Федеральное государственное унитарное предприятие «Объединенный эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды»
(ФГУП «Радон»)

На правах рукописи

ГЕРМАНОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

ИММОБИЛИЗАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ ПРОПИТКИ ПОРИСТЫХ ЦЕМЕНТНЫХ МАТРИЦ

05.17.02 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, **Варлаков А.П.**

Москва – 2013

Оглавление

Введение **3**

Глава 1. Литературный обзор **9**

1.1 Обращение с органическими жидкими радиоактивными отходами 9

1.2 Характеристика пористой цементной матрицы 25

1.3 Теоретические основы пропитки пористых материалов 41

1.4 Выводы из обзора научно-технической информации. Выбор направления исследований 46

Глава 2. Экспериментальная часть **50**

2.1 Характеристика исходных материалов 50

2.2 Методика исследования, характеристика оборудования 55

2.3 Результаты исследований 68

Глава 3. Технологическая часть **98**

3.1 Опытно-промышленные испытания метода пропитки цементной матрицы различными видами органических ЖРО на опытном стенде 98

3.2 Испытания модуля пропитки цементной матрицы 104

3.3 Распределение радионуклидов в цементной матрице при пропитке в 200-л бочке 112

3.4 Расчет экономического эффекта от реализации технологии пропитки пористой цементной матрицы органическими ЖРО 114

Заключение **121**

Список сокращений и условных обозначений **123**

Список литературы **124**

Приложение 1. Технологическая документация на модуль пропитки **139**

Введение

Актуальность работы. Радиоактивные отходы (РАО) в процессе текущей деятельности образуются во всех отраслях атомной промышленности: на атомных электростанциях (АЭС), радиохимических производствах, предприятиях, обслуживающих корабли с ядерными энергетическими установками, промышленных предприятиях, применяющих радионуклиды, научно-исследовательских и медицинских центрах. В настоящее время в Российской Федерации накоплено порядка 650 млн. $м^3$ жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и твердых радиоактивных отходов (ТРО) суммарной активностью более $6 \cdot 10^{19}$ Бк [1]. В настоящее время на предприятиях атомной отрасли в целом накоплен большой объем органических жидких радиоактивных отходов (ЖРО), имеющих характерный для каждого предприятия химический и радиохимический состав. Это масла, смазочные органические и гидравлические жидкости, сцинтилляционные растворы, растворители, экстрагенты.

Жидкие радиоактивные отходы подлежат переработке и кондиционированию, надежной изоляции от окружающей среды при хранении и захоронении [2, 3]. Переработка ЖРО заключается в концентрировании радионуклидов с последующей иммобилизацией продуктов переработки и кондиционированием. Иммобилизация является суммой операций, конечной целью которых является перевод ЖРО в твердую форму посредством их отверждения, включения в какую-либо матрицу или заключение в герметичные оболочки [4]. Следующим этапом обращения с ЖРО является кондиционирование [4], представляющее собой операции по изготовлению упаковок отходов, пригодных для безопасного хранения, и (или) транспортирования, и (или) захоронения [5, 6]. Одним из основных требований при переработке и кондиционировании ЖРО является снижение объема конечного продукта.

Для каждого вида органических отходов могут быть применены соответствующие методы переработки. Широко распространены термические методы: сжи-

гание, пиролиз. Для некоторых видов отходов предлагаются методы химического и электрохимического окисления в жидкой фазе, кислотного растворения, очистка. Все перечисленные методы требуют сложного и дорогостоящего оборудования и высокой квалификации персонала. Переработка отходов сопровождается образованием вторичных радиоактивных и, часто, химически вредных отходов. При переработке происходит концентрирование радионуклидов в конечном продукте, что требует повышенных мер по обеспечению радиационной и ядерной безопасности. Методы направлены, как правило, на переработку отходов определенного состава. Поэтому их применение на предприятии может быть экономически целесообразным только при больших объемах отходов. Кроме того, органические отходы накапливались без переработки на атомных предприятиях и представляют в настоящее время смеси различных веществ, переработка и кондиционирование которых является еще более сложной технической задачей [7].

При сравнительно небольших объемах отходов на предприятии целесообразно применение технически простых методов, которые обеспечивают необходимое качество упаковок для хранения или захоронения, хотя в некоторых случаях увеличивают объем конечного продукта. Одним из таких методов является цементирование органических ЖРО совместно с водными солевыми отходами. Цементирование органических ЖРО без предварительной подготовки не позволяет включать их в конечный продукт более 4-5 % по массе. Наполнение до 15-30 % по массе может быть получено при предварительном эмульгировании отходов в воде [8], а также при предварительной их адсорбции различными твердыми материалами (глина, вермикулит, песок, земля, натуральное и синтетическое волокно), которые затем смешиваются с цементным раствором [9].

Известны способы иммобилизации водных солевых ЖРО методом пропитки пористых керамических матриц, формируемых в виде небольших блоков. Реализация способов предусматривает концентрирование и закрепление радионуклидов в матрице путем её многократной пропитки чередуемой с сушкой

[10, 11, 12, 13]. Пропитанные блоки подлежат размещению и омоноличиванию в контейнере с получением целостной матрицы без пустот.

Метод пропитки пористых матриц может быть использован для иммобилизации органических ЖРО. Высокая эффективность технологии, заключающаяся в увеличении наполнения конечного продукта отходами, рациональном сокращении числа и продолжительности сложных радиационно опасных операций, может быть достигнута при использовании пористой матрицы, в объеме равной объему контейнера и размещенной в контейнере при приготовлении. Такие матрицы могут быть приготовлены на основе пористого бетона.

В этой связи актуальными представляются исследования, направленные на создание эффективной технологии иммобилизации органических ЖРО различного вида методом пропитки пористой цементной матрицы, размещенной в упаковке, пригодной для транспортирования и хранения.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнялась в соответствии с планом научно-исследовательских работ ФГУП «Радон» на 2006-2010 год по «Программе совершенствования и повышения качества, безопасности, надежности средств и методов производства при обезвреживании РАО, обеспечения радиационной безопасности населения и охраны окружающей среды Московского региона», шифр темы 2.03.01, на основании постановления Правительства г. Москвы № 945 «О мерах по повышению радиационной безопасности населения г. Москвы». По теме диссертации выполнялась работа в рамках Соглашения № 01.168.24.019. от 08.10.2009 г. между ФГУП «Радон» и Федеральным агентством по науке и инновациям.

Цель работы – разработка научно обоснованных технических решений для создания эффективной технологии иммобилизации органических ЖРО методом пропитки пористой цементной матрицы.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи:**

1. Разработать композицию для приготовления пористой цементной матрицы, обеспечивающую эффективную иммобилизацию органических ЖРО различного вида методом пропитки.

2. Обосновать и определить эффективные параметры пропитки пористой цементной матрицы органическими ЖРО различного вида.

3. Определить зависимость эффективных параметров для оценки и прогнозирования технологии пропитки.

4. Определить распределение радионуклидов по высоте цементной матрицы при пропитке.

5. Определить влияние органических ЖРО различного вида на свойства цементной матрицы.

6. Обосновать технические решения эффективной технологии иммобилизации органических ЖРО методом пропитки пористой цементной матрицы.

Научная новизна работы:

1. Впервые разработана композиция для получения пористой цементной матрицы, обеспечивающей эффективную иммобилизацию органических ЖРО различного вида методом пропитки, характеризующейся пористостью около 70 %, с однородными порами размером $(1\text{-}5)\cdot10^{-5}$ м, и прочностью, удовлетворяющей регламентированным требованиям к цементированным РАО.

2. Определено, что вязкость органических ЖРО, скорость пропитки и гидравлическое сопротивление данной цементной матрицы не оказывают значимого влияния на степень пропитки.

3. Определена полиномиальная зависимость гидравлического сопротивления данной цементной матрицы от эффективных параметров пропитки органическими ЖРО различного вида.

4. Определена полиномиальная зависимость распределения радионуклидов по высоте цементной матрицы при пропитке органическими ЖРО.

5. По совокупности полученных результатов разработаны и обоснованы технические решения эффективной технологии иммобилизации органических ЖРО методом пропитки пористой цементной матрицы.

Практическая значимость работы. Разработанные технические решения эффективной технологии иммобилизации органических ЖРО обоснованы при ис-

пытаниях модуля кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых цементных матриц, введенного в эксплуатацию в ФГУП «Радон» в составе миниблочной растворосмесительной установки по «Технологическому регламенту технологического процесса РадХ-12.03/2008. Цементирование радиоактивных отходов. Миниблочная растворосмесительная установка», утвержденному 16.12.2008 г. с изменениями от 02.09.2010 г.

Личный вклад соискателя. Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором лично, а именно:

1. Предложен принцип технологии иммобилизации и разработаны основные положения метода пропитки, методики экспериментальных и опытно-промышленных испытаний.

2. Проведены научные исследования, обобщение и анализ экспериментальных данных.

3. Предложены конструкции и состав оборудования для реализации метода пропитки, проведены его испытания и ввод в эксплуатацию.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на 5 международных научно-технических конференциях: 1st International Symposium on Cement-based Materials for Nuclear Wastes («NUWCEM 2011», Avignon, France), 11th, 12th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM' 07 Bruges, Belgium; ICEM' 09 Liverpool, UK), International Conference on Waste Management, Energy Security end a Clean Environment Management (WM'08, Tucson, Arizona), 9th International Symposium «Conditioning of Radioactive Operational & Decommissioning Wastes» (Drezden, 2009) и 7 российских научно-технических конференциях. Результаты работы докладывались на научно-техническом совете ГУП МосНПО «Радон» (дек. 2007 г., окт. 2010 г.). На IX Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи в 2009 г. работа была отмечена медалью в номинации «За успехи в научно-техническом творчестве».

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 15 печатных работах, включая 2 статьи в рецензируемых научных журналах ВАК, 1 па-

тент РФ на изобретение и 12 публикаций в сборниках трудов и тезисов докладов на российских и международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения и списка литературы из 138 наименований; изложена на 166 страницах машинописного текста, включающего 30 рисунков и 26 таблиц.

На защиту выносятся:

1. Обоснование композиции для приготовления пористой цементной матрицы, обеспечивающей эффективную иммобилизацию органических ЖРО различного вида методом пропитки.

2. Обоснование влияния вязкости органических ЖРО, скорости пропитки и гидравлического сопротивления цементной матрицы на степень пропитки органическими ЖРО различного вида.

3. Обоснование полиномиальной зависимости гидравлического сопротивления цементной матрицы от эффективных параметров пропитки органическими ЖРО различного вида.

4. Обоснование полиномиальной зависимости распределения радионуклидов по высоте цементной матрицы при пропитке.

5. Обоснование технических решений технологии эффективной иммобилизации органических ЖРО методом пропитки пористой цементной матрицы.

Глава 1. Литературный обзор

1.1 Обращение с органическими жидкими радиоактивными отходами

1.1.1 Характеристика органических жидких радиоактивных отходов

К жидким радиоактивным отходам относятся не подлежащие дальнейшему использованию органические и неорганические жидкости, пульпы и шламы [14], удельная активность техногенных радионуклидов в которых превышает минимально значимую удельную активность (МЗУА) (сумма отношений удельных активностей техногенных радионуклидов к их МЗУА превышает 1). Значения МЗУА приведены в приложении 4 [15] или приложении 1 [14].

Жидкие радиоактивные отходы по удельной активности подразделяются на три категории: низко-, срене- и высокоактивные. Помимо удельной активности РАО могут быть классифицированы по агрегатному состоянию, радиохимическому и химическому составу, месту образования и др. [16, 17, 18].

В составе ЖРО выделяют [19] растворенные соли и органические вещества:

а) детергенты (сульфанол, мыло, моющие средства) – компоненты, вызывающие понижение поверхностного натяжения отходов и придающие им способность к вспениванию, попадают в отходы вместе с растворами от дезактивации помещений и одежды;

б) масло (в основном турбинное) – поступает в отходы АЭС с трапной водой машинного зала, содержится в небольшом количестве (до 10 мг/л); в отходах научно-исследовательских центров может содержаться в значительных количествах (до 30-50 $м^3$/год), часто в смеси с органическими растворителями, водой, дисперсными примесями;

в) динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) $C_{10}H_{14}O_8N_2Na_2 \times 2H_2O$ (торговое название – Трилон Б), которая используется для

предпусковой и эксплуатационной очистки парогенерирующего оборудования и содержание которой может составлять до 20-25 г/л.

Смазочные масла и органические вещества не только попадают в водные растворы, но в отдельных случаях являются самостоятельными группами отходов – жидкими органическими радиоактивными отходами. Большое количество таких отходов накоплено на радиохимических предприятиях, в научных институтах, атомном флоте [20] (таблица 1, 2) и продолжает увеличиваться. В процессе переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) экстракционным методом образуется значительное количество органических ЖРО, представляющих собой трибутилфосфат (ТБФ) в смеси с растворителем [21]. Зачастую они являются смесью различных нефтяных и синтетических масел, сцинтилляционных жидкостей, смазочных материалов, растворителей [22, 23] (таблица 2). Кроме того, эти смеси содержат значительное количество воды и твердых включений.

Таблица 1 – Характеристики ЖРО МАЭК [24]

Параметр	Емкость № Б–02/6*	
	ЖРО	Масло
Плотность, г/см^3	1,061	0,811
Удельная активность, Бк/л		
Σβ	$4{,}0\times10^6$	$3{,}6\times10^5$

* – содержимое емкости хранения Б-02/6 ХЖО РУ БН–350 включает в себя две основные составляющие – масла, расположенные в верхней части содержимого емкости, и солевые ЖРО. Объем ЖРО в емкости Б-02/6 – 330,5 м^3, из них масла – 158,0 м^3. В остальных емкостях содержатся только солевые ЖРО.

Таблица 2 – Характеристики органических ЖРО, поступивших на цементирование в ФГУП «Радон» в 2003-2009 г.г. [25]

Наименование по паспорту	Внешний вид	Плотность, г/см^3	Удельная активность, Бк/м^3
Смесь жидких отходов: масло, вода, органические вещества, бензин, ацетон, керосин (ГНЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск)	Жидкость с ярко выраженной границей раздела фаз: верх – масляная фракция темно-коричневого цвета (70 % объема), низ – прозрачная бесцветная жидкость (30 % объема). Запах ацетона.	0,79	$\Sigma\beta$ $3{,}0\cdot10^7$
Масло техническое (ОАО ПО «Севмаш»)	Масляная жидкость темно-коричневого цвета	–	$\Sigma\beta$ $5{,}1\cdot10^7$ $\Sigma\alpha$ $2{,}1\cdot10^6$
Масло нефтяное (ФГУП РНЦ «Курчатовский институт»)		0,84	$\Sigma\beta$ $1{,}75\cdot10^6$
Смесь жидких отходов: масло, вода, примесь песка (ОАО ГНЦ РФ «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара»)		0,89	$\Sigma\alpha$ $3{,}8\cdot10^7$
	25 % раствор трибутилфосфата (ТБФ) в синтине	0,84	$\Sigma\alpha$ $2{,}0\cdot10^8$
Масло нефтяное (МСЗ, г.Электросталь)	Масляная жидкость темно-коричневого цвета	0,94	$\Sigma\alpha$ $2{,}5\cdot10^7$

Как видно из таблиц 1, 2 вещественный и радионуклидный состав органических ЖРО весьма разнообразен.

1.1.2 Способы переработки и кондиционирования органических жидких радиоактивных отходов

Переработка органических ЖРО представляет собой технологические операции по сокращению объема, изменению агрегатного состояния и (или) физико-химических свойств ЖРО. Основные принципы переработки ЖРО заключаются в следующем [26]:

– минимизация объема – максимально возможное сокращение объема отходов в ходе переработки (количественным показателем является коэффициент изменения объема ЖРО, численно равный отношению исходного объема ЖРО и объема конечного продукта);

– обеспечение радиационной безопасности на всех стадиях переработки ЖРО;

– максимальная простота, надежность и безопасность технологий переработки.

Методы переработки должны выбираться с учетом характеристики отходов, технологических и экономических показателей процесса, а также с учетом условий и продолжительности временного хранения упаковок, условий транспортирования и захоронения отходов [27, 28, 29]. При выборе способа переработки предпочтение должно быть отдано тому из методов, при котором максимально снижается риск облучения людей на всех последующих стадиях обращения с РАО [30]. Объем ЖРО после переработки должен сокращаться до технически и экономически обоснованного минимума.

Для каждого вида органических отходов могут быть применены соответствующие методы переработки, позволяющие разрушить органические компоненты и значительно уменьшить объем отходов. Широко распространены термические методы. Сжигание является одним из основных методов переработки, в процессе которого органические вещества окисляются до простых оксидов [31]. Технологический процесс сжигания даже нерадиоактивных отработанных масел сопряжен

с комплексом проблем по газоочистке, связанных, главным образом, с выделением при термическом разложении масел опасных химических соединений канцерогенного характера (диоксины, полициклические арены, продукты окисления меркаптанов и хлорпроизводных и т.п.), токсичных летучих примесей [32]. Этим обусловлены значительные затраты на спецгазоочистку отходящих газов установки сжигания. В процессе сжигания образуется вторичные радиоактивные отходы: конденсат, фильтры после очистки отходящих газов, сажа, зольный остаток, содержащий основное количество радионуклидов [33].

Пиролиз представляет собой термическое неполное окисление при недостатке кислорода. Процесс протекает при более низких температурах, чем сжигание, при этом уменьшается коррозия оборудования и унос радионуклидов в газовую фазу [34].

Для отходов, содержащих преимущественно растворимые в воде органические вещества, предлагаются методы химического [35] и электрохимического окисления [36] в жидкой фазе. Процессы реализуются при более низких температурах, чем сжигание, и не требуют сложной систем очистки отходящих газов. Однако в процессах используются дорогие химические реактивы и оборудование.

Для некоторых отходов применим метод кислотного растворения [37] в смеси азотной и серной кислот при 250 °С. Для процесса требуются оборудование из дорогих коррозионно-стойких материалов, сложные системы очистки агрессивных газов, так как в течение процесса образуются диоксиды серы и азота.

Для очистки отходов может быть использован гидролизный процесс, при котором радионуклиды переходят из органической фазы в водную [38]. Для некоторых отходов может быть использована дистилляция, в результате которой образуется очищенный дистиллят и кубовый остаток, концентрирующий в себе радионуклиды [39]. Известен способ очистки органических ЖРО от радиоактивного масла путем его концентрирования с помощью коагулянта и последующего центрифугирования смеси с получением очищенной воды и концентрата [40, 41].

Очищенные смеси органических веществ представляют собой промышленные отходы и требуют дальнейшей переработки.

При значительном снижении объема конечного продукта по сравнению с исходным объемом органических ЖРО, термические методы, методы очистки, окисления и кислотного растворения имеют общие недостатки. Все перечисленные методы требуют сложного и дорогого оборудования (стоимость одной установки сжигания ТБФ составляет около 2,5 млн. $ США [21]) и высокой квалификации персонала. Термические методы переработки часто сопровождаются большим уносом радионуклидов, что обуславливает необходимость применения дорогостоящих сложных средств контроля и систем очистки отходящих газов и аэрозолей. Переработка отходов сопровождается образованием вторичных радиоактивных и, часто, химически вредных отходов, требующих других технологий переработки.

С учетом того, что наиболее эффективные технологические процессы направлены, как правило, на переработку отходов определенного состава, их применение может быть экономически целесообразным только при больших объемах отходов [42]. Кроме того, в течение многих лет органические отходы накапливались без переработки на атомных предприятиях и представляют в настоящее время смеси различных веществ, переработка и кондиционирование которых являются еще более дорогими и сложными.

Примером рациональной организации переработки органических ЖРО может служить способ, по которому отработавший ТБФ используется в качестве пластифицирующей добавки к твердым битумам [43]. Экстрагент при локализации выполняет роль связующего для РАО. Существенным является то, что использование добавок не приводит к изменению в технологическом и аппаратурном оформлении отверждения. Однако основными недостатками такого способа переработки органических ЖРО является высокая стоимость оборудования, чувствительность к составу отходов и низкое наполнение конечного компаунда.

При сравнительно небольших объемах отходов целесообразно применение более простых методов, которые хотя и приводят к увеличению объема конечного продукта кондиционирования, однако обеспечивают качество упаковок, предназначенных для хранения или захоронения [44].

Кондиционирование ЖРО включает в себя операции по изготовлению упаковок отходов, пригодных для безопасного хранения и (или) транспортирования и (или) захоронения [5]. Одним из способов переработки ЖРО является отверждение, которое заключается в переводе жидких отходов в твердое агрегатное состояние с целью уменьшения возможности миграции радионуклидов в окружающую среду. В качестве методов отверждения водных солевых ЖРО на АЭС и других объектах использования атомной энергии наибольшее распространение в России получили цементирование, битумирование и остекловывание [44].

Для кондиционирования органических ЖРО применяется цементирование, которое может осуществляться различными способами. Простое цементирование, при котором органические отходы вводят напрямую без предварительной подготовки в цементный раствор малоэффективно, так как не позволяет включать отходы в конечный продукт более 4-5 % по массе из-за их отрицательного влияния на приготовление и твердение цементного компаунда [25].

Основные проблемы цементирования органических ЖРО связаны с воздухововлечением в цементный раствор и неравномерным распределением органической фазы в нем при перемешивании и расслоением цементного раствора при твердении, а также с отрицательным влиянием гидрофобных свойств отходов на механизмы твердения цементного материала. Следствием вышеперечисленных проблем цементирования органических ЖРО является:

– низкое наполнение конечного компаунда по органическим ЖРО (не более 5 % по массе);

– низкое водоцементное отношение (не более 0,5), обуславливающее большую вязкость цементного раствора;

– необходимость специального перемешивающего устройства;

– опасность разрушения цементного компаунда при длительном хранении из-за биологического окисления и омыления органических ЖРО в цементной матрице с последующей ее деструкцией продуктами окисления и продуктами жизнедеятельности микроорганизмов [25].

Большее наполнение может быть получено при предварительном эмульгировании отходов в воде, а также при предварительной их адсорбции различными твердыми материалами, которые затем смешиваются с цементным раствором. В зависимости от сорбирующих материалов и состава органические отходы могут быть переведены в форму от желеобразной до твердой [9].

