$$

– для цементно-зольной смеси

$$\frac{16n}{\rho_{\text{сз}}} + \frac{0,4 \cdot 16n}{\rho_b} = 0,8V, \quad (4.24)$$

где  $n$  – число мешков сухой смеси, 1;

$\rho_b = 1000$  – плотность воды затворения, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{сш}} = 1600$  и  $\rho_{\text{сз}} = 814$  – плотности сухих цементно-шлаковой и цементно-зольной смесей соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$V = 600$  – объем смесителя, л.

В итоге получаем:

– для цементно-шлаковой смеси  $n = 18$  мешков;

– для цементно-зольной смеси  $n = 19$  мешков.

Необходимый объем воды затворения,  $V_b$ , м<sup>3</sup>, находим по формулам:

– для цементно-шлаковой смеси

$$V_b = \frac{0,3 \cdot 30n}{\rho_b} = 0,162 \text{ м}^3 = 162 \text{ л.}$$

– для цементно-золевой смеси

$$V_b = \frac{0,4 \cdot 16n}{\rho_b} = 0,122 \text{ м}^3 = 122 \text{ л.}$$

Необходимая масса  $m$ , кг, сухой смеси для изготовления 1 м<sup>3</sup> раствора определяется по формулам:

– для цементно-шлаковой смеси

$$m + 0,3 m = 1910, \text{ откуда } m = 1469,23 \text{ кг или 49 упаковок сухой смеси;}$$

– для цементно-золевой смеси

$$m + 0,4 m = 1258, \text{ откуда } m = 898,57 \text{ кг или 56 упаковок сухой смеси.}$$

Вода затворения, применяемая для получения минерально-цементных растворов, должна иметь свойства, соответствующие требованиям нормативной документации [159].

Приготовление и перекачивание цементно-золевых растворов может быть осуществлено с помощью оборудования типа «Монолит» и ОПР1. Расход воды затворения в данном случае зависит от темпа подачи сухой цементно-золевой смеси в бункер смесительно-нагнетательной установки.

Монтажная схема оборудования типа «Монолит» аналогична монтажной схеме при возведении гипсовых перемычек и подробно изложена в нормативных документах [27, 38, 67].

### **4.3.3 Компонентный состав быстротвердеющих смесей с цементным вяжущим**

В НИИГД «Респиратор» разработано несколько вариантов рецептов быстротвердеющих смесей в зависимости от скорости твердения и расхода цементного вяжущего.

Наименьшее время набора прочности достигается в составе с формулой ПЦ : ШЛ : КХ : В (7:3:0,04:0,3),

где ПЦ – цемент;

ШЛ – доменный отвальный шлак;

КХ – хлористый кальций;

В – вода.

В скобках приведены относительные величины указанных компонентов. Химический ускоритель твердения – хлористый кальций – берется относительно цементного вяжущего, а вода – относительно суммы твердых компонентов смеси.

Под наименьшим временем набора прочности смесей понимается время ее достижения твердеющего материала, равной 3 МПа.

Для расчета заданного времени набора лабораторной прочности вышеприведенного состава необходимо пользоваться эмпирической кривой 1 набора ранней прочности  $\sigma_{сж}$ , МПа, показанной на рисунке 2.14, или формулой

$$\sigma_{сж} = 0,024t^2 + 1,32t - 4,71,$$

где  $t$  – время набора прочности, ч.

Наименьшее время достижения прочности, равной 3,0 МПа, составляет около (6,5...7,0) ч (см. главу 2).

Цементно-зольный состав с формулой ПЦ : ЗУ : КХ : В (7 : 3 : 0,03 : 0,4), где ЗУ – зола-унос (далее – зола) тепловой электростанции - характеризуется низким коэффициентом трения и набирает прочность 3 МПа за 16 ч твердения. Предел прочности определяют по эмпирической кривой 3 набора ранней прочности  $\sigma_{сж}$ , МПа, показанной на рисунке 2.14, или рассчитывают по формуле

$$\sigma_{сж} = 0,18t + 0,01.$$

Мелкозернистая структура цементно-шлаковых смесей, необходимая для эффективного перекачивания по трубопроводу и растекаемости по площади перемычки, достигается за счет применения фракций шлака с диаметром не более 2 мм. Характеристика цементных смесей представлена в таблице 4.1.

Стабильность физико-механических свойств быстротвердеющих составов обеспечивается соответствием всех компонентов смеси, используемых при возведении сооружения, нормативным документам.

В таблице 4.2 приведен перечень материалов с соответствующими нормативными документами.

Таблица 4.1

#### Характеристика цементных смесей

Вид смеси	Водо-твердое отношение, 1	Средняя плотность раствора, кг/м <sup>3</sup>	Средняя плотность сухой смеси, кг/м <sup>3</sup>	Время набора прочности 3 МПа, ч		Масса сухой смеси на единицу объема перемычки, кг/м <sup>3</sup>
				в лабораторных условиях	в моно-блоке перемычки	
Цементно-шлаковая	0,3	1910	1600	6,5-7,0	5,0-5,5	1469
Цементно-зольная	0,4	1258	814	15,5-16,0	7,0-7,5	899

Таблица 4.2

#### Перечень материалов

Материал	Нормативный документ	Возможный поставщик
Портландцемент ПЦ I 500	ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Цементы общестроительного назначения. Технические условия	ООО "Цемент Донбасса" (пгт. Новоамвросиевское)
Доменный отвалный шлак	ГОСТ 5578-94 Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов. Технические условия; ТУ У В.2.7.03450778.096-99 Шлак дробленый для дорожного строительства	ДМЗ (г. Донецк)
Зола	ГОСТ 25818-2017 Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия	Зуевская ТЭС (г. Зугрэс)
Кальций хлористый гранулированный	ГОСТ 450-77 Кальций хлористый технический. Технические условия	Российский производитель

#### 4.3.4 Технология изготовления сухих смесей с цементным вяжущим

Технология изготовления сухих смесей включает в себя подготовку материалов, принудительное перемешивание и расфасовку.

Все поступающие на участок по изготовлению сухих смесей материалы должны иметь сертификат соответствия требованиям нормативных документов согласно таблице 4.2. Такой участок может быть организован на территории одного из подразделений ГВГСС или ругой, подходящей с технической точки зрения, промышленной площадке.

Наполнитель в виде доменного отвального шлака подвергается предварительной подготовке. Для приготовления исходной шлаковой массы требуется извлечение металла, дробление кусков шлака до необходимого размера, сушка полученной массы. Для получения мелкозернистой структуры раствора, необходимой для хорошей растекаемости по межопалубочному пространству взрывоустойчивой перемычки, максимальный размер шлаковых частиц не должен превышать 2 мм.

Согласно предварительной заявке горноспасателей минимально необходимый годовой объем готового материала составляет 250 т. Таким образом, можно предположить, что отделение металла от шлаковой массы допустимо производить вручную.

Для получения мелкозернистой шлаковой массы с диаметром зерна не более 2 мм необходимо использовать шлаковую дробилку. В качестве сушильной установки в технологической схеме необходимо использовать сушильный барабан. Общая принципиальная схема производства сухих смесей показана на рисунке 4.7.

Схема включает участки приемки сырья (шлака, золы, цементного вяжущего и добавок), подготовки шлакового наполнителя, дозирочную секцию, смесительную секцию, упаковочно-фасовочную секцию.

Технологическая схема изготовления сухой цементно-шлаковой смеси показана на рисунке 4.8.

Доменный отвальный шлак подается в приемный бункер щековой дробилки. Выходная фракция шлака из дробилки 1 (см. рисунок 4.8) с помощью шнекового конвейера 2 подается в специальный сушильный барабан 3. Он

предназначен для сушки молотого шлака в непрерывном режиме. С выхода сушильного барабана 3 мелкодробленый и горячий шлак с температурой 100 °С подается в накопительный бункер 4 для остывания до температуры около 50 °С.

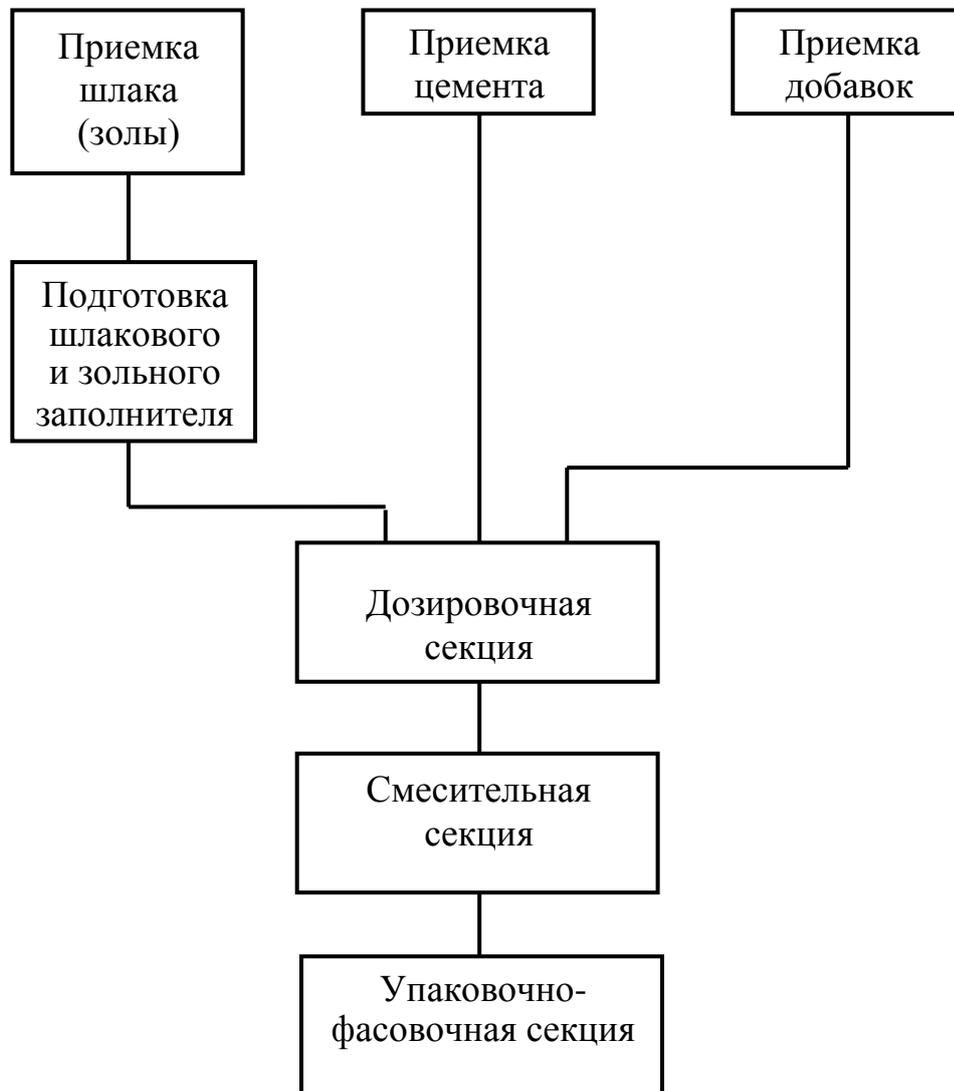
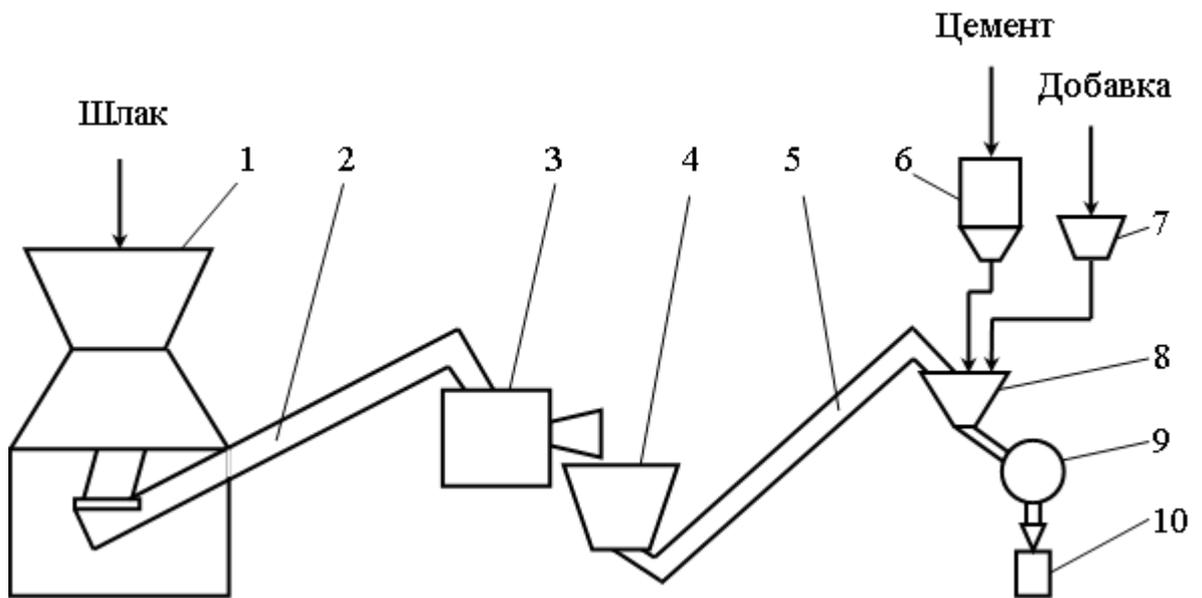