Наполнение цементного компаунда до 15 % по массе может быть получено при предварительном суспензировании и эмульгировании отходов. Сущность технологии суспензирования заключается в следующем [8]. На основе органических и водных солевых ЖРО интенсивным перемешиванием в блоке предварительного суспензирования, основным элементом которого является диспергатор с фланцами-завихрителями, готовят стойкую к расслаиванию суспензию и затем вводят ее в основной цементный раствор. Для повышения равномерности распределения органических ЖРО в суспензию вводят специальные порошкообразные добавки, которые способны сорбировать органические вещества и повышать качество цементного компаунда.

Однако проведенные исследования [45] показали, что масляная пленка, даже однородно распределенная в цементном компаунде благодаря предварительному суспензированию, отрицательно влияет на процессы гидратации основных минералов цемента.

Технология эмульгирования [8, 46] предусматривает предварительную обработку отходов эмульгирующими и многофазными (масло/вода/растворитель) жидкостями. Введение эмульгатора в состав цементного компаунда в виде устойчивой к расслоению эмульсии позволяет увеличить степень наполнения отходами до 15 % по массе. При этом состав цементного компаунда необходимо корректи-

ровать путем предварительных опытов по отверждению малых образцов даже при незначительных отклонениях в составе отходов.

При предварительной абсорбции органических отходов различными твердыми материалами (глина, вермикулит, песок, земля, натуральное и синтетическое волокно, активный гидрофобный поглотитель), которые затем смешиваются с цементным раствором, наполнение цементного компаунда может достигать 30 % по массе [9, 47, 48, 49]. Поглотительная способность различных сорбентов может быть достаточно высокой, хотя увеличение объема отходов может быть трехкратным. В зависимости от сорбирующих материалов и состава органические отходы могут быть переведены в форму от желеобразной до твердой.

В качестве абсорбента органических отходов также может быть использован полимерный материал типа «Сипрон», предварительно измельченный до частиц размером от 0,3 до 1 см^3, который ранее использовался в фильтрах системы очистки сточных вод [50]. Частицы полимерного материала, пропитанного органическими ЖРО, отделяют от водной фазы и смешивают с цементным раствором, смесь выдерживают до полного отверждения. Наполнение цементного компаунда органическими ЖРО при таком способе цементирования составляет 4,8-11,4 % по массе.

ФГУП «ПО «Маяк» предлагает трехстадийную технологию отработанных радиоактивно загрязненных вакуумных масел, включающую стадии приготовления смеси масла с поглотителем, приготовления и выдержки цементного теста, смешения маслосодержащей пасты и цементного теста [51]. Для применения в качестве материала-поглотителя изучались бентонит, низкокальциевая зола уноса Аргаяшской ТЭЦ, аэросил, оксиды кальция и магния. Свойства цементного компаунда с наполнением по маслу около 20 % масс. соответствуют регламентированным требованиям [5, 52], в отличие от полимерной фенолформальдегидной матрицы, содержащей около 40 % по массе масла [53], использованной в качестве объекта сравнения. Термо- и огнестойкость цементных компаундов также оказалась выше, чем у полимерного материала. Однако при иммобилизации масла в

цемент объем материала, подлежащего хранению, увеличивается в 3 раза, а при включении в полимер – в 2,5 раза.

Главным преимуществом технологии цементирования с абсорбцией – толерантность к составу органической фазы. Но присутствие воды или других примесей в ионной форме обычно отрицательно влияет на процесс сорбции органических ЖРО на твердых сорбентах.

Технология цементирования жидких отходов располагает методами для отверждения различных видов органических ЖРО и обеспечивает при этом регламентированное [5, 52] качество цементных компаундов. Основным недостатком технологии цементирования органических ЖРО является увеличение объема конечного продукта по сравнению с исходным объемом отходов.

Известны способы иммобилизации водных солевых ЖРО методом пропитки пористых керамических матриц, формируемых в виде небольших блоков при термической обработке предварительно спрессованных оксидов различных элементов [10]. Концентрирование радионуклидов в матрице происходит путем её многократной пропитки чередуемой с сушкой и последующей обработкой защитным покрытием. Блоки имеют высокую открытую пористость – 70 % со значительными размерами макропор: 0,01-0,29 мм и, как следствие, низкую механическую прочность на сжатие: 2,7-4,0 МПа [11]. Способ включает многократную пропитку радиоактивными растворами пористой матрицы с промежуточной сушкой, обработку матрицы растворами осадителей, высокотемпературную обработку при 1350-1500 ºС [12] или спекание с последующей «запечаткой» открытой пористости химически стойким нерадиоактивным защитным слоем [13]. Пропитанные блоки подлежат размещению и омоноличиванию в упаковке с получением целостной матрицы без пустот, пригодной для транспортирования и хранения.

Зачастую единственным способом обращения с органическими ЖРО в России, применяемым в настоящее время, является их временное контролируемое хранение в емкостях на промышленной площадке. В недавнем прошлом на ФГУП «СХК» внедрен в опытно-промышленном масштабе способ удаления орга-

нических ЖРО в подземные горизонты с потоком жидких радиоактивных отходов среднего уровня активности (САО), содержащими анионогенные поверхностно-активные вещества (сульфанол). Полученные сведения были использованы для разработки способа удаления органических отходов, содержащих ТБФ, в пласт-коллектор в потоке щелочных САО на ФГУП «ГХК» [54].

1.1.3 Регламентированные свойства цементных компаундов, содержащих радиоактивные отходы

При выборе состава цементного компаунда ориентируются на достижение важнейших физико-химических свойств конечного компаунда, значения которых приведены в ГОСТ Р 51883-2002 [52] (таблица 3).

Прочность на сжатие цементного компаунда является определяющим регламентированным свойством. Как правило, чем выше прочность компаунда, тем выше остальные характеристики – устойчивость к выщелачиванию, морозостойкость, устойчивость к длительному пребыванию в воде. Это связано с тем, что прочность цементного компаунда зависит от его пористости [55].

Механизм снижения прочностных свойств цементного камня при испытаниях на морозостойкость обусловлен тем, что при переходе в лёд объем воды увеличивается примерно на 10 %. Замерзая в порах и капиллярах цементного камня, вода оказывает большое давление на их стенки. Многократные теплосмены приводят к постоянному разрушению структуры цементного камня и появлению трещин. Установлено, что в микрокапиллярах цементного камня замерзание может не происходить даже при температурах -40 … -50 °С [56]. Большинство органических жидкостей имеют температуру кристаллизации меньше 0 °С, что значимо снижает вероятность разрушения цементного компаунда, содержащего органические ЖРО, в ходе испытаний на морозостойкость.

Таблица 3 – ГОСТ Р 51883-2002. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования [52].

Наименование показателя	Значение	Метод испытания
Скорость выщелачивания радионуклидов (по Cs^{137}), г/см^2·сут, не более	$1 \cdot 10^{-3}$	По ГОСТ Р 52126-03
Механическая прочность (предел прочности при сжатии), МПа (кг/см^2), не менее	4,9 (50)	По ГОСТ 310.4
Радиационная устойчивость при облучении, Гр*	$1 \cdot 10^{6}$	Снижение механической прочности не более чем на 25 %, но не ниже 5 МПа
Морозостойкость (количество циклов замораживания/оттаивания** при температуре -40….+40 °С), не менее	30	По ГОСТ 10060.1, снижение механической прочности не более чем на 25 %, но не ниже 5 МПа
Устойчивость к длительному пребыванию в воде, сут	90***	Снижение механической прочности не более чем на 25 %, но не ниже 5 МПа

* испытанию подвергают цементные компаунды, содержащие ионообменные смолы или другие органические материалы.

** оттаивание проводить на воздухе.

*** если прочность компаундов после 90 суток выше 5 МПа, но ниже 75 % от первоначальной, испытания следует продлить до 180 суток без смены воды.

В мировой практике для уменьшения выщелачивания радионуклидов из цементной матрицы используются специальные добавки, которыми часто служат глинистые материалы (бентонит, вермикулит и др.), цеолиты (клиноптилолит и др.), сланцы, способные, кроме снижения пористости за счет набухания, выступать сорбентами для радионуклидов [57, 58, 59]. Эти добавки позволяют в десятки раз уменьшить скорость выщелачивания радионуклидов при сохранении необходимой механической прочности цементного компаунда. Наиболее часто в качестве неорганической сорбирующей добавки в технологиях цементирования РАО используется тонкодисперсная бентонитовая глина, представляющая собой гидроалюмосиликаты различного состава [60, 61].

Важно отметить, что результаты исследований [62] цементного компаунда на основе водных солевых ЖРО при долговременном хранении позволяют харак-

теризовать его величиной общей пористости около 30 %. При этом цементный компаунд сохраняет удерживающие свойства по отношению к радионуклидам.

1.1.4 Применение метода пропитки при обращении с радиоактивными отходами и в других отраслях промышленности

Использование процесса пропитки для заполнения порового пространства материала нашло свое применение в различных отраслях промышленности, включая область обращения с радиоактивными отходами.

Помимо указанных выше способов кондиционирования водных солевых ЖРО методом пропитки пористых керамических матриц, формируемых в виде небольших блоков при термической обработке предварительно спрессованных оксидов различных элементов [10-13], известно о разработке и внедрении в производство в ФГУП «Радон» метода пропитки для кондиционирования твердых зернистых или фракционированных радиоактивных отходов. В работе [63] разработана технология пропитки высокопроникающими цементными растворами ТРО на примере золы от сжигания. Рассчитанные и экспериментально подтвержденные параметры движения под давлением неоднородной неньютоновской жидкости (цементного раствора) по каналам, образованным случайной упаковкой различных по размеру и форме частиц зольного остатка от сжигания ТРО, позволяют методом пропитки снизу вверх зольного остатка в 200-литровом контейнере получить конечный цементный компаунд, удовлетворяющий регламентированным требованиям [5, 52] без увеличения объема кондиционированного продукта по сравнению с исходным насыпным объемом радиоактивного зольного остатка.

Существует способ ликвидации свежих разливов нефти и нефтепродуктов с использованием пенобетонных смесей [64]. Процесс химического связывания воды при твердении легких (средняя плотность менее 800 кг/м^3) цементных пенобетонов сопровождается одновременным отсосом нефтепродуктов с твердых поверхностей за счет проявления сил химической связи при комплексообразовании

(гидратообразовании) и явлений осмоса. Итог проявления таких сил выражается в поднятии нефти с поверхности вверх по бетонной матрице и вхождению ее в пористую структуру, формирующую бетонную матрицу. Опыты показали, что максимальная эффективность удаления нефтепродуктов с песчаного грунта, достигается при использовании пенобетонной смеси плотностью 600 кг/м^3.

Параметры процесса пропитки, позволяющего упрочняющим полимерным или цементным материалам проникать глубоко в трещины горных пород, изучены в работах по укреплению горных массивов [65], проведению строительных работ в туннелях, при укреплении грунтов под основания и фундаменты.

В строительстве разработана технология пропитки пористых материалов гидрофобизирующими растворами [66]. Более того, разработан метод ультразвукового контроля и интенсификации процесса пропитки пористых материалов (кирпичей) гидрофобизирующими растворами.

Наиболее интересна технология и оборудование для реализации процесса пропитки маслом пористых материалов. Пористые изделия пропитывают, погружая в ванну с подогретым до 110-140 °С маслом и выдерживают при этой температуре около 1-3 ч. После этого пористую деталь охлаждают в той же ванне, а потом извлекают [67]. Коэффициент теплового расширения масла больше, чем пористых железокерамических изделий. При остывании объем масла в порах по сравнению с объемом пор уменьшается. В силу этого при остывании деталей в ванне с маслом происходит их подпитка.

Известно об опыте пропитки бетона полимеризационными смолами [68], в частности, эпоксидной смолой [69, 70], жидким стеклом [71] и другими органическими вяжущими [72].

Из приведенного обзора по обращению с органическими ЖРО следует, что:

– для каждого вида органических отходов могут быть применены соответствующие методы переработки, позволяющие разрушить органические компоненты и значительно уменьшить объем отходов;

– широко распространены термические методы. Сжигание является одним из основных методов переработки, в процессе которого органические вещества окисляются до простых оксидов. В процессе сжигания образуются вторичные радиоактивные отходы: конденсат, фильтры после очистки отходящих газов, сажа, зольный остаток, содержащий основное количество радионуклидов. Пиролиз представляет собой термическое неполное окисление при недостатке кислорода. Процесс протекает при более низких температурах, чем сжигание, при этом уменьшается коррозия оборудования и унос радионуклидов в газовую фазу;

– для отходов, содержащих преимущественно растворимые в воде органические вещества, предлагаются методы химического и электрохимического окисления в жидкой фазе. Процессы реализуются при более низких температурах, чем сжигание, и не требуют сложной системы очистки отходящих газов. Однако в процессах используются дорогие химические реактивы и оборудование;

– для некоторых отходов применим метод кислотного растворения в смеси азотной и серной кислот при температуре 250 °С. Для процесса требуются оборудование из дорогих коррозионно-стойких материалов и сложные системы очистки агрессивных газов, так как во время процесса образуются диоксиды серы и азота;

– для очистки отходов может быть использован гидролизный процесс, при котором радионуклиды переходят из органической фазы в водную. Для некоторых отходов может быть использована дистилляция, в результате которой образуется очищенный дистиллят и кубовый остаток, концентрирующий в себе радионуклиды. Очищенные смеси органических веществ представляют собой промышленные отходы и требуют дальнейшей переработки;

– для кондиционирования органических ЖРО применяется цементирование, которое может осуществляться различными способами. Простое цементирование, при котором органические отходы вводят напрямую без предварительной подготовки в цементный раствор малоэффективно, так как не позволяет включать отходы в конечный продукт более 4-5 % по массе из-за их отрицательного влияния на приготовление и твердение цементного компаунда. Большее наполнение

может быть получено при предварительном эмульгировании отходов в воде, а также при предварительной их адсорбции различными твердыми материалами, которые затем смешиваются с цементным раствором. В зависимости от сорбирующих материалов и состава органические отходы могут быть переведены в форму от желеобразной до твердой;

– известны способы иммобилизации водных солевых ЖРО методом пропитки пористых керамических матриц, формируемых в виде небольших блоков. Концентрирование радионуклидов в матрице происходит путем её многократной пропитки чередуемой с сушкой и последующей обработкой защитным покрытием. Пропитанные блоки подлежат размещению и омоноличиванию в упаковке с получением целостной матрицы без пустот, пригодной для транспортирования и хранения;

– иммобилизация методом пропитки пористых матриц может быть применена для органических ЖРО. Метод пропитки с различными целями применяется при обработке бетонных изделий растворами, полимерными материалами, маслом. А также при ликвидации свежих разливов нефти с помощью пористых цементных гранул.

1.2 Характеристика пористой цементной матрицы

Бетон – это искусственный каменный материал, получаемый из цемента, заполнителей, специальных добавок и воды. Среди бетонов по плотности бетоны разделяют на особо тяжелые (более 2500 кг/м^3), тяжелые (1800-2500 кг/м^3), легкие (500-1800 кг/м^3) и особо легкие (менее 500 кг/м^3) [56].

В качестве пористых цементных матриц целесообразно рассмотреть ячеистые бетоны, являющиеся разновидностью легких бетонов. Ячеистый бетон – искусственный каменный материал на основе минерального вяжущего вещества с равномерно распределенными по объему порами. Ячеистые бетоны характеризуются плотностью в пределах 200-1200 кг/м^3, прочностью до 15 МПа, низкой теплопроводностью: 0,06-0,25 Вт/(м·°С) [73, 74, 75], морозостойкостью не менее 35 циклов замораживания-оттаивания, водопоглощением около 14-20 % по массе [76].

Ячеистые бетоны подразделяют по назначению, по условиям твердения, по способу порообразования, по видам вяжущих и кремнеземистых компонентов. По назначению ячеистые бетоны подразделяют на: теплоизоляционные (200-500 кг/м^3), конструкционно-теплоизоляционные (500-900 кг/м^3) и конструкционные (900-1200 кг/м^3). По условиям твердения ячеистые бетоны подразделяют на автоклавные и неавтоклавные. По способу порообразования ячеистые бетоны подразделяют на газобетоны, пенобетоны и газопенобетоны. Ячеистые бетоны подразделяют по виду основного вяжущего: на известковых, цементных, смешанных, шлаковых и зольных вяжущих, по виду кремнеземистого компонента: на природных материалах, на вторичных продуктах промышленности [77].

Ячеистые бетоны имеют ряд преимуществ [56] по сравнению с остальными легкими бетонами:

– хорошую морозостойкость, объясняющаяся тем, что вследствие большого объема пор вода не заполняет их полностью, и поэтому расширение воды при замерзании не вызывает разрушения цементного камня;

– негорючесть (пенобетон толщиной 150 мм защищает от пожара в течение 4 часов);

– экономичность при изготовлении (хорошее сочетание плотности, прочности, теплопроводности и др.);

– устойчивость к расслоению и водоотделению на стадии приготовления;

– текучесть (возможность перекачивания по трубопроводу и формования различных строительных изделий: стеновых блоков, перегородок, перемычек, плит перекрытия и т.д.).

1.2.1 Свойства пористой цементной матрицы

При одинаковой величине общей пористости, но при различном соотношении ее видов пористая цементная матрица имеет различные физико-механические свойства. При одинаковой пористости наилучшими прочностными свойствами обладает цементная матрица с наиболее мелкими однородными порами. Поэтому необходимо изготавливать ячеистые бетоны с равномерно распределенными сферическими порами возможно меньшего, но одинакового диаметра [78].

Структура пористой цементной матрицы зависит от качества применяемой пены, одним из показателей которого является кратность – отношение объема пены к объему водного раствора, из которого она была получена [78]. Свойства ячеистого бетона зависят от состава, технологии приготовления, стабильности структуры ячеистой смеси и режима ее твердения и характеризуются плотностью, пористостью, строением порового пространства и структурой межпоровых перегородок, что, в свою очередь, сложным образом влияет на их прочность [79, 80]. Стабильность структуры ячеистой смеси, т.е. сохранение структуры ячеистой смеси до достижения заданной прочности, зависит от количества равномерно распределенных пор оптимальной формы и размера [81, 82].

Существует предположение [83], что в пористых материалах с мелкодисперсной ячеистой структурой, независимо от средней плотности, следует стре-

миться к одинаковому и минимальному диаметру ячеистых пор, а материалы с такой пористостью должны характеризоваться наилучшими прочностными свойствами. В работах [84, 85] приводятся расчетные зависимости, отражающие взаимосвязь средней плотности и основных морфологических параметров (средний диаметр ячеек, толщина межпоровой перегородки) в пористых материалах различной природы.

Исследования зависимости прочности пористых цементных матриц от их объемного веса показали, что эта зависимость не линейна. На основании многочисленных экспериментальных данных установлено, что в интервале плотностей от 300 кг/м^3 до 1200 кг/м^3 графически её можно отобразить в форме сложной кривой параболического характера (рисунок 1).

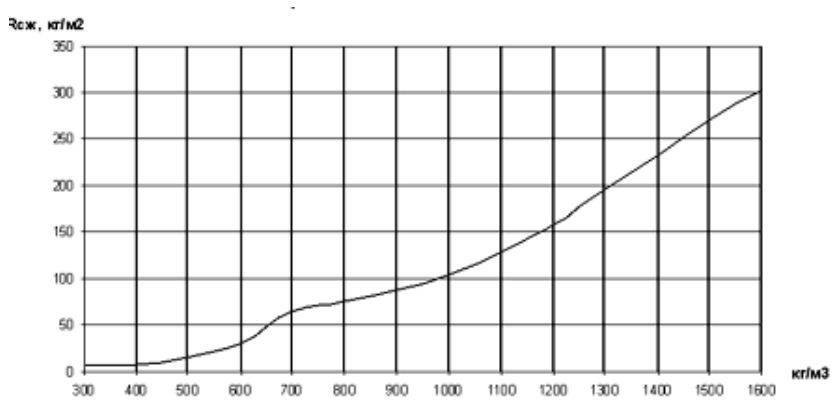


Рисунок 1 – Взаимосвязь плотности и прочности пористой цементной матрицы

Согласно ГОСТ 25485-89 [77] прочность на сжатие типовых цементных матриц пористостью около 70 % составляет 2,5-3,0 МПа.

1.2.2 Структура порового пространства цементной матрицы

Характерной особенностью цементной матрицы является её поровая структура, представленная различными видами пор и характеризуемая величиной общей пористости, величиной, формой и распределением пор по размерам [86]. Со-

гласно классификации проф. К.Э. Горяйнова и С.К. Горяйновой [87] поры разделяют по размерам на:

– ячеистые – $10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-3}$ м;

– капиллярные – $10^{-7} \div 10^{-6}$ м;

– гелевые – менее 10^{-7} м.

Ячеистые поры вносят основной вклад (более 80 %) в величину общей пористости цементной матрицы (рисунок 2) [88].

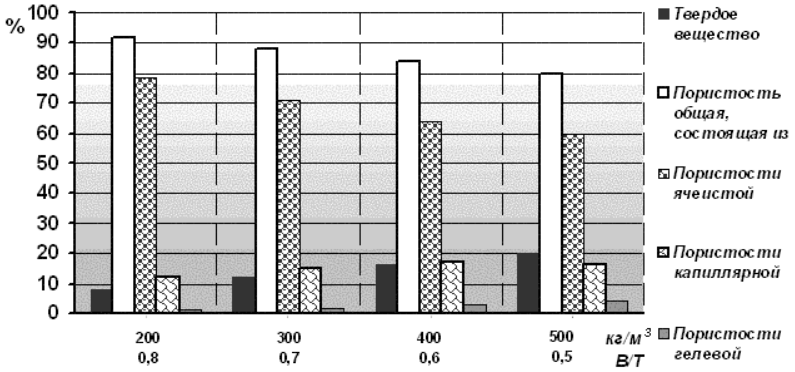


Рисунок 2 - Соотношение параметров межпорового вещества и видов пористости в пористой цементной матрице

Межпоровые перегородки состоят из продуктов гидратации, капиллярных и гелевых пор. Капиллярная пористость цементной матрицы зависит от исходного значения водовяжущего отношения (В/В) и может изменяться в процессе последующей гидратации цемента. Величина гелевой пористости в цементной матрице зависит от количества вяжущего и степени его гидратации. Наибольший объем пор в цементной матрице приходится на ячеистые поры, которые и должны определять его свойства, как разновидности всех видов бетонов, образуя округленные пустоты и межпоровые перегородки, т.е. его характерную макроструктуру. Величина ячеистой пористости в зависимости от вида укладки ячеистых пор не превышает определенного значения и взаимосвязана с количеством и средним размером ячеистых пор, между которыми есть определенная взаимосвязь [89]. Эти и

ряд других последующих показателей ячеистой структуры цементной матрицы характеризуют её физико-структурные, физические и механические свойства [90, 91].