Рисунок 4.7 Принципиальная схема производства сухих смесей

После остывания шлака его подают с помощью шнекового конвейера 5 на дозатор 8.

На дозатор 8 также поступает цемент из бункера 6 и добавка из бункера 7. Из выходного окна дозатора 8 отдозированные компоненты подаются самотеком в смеситель 9. Смеситель функционирует по принципу жидких слоев, образуемых

механическим путем. Особая форма, расположение и скорость вращения смесительного приспособления создает центробежное вихревое движение, что позволяет производить объемное смешивание с равномерной плотностью каждого компонента в единице объема смеси. Это является гарантией того, что компоненты с различными гранулометрическими показателями и плотностью смешиваются точно, качественно и в краткие сроки. Сухая смесь с выхода смесителя 9 направляется в установку фасовки в мешки клапанного типа 10.



- 1 – щековая дробилка; 2, 5 – шнековые конвейеры; 3 – сушильный барабан;  
 4, 6 – накопительные бункеры; 7 – бункер для добавок; 8 – дозатор;  
 9 – смеситель; 10 – клапанные мешки

Рисунок 4.8 – Технологическая схема изготовления сухой цементно-шлаковой смеси

Многослойная структура материала мешка (крафт-бумага) обеспечивает прочность и надежность, благодаря чему выдерживает фасовку тяжелых сыпучих материалов. Мешки обладают повышенной прочностью к разрыву и воздействию

влаги, позволяют сохранить качество и все свойства продукции во время ее транспортировки, складирования, хранения. Возможна дополнительная гидроизоляция полиэтиленовым слоем.

Позиции 2 и 5 в технологической схеме в соответствии с рисунком 4.8 – шнековые конвейеры. Конвейер состоит из лотка в форме трубчатого сечения, оснащенного, по крайней мере, одной разгрузочной и одной загрузочной горловинами, винтом, соединительными фланцами, редукторным двигателем.

Объемы бункеров 4 и 6 выбирают в пределах от 3 до 5 м<sup>3</sup>. Обслуживают линию три человека: рабочий дозировочно-смесительного поста, рабочий дробильно-сушильного поста, упаковщик.

Рассмотренная выше технологическая схема может использоваться и для приготовления цементно-зольных смесей. При этом щековая дробилка используется как загрузочный бункер для золы. Зола, имеющая мелкодисперсный состав, просыпается в нижний приемный бункер. Далее процесс приготовления сухой смеси аналогичен описанному выше.

Масса компонентов, необходимых для изготовления 1 т цементно-шлаковой смеси с соотношением цементного вяжущего к заполнителю, равным 7:3, определяется уравнением

$$7x + 3x + 0,04 \cdot 7x = 1000,$$

где  $x$  – масса одной части цемента, кг.

Отсюда получаем  $x = 97,28$  кг. Тогда потребная масса цемента равна 680,10 кг, шлака –291,84 кг, хлористого кальция –27,20 кг.

Масса компонентов, необходимых для изготовления 1 т цементно-зольной смеси, с соотношением цементного вяжущего к заполнителю, равным 7:3, определяется уравнением

$$7x + 3x + 0,03 \cdot 7x = 1000.$$

Отсюда  $x = 97,94$  кг. Потребная масса цемента равна 685,60 кг, золы – 293,82 кг, хлористого кальция – 20,57 кг.

Упаковка, хранение и транспортировка сухих смесей должны производиться согласно разработанным требованиям.

#### **4.4 Расчет годового экономического эффекта от внедрения результатов работы**

Годовой экономический эффект от производства и использования новых средств техники безопасности и долгосрочного применения существующих взрывоустойчивых перемычек определяется по формуле [160, 161]:

$$\begin{aligned} \text{Э} = [ (C_1 + E_n K_1) \cdot (B_2 / B_1) \cdot (P_1 + E_n) / (P_2 + E_n) + [(I_1 - I_2) - \\ - E_n \cdot (K_2^1 - K_1^1)] / (P_2 + E_n) - (C_2 + E_n K_2) ] A_2, \end{aligned} \quad (4.25)$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  – себестоимость единицы продукции, выпускаемой соответственно по базовому и новому варианту, руб.;

$K_1$ ,  $K_2$  – удельные капитальные вложения в производственные фонды (на единицу выпускаемой продукции), руб.;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (0,15);

$B_1$  и  $B_2$  – годовые объемы продукции (работы), производимые при использовании единицы соответственно базового нового средства техники безопасности, в натуральных единицах;

$B_2 / B_1$  – коэффициент учета изменения производительности нового средства техники безопасности по сравнению с базовым;

$(P_1 + E_n) / (P_2 + E_n)$  – коэффициент учета изменения срока службы нового средства по сравнению с базовым;

$P_1$ ,  $P_2$  – доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) соответственно базового и нового варианта средств, рассчитываются как величины, обратная срокам службы средств, определяемым с учетом их морального износа;

$[(I_1 - I_2) - E_n \cdot (K_2^1 - K_1^1)] / (P_2 + E_n)$  – экономия потребителя на текущих издержках эксплуатации и отчислениях от сопутствующих капитальных вложений на весь срок службы нового средства по сравнению с базовым, руб.;

$K_1^1, K_2^1$  – сопутствующие капитальные вложения потребителя (капитальные вложения без учета стоимости рассматриваемых средств труда) при использовании базового и нового средства труда в расчете на объем продукции (работы), производимой с помощью нового средства, руб.;

$I_1, I_2$  – годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании им базового и нового средства в расчете на объем продукции (работы), производимой с помощью нового средства труда, руб. В этих издержках учитывается только часть амортизации, предназначенная на капитальный ремонт средств, т.е. без учета средств на их реновацию, а также амортизационные отчисления по сопутствующим капитальным вложениям потребителя;

$A_2$  – годовой объем выпуска в расчетном году новых средств, в натуральных единицах.

Расчет ориентировочной себестоимости изготовления сухих цементно-шлаковых и цементно-зольных смесей в упрощенном варианте проведен по методике, представленной в приложении В [162]. Кроме того, учитывая различную плотность базового и новых материалов себестоимость единицы продукции определим в руб./м<sup>3</sup>, а не в руб./т. Так в горной выработке сечением 16 м<sup>2</sup> возводится перемычка из гипсового вяжущего толщиной 3,3 м (объем 52,8 м<sup>3</sup>). Согласно нормативной документации на эту перемычку предусмотрено израсходовать 67 т сухого гипса. Таким образом, если цена 1 т гипса Г-5 (по состоянию на июнь 2021 г.) составляла 6200 руб., то стоимость 1 м<sup>3</sup> гипсового раствора (только материал) равна 7867 руб. Согласно проведенным расчетам ориентировочная себестоимость 1 м<sup>3</sup> раствора из цементно-шлаковой смеси составляет 8063 руб., а из цементно-зольной смеси – 4590 руб. Следовательно,  $C_1 = 7867$  руб./м<sup>3</sup>, для цементно-шлаковой смеси  $C_2 = 8063$  руб./м<sup>3</sup>, для цементно-зольной –  $C_2 = 4590$  руб./м<sup>3</sup>.

Удельные капитальные вложения в производственные фонды  $K_1 = K_2 = 0$ .

Поскольку годовые объемы продукции  $V_1$  и  $V_2$ , производимые при использовании единицы соответственно базового нового средства техники безопасности не зависят от используемого материала, то коэффициент учета производительности нового средства по сравнению с максимальной для базового  $V_2 / V_1 = 1$ .

Доли отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление (реновацию) соответственно базового и нового варианта средств согласно приложения 2 [160]  $P_1 = 0,2155$  (до 4 лет),  $P_2 = 0,0874$  (до 8 лет). Тогда коэффициент учета изменения срока службы  $(P_1 + E_H) / (P_2 + E_H) = 1,54$ .

Годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании им базового и нового средства не изменятся, поэтому  $I_1 = I_2 = 0$ .

Сопутствующие капитальные вложения потребителя также не должны измениться,  $K_1^1 = K_2^1 = 0$ .