В материалах пористого строения различают истинную пористость и кажущуюся (открытую пористость). Истинной пористостью (***П***) материала называют степень заполнения его объема порами. Кажущаяся пористость – это отношение объема, занятого в материале порами, сообщающимися между собой и с атмосферой, к объему материала. Таким образом, сумма закрытых и открытых пор дает значение истинной пористости данного материала. Обычно истинную пористость ***П*** выражают в долях по формуле

$$П = (1 - \frac{\rho_о}{\rho_б}), \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{\rho_о}$ – плотность образца пористого материала, кг/м^3;

$\boldsymbol{\rho_б}$ – плотность материала, образующего его каркас, кг/м^3.

В машиностроении, например, при пропитке деталей маслом пористость определяется как отношение объема всех пор в детали к объему детали, выраженное в процентах [67]. Поры подразделяют на закрытые, соединенные друг с другом, и открытые, соединенные между собой каналами.

Для описания микроструктуры пористого бетона используют идеализированные модели расположения пор в материале. Пространственную структуру таких материалов, взаимосвязь составляющих элементов (пор) принято описывать структурными моделями (упаковками) [92], которые обычно представляются в виде различной укладки шаров одинакового размера.

Одним из способов исследования порового пространства является микроскопический способ. Определение характера пористости материала под микроскопом отличается большой трудоемкостью. Однако из всех существующих спо-

собов этот способ является единственным, позволяющим судить не только о распределении пор по размерам, но и о их форме [86].

Обычно при подсчете средних размеров пор материала, да и вообще средних значений любых свойств, при значительном количестве экспериментов размер каждой поры в отдельности не измеряют, а подсчитывают количество пор в каком-нибудь определенном интервале размеров. Значение признака (размера пор), соответствующее каждому отдельному интервалу, называется вариантом $\boldsymbol{x_i}$ ($\boldsymbol{x_1}$, $\boldsymbol{x_2}$, $\boldsymbol{x_3}$ и т.д.), а абсолютная численность – весом соответствующего варианта ($\boldsymbol{m_1}$, $\boldsymbol{m_2}$, $\boldsymbol{m_3}$ и т.д.). Следовательно, сумма значений признака в пределах интервала равна произведению варианта на его вес $\boldsymbol{x_i \cdot m_i}$. В этом случае формула средней величины $\overline{X}$, называемой средневзвешенной, имеет вид

$$\overline{X} = \frac{\sum x_i m_i}{\sum m_i}, \qquad (2)$$

т.е. средневзвешенная арифметическая величина равна сумме произведения вариантов $\boldsymbol{x_i}$ на их веса, разделенной на сумму весов $\boldsymbol{\sum m_i}$.

Если вес варианта $\boldsymbol{m_i}$ отнести ко всей совокупности весов $\sum \boldsymbol{m_i}$, то получим величину, называемую частностью $\boldsymbol{\omega}$. Для варианта $\boldsymbol{x_i}$ имеем $\omega_i = m_i / \sum m_i$. В вариантном ряду каждому значению интервала соответствует определенная частность. Следовательно, ее можно рассматривать как функцию значения признака.

Для наглядного изображения вариационного ряда обычно пользуются графиком. На оси абсцисс откладывают значение признака (диаметр пор), а на оси ординат – его частность. Для того, чтобы показать, что частность относится ко всему интервалу, она изображается прямоугольником, основание которого равно ширине интервала, а высота – соответствующей частности. Такое графическое изображение называют гистограммой. Допускается, что все поры, попавшие в один интервал, имеют одинаковое значение признака (одинаковый размер). Со-

единив точки середин интервалов, получают ломаную линию, называемую полигоном [86].

Для более точной характеристики пористой структуры материла иногда кроме среднего диаметра пор подсчитывают диапазон варьирования ***R***, равный разнице между наибольшими ($x_{наиб}$) и наименьшими ($x_{наим}$) значениями признака.

Но величины размаха варьирования и среднего диаметра пор также недостаточны для полной характеристики пористой структуры того или иного материала. Дополнительной характеристикой структуры материала является показатель - среднее квадратичное отклонение, который в статистике характеризует разброс значений величины признака (в данном случае диаметра пор) Если вариация признака представлена в виде вариантов x_1, x_2, x_3 … с весами m_1, m_2, m_3 …, то стандартное отклонение имеет вид

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (X - \overline{X})^2 m_i}{\sum m_i}}, \qquad (3)$$

Величина стандартного отклонения зависит от неравномерности распределения пор и от их размеров. При увеличении диаметра пор стандартное отклонение возрастает. Как показывает опыт, во многих случаях по величине стандартного отклонения можно судить о качестве ячеистых материалов. Как правило, материал, характеризующийся меньшим стандартным отклонением, имеет более высокие технические свойства.

1.2.3 Способы приготовления пористой цементной матрицы

Существует несколько технологий производства пенобетона. В отличие от ячеистого газобетона, при получении пенобетона используется менее энергоемкая безавтоклавная технология. В процессе приготовления пенобетона легко удается придать этому материалу требуемую плотность путем изменения подачи количе-

ства пенообразователя. В результате возможно получение изделий плотностью от 200 кг/м^3 до самого предельного значения легкого бетона 1200 кг/м^3 [93]. На сегодняшний день на рынке производителей стройматериалов представлены различные варианты технологических схем [94] и аппаратурного оформления производства перистого бетона. Анализ известных технологических решений позволяет систематизировать их и классифицировать:

– способ, заключающийся в раздельном приготовлении пены и раствора вяжущего с последующим их совместным перемешиванием в смесителе;

– способ «сухой минерализации пены», заключающийся в минерализации сухим порошком вяжущего и заполнителя путем равномерного распыления их над поверхностью пены при одновременном перемешивании;

– баротехнология;

– способ аэрации, основанный на воздухововлечении в цементно-песчаный раствор с добавкой пенообразователя.

Каждый способ имеет разное аппаратурное оформление, учитывающее тип изготавливаемого пенобетона (по плотности), его назначение (конструкционный, теплоизоляционный), особенности используемого сырья (минералогический состав цемента, заполнителя, тип используемого пенообразователя, добавки).

Широкое распространение получил способ получения пористого бетона путем периодического получения пенобетонной смеси. Пеногенератор должен получать пену средней кратности (20-40) с высоким коэффициентом ее использования по объему в поризуемом растворе (не ниже 0,8). Проектная плотность пористого бетона регулируется соотношением между пеной и раствором. Такой подход сложен в технологическом отношении: пропорции между пеной и раствором могут изменяться в широких пределах, так как на устойчивость пены в цементном растворе влияет множество технологических факторов. В процессе смешивания значительный объем пены гасится, что затрудняет получение пористых бетонов с низкими устойчивыми значениями плотности. Для компенсации пеногашения используют высокие дозировки пенообразователей, что удорожает продукцию. Кро-

ме того, высокие концентрации ПАВ приводят к «отравлению» цемента, замедлению сроков схватывания. Повышение подвижности цементного раствора за счет увеличения В/В ведет к снижению плотности цементного камня в перегородках. По рассматриваемому способу предпочтительно использовать пенообразователи из природного сырья, которые меньше подвержены влиянию температурно-влажностных условий, минералогического состава цемента и крупности песка. По такому способу можно получать пенобетоны со средней плотностью от 600 до 1200 кг/м^3. Основной недостаток получаемого по этому способу пористого бетона – усадка пенобетонной смеси в форме [95, 96].

Традиционный способ приготовления пористой цементной матрицы реализуется смешением пены с вяжущим материалом. Способ заключается в том, что в пеногенераторе из рабочего раствора пенообразователя получают низкократную («тяжелую», «мокрую») пену. Пена подается в пенобетоносмеситель, где она смешивается с сухими компонентами (цемент, песок). Структура материала образуется при схватывании и твердении вяжущего [97]. Отличие традиционного способа от остальных – минимальное количество технологических операций, и как следствие, простота и дешевизна. Недостатками данного способа является невозможность получения изделий стабильной плотности.

По баротехнологии процессы смешивания и транспортирования пенобетонной смеси происходят при избыточном давлении. Смесь цемента, кремнеземистых компонентов, воды и пенообразователя приготавливается в герметичном смесителе под избыточным давлением. Для данной технологии применимы синтетические пенообразователи, которые легко вспениваются, имеют более низкий расход активной основы, чем пенообразователи на природной основе. К недостаткам технологии можно отнести следующее: пеногенератор не успевает вовлекать рабочий раствор пенообразователя в пену, загрузка сухих минеральных компонентов в смеситель производится без предварительного их смешения, поэтому неравномерная подача этих компонентов ведет к дополнительному разрушению пены. Тонкие стенки пеноцементной массы не могут выдерживать повышенного давления в воз-

душных пузырьках и при заливке массы в формы идет процесс их коалесценции с образованием сплошных каналов. Изделия имеют высокие усадочные трещины.

Технология изготовления пенобетона способом аэрации заключается во вспенивании цементно-песчаного раствора с добавкой пенообразователя без предварительной их подготовки. Можно выделить технологии аэрации в открытых смесителях при атмосферном давлении и в замкнутых смесителях при избыточном давлении [98, 99]. К недостаткам данной технологии следует отнести тот факт, что для получения пенобетонов низких плотностей приходится повышать В/В, что отрицательно сказывается на прочности и долговечности. Промышленный опыт показывает, что по данной технологии получение пористых бетонов низкой плотности невозможно. Положительным является то, что наблюдается частичная активация смеси, получение мелкопористой структуры, которая определяет дальнейшие строительно-технические свойства изделий.

Существующее разнообразие способов получения пенобетонных смесей и недостаточность количества статистических данных характеристик получаемых пенобетонов не позволяют однозначно определить достоинства и недостатки каждого способа. Нет установленных закономерностей поведения пеноцементных смесей при различных способах смешения, разработанных принципов совместимости пены и цементного раствора. Поэтому на данный момент все способы имеют право на существование [93].

1.2.4 Композиция для приготовления пористой цементной матрицы

Состав пористых бетонов определяется маркой используемого цемента, природой заполнителя (прочностью, размером и формой), В/В отношением, соотношением «заполнитель/вяжущее», видом и количеством пенообразователя (ПО).

В ячеистых бетонах используют [56]:

– естественные заполнители – пористые горные породы (пемза, вулканические известковые туфы, известняки-ракушечники);

– искусственные заполнители – отходы промышленности (топливные шлаки) и искусственно поризованные материалы (керамзит, аглопорит, вспученный перлит и др.);

– естественные заполнители, не имеющие пористой структуры (кварцевый песок);

– волокнистые заполнители – дисперсно–армирующие компоненты (фибры – волокна металла, отрезки тонкой стальной проволоки, щелочестойкое стекловолокно, полимеры).

Форма зерен заполнителя важна: предпочтительны зерна округлой и кубической формы. Пластинчатые, удлиненные, так называемые лещадные зерна заполнителя укладываются в бетоне в строго ориентированном положении, как правило, горизонтальном, что делает структуру бетона неоднородной. В работе [100] отмечается, что один из главных недостатков бетона на крупных заполнителях – слабое сцепление цементного камня с заполнителями. При нагрузке бетона трещины возникают прежде всего на поверхности раздела между цементным камнем и заполнителем вследствие существенного различия в свойствах контактирующих фаз. Размер этих трещин пропорционален размеру заполнителя: крупный заполнитель образует крупные трещины, а мелкий – мелкие. В бетоне с крупными заполнителями трещины возникают при меньшем уровне напряжений. Более того, процесс вспучивания (искусственного или естественного) значительно снижает прочность заполнителя. Как правило, она меньше, чем у цементного камня, и разрушение пенобетонов также происходит по зернам крупного заполнителя.

Для каждого вида пористого заполнителя существует предельная прочность бетона, дальнейшее повышение которой возможно лишь в сравнительно небольшой степени [56]. Некоторые заполнители (диатомит, опока, известняк, кварцевый песок) не являются инертными веществами и оказывают определенное влияние на формирование структуры цементного камня [79, 101].

Композиция для получения пористой цементной матрицы в различных пропорциях помимо портландцемента может включать тонкомолотый цемент, спо-

собный увеличивать пористость матрицы за счет уменьшения толщины межпоровых перегородок при сохранении ее прочности. Толщина межпоровой перегородки в цементной матрице зависит от размера частиц вяжущего компонента смеси, вида самого вяжущего и наполнителя, условий твердения. Результаты моделирования [102] свидетельствуют о существенном влиянии минимального расстояния между порами на характер заполнения порами цементной матрицы. Так, для диаметра ячеистых пор от 0,01 до 0,1 мм при нормальном распределении уменьшение минимального расстояния между порами в 2 раза с 80 до 40 мкм увеличивает процент заполнения матрицы (пористость) практически на 10 %.

Рассматривая структуру межпоровых перегородок цементной матрицы как конструкционный элемент, размер зерен цемента в вяжущем для получения теплоизоляционного пенобетона должен составлять 25-50 % размера межпоровых перегородок, то есть иметь значение 30-50 мкм. Поэтому, для изготовления теплоизоляционного пенобетона необходим цемент, величина зерен в котором соответствует размерам межпоровых перегородок цементного камня. Предельная наибольшая крупность заполнителя должна быть не более 25 % размера сечения балочных элементов или 50 % толщины плитных элементов [102].

Пенообразователями являются коллоидные или полуколлоидные вещества с асимметрично-полярными молекулами, которые способны концентрироваться на границах раздела фаз, уменьшать поверхностное натяжение жидкостей и образовывать прочные и вязкие пленки [103]. Такие соединения имеют общее название – поверхностно-активные вещества (ПАВ) и используются также как стабилизаторы и регуляторы реологических свойств дисперсных систем – суспензий, эмульсий, пластификаторов цементных растворов, гидрофобизаторы цементов [104, 105, 106].

Различают ионогенные и неионогенные ПАВ. Ионогенные ПАВ делятся на анионоактивные, катионоактивные и амфотерные. В настоящее время в качестве пенообразователей для получения пен в производстве пенобетонов используются в основном анионоактивные и амфотерные ПАВ. По химической природе их мож-

но разделить на пять групп: алкилсульфаты, алкилбензо-сульфонаты, соли карбоновых кислот, соли смоляных кислот, алигопептиды и другие гидролизаты белков [103].

Согласно [107], механизм образования пузырька пены заключается в формировании двойного адсорбционного слоя, состоящего из молекул пенообразователя. Скорость образования единичного газового включения определяется скоростью диффузии молекул ПАВ из объема раствора к поверхности образующихся фаз. На поверхности раствора газовый пузырек окружается двойным защитным слоем ПАВ, который препятствует коалесценции новообразований.

Устойчивость пены зависит от ее строения, размеров пузырьков, толщины водных пленок, а также от их упруго-механических свойств. Требования к стойкости пены и к ее несущей способности возрастают с уменьшением заданной плотности бетона, с понижением температуры среды, а также с удлинением сроков схватывания вяжущего. Устойчивость пеномассы увеличивается при уменьшении размеров пузырьков, повышении вязкости пены, а также монодисперсности газовой фазы [79].

На структуру пены значительное влияние оказывают гидродинамические факторы процесса вспенивания (скорость вращения и форма мешалки), концентрация и вид ПАВ, а также реологические характеристики поризуемого раствора [79]. До окончания процессов схватывания и достижения структурной прочности (примерно 2-3 ч) пена должна выполнять функции несущего пространственного каркаса – не оседать и не отделять воду.

Применительно к пористым бетонам следует учитывать влияние минеральных добавок на устойчивость системы «цемент-пена», так как активный радикал ПАВ взаимодействует с поверхностными ионами минеральных частиц или ионами, перешедшими в раствор, что значительно изменяет структуру, устойчивость, время жизни и структурно-механическую прочность пены. Путем выбора дисперсных минеральных добавок с заданными электрокинетическими свойствами

можно добиться дополнительной стабилизации пены и, таким образом, увеличения эффективности действия пенообразователя [93].

Механизм этого явления представляется следующим. Анионные ПАВ выделяют в раствор отрицательно заряженные ионы, катионоактивные – положительные. При вспенивании подобных ПАВ пузырьки воздуха заключаются в тонкую оболочку ПАВ, которая приобретает заряд, равный заряду активного радикала. Попытка стабилизировать подобную пену отрицательно заряженными минеральными частицами приводит к взаимному электростатическому отталкиванию зарядов и, как следствие, стабилизации пленочного слоя [93].

Добавление минерального порошка с противоположным знаком заряду воздушного пузырька приводит к снижению кратности пены; так, между активными радикалами ПАВ и поверхностью минеральной частицы протекает процесс хемосорбции, что изменяет значение поверхностного натяжения на границе газ – жидкость и приводит к коалесценции воздушных пузырьков, тем самым снижая кратность и устойчивость пены [108].

Сложность удержания воздушных пузырьков в системе «цементный раствор – пена» заключается в том, что на поверхности цементных частиц кроме физической адсорбции происходят процессы хемосорбции, гидролиза и гидратации. В результате этого в межпоровой воде изменяется ионный состав (pH повышается до 11,5-12), что ведет, в свою очередь, к изменению электрокинетического заряда цементных частиц. При использовании в качестве пенообразователя анионоактивных ПАВ между воздушными пузырьками, имеющими электроотрицательный заряд, будут возникать силы отталкивания, что приводит к стабилизации пен [93].

Добавка минерализатора пены позволяет увеличить однородность порового пространства, препятствуя слипанию и деформации пузырьков воздуха в начальные сроки твердения. В качестве стабилизаторов пены возможно использование порошков минеральных веществ с высокой удельной поверхностью (молотый мел, молотый известняк, молотый кварцевый песок и т.п.) и специальных добавок (сульфаты железа, меди, алюминия, магния и т.п.) [79, 93].

С целью интенсификации процессов структурообразования используют известные ускорители твердения такие, как сульфат натрия, хлорид кальция, силикат натрия и т.д. Добавка для ускорения твердения матрицы предотвращает оседание пены и последующую усадку [79], что обеспечивает равномерное распределение пор по объему матрицы.

Для сорбции органических веществ и радионуклидов на межпоровых перегородках возможно использование различных сорбирующих материалов [57-61] при условии сохранения прочностных свойств пористой цементной матрицы.

Из приведенного обзора научно-технической информации по характеристикам пористой цементной матрицы следует, что:

– при одинаковой пористости наилучшими прочностными свойствами обладает цементная матрица с наиболее мелкими однородными порами;

– пористые цементные матрицы обладают, так называемой ячеистой структурой, представленной ячеистыми порами (80-90 % объема порового пространства), размер которых может варьироваться от 10^{-6} до $2 \cdot 10^{-3}$ м, и межпоровыми перегородками, которые состоят из продуктов гидратации, капиллярных (10^{-7}-10^{-6} м) и гелевых (< 10^{-8} м) пор;

– прочность на сжатие типовых цементных матриц пористостью около 70 % составляет 2,5-3,0 МПа;

– традиционный способ приготовления цементной матрицы реализуется смешением пены с вяжущим материалом;

– композиция в различных пропорциях помимо портландцемента может включать тонкомолотый цемент, способный увеличивать пористость матрицы за счет уменьшения толщины межпоровых перегородок при сохранении ее прочности;

– добавка минерализатора пены позволяет увеличить однородность порового пространства, препятствуя слипанию и деформации пузырьков воздуха в начальные сроки твердения, добавка для ускорения твердения матрицы предотвра-

щает оседание пены и последующую усадку, что обеспечивает равномерное распределение пор по объему матрицы;

– для сорбции органических веществ и радионуклидов на межпоровых перегородках возможно использование различных сорбирующих материалов.

1.3 Теоретические основы пропитки пористых материалов

В химической технологии многие процессы протекают в аппаратах, заполненных мелкозернистым материалом или насадкой (процессы фильтрования, адсорбции, абсорбции, сушки, пропитки и т.д.).

Поскольку зернистые материалы и насадки могут быть разнообразной формы (гранулы, таблетки, шарики, кольца и т.п.), то каналы, образованные пустотами в слоях этих материалов, имеют очень сложную конфигурацию. Поэтому при движении жидкости через неподвижные зернистые или пористые слои поток одновременно обтекает отдельные элементы слоя и движется внутри каналов сложной формы. Анализ такого движения составляет смешанную задачу гидродинамики. Однако для упрощения расчета подобных процессов их обычно относят к внутренней задаче [109], которая сводится к расчету гидродинамического сопротивления пористого слоя известной высоты, которое необходимо преодолеть для прохождения через слой данной пористости однородной ньютоновской жидкости.

В уравнении (4) содержатся характеристики зернистого или пористого слоя на основе аналогии с системой параллельных трубок, пренебрегая кривизной каналов и принимая их длину равной высоте слоя [110]. Уравнение (4) позволяет рассчитать гидродинамическое сопротивление зернистого или пористого слоя (потери давления на трение при движении потока однородной жидкости) $\Delta \boldsymbol{p}$

$$\Delta p = \lambda \frac{h}{d_{экв}} \frac{\rho w_0^{\ 2}}{2}, \qquad (4)$$

где $\boldsymbol{h}$ – высота слоя, м;

$\boldsymbol{d_{экв}}$ – эквивалентный диаметр каналов пористого или зернистого слоя, м;

$\boldsymbol{\rho}$ – плотность жидкости, кг/м^3;

$\boldsymbol{w_0}$ – скорость движения жидкости в каналах зернистого или пористого слоя (скорость пропитки), м/с;

$\boldsymbol{\lambda}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, отражающий влияние не только сопротивления трения, но и дополнительных местных сопротивлений, вклад которых в обще сопротивление слоя может быть очень большим.

В общем случае коэффициент гидравлического сопротивления $\boldsymbol{\lambda}$ взаимосвязан с критерием Рейнольдса ***Re*** по формуле (5), имеющей вид

$$\lambda = f(\mathrm{Re}) = A/\mathrm{Re} \tag{5}$$

где ***A*** – константа, определяемая по экспериментальным данным.