Согласно п. 1.1 главы 1 среднегодовой объем изоляционных работ, проведенных гидромеханическим способом (перемычки из гипсового вяжущего) составляет 12,3 перемычки год. Учитывая, что основное количество перемычек возводится в выработках сечением от  $8 \text{ м}^2$  до  $20 \text{ м}^2$ , будем считать средний объем перемычки равным  $43,4 \text{ м}^3$ , т.е.  $A_2 = 12,3 \times 43,4 = 534 \text{ м}^3$ .

Подставляя эти данные в выражение (4.25), получим для цементно-шлаковой смеси  $\mathcal{E} = 2163,9$  тыс. руб.; для цементно-зольной смеси  $\mathcal{E} = 4018,4$  тыс. руб.

#### **Выводы к главе 4.**

1 На основании результатов теоретических исследований НДС перемычки для цементно-шлаковой и цементно-зольной смесей научно обоснована номограмма для определения основной технической характеристики перемычки – толщины – в зависимости от площади сечения выработки, глубины возведения (горного давления), нагрузки ВУВ, перепада температур. Это позволит

обеспечить ее прочность и безопасность горноспасателей при подземных пожарах и взрывах в угольных шахтах.

2 Изложены рекомендации по использованию в дальнейшем разработанных математических моделей для исследований НДС перемычки, в общем, выполненной из анизотропного (трансверсально изотропного) материала. Приведены схемы армирования, в частности, металлическими стержнями перемычки, возведенной из материала на основе цементно-шлаковой или цементно-зольной смесей с приведенными механическими характеристиками, что позволит значительно уменьшить ее толщину, сократить материальные затраты и время возведения.

3 Усовершенствованы технические средства для возведения перемычек: комплект оборудования для приготовления и перекачивания смесей, каркасная опалубка многоразового использования, средство дозирования подачи воды в смесительно-нагнетательное оборудование. Время возведения взрывоустойчивых перемычек прежде всего зависит от затрат на сооружение опалубки, заливки перемычки и набора необходимой прочности материала моноблока. Использование современного оборудования позволяет значительно сократить время возведения.

4 Приведена технология приготовления смесей и возведения перемычек из цементно-шлакового и цементно-зольного материалов.

5 Проведен расчет ожидаемого годового экономического эффекта от внедрения результатов работы, который за счет увеличения срока службы сооружения, а также меньшей стоимости материала перемычек на основе цементного вяжущего и отходов местного производства, без учета снижения загрязнения окружающей среды, составляет для цементно-шлаковой смеси 2163,9 тыс. руб., цементно-зольной – 4018,4 тыс. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой в области пожарной и промышленной безопасности, в которой на базе установления закономерностей напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивых перемычек, возведенных из материалов на основе цементного вяжущего, дано решение актуальной научно-технической задачи по обоснованию параметров взрывоустойчивых перемычек с учетом использования усовершенствованных технических средств и технологии возведения, обеспечивающих безопасность горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ.

**Основные выводы, научные и практические результаты работы** заключаются в следующем:

1. Установлены зависимости, позволяющие выбирать технологический состав материала для перемычки с учетом его механических характеристик, которые определяют безопасные параметры взрывоустойчивых перемычек.

2. Разработана математическая модель НДС взрывоустойчивых перемычек, находящихся под действием горного давления, давления во фронте ВУВ и температуры, учитывающая два вида граничных условий жесткого и шарнирного крепления по периметру выработки.

3. Разработанная математическая модель представлена в виде графического отображения (номограммы) многофункциональной зависимости толщины перемычки от площади сечения выработки, глубины возведения, перепада температур с учетом давления ВУВ и времени твердения цементно-шлакового и цементно-зольного материалов в лабораторных условиях и в моноблоке перемычки.

4. На основании результатов физического моделирования методом эквивалентных материалов и теоретических исследований установлено, что

проемные металлические трубы практически не влияют на напряженно-деформированное состояние перемычки.

5. Дано обоснование времени начала безопасной эксплуатации взрывоустойчивой перемычки, возведенной из цементно-шлакового материала с отношением компонентов 7:3 и ускорителем твердения (хлористый кальций), которое при пределе прочности материала не менее 3,0 МПа, составляет не более 5,0 ч после окончания заливки моноблока перемычки.

6. Разработан технологический режим, средства и технология приготовления смесей и возведения перемычек.

7. В рамках выполнения работы разработаны, согласованы и утверждены в установленном порядке «Рекомендации по ведению изоляционных работ на участках с осложнившимся пожаром с использованием смесей на основе цементных вяжущих», которые получили внедрение в подразделения ГВГСС и в учебный процесс Донецкого национального технического университета (приложения К, Л).

8. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения перемычек из цементно-шлакового и цементно-зольного материалов составляет примерно 2163,9 тыс. руб. и 4018,4 тыс. руб. соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Калякин, С.А. Идеология взрывобезопасности угольных шахт, опасных по газу и угольной пыли / С.А. Калякин // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 11. – С. 38–43.

2 Агеев, В.Г. Взрывозащита при изоляции пожаров в угольных шахтах/ В.Г. Агеев. – Донецк: Арпи, 2014. – 338 с.

3 Анализ аварий и горноспасательных работ на шахтах, обслуживаемых ГВГСС Минуглепрома Украины за 2007 год / Центр. штаб Государств. горноспасат. службы Украины. – Донецк, 2008. – 204 с.

4 Анализ аварий и горноспасательных работ на шахтах, обслуживаемых ГВГСС Минуглепрома Украины за 2008 год / Центр. штаб Государств. горноспасат. службы Украины. – Донецк, 2009. – 159 с.

5 Анализ аварий и горноспасательных работ на шахтах, обслуживаемых ГВГСС Минуглепрома Украины за 2009 год / Центр. штаб Государств. горноспасат. службы Украины. – Донецк, 2010. – 175 с.

6 Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых ГВГСС в угольной промышленности Украины за 2010 год / Центр. штаб Государств. горноспасат. службы Украины. – Донецк, 2011. – 135 с.

7 Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых ГВГСС в угольной промышленности Украины за 2011 год / Центр. штаб Государств. горноспасат. службы Украины. – Донецк, 2012. – 165 с.

8 Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых ГВГСС в угольной промышленности Украины за 2012 год / Центр. штаб Государств. горноспасат. службы Украины. – Донецк, 2013. – 163 с.

9 Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых ГВГСС в угольной промышленности Украины за 2013 год / Центр. штаб Государств. горноспасат. службы Украины. – Донецк, 2014. – 145 с.

10 Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС за 2014 год / Упр. Государств. горноспасат. службы МЧС. – Донецк, 2015 г. – 111 с.

11 Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС за 2015 год / Департамент Государств. горноспасат. службы МЧС. – Донецк, 2016. – 69 с.

12 Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС за 2016 год / Департамент Государств. горноспасат. службы МЧС. – Донецк, 2017. – 60 с.

13 Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС за 2017 год / Департамент Государств. горноспасат. службы МЧС. – Донецк, 2018. – 74 с.

14 Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС за 2018 год / Департамент Государств. горноспасат. службы МЧС. – Донецк, 2019. – 76 с.

15 Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС за 2019 год / Департамент Государств. горноспасат. службы МЧС. – Донецк, 2020. – 67 с.

16 Анализ аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС за 2020 год / Департамент Государств. горноспасат. службы МЧС. – Донецк, 2021. – 139 с.

17 Агрегат «Монолит»: инструкция по эксплуатации / Всесоюз. науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела. – Донецк, 1973. – 56 с.

18 Байсаров, Л.В. Опыт применения импортных и отечественных составов сухих смесей при возведении литых околострековых полос на шахте «Красноармейская-Западная» № 1 / Л.В. Байсаров, А.А. Яйцов, В.А. Болбат // Уголь Украины. – 2005. – № 11. – С. 3–5.

19 Пат. 53569А Україна, МПК 7E21B33/138, E21D21/00. Цементно-мінеральна суха суміш для спорудження при штрекових смуг / Байсаров Л.В., Грицай В.Ф., Михалко Т.В. М.О. Ільяшов, Н.В. Лобачова, Л.М. Лукач, О.О. Яйцов. В.О. Болбат, Ю.П. Чернишов, М.Д. Хрипун, В.В. Хилько, А.В. Ємченко, Ю.А. Наумов, А.І. Демченко. – № 2002086429; заявл. 01.08.02; опубл. 15.01.03, Бюл. № 1. – 3 с.

20 Пневмонагнетатели СО-241, СО-242, ПН-500, ПН-600, ПН-800, ПН-1000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stk-sparta.com.ua/pnevmonagnetateli-pnevropodatchiki-so-241-242-pn-500-600-1000>. – (Дата обращения 15.04.2019).

21 Комплекс «Темп-500» : техн. описание и инструкция по эксплуатации / Всесоюз. науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела. – Донецк, 1981. – 112 с.

22 ТУ 5737-004-50591851-2006 Текбленд (цементная смесь). Технические условия.

23 Инструкция по предупреждению и тушению подземных эндогенных пожаров в шахтах Кузбасса : утв. техн. директорами ОАО «Угольная компания «Кузбассуголь» [и др.] 20 июня 2007 г. / ФГУП РосНИИГД; ФГУП НЦ ВостНИИ. – Кемерово, 2007. – 77 с.

24 Технология возведения изолирующих, водоупорных и взрывоустойчивых перемычек на шахтах ОАО «Южный Кузбасс» / И.А. Шундулиди, А.В. Чубриков, В.А. Пуртов, И.Б. Коржов // Уголь. – 2005. – № 6. – С. 33–35.

25 Смоланов, С.Н. Изоляционные, вентиляционные и взрывоустойчивые перемычки / С.Н. Смоланов, В.И. Голинько, М.С. Мартиненко. – Днепропетровск: Наука и образование, 2002. – 260 с.

26 Булгаков, Ю.Ф. Тушение пожаров в угольных шахтах / Ю.Ф. Булгаков; Науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела. – Донецк, 2001. – 280 с.

27 Устав по организации и ведению горноспасательных работ Государственной военизированной горноспасательной службой Министерства по

делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики : утв. М-вом по делам граждан. обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий ДНР 09.12.2015 № 965. – Донецк, 2016. – 332 с.

28 Руководство по изоляции отработанных участков, временно остановленных и неиспользуемых горных выработок в шахтах (к § 152 «правил безопасности в угольных и сланцевых шахтах», «Недра», 1973) : утв. зам. министра угольной пром-сти СССР 10 декабря 1976 г. / М-во угольной пром-сти СССР, Восточ. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти ВостНИИ. – Кемерово, 1977. – 139 с.

29 Умнов, А.Е. Водоналивная перемычка и возможности ее использования при локализации взрывов в угольных шахтах / А.Е. Умнов // Сб. ст. по горноспасат. делу. – Кемерово, 1975. – Вып. 6. – С. 39–43.