Основной задачей при определении гидравлического сопротивления слоя пористого или зернистого материала является установление вида функциональной зависимости (5) [110, 111, 112]. В частных случаях значение коэффициента ***A*** и показатель степени критерия Рейнольдса ***Re*** меняются в зависимости от режима движения жидкости, структуры пористого пространства материала и природы жидкости, движущейся по порам материала [113].

Критерий Рейнольдса ***Re*** для зернистых или пористых материалов, каналы в которых образованы пустотами в слоях этих материалов и имеют очень сложную конфигурацию [110], можно рассчитать по формуле

$$\mathrm{Re} = \frac{w}{\Pi}\frac{\Phi d_{ср}\Pi}{1-\Pi}\frac{\rho}{\mu} = \mathrm{Re}_n\frac{\Phi}{1-\Pi}, \tag{6}$$

где $\boldsymbol{w}$ – скорость движения жидкости, отнесенная ко всему сечению пористого или зернистого слоя, м/с;

$\boldsymbol{d_{ср}}$ – средний диаметр пор слоя, м;

$\boldsymbol{\mu}$ – вязкость жидкости, Па·с;

$\boldsymbol{\Phi}$ – коэффициент, учитывающий зависимость эквивалентного диаметра пор слоя от их формы (например, для пор шаровой формы равен 2/3).

После подстановки в уравнение (4) формулы (6) получим

$$\Delta p = \lambda_n \frac{h}{d_{cp}} \frac{\rho w^2}{2} \frac{(1-\Pi)^2}{\Pi^3} \frac{1}{\Phi^2}, \qquad (7)$$

где $\boldsymbol{\lambda_n = f(Re_n) = f(wd_{cp}\rho/\mu)}$.

Согласно [110] при значениях $\boldsymbol{Re \ll 1}$: $\boldsymbol{\lambda_n = 220/Re_n}$. Тогда уравнение (7) можно представить в следующем виде

$$\Delta p = 110 \frac{\mu w h}{d_{cp}^2} \frac{(1-\Pi)^2}{\Pi^3} \frac{1}{\Phi^2}, \qquad (8)$$

Анализ уравнения (8) показывает, что гидродинамическое сопротивление пористого или зернистого слоя $\Delta \boldsymbol{p}$ прямо пропорционально его высоте $\boldsymbol{h}$, скорости движения жидкости $\boldsymbol{w}$ и ее вязкости $\boldsymbol{\mu}$ и обратно пропорционально среднему диаметру пор слоя $\boldsymbol{d_{cp}}$ и пористости слоя $\boldsymbol{\Pi}$.

При определении проникающих свойств жидкости следует рассматривать пористую структуру как систему капилляров (узких каналов), доступных для перемещения в них жидкости. Диаметр пор определяет характер сил, действующих в них на жидкость. В капиллярных порах поверхность жидкости принимает форму, обусловленную силами поверхностного натяжения, а влияние сил тяжести пренебрежимо мало. В ячеистых порах поведение жидкости следует рассматривать с учетом сил тяжести [114].

Капиллярное давление поднимает жидкость до тех пор, пока оно не уравновесится гидростатическим давлением столба поднявшейся жидкости. В соответствии с этим в случае неполного смачивания высота капиллярного поднятия $\boldsymbol{h}$ выражается формулой Жюрена

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{g\rho r}, \qquad (9)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – поверхностное натяжение жидкости, Н·м^2;

$\boldsymbol{\theta}$ – угол смачивания, град;

$\boldsymbol{g}$ – ускорение силы тяжести, м/с^2;

$\boldsymbol{\rho}$ – плотность жидкости, кг/м^3;

$\boldsymbol{r}$ – радиус капилляра (поры), м.

Высота поднятия жидкости в порах обратно пропорциональна их радиусу и прямо пропорциональна характеристике смачивания $\boldsymbol{B = Cos\theta}$. Таким образом, чем меньше угол смачивания пористого материала, тем большим капиллярным подсосом он обладает; чем меньше радиус капилляра (поры), тем большим капиллярным подсосом он обладает [115].

Таким образом, механизм объемной пропитки пористых материалов сводится к описанию движения жидкости в пустотном пространстве пористого материала на основе диффузионного, фильтрационного и капиллярного процессов с учетом противодействия внутренних давлений. Параметры процесса пропитки и его качество зависит от сопротивления пропитываемой пористой среды и проникающих свойств жидкости, т.е. их способности проникать в пористое пространство [116].

Например, процесс объемной пропитки щебня из пористого камня выражают через математические зависимости на основе описания диффузионного, фильтрационного и капиллярного механизмов. Приводятся зависимости глубины пропитки камня жидкостью под избыточными давлениями, которые включают в себя характеристики жидкости и параметры пропитки (величина избыточного давления) [116]. Подбор эффективных параметров обеспечивает надежность протекания процесса пропитки и качество получаемого продукта.

Частично разработаны методы контроля и управления процессом пропитки. В частности, в работе [117] разрабатывается метод контроля процесса пропитки армирующих наполнителей полимерными связующими.

Из представленного обзора теоретических основ движения потока жидкости в пористом слое следует, что:

– процесс пропитки зависит преимущественно от двух составляющих – гидравлического сопротивления пористого слоя и проникающих свойств жидкости;

– из работ Касаткина А.Г., Дытнерского Ю.И. и др. гидравлическое сопротивление $\Delta \boldsymbol{p}$ пористого слоя при движении жидкости в нем может быть рассчитано по формуле (7);

– коэффициент гидравлического сопротивления при очень малых числах Рейнольдса $(Re<<1)$ при пропитке ньютоновской жидкостью пористого материала определяют по зависимости $\lambda_n=220/Re_n$.

1.4 Выводы из обзора научно-технической информации. Выбор направления исследований

Из представленного обзора научно-технической информации можно сделать следующие выводы.

Для каждого вида органических отходов могут быть применены соответствующие методы переработки, позволяющие разрушить органические компоненты и значительно уменьшить объем отходов. Широко распространены термические методы. Сжигание является одним из основных методов переработки, в процессе которого органические вещества окисляются до простых оксидов. В процессе сжигания образуются вторичные радиоактивные отходы: конденсат, фильтры после очистки отходящих газов, сажа, зольный остаток, содержащий основное количество радионуклидов. Пиролиз представляет собой термическое неполное окисление при недостатке кислорода. Процесс протекает при более низких температурах, чем сжигание, при этом уменьшается коррозия оборудования и унос радионуклидов в газовую фазу.

Для отходов, содержащих преимущественно растворимые в воде органические вещества, предлагаются методы химического и электрохимического окисления в жидкой фазе. Процессы реализуются при более низких температурах, чем сжигание, и не требуют сложной системы очистки отходящих газов. Однако в процессах используются дорогие химические реактивы и оборудование.

Для некоторых отходов применим метод кислотного растворения в смеси азотной и серной кислот при температуре 250 $^{\circ}$C. Для процесса требуются оборудование из дорогих коррозионно-стойких материалов и сложные системы очистки агрессивных газов, так как во время процесса образуются диоксиды серы и азота.

Для очистки отходов может быть использован гидролизный процесс, при котором радионуклиды переходят из органической фазы в водную. Для некоторых отходов может быть использована дистилляция, в результате которой образуется очищенный дистиллят и кубовый остаток, концентрирующий в себе радионукли-

ды. Очищенные смеси органических веществ представляют собой промышленные отходы и требуют дальнейшей переработки.

Для кондиционирования органических ЖРО применяется цементирование, которое может осуществляться различными способами. Простое цементирование, при котором органические отходы вводят напрямую без предварительной подготовки в цементный раствор малоэффективно, так как не позволяет включать отходы в конечный продукт более 4-5 % по массе из-за их отрицательного влияния на приготовление и твердение цементного компаунда. Большее наполнение может быть получено при предварительном эмульгировании отходов в воде, а также при предварительной их адсорбции различными твердыми материалами, которые затем смешиваются с цементным раствором. В зависимости от сорбирующих материалов и состава органические отходы могут быть переведены в форму от желеобразной до твердой.

Известны способы иммобилизации водных солевых ЖРО методом пропитки пористых керамических матриц, формируемых в виде небольших блоков. Концентрирование радионуклидов в матрице происходит путем её многократной пропитки чередуемой с сушкой и последующей обработкой защитным покрытием. Пропитанные блоки подлежат размещению и омоноличиванию в упаковке с получением целостной матрицы без пустот, пригодной для транспортирования и хранения.

Иммобилизация методом пропитки пористых матриц может быть применена для органических ЖРО. Метод пропитки с различными целями применяется при обработке бетонных изделий растворами, полимерными материалами, маслом. А также при ликвидации свежих разливов нефти с помощью пористых цементных гранул.

Пористые цементные матрицы обладают, так называемой ячеистой структурой, представленной ячеистыми порами (80-90 % объема порового пространства), размер которых может варьироваться от 10^{-6} до $2 \cdot 10^{-3}$ м, и межпоровыми перегородками, которые состоят из продуктов гидратации, капиллярных (10^{-7}-10^{-6} м) и

гелевых (< 10^{-8} м) пор. Согласно ГОСТ 25485-89 [77] прочность на сжатие типовых цементных матриц пористостью около 70 % составляет 2,5-3,0 МПа. При одинаковой пористости наилучшими прочностными свойствами обладает цементная матрица с наиболее мелкими однородными порами. Традиционный способ приготовления цементной матрицы реализуется смешением пены с вяжущим материалом. Композиция в различных пропорциях помимо портландцемента может включать тонкомолотый цемент, способный увеличивать пористость матрицы за счет уменьшения толщины межпоровых перегородок при сохранении ее прочности. Добавка минерализатора пены позволяет увеличить однородность порового пространства, препятствуя слипанию и деформации пузырьков воздуха в начальные сроки твердения, добавка для ускорения твердения матрицы предотвращает оседание пены и последующую усадку, что обеспечивает равномерное распределение пор по объему матрицы. Для сорбции органических веществ и радионуклидов на межпоровых перегородках возможно использование различных сорбирующих материалов.

Процесс пропитки зависит преимущественно от двух составляющих – гидравлического сопротивления пористого слоя и проникающих свойств жидкости. Гидравлическое сопротивление $\Delta \boldsymbol{p}$ пористого слоя при движении жидкости в нем может быть рассчитано по формуле (7). Коэффициент гидравлического сопротивления при очень малых числах Рейнольдса ($\boldsymbol{Re<<1}$) при пропитке ньютоновской жидкостью пористого материала определяют по уравнению $\boldsymbol{\lambda_n=220/Re_n}$.

Методы переработки, позволяющие разрушить органические компоненты и значительно уменьшить объем отходов сложны и дорогостоящи. При переработке образуются вторичные радиоактивные и, часто, химически вредные отходы, происходит концентрирование радионуклидов в конечном продукте, что требует повышенных мер по обеспечению радиационной и ядерной безопасности. При сравнительно небольших объемах отходов целесообразно применение более простых методов, которые обеспечивают качество упаковок, предназначенных для хранения или захоронения.

Для органических ЖРО может быть применена иммобилизация методом пропитки пористых матриц. Потенциальная возможность использования ячеистых пор (80-90 % объема всех пор) цементных матриц для включения в нее органических ЖРО пропиткой **придают актуальность** разработке эффективной технологии иммобилизации органических ЖРО данным методом.

Для научного обоснования эффективной технологии иммобилизации органических ЖРО методом пропитки пористой цементной матрицы необходимо:

– разработать композицию для приготовления матрицы, характеризующейся пористостью около 70 %, с однородными порами, и регламентированной прочностью;

– обосновать и определить эффективные параметры пропитки;

– обосновать и определить зависимость параметров для оценки и прогнозирования технологии пропитки;

– определить свойства пропитанной цементной матрицы;

– на основании анализа данных оптимизировать технологию.

Глава 2. Экспериментальная часть

2.1 Характеристика исходных материалов

2.1.1 Органические жидкие радиоактивные отходы

Жидкие радиоактивные отходы, подлежащие иммобилизации, весьма разнообразны по составу и физико-химическим свойствам. В экспериментах по пропитке цементной матрицы использовали органические ЖРО различного вида, а именно: раствор ТБФ в синтине, сцинтиллятор и нефтяное масло, поступившие в ФГУП «Радон» от сторонних организаций.

ТБФ представляет собой бесцветную маслянистую жидкость без запаха, смешивается с большинством органических растворителей. По химическим свойствам ТБФ типичный представитель полных эфиров фосфорной кислоты, обладающих полярными свойствами [118]. Синтином называют жидкую горючую смесь насыщенных и ненасыщенных углеводородов. ТБФ используют в качестве экстрагента редкоземельных элементов и трансурановых элементов при переработке ОЯТ. Синтин выступает в роли разбавителя, образуя истинный раствор с ТБФ и не снижая при этом его экстракционной способности.

Нефтяные масла являются смесью метановых, нафтеновых, ароматических и нафтено-ароматических соединений. Углеводороды, составляющие нефтяные масла различного рода и различного веса, имеет общее свойство – неполярность.

Жидкие сцинтилляторы представляют собой растворы сцинтиллирующего вещества в органической жидкости. Примером жидкого сцинтиллятора может быть раствор р-терфенила в ксилоле с добавкой шифтера. Другими часто используемыми растворителями являются толуол, фенил-циклогексан и фенилоксилетан, а сцинтиллирующими веществами – дифенолоксазол и детрафенилбутадиен.

Радиометрический и радиоизотопный состав раствора ТБФ в синтине, сцинтиллятора и нефтяного масла, использованных в работе, представлен в таблице 4.

Основными носителями активности в растворе ТБФ в синтине являются α-излучающие радионуклиды ^{238}U и ^{235}U и находящиеся в равновесии с ними $^{234}Th+^{234m}Pa$, в жидком сцинтилляторе α- и β-излучающие радионуклиды – ^{137}Cs, ^{239}Pu и ^{241}Am, а в нефтяном масле – ^{234}U.

Таблица 4 – Радионуклидный состав органических ЖРО

Удельная активность радионуклидов, Бк/л		
25 % раствор ТБФ в синтине		
U^{238}	U^{234}	$^{234}Th+^{234m}Pa$
$2{,}0\cdot10^{5}$	$2{,}0\cdot10^{5}$	$2{,}0\cdot10^{5}$
Нефтяное масло		
U^{238}	U^{235}	U^{234}
$9{,}0\cdot10^{3}$	$1{,}3\cdot10^{3}$	$1{,}5\cdot10^{4}$
Сцинтиллятор		
Am^{241}	Cs^{137}	Pu^{239}
$2{,}4\cdot10^{6}$	$1{,}1\cdot10^{9}$	$2{,}1\cdot10^{6}$

Динамическая вязкость отходов, включаемых методом пропитки в пористую цементную матрицу, имела следующие значения:

– для раствора ТБФ в синтине 0,003 Па·с;
– для сцинтиллятора 0,01 Па·с;
– для нефтяного масла 0,058 Па·с.

2.1.2 Компоненты композиции

В качестве основы цементной композиции был использован тонкомолотый цемент (ТМЦ) и цемент марки ЦЕМ I 42,5Б Д0, химический и минералогический состав которого приведен в таблице 5. Тонкомолотый цемент со сверхтонкими частицами близок по химическому и минералогическому составу к портландцементу, изготавливается опытными партиями по специальной технологии (цементная пыль, улавливаемая электрофильтрами при помоле портландцементного клин-

кера). Свойства ТМЦ и цементных компаундов на его основе приведены в таблицах 6-7.

Таблица 5 – Свойства портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Б Д0

Химический состав клинкера, % масс.					
$CaO_{св.}$	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	RaO
0,12	23,07	4,23	4,69	66,72	0,6
Минералогический состав клинкера, % масс.					
C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF		
60,7	20,3	3,2	14,2		
Активность при пропаривании – 36,3 МПа; Средняя активность в возрасте 3 суток – 27,7 МПа; Признаки ложного схватывания – нет; Удельная эффективная активность радионуклидов - 64 ± 11 Бк/кг.					

Таблица 6 – Химический и минералогический состав ТМЦ

Химический состав, % масс.					Минералогический состав, % масс.			
CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	$CaO_{св.}$	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
64,35	22,26	4,48	5,86	0,18	61,0	19,7	4,2	13,6

В качестве пенообразующей добавки для приготовления ПЦМ был использован промышленно выпускаемый синтетический ПО «Пентапав-430» марки А. Основные качественные показатели используемого ПО приведены в таблице 8.

В качестве воды затворения для приготовления цементной матрицы использовали техническую воду.

В качестве модифицирующих добавок к портландцементу и ТМЦ использовали:

– ускорители схватывания: силикат натрия Na_2SiO_3 марки «х.ч.», хлорид кальция $CaCl_2$ марки «х.ч.» и карбонат кальция $CaCO_3$ марки «х.ч.»;

– минерализаторы пены: мелкодисперсный порошок Fe_2O_3 марки КА [119], свойства которого приведены в таблице 9, оксид магния марки «х.ч.» и кварцевый песок [120].

Таблица 7 – Свойства ТМЦ и цементных компаундов на его основе

Гранулометрический состав		Удельная поверхность, $см^2/г$	Активность при пропаривании, МПа	Средняя активность в возрасте 3 суток, МПа	Признаки ложного схватывания	Водоотделение после 60 мин после затворения, %	Прочность на сжатие цементных компаундов на 28 сут, МПа	
Размер фракции, мм	% по массе						В/В=0,5	В/В=1,5
> 0,8	0	12100,00	39,50	28,90	нет	2,54	41,30	4,60
0,63-0,8	0,25							
0,4-0,63	2,18							
0,315-0,4	18,46							
0,2-0,315	35,62							
0,1-0,2	5,19							
0,063-0,1	22,89							
0,05-0,063	13,07							
< 0,05	2,07							
Средний размер частиц $d_{95\%}$=4,11 мкм								

Таблица 8 – Качественные показатели «Пентапав-430» марки А.

Наименование показателей	Норма по ТУ/ГОСТ [121]	Результаты испытаний
Внешний вид	Вязкая жидкость от светло-серого до коричневого цвета, допускается образование осадка	соответствует
Масс. доля активного вещества, %, не менее	20,0	30,4
Водородный показатель (pH) 1 % водного раствора	7,0-11,5	10,1

В качестве сорбирующей добавки к цементу использовали бентонитовый глинопорошок марки ПБМВ производства АО «Керамзит» г.Серпухов из глины Калиново-Дашковского месторождения (далее по тексту – бентонит), свойства которого представлены в таблице 10.

Таблица 9 – Свойства мелкодисперсного порошка Fe_2O_3 марки КА [123]

Наименование показателей	Значение
Массовая доля соединений железа в пересчете на Fe_2O_3, %	96,5
Массовая доля веществ, растворимых в воде, %	0,5, не более
Массовая доля воды и летучих веществ, %	0,5, не более
pH водной суспензии	6,0-8,0
Остаток на сите с сеткой 0063, %	0,2, не более
Удельная поверхность, $см^2/г$	8000,0
Потери массы при прокаливании, %	1,5, не более
Массовая доля остатка, нерастворимого в соляной кислоте, %	0,3
Маслоемкость, г/100 г пигмента	50,0
Диспергируемость, мкм	30,0, не более
Укрывистость, $г/м^2$	7,0, не более

Таблица 10 – Свойства бентонитового глинопорошка [122]

Минералогический состав бентонитовой глины Калиново-Дашковского месторождения, % по массе								
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Остаток	Остальное
50,81	15,90	6,79	0,94	3,79	0,11	3,19	14,24	4,23

Качественные показатели глинопорошка марки ПБМВ	Величина
Выход глинистого раствора вязкостью 25 сек, $м^3/т$	12…13
Массовая доля влаги, %	10…13
Плотность суспензии, $г/см^3$	1,048…1,052
Мокрый ситовой анализ суспензии, остаток на ситах, %:	
№ сита 05, %	0, не более
№ сита 0071, %	3…4, не более
Показатель фильтрации, $см^3$	12…15
Модификатор	Na_2CO_3+
Показатель седиментации, %	0
Объемный вес, $г/см^3$	0,8…1,0

2.2 Методика исследования, характеристика оборудования

Для органических ЖРО может быть применена иммобилизация методом пропитки пористых матриц. Потенциальная возможность использования ячеистых пор (80-90 % объема всех пор) цементных матриц для включения в нее органических ЖРО пропиткой придают актуальность разработке эффективной технологии иммобилизации органических ЖРО данным методом.

Для научного обоснования эффективной технологии иммобилизации органических ЖРО методом пропитки пористой цементной матрицы необходимо разработать композицию для приготовления матрицы, характеризующейся пористостью около 70 %, с однородными порами, и регламентированной прочностью, обосновать и определить эффективные параметры пропитки, зависимость параметров для оценки и прогнозирования технологии пропитки, определить свойства пропитанной цементной матрицы и на основании анализа данных оптимизировать технологию.

2.2.1 Разработка композиции для приготовления пористой цементной матрицы

Задачей исследований являлось приготовление цементной матрицы, с прочностью на сжатие более 5 МПа на 28 сутки твердения, пористостью около 70 %, с однородными ячеистыми порами размером $(1\text{-}5)\cdot 10^{-5}$ м.

При разработке композиции для приготовления пористой цементной матрицы были выделены ключевые характеристики пористой цементной матрицы:

– прочность на сжатие пористой цементной матрицы не 28 сутки твердения: определяется нормативными требованиям к цементированным РАО;

– пористость цементной матрицы: определяет потенциальную емкость матрицы при пропитке ее отходами и, соответственно, эффективность технологического процесса;

и основные характеристики структуры порового пространства цементной матрицы:

– отсутствие оседания матрицы при схватывании;

– средний размер пор;

– среднее квадратичное отклонение как показатель однородности пор;

– диапазон варьирования размеров пор как разность между наибольшим и наименьшим размером пор.

Цементную матрицу готовили традиционным способом: из водного раствора ПО с концентрацией 0,1-0,6 % по массе с помощью высокоскоростного генератора получали монодисперсную устойчивую пену максимальной кратности, которую затем перемешивали в типовом смесителе с сухими компонентами композиции при В/В в диапазоне 0,4-1,0.