30 Мильман, Г.В. Надувная перемычка для горных выработок / Г.В. Мильман, А.П. Нечепуренко, В.Г. Коржов // Способы и средства ведения горноспасательных работ и предупреждения аварий в шахтах: сб. науч. тр. / Гос. Макеев. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти, Всесоюз. науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела. – Донецк, 1977. – Вып. 14. – С. 102–105.

31 Устройство парашютного типа для изоляции пожара в проветриваемой выработке / Б. Я. Синельников [и др.] // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / Науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела. – Донецк, 1994. – С. 41–45.

32 Руководство по применению вентиляционной парашютной перемычки при ликвидации подземных аварий / Всесоюз. науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела. – Донецк, 1983. – 23 с.

33 Кайдаш, З. Современные технические средства, содействующие контролю и управлению горноспасательными работами / З. Кайдаш // Горный информ.-аналит. бюл. – М., 2005. – № 2. – С. 301–309.

34 Горбатов, В.А. Исследование эффективности пылевых и водяных заслонов для снижения динамической нагрузки на взрывоустойчивые перемычки /

В.А. Горбатов, И.М. Васенин, В.Г. Игишев, А.Ф. Син // Горный информ.-аналит. бюл. – М., 2005. – № 1. – С. 34–38.

35 Абинов, А.Г. Исследование параметров взрыва метанопылевоздушных смесей и совершенствование средств гашения ударных волн в горных выработках угольных шахт : дис. ...канд. техн. наук : 05.26.01 / Абинов Анатолий Георгиевич. – Караганда, 1984. – 183 с.

36 Тушение подземных пожаров на угольных шахтах / Г.Г. Соболев [и др.]. – М.: Недра, 1977. – 248 с.

37 А. с. 1033774 СССР А Е 21 F 11/00. Способ возведения взрывоустойчивых перемычек / В.Л. Рычка, В.К. Крикуненко, А.С. Омельченко, Г.Ф. Денисова (Всесоюз. науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела). – № 3416341/22-03; заявл. 02.04.82; опубл. 07.08.83, Бюл. № 29. – 6 с.

38 СОУ 10. 1- 00174102-016: 2011. Вентиляційні, ізолюючі та вибухостійкі перемички при ліквідації аварій у вугільних шахтах. Конструкція, матеріали та технологія зведення. – Київ, 2012. – 55 с.

39 К вопросу о баррикадных перемычках / И.А. Пономарев [и др.] // Борьба с авариями в шахтах. – Кемерово: Кемеров. кн. изд-во, 1970. – Вып. 2. – С. 47–51.

40 Пефтибай, Г.И. Параметры барьерной перемычки для изоляции пожарных участков / Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, Е.В. Курбацкий // Науч. вестн. НИИГД «Респиратор». – 2017. – № 2 (54). – С. 78–88.

41. Учебник подземного горноспасателя / В.А. Горбатов, В.В. Мячин, С.А. Шаров, Э.А. Иголинский . Т. 2. – Новокузнецк, 2004. – 485 с.

42 А. с. 1807216 СССР А1 Е 21 F 1/14, 5/00. Шахтная взрывоустойчивая перемычка «Лотос» / В.А. Бойко, Ю.Г. Анцыгин, Н.В. Шибка, А.С. Ищенко, С.Б. Микрюков (Днепропетров. горный ин-т им. Артема). – № 4916313/03; заявл. 21.12.91; опубл. 07.04.93, Бюл. № 13. – 3 с.

43 Основные технологические параметры приготовления и перекачивания быстротвердеющих растворов / А.С. Омельченко, Г.И. Пефтибай,

Э.Г. Чайковская, Н.П. Диденко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / Науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела. – Донецк, 2002. – С. 110–114.

44 Возведение перемычек в обводненных горных выработках / Н.В. Каледин, Г.И. Пефтибай, А.С. Омельченко, В.М. Медгаус // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / Науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела «Респиратор». – Донецк, 2005. – С. 22–30.

45 Пефтибай, Г.И. Устойчивость безопалубочных перемычек / Г.И. Пефтибай // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / Науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела «Респиратор». – Донецк, 2004. – Вып. 41. – С. 93–97.

46 Пашковський, П.С. Технологія дистанційного заповнення пустот у гірничих виробках / П.С. Пашковський, Г.І. Пефтібай // Уголь України. – 2012. – № 7. – С. 19–22.

47 Агеев, В.Г. Определение технологических параметров возведения перемычек / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай, Э.Г.Чайковская // Уголь Украины. – 2014. – № 6. – С. 32–36.

48 Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) : справ. / под общ. ред. А.В. Ферронской. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 488 с.

49 Гипсовые вяжущие вещества / Г.И. Пефтибай, Э.Г. Чайковская, А.М. Луганский, Н.А. Выпирайло // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / Науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела «Респиратор». – Донецк, 2010. – Вып. 47. – С. 63–68.

50 Пефтибай, Г.И. Применение современных материалов для возведения изолирующих взрывоустойчивых сооружений / Г.И. Пефтибай, Э.Г. Чайковская, А.М. Луганский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / Науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела «Респиратор». – Донецк, 2010. – Вып. 47. – С. 25–34.

51 Пефтибай, Г.И. Требования к материалам для возведения изолирующих сооружений в угольных шахтах / Г.И. Пефтибай // Горноспасательное дело: сб.

науч. тр. / Науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела «Респиратор». – Донецк, 2003. – С. 36–44.

52 Каледин, Н.В. Современные материалы для возведения гидромеханическим способом изолирующих сооружений в шахте / Н.В. Каледин, Г.И. Пефтибай, Э.Г. Чайковская // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / Науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела «Респиратор». – Донецк, 2009. – Вып. 46. – С. 42–50.

53 Современные материалы для возведения гидромеханическим способом изолирующих сооружений в шахте / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай, Э.Г. Чайковская, Н.А. Выпирайло : XXIV Международ. науч.-практ. конф. по проблемам пожарной безопасности, посвящ. 75-летию создания ин-та : тезисы докл. Ч. 3. – М.: ВНИИПО, 2012. – С. 365–367.

54 Ружинский, С. И. Ускорители схватывания и твердения в технологии бетонов / С. И. Ружинский // Популярное бетоноведение. – 2005. – № 1. – С. 2–76.

55 Синельников, В.В. Современные технологии возведения взрывоустойчивых перемычек в горных выработках / В.В. Синельников // Глюкауф. – 2010. – № 2(3). – С. 75.

56 Булат, А.Ф. К выбору строительных смесей для горных технологий / А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, Л.В. Левченко // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. механики им. Н.С. Полякова. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 61. – С. 27–41.

57 Цементная сухая смесь «Барьер» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kps-t.ru/index.php?id=42>. – (Дата обращения: 02.05.2019).

58 Цементная сухая смесь «Распор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kps-t.ru/index.php?id=41>. – (Дата обращения: 02.05.2019).

59 Нургалиев, Е.И. Технология возведения монолитных взрывоустойчивых перемычек с применением минеральной смеси «УГМ» // Ежегод. молодеж. конф. ИУ СО РАН – 2015: сб. тр. конф., Кемерово, 16-17 апреля 2015 г. / Ин-т угля

Сибир. отд-ния РАН. [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые дан. – Кемерово: Ин-т угля СО РАН, 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 59–70.

60 Цементная смесь «Текфом» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.stroy-union.ru/i\\_store/item\\_765240/cementnaya-smes-tefkom.html](http://www.stroy-union.ru/i_store/item_765240/cementnaya-smes-tefkom.html). – (Дата обращения: 02.05.2019).

61 Цементная смесь «Текхард» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.stroy-union.ru/i\\_store/item\\_765105/cementnaya-smes-tekhard.html](http://www.stroy-union.ru/i_store/item_765105/cementnaya-smes-tekhard.html). – (Дата обращения: 02.05.2019).

62 Продукты фирмы «Минова» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minovaru.com/produktsiya/gornoe-delo/tsementnye-smesi2/>. – (Дата обращения: 02.05.2019).

63 Пат. 2251001 Российская Федерация, МПК E21 F17/103. Состав для возведения изолирующих сооружений / Игишев В.Г. [и др.]; № 2004101000/03; заявл. 12.01.2004; опубл. 27.07.2005, Бюл. № 12. – 4 с.

64 Берасит-Крепль – сухая минерально-цементная смесь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://biz-gid.ru/products?q=%E1%E5%F0%E0%F1%E8%F2&Submit=%CF%EE%E8%F1%EA>. – (Дата обращения: 02.05.2019).

65 Технология строительства перемычек и испытания параметров на взрывоустойчивость для их применения при изоляции пожаров и ликвидированных выработок. Результаты испытаний и технология строительства перемычек: Проект.-испыт. документация [Ксерокопия] / Глав. ин-т горного дела, Катовице, Польша; Казимер Лебецки, Павел Кржыстолик. – 1996-1997. – 7 с.

66 Инструкция по применению цементной смеси ТЕКБЛЕНД в подземных условиях рудников и угольных шахт : утв. генер. директором ООО «Минова ТПС» 20 декабря 2007 г. / ООО «Минова ТПС». – Кемерово, 2007. – 26 с.

67 СОУ 10.1.00174102-022:2012. Шахтні вибухостійкі споруди, що ізолюють. Загальні технічні вимоги. – Київ, 2013. – 64 с.

68 Пефтибай, Г. И. Быстротвердеющие зольно-цементные и шлако-цементные смеси для возведения взрывоустойчивых перемычек / Г. И. Пефтибай, Н. А. Галухин, Е. В. Курбацкий // Науч. вестн. НИИГД «Респиратор». – 2017. – № 4 (54). – С. 70–81.

69 Агеев, В.Г. Расчет конструктивных параметров оборудования для возведения изолирующих сооружений гидромеханическим способом в шахтах / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай, Э.Г. Чайковская. – Науч. вестн. УкрНИИПБ. – 2013. – № 1 (27). – С. 212–218.

70 Пенобетонный насос Mono WT 820 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minovaru.com/produksiya/gornoe-delo/oborudovanie-i-komplektuyushchie/>. – (Дата обращения: 02.05.2019).

71 Пат. 55805 Україна, МПК В28С, 5/14. Пристрій для приготування і нагнітання швидкотверднучих розчинів / Калєдін М.В., Омельченко А.С., Пефтібай Г.І., Медгаус В.М, Тельпнер Л.М.; власник патенту Науково-дослідний інститут гірничорятувальної справи та пожежної безпеки. – № 2002065307; заявл. 27.06.2002; опубл. 15.09.2006, Бюл. № 9. – 4 с.

72 Омельченко, А.С. Новое оборудование для возведения изолирующих сооружений в шахтах / А.С. Омельченко, Г.И. Пефтибай, Е.И. Бржевский // Уголь Украины. – 2003. – № 1. – С. 40–41.

73 Пефтибай, Г.И. Новое оборудование для возведения изолирующих сооружений в угольных шахтах / Г.И. Пефтибай // Пути повышения безопасности горных работ в угольной отрасли : тезисы докл. науч.-практ. конф. – Макеевка, 2004. – С. 385–386.

74 Пефтибай, Г.И. Новое оборудование для возведения изолирующих сооружений на горнодобывающих предприятиях при ведении аварийно-спасательных работ / Г.И. Пефтибай // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : сб. тезисов докл. III Международ. науч.-практ. конф. В 3 т. Т. 2. – Минск, 2005. – С. 136–137.

75 Агеев, В.Г. Пути совершенствования оборудования для изоляции участков при пожарах в шахтах / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай // Науч. вест. УкрНИИПБ. – 2012. – № 1 (25). – С. 60–67.

76 Пефтибай, Г.И. Эффективные средства возведения изолирующих сооружений в подземных выработках при ведении аварийно-спасательных работ / Г.И. Пефтибай // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи (Пожежна безпека – 2005): матеріали VII Всеукраїнської наук.-практ. конф. – Київ: УкрНДІПБ МНС України, 2005. – С. 248–250.

77 Установка смесительно-нагнетательная Монолит-1М [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kezsrb.ru/produkcija/serijnaya-produkcija/rozharotushashhaya-tekhnika/monolit/>. – (Дата обращения: 02.05.2019).

78 Бетононасос БН-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stankomasch.ru/catalog/product/80/>. – (Дата обращения: 02.05.2019).

79 Пенобетонный насос НПБС-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ekos-s.ru/products/?SECTION\\_ID=7&ELEMENT\\_ID=30](http://www.ekos-s.ru/products/?SECTION_ID=7&ELEMENT_ID=30). – (Дата обращения: 02.05.2019).

80 Установка UELMAT S30L-E401L (Uelzener Maschinen GmbH, Германия) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uelzener-ums.de/index.php?id=141>. – (Дата обращения: 02.05.2019).

81 Пенобетонный насос ПБН-15КПС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kps-t.ru/index.php?id=44>. – (Дата обращения: 02.05.2019).

82 Насосный агрегат КТХ 80 P2 V [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.koexpro.cz/new/koex/?menu=katalog&lang=ru&id=161&sub=3&sub2=2>. – (Дата обращения: 02.05.2019).

83 Агеев, В.Г. Оптимизация конструктивных элементов оборудования для возведения изолирующих сооружений в шахтах с учетом основных технологических параметров / В.Г. Агеев, Г. И. Пефтибай // Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності оперативно-рятувальних

підрозділів: збірник тез Всеукраїнської наук.-прак. конф. – Харків: НУЦЗУ, 2013. – С. 312–314.

84 Плотников, В.М. Использование гипсовых перемычек в шахтах / В.М. Плотников. – Караганда: КазгосИНТИ, 1994.– 43 с.

85 Расчет несущей способности монолитных перемычек при воздействии динамических нагрузок / Н.В. Каледин, А.С. Омельченко, В.К. Крикуненко, Е.В. Курбацкий // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / Науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела. – Донецк, 2000. – С. 17–26.

86 Чеховских, А.М. Генерирование воздушных ударных волн в трубах для исследований моделей шахтных сооружений / А.М. Чеховских // Горноспасательное дело / Всесоюз. науч.-исследоват. ин-т горноспасат. дела. – Донецк, 1972. – Вып. 5. – С. 70–75.

87 Соболев, Г.Г. Горноспасательное дело / Г.Г. Соболев. – М.: Недра, 1979.– 432 с.

88 Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Д. Гудьер. – М.: Наука, 1995. – 576 с.

89 Михлин, С.Г. Вариационные методы в математической физике / С.Г. Михлин. – М.: Гостехиздат, 1997. – 422 с.

90 Методы решения краевых задач в горной геомеханике : моногр. / под общ. ред. И.А. Ефремова, И.Ф. Марийчука. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 291 с.

91 Костенко, В.К. Геомеханические и аэрологические основы предупреждения эндогенных пожаров в труднодоступных местах угольных шахт : дис. ... д-р техн. наук : 21.06.02 / Костенко Виктор Климентьевич. – Макеевка, 2004. – 353 с.

92 Новиков, А.О. Теоретические основы оценки напряженно-деформированного состояния армированного анкерами массива горных пород вокруг выработки / А.О. Новиков // Науковий вісник Національного гірничого університету / Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 31–38.

93 Новиков, А.О. Развитие научных основ управления устойчивостью выработок с использованием анкерных систем : дис. ... д-р техн. наук : 05.15.02 / Новиков Александр Олегович. – Донецк, 2011. – 479 с.

94 Шестопалов, И. Н. Обоснование параметров рамно-анкерной крепи для поддержания подготовительных выработок глубоких шахт : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.02 / Шестопалов Иван Николаевич. – Донецк, 2014. – 198 с.

95 Купенко, И.В. К вопросу о расчете анкерно-бетонной крепи вертикальных стволов / И.В. Купенко, И.Ф. Марийчук, Д.А. Мозолевский // Проблема недропользования : международ. форум-конкурс молодых ученых 20-22 апреля 2016 г.: сб. науч. тр. Ч. 1. – СПб., 2016. – С. 132–134.

96 Напряженно-деформированное состояние массива горных пород подземных объектов угольных шахт : моногр. / под общ. ред. С.В. Борщевского, И.Ф. Марийчука; Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования «Донец. нац. техн. ун-т». – Донецк, 2017. – 275 с.

97 Моделирование физических процессов в горном производстве / С.В. Борщевский [и др.]. – Донецк: ООО «Цифровая типография», 2016. – 250 с.

98 Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1996. – 343 с.

99 Шерман, Д.И. О напряжениях в плоской весомой среде с двумя одинаковыми симметрично расположенными круговыми отверстиями / Д.И. Шерман // Прикладная математика и механика. – 1991.– Т. 15, вып. 3. – С. 94–99.

100 Космодамианский, А.С. Распределение напряжений в изотропных многосвязных средах / А.С. Космодамианский : сб. науч. тр. / Донец. Гос. ун-т. – Донецк, 1992. – № 2. – С. 105–110.

101 Конструктивное решение монтажа проемных труб при возведении гидромеханическим способом изолирующих сооружений / Г.И. Пефтибай, В.Ф. Парашевин, Р.С. Глущенко, Д.Ф. Золотарева : XXIV Международ. науч.-

практ. конф. по проблемам пожарной безопасности, посвящ. 75-летию создания ин-та : тезисы докл. Ч. 3. – М.: ВНИИПО, 2012.– С. 360–62.

102 Лейдякин, Е.С. О нагревании изоляционных взрывоустойчивых перемычек / Е.С. Лейдякин, Н.Ю. Трошков, А.С. Ярош // Вестн. науч. центра по безопасности работ в угольной пром-сти. – 2016. – № 4. – С. 56–61.

103 Калякин, С.А. Предотвращение воспламенения взрывоопасной смеси в горных выработках дисперсной средой / С.А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах : сб. науч. тр. / Гос. Макеев. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Макеевка, 2006. – С. 88–97.

104 Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1991. – 824 с.

105 R.K. Zipf, M.J. Sapko, J.F. Brune. Explosion Pressure Design Criteria for New Seals in U.S. Coal Mines (2007). [<https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2007-144.pdf>]. Date accessed: June 2018.

106 W.B. Cybulski, J.H. Gruszka, P.A. Krzystolik. Research on firedamp explosions in sealed-off roadways (abstract in English and German; complete paper in German only). Proceedings of the 12th International Conference of Mine-Safety Research Establishments (Dortmund, Germany, September 11-15, 1967). Vol. I, paper No. 22 (1967).

107 R.A. Gates, R.L. Phillips, J.E. Urosek, C.R. Stephan, R.T. Stoltz, D.J. Swentosky, et al. Report of investigation, fatal underground coal mine explosion, January 2, 2006. Sago mine, Wolf Run Mining Company, Tallmansville, Upshur County, West Virginia, ID No. 46-08791. Arlington, VA: U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration (2007). [<https://www.cdc.gov/Mmwr/preview/mmwrhtml/mm5751a3.htm>]. Date accessed: June 2018.

108 W. Bartknecht. Explosionsschutz: Grundlagen und Anwendung. Berlin, Germany: Springer-Verlag (1993).

109 S.R. Kattenbraker. Explosion at Big Ridge mine portal #2, February 1, 2002. Memorandum of July 2, 2002, for the record from Steven R. Kattenbraker, Mine Safety and Health Administration (2002). [<https://www.cdc.gov/niosh/nioshtic-2/20027619.html>]. Date accessed: June 2018.

110 T.E. Light, R.C. Herndon, A.R. Jr. Guley, G.L. Cook, M.A. Odum, R.M. Jr. Bates, et al. Report of investigation, fatal underground coal mine explosion, May 20, 2006. Darby mine No. 1, Kentucky Darby LLC, Holmes Mill, Harlan County, Kentucky, ID No. 15-18185. Arlington, VA: U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration (2007). [<https://usminedisasters.miningquiz.com/saxsewell/darby.htm>]. Date accessed: June 2018.

111 Ross E Jr., Schultz MJ [1996], Report of investigation (underground coal mine). Noninjury coal mine explosion. Mine No. 1 (I.D. No. 46-07273), Oasis Contracting, Inc., Quinland, Boone County, West Virginia, May 15, 1996, and June 22, 1996. U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration.

112 Rutherford JW, Painter RJ, Urosek JE, Stephan CR, Dupree WA Jr. [1993], Report of investigation, underground coal mine explosion, Blacksville No. 1 mine, I.D. No. 46-01867. Consolidation Coal Company, Blacksville, Monongalia County, West Virginia, March 19, 1992. Arlington, VA: U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration.

113 Scott DS, Stephan CR [1997], Accident investigation report (underground coal mine). Noninjury methane explosion. Oak Grove mine (I.D. No. 01-00851), U.S. Steel Mining Company L.L.C., Adger, Jefferson County, Alabama, July 9, 1997. Birmingham, AL: U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration.

114 C.D. Hornsby, P. Hallam, J.A. Allan, G. Walker, J.C. Boyle, S.J. Criddle, et al. Sealing off fires underground. Memorandum from the Committee of the Institution of Mining Engineers, U.K. (1985).

115 K. Lebecki, Z. Kajdasz, T. Napieracz, K. Cybulski. Tests on bulkheads resistance to methane explosion. Proceedings of the 28th International Conference of Safety in Mines Research Institutes (Sinaia, Romania, June 7-11, 1999). Vol. III.

Petroșani, Romania: National Institute for Mining Safety and Explosion Proof Protection (1999), pp. 5-19.