Первоначально определяли содержание ТМЦ и функциональных добавок в композиции. В качестве компонентов композиции использовали портландцемент и ТМЦ в соотношении от 0 до 1:1. ТМЦ использовали вместо заполнителя, что позволяет за счет уменьшения толщины межпоровых перегородок при сохранении прочности цементной матрицы увеличить ее пористость [102]. Затем для увеличения однородности порового пространства вводили в водный раствор ПО перед приготовлением пены минерализаторы в количестве до 3 % от массы цементной композиции, препятствующие слипанию и деформации пузырьков воздуха в начальные сроки твердения. Во избежание оседания пены и последующей усадки с уплотнением верхних слоев матрицы для равномерного распределения пор по объему матрицы использовали ускорители схватывания в количестве до 5 % от массы цементной композиции. Для сорбции органических веществ и радионуклидов в цементную композицию вводили бентонит в количестве до 10 % от массы цементной композиции.

Характеристики цементной матрицы и структуру порового пространства формировали, варьируя композицию качественно и количественно.

Прочность на сжатие матрицы определяли в разные сроки твердения.

Пористость цементной матрицы на 28 сутки твердения определяли по формуле (1) в соответствии с ГОСТ 12730.4-78 [123]. Плотность цементной матрицы ρ_0 в состоянии естественной влажности (сразу после отбора на 28 сутки твердения в воздушно-влажных условиях) определяли по ГОСТ 12730.1-78 [124]. Плотность измельченной в порошок цементной матрицы $\rho_б$ определяли по методике, указанной в ГОСТ 8269.0-97 [125].

Через 28 суток твердения начинали исследования стойкости матрицы к агрессивным факторам (водостойкость и морозостойкость). В результате исследований оценивали соответствие свойств цементной матрицы регламентированным требованиям [5, 52].

Структура пенобетонов во многом определяется качеством применяемой пены [79]. Устойчивость пены зависит от ее строения, размеров пузырьков, толщины водных пленок, а также от их упруго-механических свойств. Для характеризации получаемых пен определяли:

– кратность пены K по формуле

$$K = \frac{V_п}{V_ж}, \tag{10}$$

где $V_п$ – объем пены, л;

$V_ж$ – объем исходного раствора ПО, л.

– оседание пены S по формуле

$$S = (\frac{h_{нач} - h}{h_{нач}}) \cdot 100\%, \tag{11}$$

где $h_{нач}$ – начальная высота пены сразу после приготовления, мм;

h – высота пены после замера, мм.

Оседание матрицы ***OS*** определяли на 3 сутки твердения по методике измерения усадки при высыхании в соответствии с ГОСТ 25485-89 [126], и рассчитывали по формуле

$$\mathrm{OS} = \frac{\Delta h}{h_{нач}}, \qquad (12)$$

где $\boldsymbol{h_{нач}}$ – высота цементной матрицы сразу после приготовления, м;

$\Delta \boldsymbol{h}$ – изменение высоты цементной матрицы на 3 сутки твердения, мм.

Характеристики порового пространства цементной матрицы определяли после 28 суток их твердения. Для этого матрицу сушили в климатической камере марки МК-53 при t=110 °С до постоянного веса, затем готовили ровный скол образца площадью 4-6 см^2 и толщиной 1,0-1,5 см так, чтобы плоскость скола была перпендикулярна основанию исходного образца-кубика. Поровое пространство исследовали микроскопическим методом. Скол продували сжатым воздухом и помещали на стеклянную подложку оптического микроскопа марки «Биолам Л-211», подбирали соответствующий объектив и измеряли размеры пор на поверхности скола, последовательно перемещаясь от одной поры к другой. Для съемки изображения в объективе микроскопа использовали цифровой фотоаппарат марки «Canon».

Расчет среднего размера пор $\boldsymbol{d_{ср}}$ производили по формуле (2).

Расчет среднего квадратичного отклонения $\boldsymbol{\delta}$ производили по формуле (3).

Расчет размаха варьирования размеров пор ***R*** производили по формуле

$$\mathrm{R} = \mathrm{d}_{\max} - \mathrm{d}_{\min}, \qquad (13)$$

где $\boldsymbol{d_{max}}$ и $\boldsymbol{d_{min}}$ – наибольший и соответственно наименьший зафиксированный в результате исследований размер пор, м.

2.2.2 Определение эффективных параметров пропитки

Задачей исследований являлось определение интервалов эффективных параметров пропитки пористой цементной матрицы органическими ЖРО различного вида:

– степени пропитки матрицы;
– гидравлического сопротивления матрицы;
– скорости пропитки матрицы.

В качестве контейнера, рассматриваемого для размещения цементной матрицы с целью включения в нее органических ЖРО методом пропитки, приняли стандартную 200-литровую стальную бочку высотой ***H=0,84 м*** и внутренним диаметром ***D=0,56 м***, применяемую при временном хранении кондиционированных РАО в качестве промежуточного изоляционного барьера.

Параметры исследовали на лабораторной установке (рисунок 3), использовали матрицы цилиндрической формы с 10-тикратно уменьшенными размерами стандартной 200-литровой бочки (высота матрицы ***h=0,084 м***).

Эффективная степень пропитки (отношение наполнения ЖРО цементной матрицы к её пористости) η должна находиться в интервале объемной доли ячеистых пор в цементной матрице 0,8-0,9.

Интервалы величин эффективных параметров скорости пропитки w_0 и гидравлического сопротивления матрицы Δp приняли, исходя из следующих положений. Минимальная скорость пропитки $w_0=0,2$ ***см/мин*** позволяет пропитать цементную матрицу в 200-л бочке за рациональное время 8 часов (одна рабочая смена). При данной скорости были определены степень пропитки и гидравлическое сопротивление.

Максимальная скорость пропитки w_0 была определена в эксперименте при принятом рациональном гидравлическом сопротивлении цементной матрицы $\Delta p=0,5$ ***МПа***, которое позволяет пропитывать 200-л бочку, эксплуатируя на объектах ядерного топливного цикла трубопроводы 3-го класса безопасности

(НП-070-06). На лабораторной установке рациональное гидравлическое сопротивление цементной матрицы Δp составляло 0,05 МПа.

2.2.2.1 Лабораторная установка

Процесс пропитки пористых цементных матриц ЖРО изучали с помощью лабораторной установки (рисунок 3). Установку изготовили из материалов и оборудования, характеристики которого приведены в таблице 11.

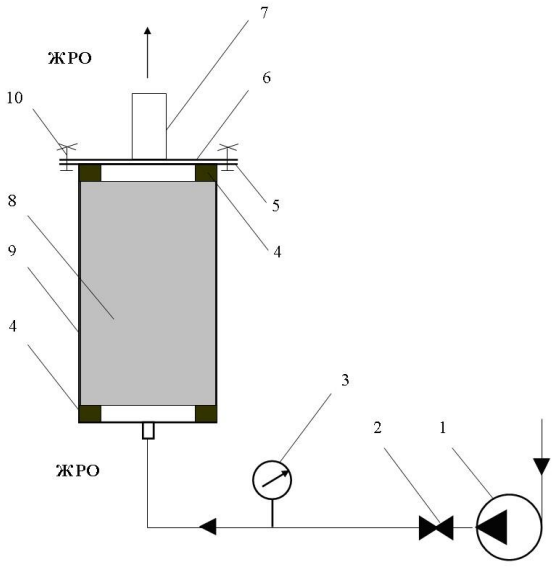
В качестве формы для размещения пористой цементной матрицы использовали металлический стакан с размещенным внизу по центру штуцером и фланцем сверху, к которому крепится крышка с уплотнительной прокладкой. Форму решено было взять таких размеров, чтобы в нее помещалась матрица диаметром ***d=0,056 м*** и высотой ***h=0,084 м***, что в 10 раз меньше размеров стандартной 200-литровой бочки, с сохранением пропорций высоты к диаметру ***H/D=1,5***. Тогда высоте 200-литровой бочки (***H=0,84 м***) соответствует высота 10-ти матриц в лабораторной форме. Подачу органических ЖРО в форму с пропитываемой матрицей осуществляли снизу по всей площади сечения придонной части. Подачу органических ЖРО осуществляли с помощью ручного насоса. Подача отходов ручным насосом по трубопроводу в форму обеспечивала равномерность подачи, точный контроль гидравлического сопротивления матрицы и скорости пропитки.

Пропитку на лабораторной установке осуществляли следующим образом. В бак ручного насоса (поз. 1) заливали ЖРО. В корпус формы (поз. 9) устанавливали матрицу (поз. 8) с уплотнительными кольцами (поз. 4) и фиксировали его сверху крышкой (поз.6) с помощью фланца (поз. 5). Закрывали клапан обратного сброса (поз. 2) на ручном насосе (поз. 1) и начинали подачу ЖРО в форму. Величину гидравлического сопротивления цементной матрицы контролировали по показаниям манометра в диапазоне 0-1 атм. При пропитке матрицы отслеживали появление ЖРО в сборном патрубке (поз. 7). После окончания пропитки открывали клапан обратного сброса (поз. 2), визуально по показаниям манометра следили за

достижением показания манометра (поз. 3) отметки «0». Открывали крышку (поз. 6) формы и извлекали пропитанную матрицу (поз. 8).

Таблица 11 – Состав лабораторной установки

Название	**Техническая характеристика**	**Назначение**
Металлическая форма	Объем 0,2 л. Диаметр ***d=0,056 м,*** высота ***h=0,084 м.***	Размещение образца цементной матрицы
	Штуцер с резьбой по центру нижней торцевой поверхности	Подача ЖРО в донную часть формы для пропитки
	Фланец с четырьмя шпильками в верхней части	Соединение с крышкой формы
	Резиновые уплотнительные кольца снизу и сверху	Предотвращение проскока ЖРО между стенок формы и образцом цементной матрицы
	Тройник	Соединение трубопровода подачи ЖРО и манометра
	Крышка с четырьмя сквозными отверстиями под фланец, с патрубком по центру и уплотнительным кольцом	Фиксация образца цементной матрицы в форме, извлечение образца цементной матрицы из формы после пропитки
Манометр	МП4-У – 0…1 кгс/см^2	Измерение давления
Ручной насос	Снабжен клапаном обратного сброса и трубопроводом, объем бака 1 л	Подача ЖРО в форму под давлением по трубопроводу



А Б

А: 1 – ручной насос; 2 – клапан обратного сброса; 3 – манометр;
4 – уплотнительное кольцо; 5 – фланец; 6 – крышка; 7 – сборный патрубок;
8 – цементная матрица; 9 – корпус формы; 10 – крепежная шпилька с гайкой

Рисунок 3 – Схема (А) и внешний вид (Б) лабораторной установки для определения эффективных параметров пропитки

После каждого эксперимента определяли скорость пропитки $\boldsymbol{w_0}$, объемное наполнение цементной матрицы отходами $\boldsymbol{\varphi}$ и степень пропитки $\boldsymbol{\eta}$.

2.2.3 Определение зависимости эффективных параметров пропитки

Задачей исследований являлось определение на основе экспериментальных данных зависимости эффективных параметров для оценки и прогнозирования технологии пропитки цементной матрицы органическими ЖРО различного вида.

С использованием дисперсионного анализа экспериментальных данных определили значимость влияния на степень пропитки цементной матрицы скорости пропитки $\boldsymbol{\omega_0}$, гидравлического сопротивления матрицы $\Delta\boldsymbol{p}$, вязкости отходов $\boldsymbol{\mu}$.

Затем рассчитали гидравлическое сопротивление матрицы $\Delta\boldsymbol{p}$ при заданных технологических параметрах по уравнению (8) гидродинамики прохождения жидкости через пористые слои [110]

Данные для расчета гидравлического сопротивления приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Условия расчета ожидаемого гидравлического сопротивления цементной матрицы

Пропитка матрицы в лабораторной форме	Размеры матрицы		Свойства матрицы		Свойства ЖРО	
	Высота ***h***, мм	Диаметр ***d***, мм	Средний размер пор $\boldsymbol{d_{ср}}$, мм	Пористость ***П***, отн. ед.	Плотность $\boldsymbol{\rho}$, г/см^3	Вязкость $\boldsymbol{\mu}$, Па·с
раствор ТБФ в синтине	84	56	Параметры задаются по результатам экспериментов		0,843	0,003
нефтяное масло					0,867	0,058
сцинтиллятор					0,990	0,010

В расчетах вместо общей пористости матрицы ***П*** использовали её фактическое объемное наполнение отходами $\boldsymbol{\varphi}$, рассчитываемое через степень пропитки $\boldsymbol{\eta}$ по уравнению

$$\varphi = \eta П \tag{14}$$

Для оценки справедливости уравнения (8) проводили анализ экспериментальных и расчетных данных.

2.2.4 Определение зависимости распределения радионуклидов в цементной матрице при пропитке

Задачей исследований являлось определение зависимости распределения радионуклидов по высоте цементной матрицы при пропитке для оценки распределения радионуклидов в матрице, размещенной в 200-литровой бочке. Исследования проводили на лабораторной установке (рисунок 3), использовали матрицы

цилиндрической формы с 10-тикратно уменьшенными размерами стандартной бочки объемом 200 л (высота матрицы ***h=0,084 м***).

Пропитку цементной матрицы проводили в несколько циклов. Цикл пропитки считали завершенным при прохождении через матрицу порции ЖРО равной объемному наполнению по уравнению (14). Определяли активность каждой порции ЖРО.

2.2.5 Влияние органических жидких радиоактивных отходов на свойства конечного продукта

После пропитки изучали влияние органических отходов различного вида на свойства конечного продукта, включая регламентированные требования [5, 52]:

– прочность на сжатие после пропитки;

– устойчивость к агрессивным факторам окружающей среды (скорость выщелачивания радионуклидов, морозо- и водостойкость);

– скорость выщелачивания радионуклидов ^{137}Cs и ^{238}U;

– скорость выщелачивания органических компонентов.

Оценивали прочность на сжатие конечного продукта, полученного пропиткой пористых цементных матриц ЖРО. Считали важным сравнить прочность цементных компаундов после пропитки и прочность исходной цементной матрицы, установив тем самым влияние пропитки на целостность матрицы. Поэтому образцы матриц после пропитки делили на несколько равных частей и подвергали испытаниям. Кроме прочности на сжатие цементных матриц после пропитки определяли остальные регламентированные требования в возрасте до 118 суток – морозостойкость, устойчивость к длительному пребыванию в воде, скорость выщелачивания ^{238}U и ^{137}Cs.

Низкие температуры вспышки и воспламенения (менее 100 °С), способность воспламентяться от внешнего источника тепла и поддерживать горение некоторых

компонентов органических ЖРО (синтин, ТБФ) обусловили необходимость изучения воздействия данных факторов на конечный продукт после пропитки. Для чего оценивали пожаровзрывоопасность отходов, содержащих горючие компоненты (раствор ТБФ в синтине), и пропитанного ими конечного продукта, базируясь на методики, указанные в ГОСТ 12.1.044-89 [127]. Для испытаний использовали закрытый тигель, в который помещали исследуемые раствор ТБФ в синтине или матрицу после пропитки им. Устанавливали и поддерживали скорость нагрева исследуемого объекта в тигле 5-6 °С/мин. Каждую минуту вносили в закрытый тигель источник открытого пламени. При возникновении кратковременного горения (1-2 сек) фиксировали температуру вспышки, а при возникновении устойчивого горения – температуру воспламенения.

Затем определяли воздействие открытого пламени на образцы после пропитки как раствором ТБФ в синтине, так и жидким сцинтиллятором и отработанным маслом. Огнестойкость образцов оценивали по времени необходимому для возгорания компаунда.

Для оценки надежности закрепления ЖРО в цементной матрице проводили центрифугирование образцов конечного продукта объемом до 120 см^3. Частоту вращения центрифуги варьировали от 200 до 700 об/мин. Время испытаний варьировали от 10 до 90 мин. Через каждые 10 мин центрифугу останавливали, образец извлекали и взвешивали. Определяли объем отделившихся из цементной матрицы органических ЖРО, а по нижеприведенной формуле рассчитывали относительную центробежную силу ***ОЦС***, действующую на цементную матрицу во время центрифугирования

$$ОЦС = (\frac{\nu}{1000})^2 \cdot r \cdot 1{,}118, \qquad (15)$$

где ***ν*** – частота вращения, об/мин;

r – радиус вращения, мм.

Кроме того, были определены показатели пожаровзрывоопасности отходов в закрытом тигле (температура вспышки и воспламенения) до пропитки в исходном состоянии и после пропитки в матрице, а также надежность закрепления отходов в матрице центрифугированием образцов объемом до 120 см^3 в течение 1,5 ч.

2.2.6 Аналитические методики физико-химических исследований

Удельную поверхность пигмента железо-окисного определяли методом воздухопроницаемости по методике [128].

Плотность цементных растворов определяли с помощью рычажных весов марки ВРП-1 по методике [129]. Динамическую вязкость органических ЖРО определяли на вискозиметре ВСН-3 в соответствии с паспортом на прибор [130].

Образцы цементных компаундов для определения прочности, морозостойкости, устойчивости к длительному пребыванию в воде и параметров выщелачивании готовили в разборных формах марки 6ФК-20 в виде кубиков размером 2·2·2 см. образцы хранили над слоем воды в воздушно-влажных условиях твердения.

В разные сроки твердения определяли прочность на сжатие матриц на разрывной машине ИР-5047-50С с максимально-допустимой нагрузкой 50 кН по методике [131]. Прочность на сжатие конечного продукта дополнительно определяли в возрасте 56 суток, 1 год и 2 года.

В возрасте твердения 28-30 суток начинали исследования цементной матрицы на морозостойкость и устойчивость к длительному пребыванию в воде. После пропитки цементную матрицу также исследовали на морозо- и водостойкость, а также исследовали скорость выщелачивания радионуклидов ^{238}U и ^{137}Cs.

Морозостойкость цементной матрицы определяли с использованием климатической камеры МК-53 по методике [132].

Устойчивость цементной матрицы к длительному пребыванию в воде определяли по методике [133].

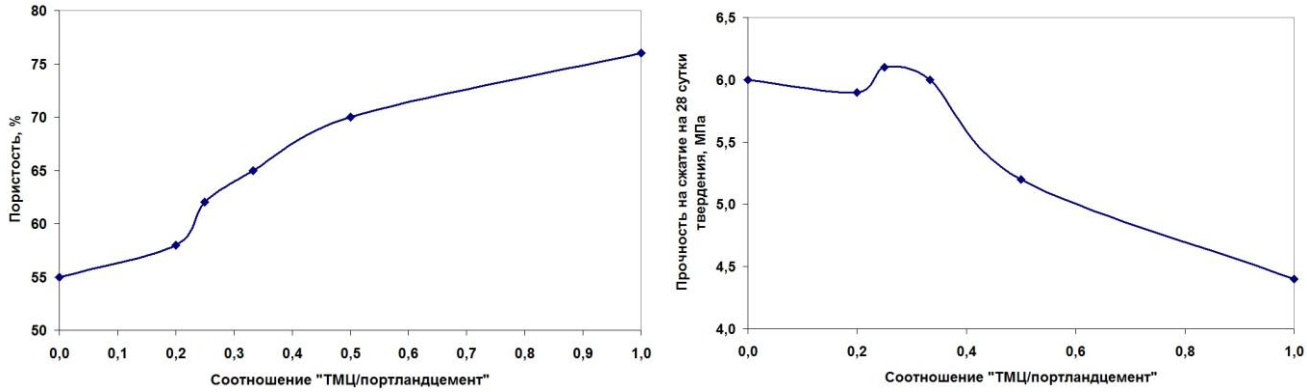
Скорость выщелачивания радионуклидов ^{238}U и ^{137}Cs из цементной матрицы определяли по ГОСТ 52126-2003 [134]: образцы помещали в дистиллированную воду, отборы проб воды проводили на 1, 3, 7, 10, 14, 21, 28, 59, 86 сутки выщелачивания, в пробах, подготовленных в соответствии с [135] определяли количество U^{238} и Cs^{137} (Бк/л) по методике [136].

2.3 Результаты исследований

2.3.1 Разработка композиции для приготовления матрицы

Была разработана композиция для получения пористой цементной матрицы с прочностью на сжатие более 5 МПа на 28 сутки твердения, пористостью около 70 %, с однородными ячеистыми порами размером $(1\text{-}5)\cdot 10^{-5}$ м.

Для определения оптимального соотношения «ТМЦ/портландцемент» определена прочность и пористость цементных матриц на 28 сутки твердения с различным соотношением «ТМЦ/портландцемент» в композиции. Результаты исследования свойств цементной матрицы представлены на рисунке 4.



А **Б**

Рисунок 4 – Влияние соотношения «ТМЦ/портландцемент» в композиции на пористость (А) и прочность на сжатие (Б) матрицы

Как видно из данных, представленных на рисунке 4, оптимально использование композиции с соотношением «ТМЦ/портландцемент» 1:3, так как формируется матрица с пористостью 65 %, что превышает на 15 % пористость матрицы без ТМЦ (рисунок 4А). При этом прочность на сжатие матрицы не снижается и составляет 6 МПа (рисунок 4Б). При увеличении соотношения «ТМЦ/портландцемент» в композиции увеличение пористости цементных матриц продолжается (рисунок 4А) до 75-77 %, но прочностные свойства матрицы при

этом ухудшаются. Как видно по рисунку 4Б при увеличении соотношения «ТМЦ/портландцемент» с 1:3 до 1:1 прочность на сжатие матрицы снижается с 6,2 до 4,4 МПа, что, вероятно, обусловлено чрезмерным утончением межпоровых перегородок и, как следствие, их более быстрому разрушению при воздействии внешней нагрузки.

Наблюдения показали, что оседание цементных матриц при схватывании составляет в среднем 80-100 мм/м вне зависимости от содержания ТМЦ в композиции.

На следующем этапе композицию «ТМЦ/портландцемент»=1:3 модифицировали функциональными добавками. В водный раствор ПО вводили различные минерализаторы пены. Наблюдали за кратностью и оседанием пены с течением времени, полученной с использованием минерализаторов различного типа. На рисунке 5 графически отображено изменение кратности получаемой пены в зависимости от типа минерализатора и его содержания.