116 J. Michelis, W. Kleine. Development of components designed to resist explosion pressures of approximately 1 MPa for use in ventilation structures in underground mines. Proceedings of the 23rd International Conference of Safety in Mines Research Institutes Washington, DC, September 11-15, 1989). Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines (1989), pp. 859-857.

117 J.W. Oberholzer, B.J. Lyne. A review of the requirements for the testing of the strength of ventilation structures to be used in Queensland mines. Proceedings of the Queensland Mining Industry Health and Safety Conference (2002), pp. 105-112.

118 M.J. Sapko, E.S. Weiss, S.P. Harteis. Methods for evaluating explosion-resistant ventilation structures. Gillies ADS, ed. Proceedings of the Eighth International Mine Ventilation Congress (Brisbane, Queensland, Australia, July 6-8, 2005). Carlton, Victoria, Australia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy (2005), pp. 211-219.

119 E.S. Weiss, K.L. Cashdollar, M.J. Sapko. Evaluation of Explosion-Resistant Seals, Stoppings, and Overcast for Ventilation Control in Underground Coal Mining (2002). [<https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/ri9659.pdf>]. Date accessed: June 2018.

120 H.L. Willett, J. Blunt, A.J.G. Coulshed, F.V. Tideswell. Sealing off fires underground. Memorandum from the Committee of the Institution of Mining Engineers, U.K. (July 4, 1962) (1962), pp. 709-760.

121 D.E. Brookes, J.R. Leeming. The performance of explosion proof stoppings. Proceedings of the 28th International Conference of Safety in Mines Research Institutes (Sinaia, Romania, June 7–11, 1999). Vol. I. Petroșani, Romania: National Institute for Mining Safety and Explosion Proof Protection (1999), pp. 59–69.

122 D.E. Brookes, A.M. Nicol. Design criteria for explosion-proof stoppings: test on large-scale stoppings. Buxton, U.K.: Health & Safety Laboratory, Dust Explosion Section, ref DE/97/09 (1997).

123 Wiemann W [1987], Influence of temperature and pressure on the explosion characteristics of dust/air and dust/air/inert gas mixtures. In: Cashdollar KL, Hertzberg M, eds. Industrial dust explosions. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM), Special Technical Publication (STP) 958.

124 R. Gallagher. Research needs in regard to design, performance criteria, construction, maintenance assessment and repair of coal mine seals. Proceedings of the 31st International Conference of Safety in Mines Research Institutes (Brisbane, Queensland, Australia, October 2-5, 2005). Brisbane, Queensland, Australia: Safety in Mines Testing and Research Station (Simtars) (2005), pp. 236-242.

125 Mutton I. V., Remennikov A. Designing explosion rated ventilation seals for coal mines using high-fidelity physics-based computer modelling / Aziz (ed.) // 10<sup>th</sup> Underground Coal Operator's Conference. University of Wollongong & the Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2010, pp. 312-325.

126 Brake D. J. Fire modeling in underground mines using Ventsim Visual Ventfire Software // The Australian Mine Ventilation Conference. Adelaide, SA, 1-3 July, 2013, pp. 265-276.

127 R.K. Zipf, V.N. Gamezo, M.J. Sapko, W.P. Marchewka, et al. Methane-Air Detonation Experiments at NIOSH Lake Lynn Laboratory. [<https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/madea.pdf>]. date accessed: June 2018.

128 DJF Consulting Limited. Final Report Explosion Proof Stoppings (Or Seals) In Underground Coal Mining for the Underground Coal Mining Safety Research Collaboration (UCMSRC) administered by NRCAN-CANMET Mining & Mineral Science Laboratories. [<http://www.ugcoal.ca/projects/Explosion%20Proof%20Stoppings/stoppings.pdf>]. Date accessed: June 2007.

129 Прочность. Устойчивость. Колебания : справ. Т.1 / под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1998. – 832 с.

130 ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. – Введ. 1983-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 22 с.

131 Прочностные характеристики цементно-шлакового материала взрывоустойчивой перемычки / Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, И.Ф. Марийчук, Н.И. Василенко // Горный информ.-аналит. бюллетень (науч.-техн. журн). – 2018. – Спец. вып. 49: Подземная угледобыча XXI век-2. – С. 432–442.

132 Пефтибай, Г.И. Быстротвердеющие смеси с использованием промышленных отходов / Г.И. Пефтибай // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: сб. материалов XII Международ. науч.-практ. конф. 22-23 ноября 2017 г. / КузГТУ [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. (25 Мб). – Кемерово, 2017. – 1CD-диск, без сопровод. документации. – Систем. требования: MS Windows XP; ОЗУ 1 Гб для MS Windows XP / 2 Гб для MS Windows Vista / 7 / 8; частота процессо-ра не менее 1,0 ГГц; 3D-видеоадаптер с памятью 128 МБ, совместимый с DirectX® 9.0c; DirectX® 9.0c; Интернет-браузер Microsoft Internet Explorer 10 / Mozilla Firefox 27 / Google Chrome 32 / Opera 18 с включенной поддержкой Javascript; ПО для чтения файлов PDF-формата; CD-ROM дисковод; SVGA-совместимая видеокарта; мышь. – Секция 1. Промышленная безопасность в современных условиях, 142-1.

133 Пефтибай, Г.И., Галухин, Н.А. Быстротвердеющие цементно-минеральные смеси для возведения взрывоустойчивых шахтных сооружений / Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин // Пожарная и аварийная безопасность : сб. материалов XII междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году граждан. обороны, Иваново, 29-30 ноября 2017 г. / ФГБОУ ВО Иванов. пожарно-спасат. академия ГПС МЧС России. – Иваново, 2017. – С. 537–540.

134 Пефтибай, Г.И. Малокомпонентные быстротвердеющие цементные смеси для возведения взрывоустойчивых перемычек / Г.И. Пефтибай // Вестн. Науч. центра ВостНИИ по промышл. и эколог. безопасности в горной отрасли. – 2018. – № 1. – С. 47–52.

135 Пашковский, П.С. Влияние тепловыделения цементных материалов на кинетику ранней прочности взрывоустойчивой перемычки // П.С. Пашковский,

Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин // Науч. вест. НИИГД «Респиратор». – 2019. – № 1 (56). – С. 47–56.

136 Морозов, В.В. Методы обработки результатов физического эксперимента / В.В. Морозов, Б.Е. Сobotковский, И.Л. Шейнман. – СПб. : Изд-во СПбГТУ «ЛЭТИ», 2004. – 64 с.

137 Основы моделирования геомеханических процессов : моногр. / под общ. ред. И.А. Ефремова, И.Ф. Марийчука. – Донецк: Ноулидж, 2012. – 262 с.

138 Пефтибай, Г.И. Физическое моделирование воздействия горного давления на взрывоустойчивую перемычку / Г.И. Пефтибай, И. Ф. Марийчук, И. Н. Шестопалов, В.Е. Нефедов // Проблемы горного давления. – 2017. – № 1 (32). – С. 20–31.

139 Агеев, В.Г. Моделирование воздействия горного давления на взрывоустойчивую перемычку / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай, И.Ф. Марийчук // Науч. вестн. НИИГД «Респиратор». – 2018. – № 2 (55). – С. 44–52.

140 Пефтибай, Г.И. Определение основных параметров каркасных опалубок многократного использования для возведения изолирующих сооружений / Г.И. Пефтибай, В.А. Чернышев, Э.Г. Чайковская // Науч. вестн. НИИГД «Респиратор». – 2016. – № 3 (53). – С. 103–111.

141 Беляев, Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М: Физматгиз, 1976. – 607 с.

142 Пелех, Б.Л. Теория оболочек с конечной сдвиговой жесткостью / Б.Л. Пелех. – Киев: Наукова думка, 1973. – 236 с.

143 Амбарцумян, С.Н. Теория анизотропных оболочек / С.Н. Амбарцумян. – М.: Физматлит, 1961. – 384 с.

144 Агеев, В.Г. Математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием горного давления без учета действия воздушной ударной волны / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай // Вестн. Науч. центра ВостНИИ по промышл. и эколог. безопасности в горной отрасли. – 2017. – № 4. – С. 68–74.

145 Агеев, В.Г. Математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием ударных волн / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай // Науч. вестн. НИИГД «Респиратор». – 2018. – № 3 (55). – С. 7–18.

146 Пефтибай, Г.И. Параметры шахтной взрывоустойчивой перемычки из материалов на основе цементного вяжущего / Г.И. Пефтибай // Вестн. Науч. центра ВостНИИ по промышл. и эколог. безопасности в горной отрасли. – 2018. – № 4. – С.24–30.

147 Ахмеднабиев, Р.М. Прочность бетонов армированных стальными волокнами / Р.М. Ахмеднабиев, О.И. Гутак // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по материалам XXXII междунар. науч.-практ. конф. / СибАК № 3 (28). – Новосибирск, 2014. – С 86–92.

148 Совершенствование эксплуатационных параметров оборудования для возведения изолирующих взрывоустойчивых перемычек в шахтах / П.С. Пашковский, Г.И. Пефтибай, Э.Г. Чайковская, Н.А. Выпирайло // XXIV Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам пожар. безопасности, посвящ. 75-летию создания ин-та : тезисы докл. Ч. 3. – М.: ВНИИПО, 2012. – С. 362–365.

149 Основные требования и средства технологического контроля возведения взрывоустойчивых перемычек / Е.В. Курбацкий, В.Л. Овчаренко, Г.И. Пефтибай, Э.Г. Чайковская : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. «Промышленная безопасность и вентиляция подземных сооружений в XXI столетии» / Донец. нац. техн. ун-т. – Донецк, 2015. – С. 3–10.

150 Повышение эффективности оборудования для возведения изолирующих сооружений гидромеханическим способом / Г.И. Пефтибай, И. Ф. Дикенштейн, В.А. Чернышев, Э.Г. Чайковская // Вестн. ИГЗД. – 2015. – Вып. 2(2). – С. 26–32.

151 Пефтибай, Г.И. Выбор типа расходомера воды для использования в смесительно-нагнетательных установках / Г.И. Пефтибай, В.А. Чернышев, Э.Г. Чайковская // Науч. вестн. НИИГД «Респиратор»: сб. науч. тр. / Гос. науч.-

исслед. ин-т горноспасат. дела, пожар. безопасности и граждан. защиты «Респиратор» МЧС ДНР. – Донецк, 2015. – Вып. 52. – С. 174–181.

152 Совершенствование оборудования для приготовления и перекачивания растворов при возведении взрывоустойчивых сооружений / Е.В. Курбацкий, Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, А.В. Чапкович // Современные проблемы охраны труда и аэрологии горных предприятий: сб. науч. тр. IV науч.-техн. конф. молодых ученых, студентов и аспирантов, 24 ноября 2016 года / Донец. нац. техн. ун-т. – Донецк, 2016. – С. 132–142.