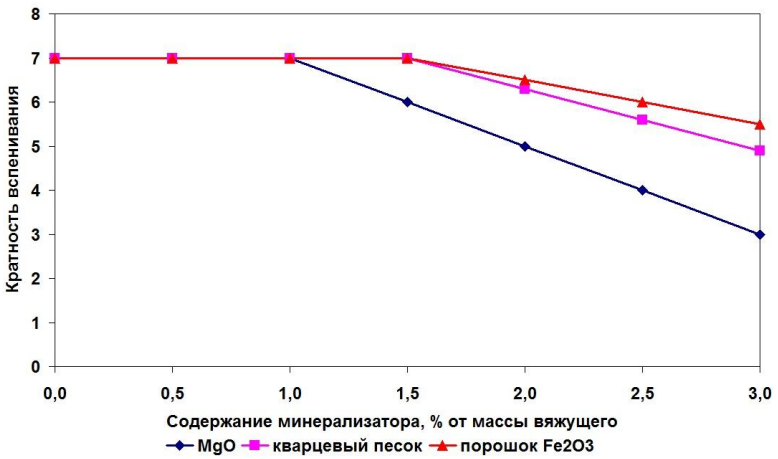


Рисунок 5 – Влияние типа и количества минерализатора на кратность вспенивания

При введении в пену минерализаторов (рисунок 5) в количестве до 1-1,5 % от массы композиции кратность пены не снижается. При содержании минерализатора более 1-1,5 % от массы композиции кратность пены начинает постепенно снижаться. При использовании мелкодисперсного порошка оксида же-

леза снижение кратности пены наименее интенсивное. Таким образом, введение в пену минерализаторов в количестве более 1-1,5 % от массы композиции нецелесообразно, потому что снижение кратности получаемой пены влечет за собой снижение пористости матрицы, приготавливаемой на ее основе. Снижения кратность получаемой пены можно избежать путем увеличения концентрации водного раствора ПО, однако это может негативно отразиться на прочностных свойствах матрицы.

На рисунке 6 графически отображен процесс оседания пены во времени в зависимости от типа минерализатора.

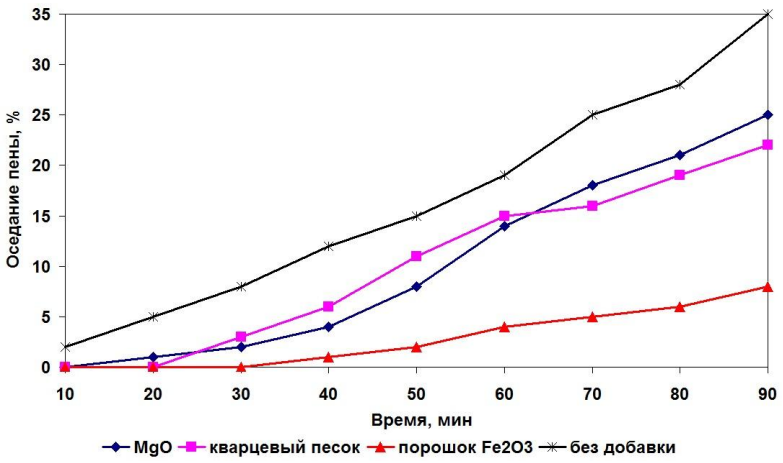


Рисунок 6 – Влияние типа минерализатора на оседание пены

По данным рисунка 6 видно, что мелкодисперсный порошок оксида железа в количестве 1,5 % от массы композиции наиболее эффективен из исследованных типов минерализаторов. Через 90 минут после приготовления оседание пены без минерализатора достигает 35 %, а оседание пены с мелкодисперсным порошком оксида железа минимально и составляет около 7 %.

На рисунке 7 показаны пены без минерализатора и с минерализатором – мелкодисперсным порошком оксида железа через 1,5 часа после их одновременного приготовления из 0,5 % водного раствора ПО.

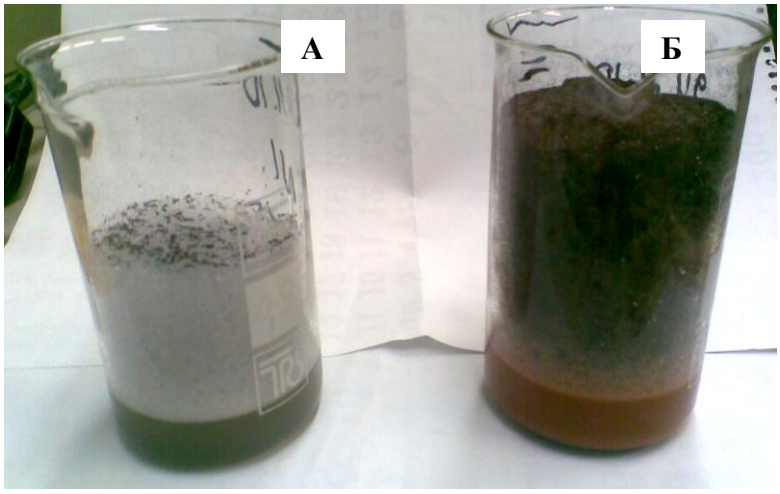


Рисунок 7 – Пены без минерализатора (А) и с минерализатором – мелкодисперсным порошком оксида железа (Б) через 1,5 часа после их одновременного приготовления

Результаты наблюдений за оседанием цементной матрицы при схватывании приведены ниже:

– 30-35 мм/м при использовании мелкодисперсного порошка оксида железа;

– 44-52 мм/м при использовании кварцевого песка;

– 57-64 мм/м при использовании оксида магния.

Прочностные свойства цементных матриц, содержащих минерализаторы пены в количестве не более 1,5 % от массы композиции, по сравнению с матрицами, не содержащих минерализаторы, немного снизились и характеризовались значениями 5,8-5,9 МПа на 28 сутки твердения, что согласуется с повышением пористости матриц с 65 % до 67 % за счет их менее интенсивного оседания при схватывании.

Далее к композиции при введении ее в пену, содержащую «ТМЦ/портландцемент» в соотношении 1:3 и мелкодисперсный порошок оксида железа в количестве 1,5 % от массы композиции добавляли поочередно ускорители схватывания: карбонат кальция $CaCO_3$, хлорид кальция $CaCl_2$ и силикат натрия Na_2SiO_3.

Результаты определения прочности на сжатие цементных матриц в ранние сроки твердения (на 3 сут), содержащих ускорители схватывания в различных количествах, представлены на рисунке 8.

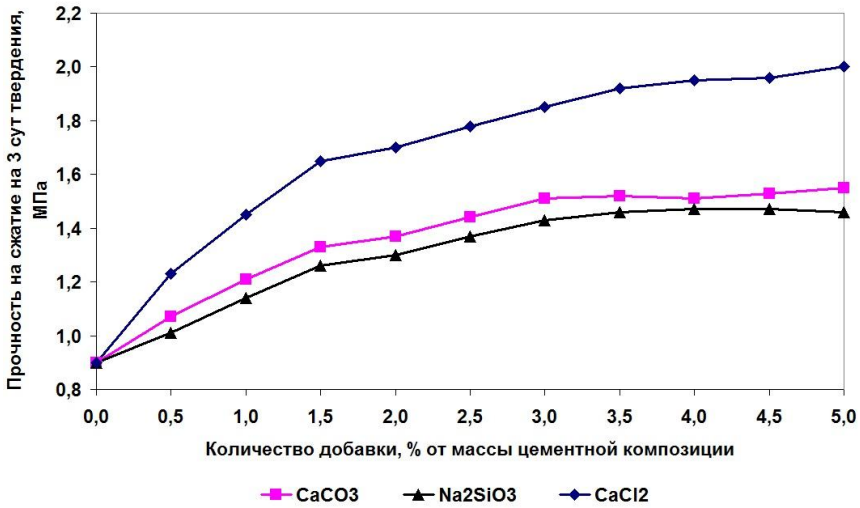


Рисунок 8 – Влияние ускорителей схватывания и их содержания в композиции на прочностные свойства матрицы на 3 сутки твердения

Как видно из данных на рисунке 8, увеличение содержания в композиции хлорида кальция $CaCl_2$ до 5 % от массы композиции приводит к наибольшему росту прочности матрицы на 100-120 % на 3 сутки твердения. Карбонат кальция $CaCO_3$ в количестве 3 % от массы композиции приводит к увеличению прочности матрицы на 3 сутки твердения на 60-70 %. При введении силиката натрия Na_2SiO_3 в количестве до 3 % от массы композиции рост прочности матрицы на 3 сутки твердения наименее интенсивный и составляет 15-50 %.

Важно отметить, что хлорид кальция $CaCl_2$ оказал негативное влияние на оседание матрицы при схватывании. Сразу после приготовления матрицы наблюдалось интенсивное разрушение пены. Оседание матрицы с хлоридом кальция $CaCl_2$ при схватывании достигало 200-250 мм/м, в результате чего пористость матрицы составляла всего лишь 48-50 %, что согласуется с максимальным упрочняющим действием добавки на 3 сутки твердения.

В тоже время цементные матрицы, содержащие в качестве ускорителей схватывания карбонат кальция $CaCO_3$, не оседали при схватывании, а матрицы с силикатом натрия Na_2SiO_3 характеризовались оседанием при схватывании в интервале 10-15 мм/м. Пористость матриц с ускорителями схватывания карбонатом кальция $CaCO_3$ и силикатом натрия Na_2SiO_3 по сравнению с матрицами без ускорителей схватывания повышалась с 67 % до 69 % при незначительном снижении прочности на сжатие на 28 сутки твердения в среднем с 5,8-5,9 МПа до 5,6-5,7 МПа.

В таблице 13 сведены результаты определения оседания матриц при схватывании, приготовленных при варьировании композиции качественно и количественно.

Таблица 13 – Результаты определения оседания матрицы при схватывании

Компоненты композиции, % масс.								Оседание матрицы при схватывании, мм/м
Вяжущие материалы		Минерализаторы пены			Ускорители схватывания			
Портландцемент	Тонкомолотый цемент	Оксид магния	Кварцевый песок	Порошок оксида железа	Хлорид кальция	Силикат натрия	Карбонат кальция	
75,0	25,0	0	0	0	0	0	0	80-100
74,2	24,8	1,0	0	0	0	0	0	57-64
73,9	24,6	0	1,5	0	0	0	0	44-52
73,9	24,6	0	0	1,5	0	0	0	30-35
72,4	24,1	0	0	1,5	3,0	0	0	200-250
72,4	24,1	0	0	1,5	0	3,0	0	10-15
72,4	24,1	0	0	1,5	0	0	3,0	0

На заключительном этапе разработки композиции определяли оптимальное содержание бентонитового глинопорошка, при котором прочность на сжатие матрицы не снижается. Результаты определения прочностных свойств цементной матрицы с бентонитовым глинопорошком на 28 сутки твердения представлены на рисунке 9, по которому видно, что при содержании бентонитового глинопорошка

в композиции не более 5-10 % масс. значимого снижения прочности на сжатие матрицы на 28 сутки твердения не наблюдается.

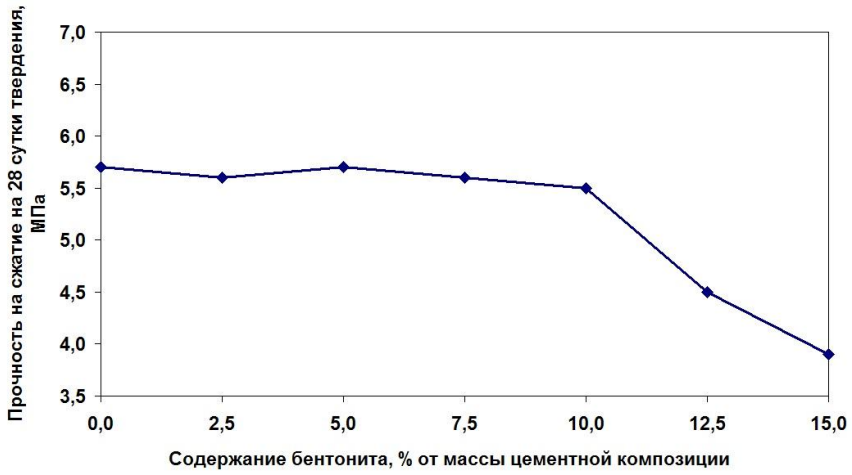


Рисунок 9 – Влияние содержания бентонитового глинопорошка на прочность на сжатие цементной матрицы на 28 сутки твердения

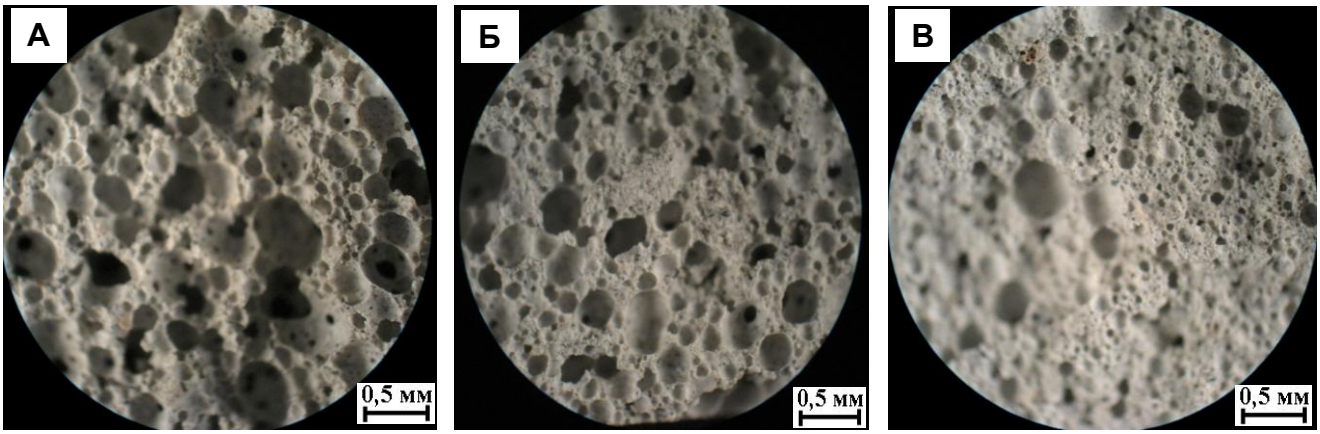
Результаты исследований с применением оптического микроскопа структуры порового пространства цементных матриц, полученных при варьировании композиции качественно и количественно, приведены ниже. Как видно по рисунку 10, структура порового пространства цементной матрицы существенно изменялась.

По результатам математической обработки экспериментальных данных исследования поровой структуры цементных матриц с помощью оптического микроскопа установлено, что при последовательном введении в композицию к портландцементу ТМЦ, мелкодисперсного порошка оксида железа и карбоната кальция:

– средний размер пор уменьшается с 223 до 30 мкм;

– показатель однородности пор – среднее квадратичное отклонение снижается с 167 до 63;

– диапазон варьирования размеров пор уменьшается с 1300 до 500 мкм.



А – композиция «ТМЦ –портландцемент»;
Б – композиция «ТМЦ-портландцемент-мелкодисперсный порошок оксида железа»;
В –композиция «ТМЦ-портландцемент-мелкодисперсный порошок оксида железа-карбонат кальция»

Рисунок 10 – Влияние композиции на структуру порового пространства матрицы

В таблице 14 представлены результаты математической обработки данных, полученных при исследовании порового пространства цементных матриц.

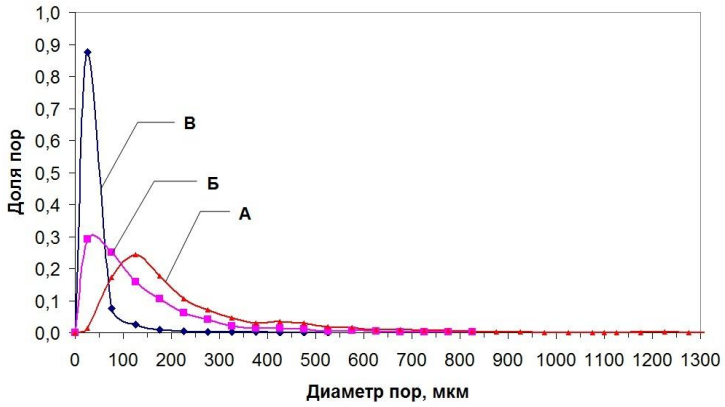
Таблица 14 – Характеристики порового пространства цементной матрицы

Композиция (см. рис. 10)	Пористость, %	Прочность на сжатие, МПа	Средний диаметр ячеистых пор, мкм	Среднее квадратичное отклонение	Диапазон варьирования, мкм
А	65	6,2	223	167	1300
Б	67	5,8	131	85	800
В	69	5,7	30	63	500

Результаты математической обработки данных позволяют предположить, что при схватывании матрицы мелкодисперсный порошок оксида железа, максимально плотно бронируя пузырьки пены, замедляет их слипание (объединение) и последующее разрушение в приповерхностных слоях матрицы. Ускоритель схватывания усиливает этот процесс за счет более интенсивного твердения скелета матрицы в ранние сроки, что в итоге приводит к формированию цементной мат-

рицы без оседания при схватывании с однородными порами средним размером в интервале 0,01-0,05 мм.

Гистограммы распределения пор по размерам исследованных цементных матриц представлены на рисунке 11.



А – «ТМЦ-портландцемент»;
Б – «ТМЦ-портландцемент-порошок оксида железа»;
В – «ТМЦ-портландцемент-порошок оксида железа-карбонат кальция»
Рисунок 11 – Распределение пор по размерам в цементной матрице

Таким образом, введение ТМЦ в композицию позволяет увеличить потенциальную емкость цементной матрицы при пропитке ее органическими ЖРО. Использование мелкодисперсного порошка оксида железа увеличивает однородность порового пространства цементной матрицы, что при пропитке обеспечит равномерность продвижения фронта жидкости и повысит надежность закрепления отходов в порах. Карбонат кальция $CaCO_3$ блокирует оседание матрицы, обусловленую разрушением пены при схватывании матрицы, что исключает уплотнение верхних слоев матрицы и связанную с этим деформацию матрицы по ширине и высоте. Это особенно важно при заполнении и последующем твердении цементной матрицы в контейнерах объемом 100 или 200 л. Отсутствие оседания матрицы при схватывании обеспечивает плотное сцепление стенок контейнера с боковой поверхностью матрицы, что исключает вероятность проскока органических ЖРО в этой области по пути наименьшего сопротивления. Бентонитовый

глинопорошок выступает в роли сорбента органических веществ и, как следствие, радионуклидов, распределенных в них, что повышает способность цементной матрицы к удерживанию радионуклидов в своем объеме.

В результате композиция для приготовления пористой цементной матрицы требуемого качества содержит ТМЦ и портландцемент в соотношении 1:3, мелкодисперсный порошок оксида железа в количестве 1,5 % по массе, карбонат кальция в количестве 3 % по массе, бентонитовый глинопорошок в количестве 10 % по массе (рисунок 12).

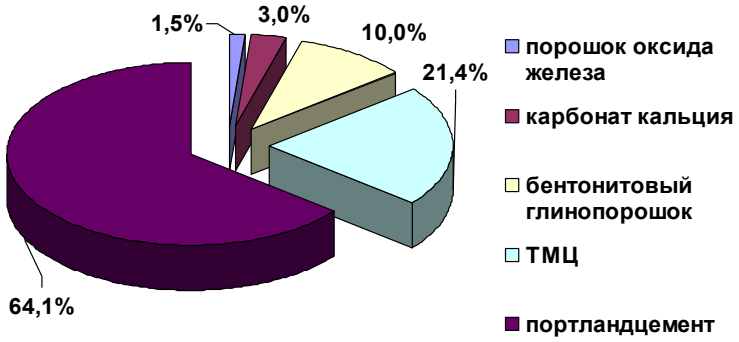


Рисунок 12 – Композиция сухих компонентов

При установленном соотношении «ТМЦ/портландцемент» и содержании функциональных добавок были установлены рабочие диапазоны содержания ПО и В/В, соблюдение которых будет обеспечивать получение цементных матриц пористостью не менее 50 % и прочностью не менее 5 МПа на 28 сутки твердения.

На рисунке 13 графически представлены результаты определения пористости и прочности цементной матрицы на 28 сутки твердения.

По рисунку 13 видно, что рабочим диапазоном концентрации водного раствора ПО следует принять 0,2-0,5 % масс., а рабочим диапазоном В/В – 0,5-0,6. В указанном выше диапазоне В/В и концентрации ПО формируется пористая цементная матрица с прочностью на сжатие более 5,0 МПа и пористостью около 70 %.

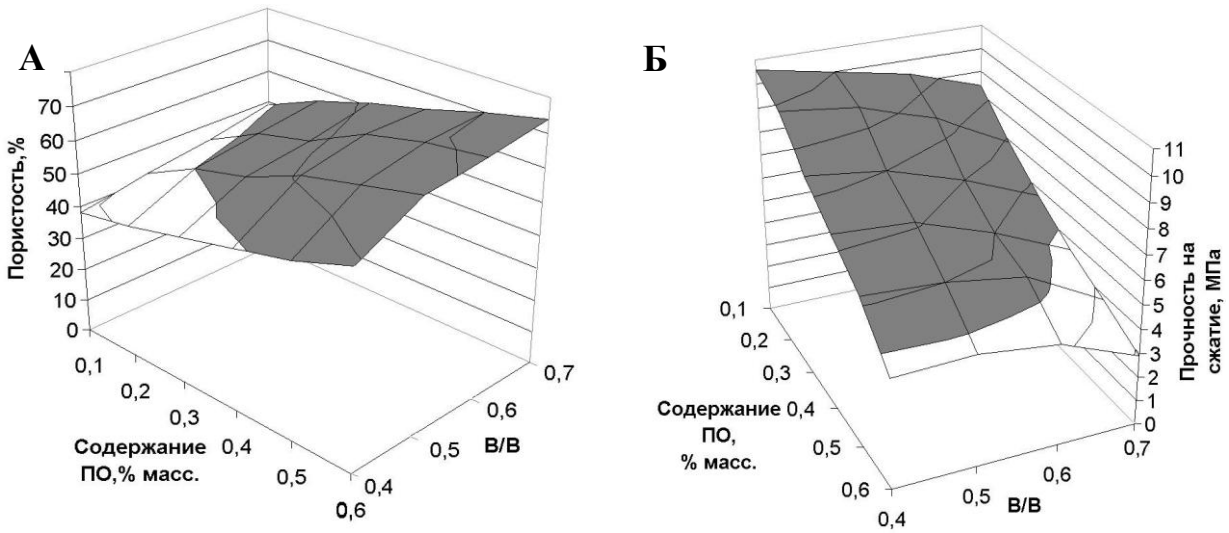


Рисунок 13 – Влияние концентрации водного раствора ПО и В/В на пористость (А) и прочность на сжатие матриц на 28 сутки твердения (Б)

На рисунке 14 приведены результаты определения плотности измельченной в порошок цементной матрицы, приготовленной на основе разработанной композиции (рисунок 12), при варьировании В/В отношения.