153 Пефтибай, Г.И. Совершенствование технологии возведения взрывоустойчивых перемычек / Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, А.В. Чапкович // Современное состояние и перспективы дальнейшего развития системы гражданской обороны ДНР : материалы Первой Респ. науч. конф., посвящ. Дню граждан. обороны и образованию Акад. граждан. защиты МЧС ДНР 24-25 октября 2017 г. / Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования «Акад. граждан. защиты МЧС ДНР». – Донецк, 2017. – С. 406–412.

154 Машины непрерывного транспорта. – М.: Машиностроение, 1969. – 720 с.

155 Зенков, Р.Л. Машины непрерывного транспорта / Р.Л. Зенков, И.И. Ивашков, Л.Н. Колобов. – М.: Машиностроение, 1980. – 304 с.

156 Богород, А.А. Грузоподъемные и транспортные машины / А.А. Богород. – М.: Металлургия, 1980. – 416 с.

157 Пашковский, П.С. Повышение эффективности возведения взрывоустойчивых перемычек гидромеханическим способом в горных выработках шахт // П.С. Пашковский, Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин // Вестн. Акад. граждан. защиты. – 2019. – Вып. 2(18). – С. 78-86.

158 Агеев, В.Г. Дозирующее устройство для подачи воды в смесительно-нагнетательную установку / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, А.В. Еремин // Научн. вестн. НИИГД «Респиратор». – 2019. – № 1(56). – С. 7–16.

159 ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – Введ. 2012–10–01. – М.: МНТКС, 2012. – III, 18 с.

160 Методика определения экономической эффективности в угольной промышленности новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – М.: ЦНИИЭИуголь, 1979. – 120 с.

161 Методические указания по определению экономической эффективности использования в угольной промышленности новой техники, связанной с предупреждением и тушением подземных пожаров: утв. Минэнергопромом СССР от 28.11.1980. – М., 1981. – 114 с.

162 Рекомендации по ведению изоляционных работ на участках с осложнившимся пожаром с использованием смесей на основе цементных вяжущих: утв. МЧС ДНР 23.04.2019. – Донецк, 2020. – 39 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://respirator.dnmchs.ru/static/upload/respirator/activities/departments/NIOSS/РекомендацииНИИГД.pdf>. – (Дата обращения: 07.02.2022).

Приложение А

Министерство угольной промышленности Украины  
Государственная военизированная горноспасательная  
служба (ГВГСС)

ЧТВЕРЖДАЮ  
Первый заместитель  
начальника ГВГСС  
Д. В. Клименко  
16 декабря 1997 г.



ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на КОМПЛЕКТ ДЛЯ ПОДАЧИ РАСТВОРОВ

ТЗ 1929630008-97

Генеральный директор  
НПО "Респиратор"  
А. С. Чумак  
16 декабря 1997 г.



8.2. Разработчиком и изготовителем комплекта является НПО "Респиратор".

8.3. Головной образец комплекта подвергается предварительным и приемочным испытаниям.

8.4. Остальные комплекты подвергаются приемке ОТК.

### 9. МЕСТОНАХОЖДЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Подлинник – НПО "Респиратор"

Копии: № 1 – ГВГСС

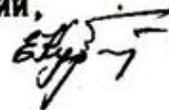
№2 и 3 – НПО "Респиратор"

Заместитель генерального директора  
НПО "Респиратор" по научной  
работе и производству



Н.В. Каледин

Заведующий отделом средств механизации,  
автоматики и связи (ОСМАС)



Е.В. Курбацкий

Заведующий лабораторией механизации  
горноспасательных работ ОСМАС



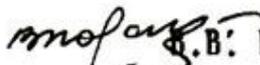
Г.И. Пештибай

Научный руководитель работы,  
с.н.с. ОСМАС



А.С. Омельченко

Заведующий отделом испытаний,  
стандартизации и сертификации (ОИСС)



С.В. Козаченко

Метролог



И.А. Потапенко

Нормоконтролер



В.И. Осадчий



10.12.2004

## Приложение Б

Министерство топлива и энергетики Украины  
Центральный Штаб государственной военизированной горноспасательной  
службы в угольной промышленности



**УТВЕРЖДАЮ**

Начальник ГВГСС

С.Н. Смоланов

27 03 2001 г.

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ПОДАЧИ РАСТВОРОВ

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ  
ТЗ 195Н-2001 (1920130048)

Генеральный директор  
НПО «Респиратор»



А.С. Чумак

20 2001 г.

Донецк-2001 г.

Таблица 9.1

Наименование документа	Организация, согласующая документацию	Организация, утверждающая документацию
Техническое задание	-	ГВГСС
Технические условия на единичное производство	ГВГСС	НПО "Респиратор"
Руководство по эксплуатации	ГВГСС	НПО "Респиратор"
Программа и методика приемочных испытаний	ГВГСС	НПО "Респиратор"

9.2 Разработчиком и изготовителем головного образца оборудования является НПО "Респиратор".

9.3 Головной образец оборудования подвергается предварительным и приемочным испытаниям.

## 10 МЕСТОНАХОЖДЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Подлинник – ЦШ ГВГСС

Копии: № 1, 2 и 3 – НПО "Респиратор"

Заместитель генерального директора  
НПО "Респиратор" по научной  
работе и производству



Н.В. Каледин

Заведующий отделом средств механизации,  
автоматики и связи (ОСМАС)



Г.И. Пefтибай

Заведующий лабораторией механизации  
горноспасательных работ ОСМАС



В.М. Медгаус

Научный руководитель работы,  
с.н.с. ОСМАС



А.С. Омельченко

Метролог



И.А. Потапенко

Нормоконтролер



В.И. Осадчий

## Приложение В

СТАНДАРТ МІНЕНЕРГОВУГІЛЛЯ УКРАЇНИ

---

**ВЕНТИЛЯЦІЙНІ, ІЗОЛЮЮЧІ ТА ВИБУХОСТІЙКІ  
ПЕРЕМИЧКИ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ АВАРІЙ  
У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ. КОНСТРУКЦІЯ, МАТЕРІАЛИ  
ТА ТЕХНОЛОГІЯ ЗВЕДЕННЯ  
СОУ 10.1-00174102-016:2011**

*Видання офіційне*

Київ  
2012

СОУ 10.1-00174102-016:2011

## ПЕРЕДМОВА

1. РОЗРОБЛЕНО: Науково-дослідний інститут гірничорятувальної справи та пожежної безпеки "Респіратор" (НДІГС "Респіратор")
2. РОЗРОБНИКИ: В.Агеєв, канд. техн. наук; П.Пашковський, д-р техн. наук; В.Лебедев, канд. техн. наук; Г.Пефтібай
3. ЗАТВЕРДЖЕНО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ Міністерства енергетики та вугільної галузі від 29.02.2012 р. № 134
4. УВЕДЕНО ВПЕРШЕ
5. ЗАРЕЄСТРОВАНО: Державне підприємство "Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації і якості" (ДП "УкрНДНЦ") від 11.06.2012 р. № 32595752/2244
6. ПОГОДЖЕНО: Державна служба гірничого нагляду та промислової безпеки від 04.11.2011 № 1/02-2-3а/8384; Центральний штаб Державної воєнізованої гірничорятувальної служби від 13.12.2011 № 03-1/1238; ДП Інститут "УкрНДПроект" від 03.11.2011 № 216-416
7. Термін перевіряння: 2016 рік

---

Відтворювати документ повністю або частково на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу Міністерства енергетики та вугільної галузі заборонено.

II

## Приложение Г

СОУ 10.1. 00174102-022:2012

СТАНДАРТ МІНЕНЕРГОВУГІЛЛЯ УКРАЇНИ

---

**ШАХТНІ ВИБУХОСТІЙКІ СПОРУДИ, ЩО ІЗОЛЮЮТЬ.**

**ЗАГАЛЬНІ ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ**

СОУ 10.1.00174102-022:2012

*Видання офіційне*

Київ

2012

СОУ 10.1. 00174102-022:2012

## ПЕРЕДМОВА

1. РОЗРОБЛЕНО: Науково-дослідний інститут гірничорятувальної справи та пожежної безпеки «Респіратор» (НДІГС «Респіратор»)
2. РОЗРОБНИКИ: В. Агеєв, канд. техн. наук; П. Пашковський, д-р техн. наук; С. Греков, д-р техн. наук; Г. Пефтібай
3. ЗАТВЕРДЖЕНО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 17.12.2012 р. № 1013
4. УВЕДЕНО ВПЕРШЕ
5. ЗАРЕЄСТРОВАНО: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») від 04.03.2013 р. № 32595752/2299
6. ПОГОДЖЕНО: Департамент промислової безпеки, охорони праці, цивільного та фізичного захисту, трудової та соціальної політики Міненерго вугілля України від 16.11.2012 р. № 14/02-2047; Державна служба гірничого нагляду та промислової безпеки України (Держгірпромнагляд України) від 05.12.2012 р. № 10948/0/2-3а/6/12; Центральний штаб ДВГРС Міненерговугілля України від 19.11.2012 р. № 04/1160; ДП «УКРНДПРОЕКТ» від 29.10.2012р. № 216-325.

---

©

Відтворювати, тиражувати чи розповсюджувати документ повністю або частково на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу Міненерговугілля України не дозволяється.

II

## Приложение Д

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики  
(МЧС ДНР)

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор»  
(НИИГД «Респиратор»)

### УТВЕРЖДАЮ

Министр по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, генерал-майор службы гражданской защиты



А.А. Кострубицкий

2015 г.

### Техническое задание

на ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКУЮ РАБОТУ (ОКР)

**РАЗРАБОТАТЬ КОМПЛЕКТ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ПЕРЕКАЧИВАНИЯ БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИХ РАСТВОРОВ ВО ВРЕМЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ИЗОЛИРУЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ В КАНАЛАХ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ**

ТЗ 11512048-2015

От заказчика  
СОГЛАСОВАНО  
Директор Департамента  
Государственной военизированной  
горноспасательной службы МЧС ДНР

Ю. А. Зиновьев  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.



От исполнителя

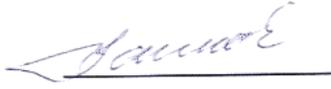
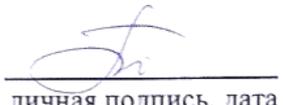
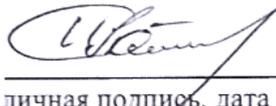
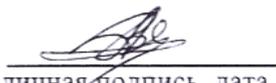
Директор  
НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР,  
канд. техн. наук

В.Л. Агеев  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.



## 12.4 Местонахождение ТЗ:

- 1-й экземпляр – Департамент ГВГСС;
- 2-й и 3-й экземпляры – НИИГД «Респиратор».