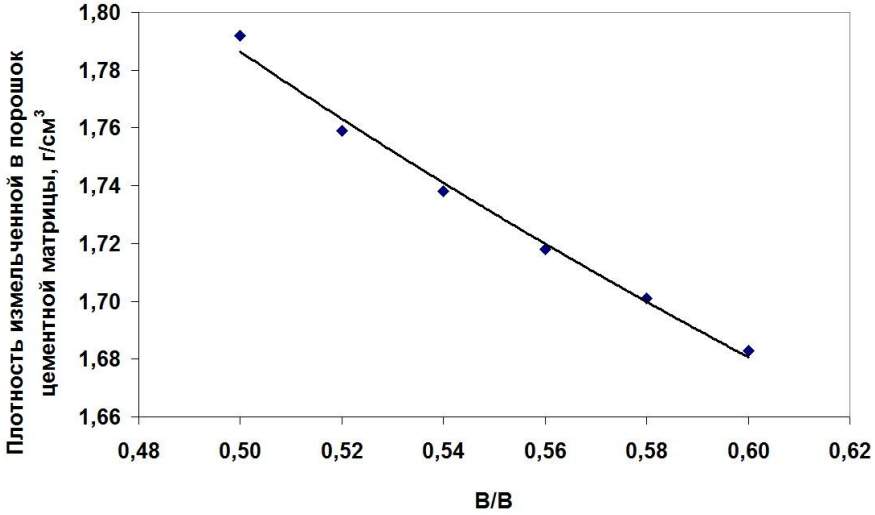


Рисунок 14 – Влияние В/В отношения на плотность измельченной в порошок цементной матрицы

Представленными на рисунке 14 данными удобно пользоваться для расчета пористости по формуле (1) в дальнейших исследованиях. Это обусловлено тем,

что в лабораторных условиях изготавливали образцы правильной формы (кубики) размером 2·2·2 см, а в опытно-промышленном масштабе планируется размещать цементную матрицу в стандартных бочках объемом 100 и 200 литров, что затрудняет отбор образцов цементной матрицы для последующего измельчения и определения плотности. Измерив объем матрицы и массу, можно рассчитать ее плотность в состоянии естественной влажности и по рисунку 14 определить плотность измельченной в порошок цементной матрицы (В/В отношение при приготовлении матрицы известно), а затем рассчитать пористость матрицы по формуле (1).

2.3.2 Стойкость цементной матрицы к воздействию агрессивных факторов

Через 28 суток после приготовления были исследованы прочностные свойства цементной матрицы, а также стойкость матрицы к воздействию агрессивных факторов: морозо- и водостойкость. Результаты исследований представлены на рисунке 15.

Как видно из представленных на рисунке 15 данных, прочностные свойства цементной матрицы после испытаний на морозо- и водостойкость изменяются незначительно по сравнению с прочностью на сжатие на 28 сутки твердения. Прочность на сжатие матрицы после испытаний на морозостойкость и водостойкость находилась в интервале 5,8-5,2 МПа при пористости около 70 % и 9,5-8,5 МПа при пористости около 50 %.

При использовании водного раствора ПО и В/В в установленных пределах прочностные свойства формируемой цементной матрицы соответствуют регламентированным требованиям [5, 52] в части требований к прочности на сжатие цементного компаунда на 28 сутки твердения, а также прочности на сжатие после испытаний на морозо- и водостойкость.

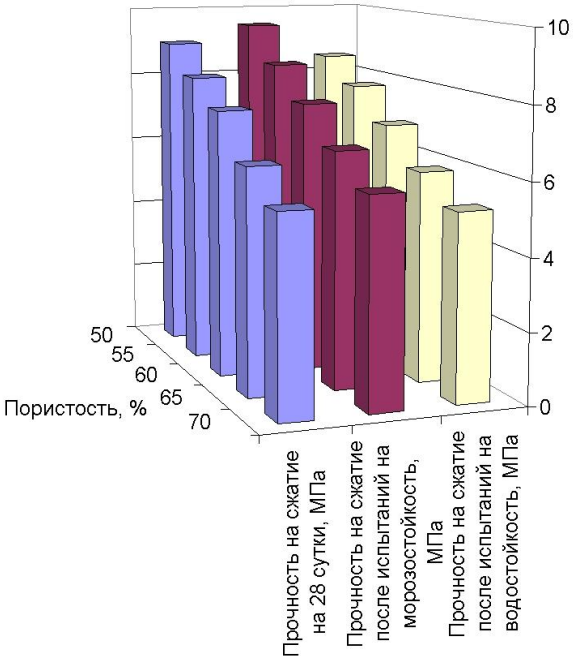


Рисунок 15 - Прочностные свойства матрицы через 28 суток твердения и испытаний на морозо- и водостойкость

Таким образом, была разработана композиция для получения пористой цементной матрицы без оседания при схватывании, удовлетворяющей регламентированным требованиям к цементированным РАО и обладающей высокой однородной равномерно распределенной пористостью.

2.3.3 Обоснование и определение эффективных параметров пропитки цементной матрицы

Результаты пропитки цементной матрицы на лабораторной установке представлены в таблице 15.

Степень пропитки цементной матрицы при варьировании параметров пропитки в указанных интервалах составила 0,8-0,9. Наполнение отходами цементной матрицы – 64 % по объему или 52 % по массе.

Таблица 15 – Результаты пропитки матриц на лабораторной установке

Параметр пропитки	Раствор ТБФ в синтине																	
Скорость пропитки, см/мин	0,2	0,7	1,2	1,6	2,1	2,5	3,1	3,7	3,8	4,5	5,0	5,2	6,5	6,4	7,1	7,2	8,1	9,9
Фактическое гидравлическое сопротивление, 10^{-2} МПа	0,1	0,3	0,5	0,6	0,6	0,7	1,5	1,8	1,5	1,5	1,7	1,5	3,6	2,8	3,3	2,7	3,4	4,5
	Сцинтиллятор																	
Скорость пропитки, см/мин	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,4	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,8	2,8	3,1	3,1	3,6	3,9
Фактическое гидравлическое сопротивление, 10^{-2} МПа	0,3	0,7	0,8	1,1	1,3	1,0	2,0	2,3	2,4	2,5	2,3	2,8	5,0	4,0	5,0	3,0	5,0	4,5
	Масло нефтяное																	
Скорость пропитки, см/мин	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9
Фактическое гидравлическое сопротивление, 10^{-2} МПа	1,8	2,2	2,3	3,3	2,3	2,4	3,1	4,5	3,6	4,1	3,4	4,0	5,0	6,0	6,7	5,5	7,3	5,0

2.3.4 Определение зависимости эффективных параметров пропитки

С использованием дисперсионного анализа экспериментальных данных определили значимость влияния на степень пропитки цементной матрицы скорости пропитки, гидравлического сопротивления матрицы, вязкости отходов.

Результаты пропитки матриц на лабораторной установке с параллельными опытами, представленные выборочно в таблицах 16-18, выступили исходными данными для оценки значимости влияния параметров пропитки (скорости пропитки, вязкости органических ЖРО и гидравлического сопротивления матрицы) на степень пропитки с помощью дисперсионного анализа, алгоритм которого приведен после таблицы 18.

Таблица 16 – Результаты пропитки цементной матрицы (выборочно) при различном гидравлическом сопротивлении

Параметры пропитки			Результат пропитки			
Вязкость ЖРО μ, Па·с	Скорость пропитки w_0, см/мин	Гидравлическое сопротивление Δp, 10^{-2} МПа	Степень пропитки η			
			Параллельные опыты			
			1	2	3	4
0,003 (раствор ТБФ в синтине)	0,3	0,10	0,82	0,85	0,87	0,88
		0,25	0,81	0,83	0,86	0,89
		0,30	0,83	0,84	0,89	0,85
		0,35	0,85	0,81	0,84	0,87
		0,40	0,83	0,89	0,88	0,84

Таблица 17 – Результаты пропитки цементной матрицы (выборочно) органическими ЖРО различной вязкости

Параметры пропитки			Результат пропитки			
Вязкость ЖРО μ, Па·с	Скорость пропитки w_0, см/мин	Гидравлическое сопротивление Δp, 10^{-2} МПа	Степень пропитки η			
			Параллельные опыты			
			1	2	3	4
0,003	0,2	1,50	0,85	0,82	0,88	0,89
0,010			0,82	0,85	0,83	0,90
0,058			0,80	0,85	0,83	0,88

Таблица 18 – Результаты пропитки цементной матрицы (выборочно) с различной скоростью пропитки

Параметры пропитки			Результат пропитки			
Вязкость ЖРО μ, Па·с	Скорость пропитки w_0, см/мин	Гидравлическое сопротивление Δp, 10^{-2} МПа	Степень пропитки η			
			Параллельные опыты			
			1	2	3	4
0,003 (раствор ТБФ в синтине)	0,2	0,20	0,80	0,90	0,88	0,89
	0,3		0,83	0,85	0,82	0,83
	0,4		0,81	0,82	0,86	0,82
	0,5		0,82	0,87	0,85	0,86
	0,6		0,89	0,80	0,81	0,88

Влияние параметров пропитки Δp, μ и w_0 на степень пропитки η исследовали с помощью однофакторного дисперсионного анализа с равным числом параллельных наблюдений.

Ниже представлены расчеты по оценке значимости влияния фактора Δp.

1. Рассчитываем итог значений степени пропитки для каждой j-ой строки в таблице 16 (η_j) по формуле

$$\eta_{i,\Delta p} = \sum_{j=1}^{m} (\eta)_{ij,\Delta p}, i = 1,2...k, \qquad (16)$$

где $(\eta)_{ijП}$ – степень пропитки с выбранным значением параметра пропитки Δp в одном из параллельном опыте.

Например, для 1-ой строки в таблице 16 получили:

$$\eta_{1,\Delta p} = 0{,}82 + 0{,}85 + 0{,}87 + 0{,}88 = 3{,}42.$$

2. По формуле (17) рассчитываем сумму квадратов степени пропитки η во всех опытах в таблице 16 (SS_1)

$$SS_1 = \sum (\eta^2) \ , \qquad (17)$$

где (η^2) – значение квадрата степени пропитки ***η*** с выбранным значением параметра пропитки ***Δp***.

$$SS_1 = 0{,}82^2 + 0{,}85^2 + 0{,}87^2 + 0{,}88^2 + ... = 14{,}5141.$$

3. По формуле (18) рассчитываем сумму квадратов итогов значений степени пропитки ***η*** в строке, деленную на число параллельных опытов ***n*** (SS_2)

$$SS_2 = \frac{\sum_{i=1}^{m} (\eta_{j,c/c})_j^2}{n}, \qquad (18)$$

где $(\eta_{j,П})_j^2$ – значение квадрата итога для значений степени пропитки ***η*** в ***j***-ой строке таблицы 16;

n – число параллельных опытов.

$$SS_2 = \frac{3{,}42^2 + 3{,}39^2 + 3{,}41^2 + 3{,}37^2 + 3{,}44^2}{4} = 14{,}5018.$$

4. По формуле (19) рассчитываем квадрат общей суммы итогов значений степени пропитки ***η*** в строках таблицы 16, деленный на общее число опытов в таблице (SS_3)

$$SS_3 = \frac{\sum \eta_i^2}{m \times k} = \frac{\sum \eta_j^2}{m \times k}, \qquad (19)$$

$$SS_3 = \frac{17{,}03^2}{4 \times 5} = 14{,}5011.$$

5. По формуле (20) рассчитываем показатель суммарной выборочной дисперсии ($SS_{общ}$)

$$SS_{общ} = SS_1 - SS_3, \qquad (20)$$

$$SS_{общ} = 14{,}5141 - 14{,}5011 = 0{,}013.$$

6. По формулам (21) и (22) определяем дисперсию (s_A^2), обусловленную параметром пропитки ***Δp*** *(SS_A)*

$$SS_A = SS_2 - SS_3, \tag{21}$$

$$s_A^2 = \frac{SS_A}{(k-1)}, \tag{22}$$

где ***k*** – количество уровней параметра пропитки ***Δp*** или количество строк;

$$SS_A = 14{,}5018 - 14{,}5011 = 0{,}0007.$$

$$s_A^2 = \frac{0{,}0007}{(5-1)} = 0{,}0002.$$

7. Для оценки фактора случайности по формулам (23, 24) определяем остаточную сумму квадратов ($SS_{ост}$) и соответствующую дисперсию ($s_{ош}^2$)

$$SS_{ост} = SS_1 - SS_2, \tag{23}$$

$$s_{ош}^2 = \frac{SS_{ост}}{k \times (n-1)}, \tag{24}$$

$$SS_{ост} = 14{,}5141 - 14{,}5018 = 0{,}0123.$$

$$s_{ош}^2 = \frac{0{,}0123}{5 \times (4-1)} = 0{,}0008.$$

8. Проверяем значимость параметра пропитки ***Δp*** по критерию Фишера. По формуле (25) определяем дисперсионное отношение для параметра пропитки ***Δp*** (F_2)

$$F_1 = \frac{s_A^2}{s_{ош}^2}, \tag{25}$$

$$F_2 = \frac{0{,}0002}{0{,}0008} = 0{,}25.$$

Табличное значение критерия Фишера для уровня значимости ***p=0,05*** и числа степеней свободы $f_1 = k - 1 = 4$ и $f_2 = k*(n-1) = 15$ равно $F_{0.95}(4,15) = 3{,}1$.

Поскольку расчетный критерий Фишера для параметра пропитки Δp меньше табличного 1,0 < 3,1, то данный параметр не оказывает значимое влияние на степень пропитки η.

Аналогичным образом проводили однофакторный дисперсионный анализ с равным числом параллельных наблюдений для изучения влияния параметров пропитки μ и w_0 на степень пропитки η пористой цементной матрицы (таблицы 19-20).

Таблица 19 – Результаты расчета оценки значимости влияния параметра пропитки μ на степень пропитки η

№	Расчетная величина	Значение
1.	$\varphi_{n,\mu}$	3,44; 3,40; 3,36
2.	SS_1	8,6810
3.	SS_2	8,6710
4.	SS_3	8,6700
5.	SS_A	0,0010
6.	$SS_{общ}$	0,0110
7.	s^2_A	0,0005
8.	$SS_{ост}$	0,0100
9.	$s^2_{ош}$	0,0011
10.	F_2	0,45
11.	$F_{табл\ 0.95}(2,9)$	4,30000
Вывод: $F_2 < F_{табл\ 0.95}(2,9)$ – параметр пропитки незначим		

Таблица 20 – Результаты расчета оценки значимости влияния параметра пропитки $\boldsymbol{w_0}$ на степень пропитки $\boldsymbol{\eta}$

№	Расчетная величина	Значение
1.	$\varphi_{n,\omega}$	3,47; 3,33; 3,31; 3,40; 3,38
2.	SS_1	14,2800
3.	SS_2	14,2676
4.	SS_3	14,2636
5.	SS_A	0,0040
6.	$SS_{общ}$	0,0164
7.	s^2_A	0,0010
8.	$SS_{ост}$	0,0124
9.	$s^2_{ош}$	0,0008
10.	F_2	1,23
11.	$F_{табл\ 0.95}(4,15)$	3,1
Вывод: $F_2 < F_{табл\ 0.95}(4,15)$ – параметр пропитки незначим		

Дисперсионный анализ позволил установить значимость влияния каждого из параметров пропитки: вязкости органических ЖРО $\boldsymbol{\mu}$, скорости пропитки $\boldsymbol{w_0}$, гидравлического сопротивления $\boldsymbol{\Delta p}$ на степень пропитки $\boldsymbol{\eta}$ цементной матрицы. По результатам дисперсионного анализа было установлено, что на степень пропитки цементной матрицы данные параметры значимого влияния не оказывают. Поэтому эффективная степень пропитки при заданном качестве матрицы и отходов будет всегда достигаться при варьировании скорости и гидравлического сопротивления в определенных эффективных интервалах. Вместе с тем при реализации технологии необходимо прогнозировать значения параметров пропитки.

По уравнению (9) произвели расчет гидравлического сопротивления цементной матрицы при скорости пропитки, достигнутой на лабораторной установке (таблица 21).

Анализ расчетных данных показал, что расчетная величина гидравлического сопротивления цементной матрицы ниже экспериментальной в среднем на 23 %.

Для сходимости расчетных и экспериментальных результатов было проведено уточнение зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от

критерия Рейнольдса (5), на которую могут влиять режим движения жидкости, структура порового пространства и природа жидкости.

Таблица 21 – Результаты расчета гидравлического сопротивления цементной матрицы

Параметр пропитки	Раствор ТБФ в синтине																	
Скорость пропитки, см/мин	0,2	0,7	1,2	1,6	2,1	2,5	3,1	3,7	3,8	4,5	5,0	5,2	6,5	6,4	7,1	7,2	8,1	9,9
Расчетное гидравлическое сопротивление, 10^{-2} МПа	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	1,0	1,3	0,9	1,4	1,5	1,2	2,9	1,9	2,5	2,0	2,8	3,9
	Сцинтиллятор																	
Скорость пропитки, см/мин	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,4	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,8	2,8	3,1	3,1	3,6	3,9
Расчетное гидравлическое сопротивление, 10^{-2} МПа	0,3	0,6	0,6	0,8	0,9	0,8	1,4	1,9	1,8	2,1	2,0	2,0	3,7	2,8	3,4	2,6	4,2	3,9
	Масло нефтяное																	
Скорость пропитки, см/мин	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9
Расчетное гидравлическое сопротивление, 10^{-2} МПа	1,5	1,7	1,8	2,6	1,9	1,8	2,6	3,6	3,0	3,2	2,8	3,1	3,9	4,6	5,0	4,6	6,0	3,9

Для уточнения функции $\lambda_n=f(Re_n)=A/Re_n$ рассчитали критерий Рейнольдса по уравнению $Re_n=wd_{cp}\rho/\mu$ и коэффициент гидравлического сопротивления по уравнению (8). С помощью регрессионного анализа эксперементальных данных (рисунок 16) установили, что зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от обратного значения критерия Рейнольдса описывает уравнение

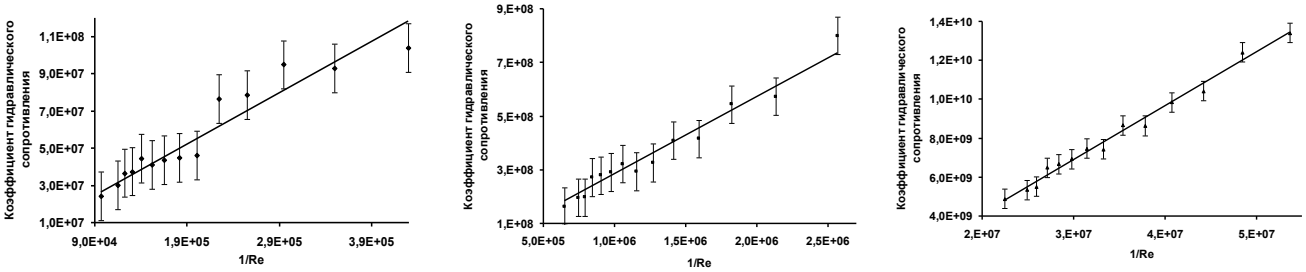
$$\lambda_{П} = A\left(\frac{1}{\mathrm{Re}_{\mathrm{П}}}\right) = A\left(\frac{\mu}{wd_{cp}\rho}\right), \qquad (26)$$

где ***A***=276±4 для раствора ТБФ в синтине;

A=287±7 для сцинтиллятора;

A=276±10 для масла нефтяного.

Учитывая значения и погрешность коэффициентов регрессии ***A*** для каждого вида ЖРО, посчитали возможным использовать его среднеарифметическое значение: ***A***=280±14.



1 **2** **3**

1 – раствор ТБФ в синтине; 2 – сцинтиллятор; 3 – масло нефтяное

Рисунок 16 – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от обратного значения критерия Рейнольдса

После подстановки в уравнение (7) расчетной зависимости (26) получили

$$\Delta p = 140 \frac{\mu w h}{d_{cp}^2} \frac{(1-\varphi)^2}{\varphi^3} \frac{1}{\Phi^2}, \qquad (27)$$

При расчете гидравлического сопротивления по уравнению (27) было установлено, что расхождение расчетных и экспериментальных величин составляет не более 3 %.

В технологическом процессе скорость пропитки определяется производительностью дозирующего оборудования, поэтому зависимость (4) можно преобразовать с использованием уравнения (14) и (28)

$$w = \frac{hG}{V}, \qquad (28)$$

где $\boldsymbol{G}$ – производительность подачи отходов, м^3/с;

$\boldsymbol{V}$ – объем пористой цементной матрицы, м^3.

После преобразования зависимость (27) принимает вид

$$\Delta p = 140 \frac{G\mu h^2}{V d_{cp}^2} \frac{(1-\eta П)^2}{(\eta П)^3} \frac{1}{\Phi^2}, \qquad (29)$$

Зависимость (29) позволяет прогнозировать параметры технологического процесса пропитки и рассчитывать рациональную категорию безопасности оборудования для его реализации.

2.3.5 Определение зависимости распределения радионуклидов в цементной матрице при пропитке

Было установлено, что в цементной матрице после каждого цикла пропитки остаются 5-10 % ^{238}U и 10-15 % ^{137}Cs от исходной активности. Варьирование исходной активности органических ЖРО в интервале 10^4-10^5 Бк по ^{238}U и 10^5-10^6 Бк по ^{137}Cs значимого влияния на данный показатель не оказывает.

Регрессионная зависимость изменения активности радионуклидов ^{238}U и ^{137}Cs по высоте цементной матрицы при пропитке, определенная по экспериментальным данным, имеет вид

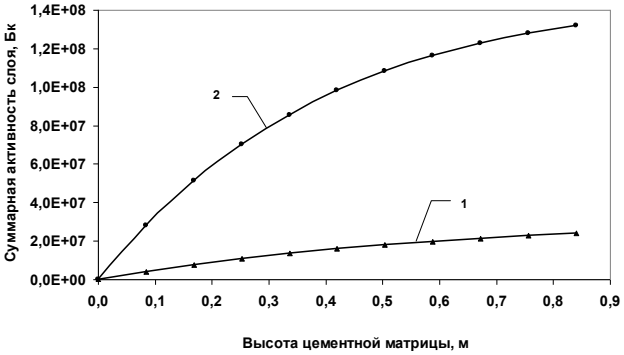
$$\omega = ak + bk^2, \qquad (30)$$

где $\boldsymbol{\omega}$ – коэффициент, равный отношению активности $\boldsymbol{A}$ (Бк) ^{238}U или ^{137}Cs, содержащаяся в цементной матрице высотой $\boldsymbol{h}$ (м) к активности $\boldsymbol{A}_{\Sigma}$ (Бк) ^{238}U и ^{137}Cs, включенных в цементную матрицу высотой $\boldsymbol{h_{max}}$ (м) в результате пропитки;

$k = h/h_{max}$;

a и ***b*** – коэффициенты регрессии: a=1,66 или 2,02 и b=(-0,67) или (-1,04) для ^{238}U и ^{137}Cs соответственно.