Первый заместитель директора НИИГД «Респиратор» по научной работе, д.т.н.	 личная подпись, дата	П.С. Пашковский
Руководитель работы, начальник ОСМАС	 личная подпись, дата	Г.И. Пештибай
Начальник НТОИСМ – главный мет- ролог НИИГД "Респиратор"	 личная подпись, дата	И.А. Потапенко
Ответственные исполнители:		
научный сотрудник ОСМАС, к.т.н.	 личная подпись, дата	В.А. Чернышев
научный сотрудник ОСМАС	 личная подпись, дата	А.В. Чапкович

## Приложение Е

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой народной республики  
(МЧС ДНР)

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор»  
(НИИГД «Респиратор»)

### УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель Министра по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики



А.М. Богомаз

2015 г.

**Техническое задание**  
на ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКУЮ РАБОТУ (ОКР)  
**КАРКАСНЫЕ ОПАЛУБКИ МНОГОРАЗОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**  
**ДЛЯ БЫСТРОВЗВОДИМЫХ ИЗОЛИРУЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ**  
**ТЗ 11512049-2015**

От заказчика

СОГЛАСОВАНО

Начальник Управления

Государственной военизированной  
горноспасательной службы МЧС ДНР



Ю. А. Зиновьев

« 14 » 05. 2015 г.

От исполнителя

Директор НИИГД

«Респиратор» МЧС ДНР



В. Г. Агеев

«    » 2015 г.



## 12.2 Местонахождение ТЗ:

- 1-й экземпляр – МЧС;
- 2-й экземпляр – Управление ГВГСС;
- 3-й экземпляр – НИИГД «Респиратор».

Первый заместитель директора  
НИИГД «Респиратор» по  
научной работе



П.С. Пашковский

личная подпись дата

Руководитель работы,  
начальник ОСМАС



Г.И. Пештибай

личная подпись дата

Начальник НТОИСМ – главный мет-  
ролог НИИГД "Респиратор"



И.А. Потапенко

личная подпись дата

Ответственные исполнители:

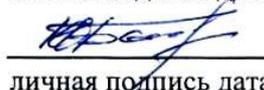
научный сотрудник ОСМАС



А.В. Чапкович

личная подпись дата

инженер 1 категории ОСМАС



Ю.В. Богатырев

личная подпись дата

## Приложение Ж

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий  
Донецкой Народной Республики (МЧС ДНР)

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОГО ДЕЛА, ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
И ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ «РЕСПИРАТОР»  
(НИИГД «Респиратор»)

УТВЕРЖДАЮ

Министр по делам гражданской  
обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий  
стихийных бедствий  
Донецкой Народной Республики  
генерал-лейтенант службы  
гражданской защиты



А. А. Кострубицкий

«23 апреля» 2019 г.

## РЕКОМЕНДАЦИИ

по ведению изоляционных работ на участках с осложнившимся пожаром  
с использованием смесей на основе цементных вяжущих

СОГЛАСОВАНО

Директор Департамента  
Государственной военизированной  
горноспасательной службы  
МЧС ДНР



С.А. Коробкин

«29» марта 2019 г.

Врио директора НИИГД  
«Респиратор» МЧС ДНР  
д-р техн. наук, проф.



П.С. Папковский

«27» февраля 2019 г.

Донецк 2019

Утверждено  
Министерством по делам  
гражданской обороны,  
чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий  
стихийных бедствий  
Донецкой Народной Республики  
23.04.2019

## **РЕКОМЕНДАЦИИ**

по ведению изоляционных работ на участках  
с осложнившимся пожаром  
с использованием смесей на основе цементных вяжущих

Донецк  
2020

УДК 622.868.42:691.54

Рекомендации по ведению изоляционных работ на участках с осложнившимся пожаром с использованием смесей на основе цементных вяжущих: утв. МЧС ДНР 23.04.2019. – Донецк, 2020. – 39 с.

Приведены рецептуры цементно-шлаковой и цементно-зольной смесей с ускорителем твердения хлористым кальцием. Описана технология изготовления сухих смесей, полностью готовых к применению в шахте, перечислено необходимое оборудование, изложены математические соотношения для определения расходов компонентов смеси, массы сухого материала, закладываемого в смеситель, расхода воды, массы раствора и сухого вещества. Предложено использование пневмо-нагнетательного оборудования для приготовления и перекачивания цементных растворов. Разработана номограмма для оперативного определения толщины взрывоустойчивой перемычки в зависимости от глубины возведения, сечения выработки, перепада температур.

Рекомендации предназначены для специалистов горноспасательной службы, работников предприятий угольной промышленности.

Составители: В.Г. Агеев, Н.А. Галухин, Д.В. Захаров, С.А. Коробкин, П.С. Пашковский, Г.И. Пефтибай, Ю.Н. Пономарев, В.А. Спичка, И.А. Сурмилов

Производственно-практическое издание

**Рекомендации по ведению изоляционных работ  
на участках с осложнившимся пожаром  
с использованием смесей на основе цементных вяжущих**

Ответственный за выпуск

Г.И. Пефтибай

Подписано в печать 18.03.2020. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура таймс. Печать лазерная. Усл. печ. л. 2,5. Тираж 20 экз. Заказ № 7

---

НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

## Приложение И

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики  
(МЧС ДНР)

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОГО ДЕЛА, ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И  
ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ «РЕСПИРАТОР»  
(НИИГД «РЕСПИРАТОР»)

УТВЕРЖДАЮ

Министр по делам гражданской  
обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий

стихийных бедствий  
Донецкой Народной Республики,  
генерал-лейтенант службы гражданской  
защиты



*[Signature]*  
А.А. Кострубицкий

«5» октября 2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на

УСТРОЙСТВО ДОЗИРОВАНИЯ ВОДЫ ДЛЯ  
СМЕСИТЕЛЬНО-НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ  
ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ИЗОЛИРУЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ  
ТЗ 11912013-2020

СОГЛАСОВАНО

Директор Департамента  
Государственной военизированной  
горноспасательной службы МЧС ДНР

Врио директора  
НИИГД «РЕСПИРАТОР»,  
д-р техн. наук



*[Signature]*  
С.А. Коробкин

*[Signature]*  
В.В. Мамаев

«1» октября 2020 г.

«30» октября 2020 г.

9.2 Местонахождение ТЗ – сектор научно-технической документации НИИГД «Респиратор».

### 9.3 Внесение изменений и дополнений в техническое задание

Настоящее техническое задание может быть дополнено или изменено в процессе выполнения работы путем согласования этих изменений и дополнений с заказчиком в установленном порядке.

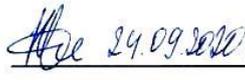
Главный инженер  
НИИГД «Респиратор»

  
личная подпись, дата 29.09.2020 А.В. Чапкович

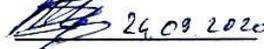
Научный руководитель работы,  
начальник НИОСС

  
личная подпись, дата 24.09.2020, Г.И. Пейтибай

Ответственные исполнители:  
научный сотрудник НИОСС

  
личная подпись, дата 24.09.2020. Н.А. Галухин

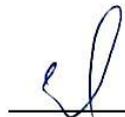
инженер-конструктор 1 кат. СКБ

  
личная подпись, дата 24.09.2020 А.В. Еремин

Начальник СКБ

  
личная подпись, дата 28.09.2020 В.Ф. Паращевин

Начальник научно-  
исследовательского отдела  
сертификации, испытаний,  
экспертизы и метрологии

  
личная подпись, дата 29.09.2020 А.Н. Жильцов

## Приложение К



**МИНИСТЕРСТВО  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ  
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**ДЕПАРТАМЕНТ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ВОЕНИЗИРОВАННОЙ  
ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОЙ СЛУЖБЫ  
(Департамент ГВГСС МЧС ДНР)**

Web: www.dnmchs.ru ул. Артема, 157, г. Донецк, 283048 тел/факс (062) 332-18-10 E-mail: gvgss.dn@mail.dnmchs.ru

01.02 2022 № 15-04/24  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы  
Пефтибая Георгия Ивановича  
на тему «Обоснование параметров взрывоустойчивых переемычек угольных  
шахт из материала на основе цементного вяжущего», представленную на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность»

Настоящая справка подтверждает, что «Рекомендации по ведению  
изоляционных работ на участках с осложнившимся пожаром с использованием  
смесей на основе цементных вяжущих», разработанные Пефтибаем Георгием  
Ивановичем в результате выполнения диссертационной работы и утвержденные  
Министром МЧС ДНР 23.04.2019, получили внедрение в подразделениях  
Государственной военизированной горноспасательной службы МЧС ДНР в  
рамках подготовки горноспасателей к проведению аварийно-спасательных  
работ.

Представленные в «Рекомендациях...» цементно-шлаковая и цементно-  
зольная смеси с химическим ускорителем твердения и заполнителем в виде  
отходов промышленного производства (отвальный шлак металлургического  
завода и зола-унос с электрофильтров теплоэлектростанций) являются  
доступным материалом и наряду с технологией их производства и применения  
в шахтных условиях, а также с учетом выбора технологического оборудования  
являются прогрессивным направлением развития горноспасательного дела.

Использование предложенных «Рекомендаций...» позволит повысить  
эффективность аварийно-спасательных работ по изоляции аварийных участков  
шахт и безопасность горноспасателей.

Директор Департамента



П.В. Березовский

## Приложение Л



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78  
эл. почта: donntu.info@mail.ru

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
Государственного образовательного  
учреждения высшего профессионального  
образования «Донецкий национальный  
технический университет»,  
д-р техн. наук, проф.



С.В. Борщевский  
2022 г.

АКТ

внедрения результатов исследований диссертационной работы  
Пефтибая Георгия Ивановича на тему «Обоснование параметров  
взрывоустойчивых перемычек угольных шахт из материала на основе  
цементного вяжущего», представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность»

1. Настоящим актом подтверждается, что «Рекомендации по ведению изоляционных работ на участках с осложнившимся пожаром с использованием смесей на основе цементных вяжущих», разработанные в рамках диссертационной работы Пефтибая Георгия Ивановича «Обоснование параметров взрывоустойчивых перемычек угольных шахт из материала на основе цементного вяжущего» используются в учебном процессе при

проведении занятий по дисциплине «Рудничные пожары и взрывы» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет» для подготовки специалистов, которые обучаются по образовательной программе «специалитет», специальность 21. 05. 04 «Горное дело», специализация «Технологическая безопасность и горноспасательное дело».

2. Научные результаты диссертационных исследований Пештибая Георгия Ивановича используются в научно-исследовательской деятельности кафедры «Охрана труда и аэрология».

Заведующий кафедрой  
«Охрана труда и аэрология»,  
канд. техн. наук, доц.



А.Л. Кавера