На рисунке 17 графически представлено расчетное распределение радионуклидов в 200-л бочке.



1 – ^{238}U; 2 – ^{137}Cs

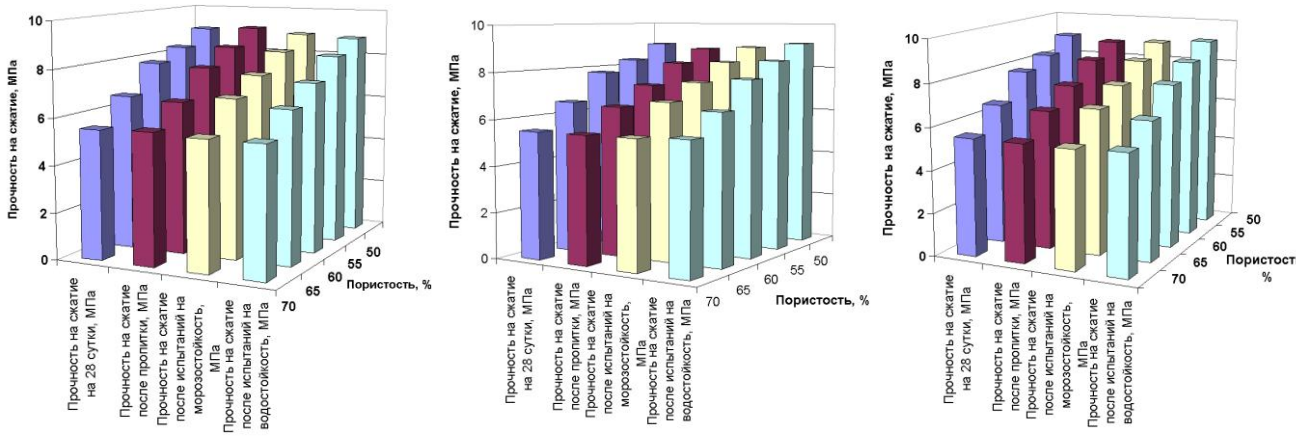
Рисунок 17 – Ожидаемое распределение радионуклидов по высоте цементной матрицы при пропитке в 200-л бочке

2.3.6 Влияние органических отходов на свойства конечного продукта

2.3.6.1 Регламентированные свойства конечного продукта

После пропитки определяли прочность на сжатие конечного продукта, а затем его подвергали испытаниям на соответствие регламентированным требованиям [5, 52]. Испытаниям подвергали цементные матрицы после пропитки во всем исследуемом диапазоне пористости. Соответственно наполнение матрицы варьировалось в широком диапазоне 37-68 % от объема.

На рисунке 18 графически отображены данные исследований прочностных свойств конечного продукта после пропитки, испытаний на водо- и морозостойкость.

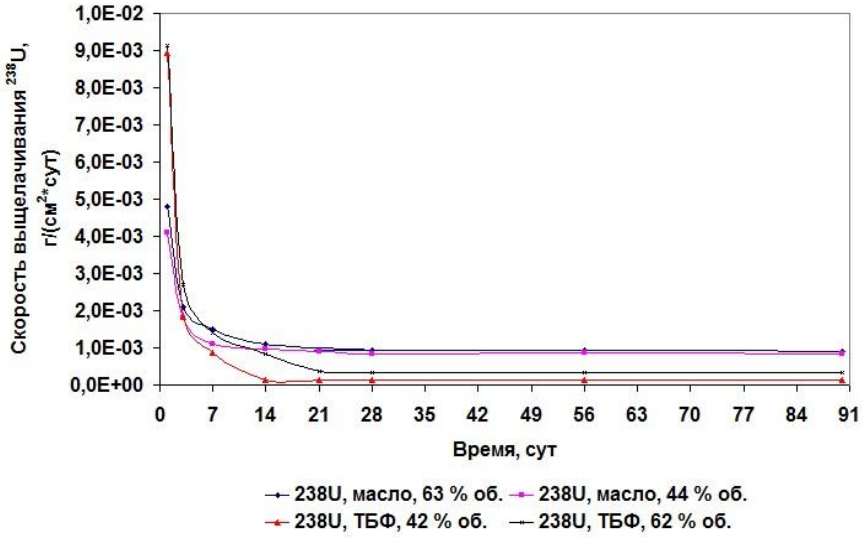


А Б В

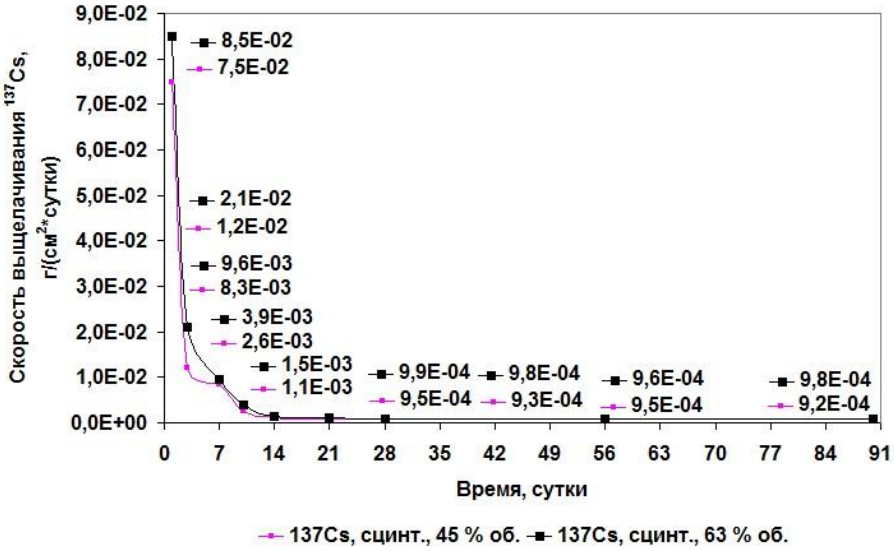
Рисунок 18 – Прочностные свойства матрицы на 28 сутки твердения и конечного продукта после пропитки (А – раствором ТБФ в синтине, Б – сцинтиллятором, В - нефтяным маслом) и испытаний на морозо- и водостойкость

Из представленных на рисунке 18 данных можно сделать вывод, что конечный продукт – матрица после пропитки с пористостью около 70 % (наполнением по отходам около 64 % об.) соответствует регламентированным требованиям [5, 52] в части требований к прочности цементного компаунда на 28 сутки твердения и после испытаний на морозо- и водостойкость. Прочность на сжатие матрицы после пропитки не снижается и составляет около 5,5 МПа при пористости около 70 %. Прочность на сжатие матриц после испытаний на морозо- и водостойкость не снижается и составляет также около 5,5 МПа при пористости около 70 %.

На рисунке 19 графически отображены данные исследований скорости выщелачивания радионуклидов ^{137}Cs и ^{238}U из конечного продукта.



А



Б

Рисунок 19 – Скорость выщелачивания радионуклидов ^{238}U из конечного продукта после пропитки раствором ТБФ в синтине и маслом нефтяным (А), и ^{137}Cs из конечного продукта после пропитки сцинтиллятором (Б)

Как видно из данных, представленных на рисунке 19, скорость выщелачивания радионуклидов ^{137}Cs и ^{238}U из конечного продукта на 28-90 сутки испытаний достигает значений $1{,}2\cdot10^{-4}$ -$9{,}8\cdot10^{-4}$ г/см^2·сут, что соответствует регламентированным требованиям [5, 52].

.

2.3.6.2 Пожаровзрывоопасность конечного продукта

Низкие температуры вспышки и воспламенения (менее 100 °С), способность возгораться от внешнего источника тепла и поддерживать горение компонентов органических ЖРО (синтин, ТБФ) обусловили необходимость изучения данных факторов на конечный продукт.

В таблице 22 представлены результаты определения температуры вспышки и воспламенения раствора ТБФ в синтине и конечного продукта.

Таблица 22 – Результаты исследования пожаровзрывовопасности конечного продукта

Исследуемый параметр	Раствор ТБФ в синтине	Цементная матрица после пропитки раствором ТБФ в синтине
Температура вспышки, °С	89	128
Температура воспламенения, °С	115	140

Как видно из данных таблицы 22, вспышка и воспламенение матрицы, пропитанной раствором ТБФ в синтине, происходит при более высоких температурах, чем исходного раствора ТБФ в синтине. Вероятно, негорючий каркас матрицы снижает пожаровзрывоопасность раствора ТБФ в синтине. Таким образом, при иммобилизации раствора ТБФ в синтине методом пропитки цементной матрицы вероятность возгорания конечного компаунда полностью не исключена, однако в достаточной степени снижена, что повышает надежность и безопасность разрабатываемой технологии в целом.

На рисунке 20 показано горение конечного продукта в закрытом тигле при температуре 140 °С.

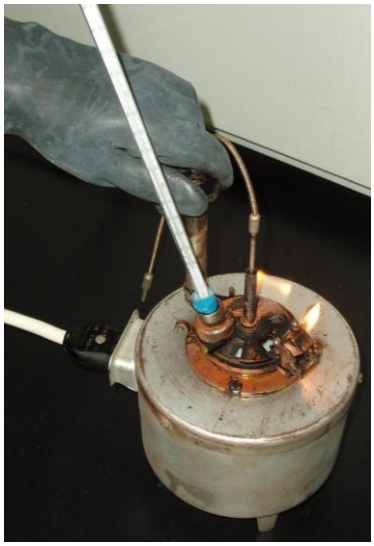


Рисунок 20 – Горение конечного продукта в закрытом тигле при температуре 140 °С

Исследования огнестойкости конечного компаунда показали, что при воздействии открытого пламени:

– матрица, пропитанная раствором ТБФ в синтине, загорается сразу;

– матрица, пропитанная жидким сцинтиллятором, загорается через 30 сек;

– матрица, пропитанная маслом нефтяным, через 10 минут.

Однако высота пламени и интенсивность горения матрицы, пропитанной жидким сцинтиллятором и маслом нефтяным, были наименьшими по сравнению с матрицей, пропитанной раствором ТБФ в синтине.

На рисунке 21 показана процедура проведения испытаний конечных компаундов на огнестойкость.

А **Б** **В**

А – поджиг образца; Б – начало горения; В – интенсивное горение

Рисунок 21 – Процедура проведения испытаний конечного компаунда на огнестойкость

2.3.6.3 Надежность закрепления отходов в матрице

Оценку надежности закрепления отходов в конечном продукте производили путем воздействия центробежной силы. Для чего образцы цементной матрицы объемом 120 см^3 цилиндрической формы после пропитки с наполнением органическими ЖРО около 60 % по объему размещали в кюветах лабораторной центрифуги, внешний вид которой представлен на рисунке 22.

Испытания проводили, увеличивая время центрифугирования матрицы с шагом в 10 минут. Таким образом, в течение 1,5 часов испытаний цементную матрицу многократно извлекали из лабораторной центрифуги, производили визуальный осмотр её поверхности на наличие капель ЖРО, выделение которых из объема матрицы могло произойти в ходе испытаний, и взвешивали для количественной оценки возможных потерь ЖРО

Рисунок 22 – Внешний вид лабораторной центрифуги

В результате проведенных исследований установлено, что при центрифугировании образцов цементной матрицы после пропитки с наполнением органическими ЖРО около 60 % по объему в течение 1,5 часов с относительной центробежной силой до 90 м/с^2 (≈9g) выделение отходов из матрицы не происходит.

Глава 3. Технологическая часть

Для обоснования технических решений технологии эффективной иммобилизации органических ЖРО методом пропитки пористой цементной матрицы определили эффективные параметры пропитки цементной матрицы, размещенной в 200-л бочке, органическими ЖРО различного вида.

3.1 Опытно-промышленные испытания метода пропитки цементной матрицы различными видами органических ЖРО на опытном стенде

Уравнение (29) справедливо описывает взаимосвязь технологических параметров пропитки, определенных в лабораторных условиях, и содержит весь комплекс технологических параметров, что позволяет прогнозировать процесс пропитки. При переходе от пропитки одними и теми же органическими ЖРО матрицы на лабораторной установке к контейнерам с матрицей объемом 50 л, 100 л, 200 л и более скорость пропитки может быть сохранена путем увеличения производительности дозирующего оборудования пропорционально увеличению площади поперечного сечения пропитываемой цементной матрицы.

Для размещения матрицы на опытном стенде (рисунок 23) использовали:

– контейнер объемом 50 л высотой 0,4 м;
– контейнер объемом 100 л высотой 0,6 м.

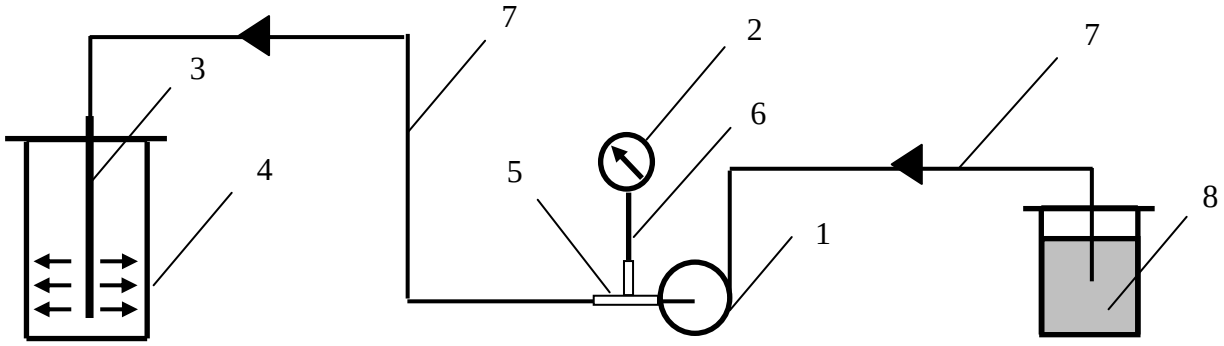
Эффективную скорость пропитки задавали путем установки перед началом эксперимента соответствующей производительности дозирующего насоса согласно уравнению (28).

Для пропитки использовали раствор ТБФ в синтине.

Для размещения матрицы использовали указанные выше контейнеры без конструктивных изменений, поэтому геометрические размеры матрицы составляли:

– в контейнере объемом 50 л – объем и высота матрицы 45 л и 0,36 м соответственно;

– в контейнере объемом 100 л – объем и высота матрицы 90 л и 0,55 м соответственно.



1 – дозирующий насос; 2 – манометр; 3 – питающее устройство;
4 – контейнер с матрицей; 5 – переходник; 6 – разделитель сред;
7 – трубопровод подачи ЖРО; 8 – транспортный контейнер с ЖРО

Рисунок 23 – Принципиальная схема опытного стенда

Для подачи ЖРО в контейнер использовали специальное питающее устройство, представляющее собой трубу внутренним диаметром 20 мм, на стенке которой выполнены двадцать (для размещения в контейнере объемом 50 л) и сорок (для размещения в контейнере объемом 100 л) отверстий диаметром 8 мм, расположенных на расстоянии 10 мм от нижнего заглушенного конца под углом 90° друг к другу (по четыре отверстия на одной высоте с шагом 50 мм).

Перед пропиткой устанавливали необходимую производительность дозирующего насоса (точность дозирования 1 %). В ходе пропитки контролировали давление пропитки (давление на выходе из дозирующего насоса). В момент появления отходов на поверхности матрицы фиксировали время пропитки и останавливали работу дозирующего насоса. Взвешивали контейнер до размещения в нем матрицы, перед пропиткой и после пропитки.

Результаты 1-го этапа испытаний метода пропитки на опытном стенде представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Результаты испытаний пропитки матрицы на опытном стенде (1-й этап)

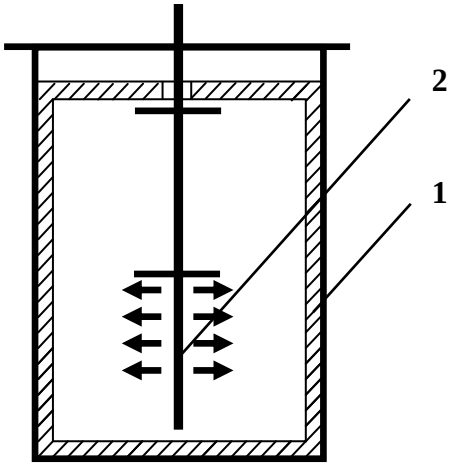
Расчетные параметры		Технологические параметры				Степень пропитки η
Гидравлическое сопротивление Δp, атм	Скорость пропитки w_0, см/мин	Производительность подачи отходов G, л/час	Скорость пропитки w_0, см/мин	Давление пропитки $p_{пр}$, атм	Наполнение φ, % от объема	
Объем контейнера 50 л						
0,11	0,27	8,1	0,49	0,19	22	0,44
0,05	0,22	10,4	0,73	0,18	19	0,27
0,53	1,35	40,5	2,00	0,79	27	0,54
0,27	1,09	52,1	2,77	0,69	25	0,36
Объем контейнера 100 л						
0,16	0,27	10,6	0,47	0,28	23	0,46
0,08	0,22	13,7	0,54	0,20	26	0,37
0,81	1,35	53,0	2,12	1,28	25	0,50
0,41	1,09	68,3	2,39	0,91	29	0,41

Анализ данных таблицы 23 показывает, что эффективная степень пропитки на опытном стенде не достигаются (0,27-0,50). Причиной низкой эффективности пропитки является попадание отходов в зону соприкосновения матрицы и стенок контейнера или питающего устройства, в результате чего происходит проскок жидкости в направлении поверхности матрицы по пути наименьшего сопротивления. Для достижения эффективных параметров пропитки внесли изменения в конструкцию контейнера и питающего устройства.

На 2-м этапе испытаний для размещения матрицы использовали контейнеры измененной конструкции. На внутренней поверхности стенок и днища контейнера была выполнена бетонная обечайка толщиной 30 мм, позволяющая увеличить силу сцепления матрицы и стенок контейнера (бетонной опалубки). Для подачи отходов в контейнер использовали оригинальное питающее устройство, представляющее собой трубу внутренним диаметром 20 мм, снабженную двумя металлическими кольцами диаметром 0,25 м на расстоянии 1/3 и 2/3 своей высоты и четырьмя сквозными отверстиями диаметром 8 мм, расположенными на расстоянии 10 мм от нижнего заглушенного конца под углом 90° друг к другу. Кон-

струкция контейнера и питающего устройства должна предотвратить проскок отходов на поверхность матрицы в процессе пропитки. Кроме того, бетонные стенки и днище контейнера исключают возможность развития коррозионных процессов в материале контейнера при долговременном хранении конечного продукта.

Схема и общий вид контейнера представлено на рисунках 24-25.



1 – бетонная обечайка; 2 – питающее устройство

Рисунок 24 – Схема контейнера с цементной матрицей

Рисунок 25 – Внешний вид контейнера с цементной матрицей перед пропиткой

Результаты 2-го этапа испытаний метода пропитки на опытном стенде представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Результаты испытаний пропитки матрицы на опытном стенде (2-й этап)

Расчетные параметры		Технологические параметры				Степень пропитки η
Гидравлическое сопротивление Δp, атм	Скорость пропитки w_0, см/мин	Производительность подачи отходов G, л/час	Скорость пропитки w_0, см/мин	Давление пропитки $p_{пр}$, атм	Наполнение φ, % по объему	
Объем контейнера 50 л						
0,11	0,27	8,1	0,28	0,11	39	0,78
0,05	0,22	10,4	0,21	0,05	66	0,94
0,53	1,35	40,5	1,30	0,49	42	0,84
0,27	1,09	52,1	1,11	0,28	63	0,90
Объем контейнера 100 л						
0,16	0,27	10,6	0,26	0,15	42	0,84
0,08	0,22	13,7	0,24	0,10	58	0,83
0,81	1,35	53,0	1,44	0,92	38	0,76
0,41	1,09	68,3	1,02	0,36	68	0,97

Как видно из таблицы 24, пропитка отходами цементной матрицы, размещенной в контейнерах объемом 50 л и 100 л, проходит при производительности подачи отходов 8-68 л/час с линейной скоростью в эффективном интервале 0,2-1,4 см/мин. Соответственно, объемное наполнение матрицы после пропитки на опытном стенде составило 38-68 % при степени пропитки 0,8-0,9, что полностью согласуется с параметрами пропитки, достигнутыми на лабораторной установке.

Время пропитки цементной матрицы, размещенной в контейнере объемом 50 л составило 0,4-2,6 часа и объемом 100 л – 0,7-4,2 часа соответственно. Пропитка проходила равномерно, проскоков ЖРО не наблюдалось, в момент завершения пропитки отходы появлялись на всей поверхности матрицы одновременно.

Конструкция контейнера и питающего устройства в ходе испытаний подтвердили свою надежность. Визуальный осмотр контейнера во время и после пропитки не выявил наличия деформаций и каких-либо других повреждений. Равномерность и степень пропитки конечного продукта подтверждена визуальным осмотром разрезанных контейнеров (рисунок 26).

Рисунок 26 – Фрагментированный контейнер с элементами цементной матрицы после пропитки раствором ТБФ в синтине (имитатор)

Таким образом, параметры пропитки на опытном стенде соответствуют параметрам, достигнутым на лабораторной установке. Определенное в ходе экспериментов давление пропитки матрицы на опытном стенде хорошо согласуется с расчетными значениями гидравлического сопротивления матрицы (расхождение не более 3 %) согласно уравнению (29), что показывает его применимость для оценки и прогнозирования технологии пропитки цементной матрицы в контейнере объемом 50 и 100 л.

По результатам экспериментов на опытном стенде заключили, что метод пропитки цементной матрицы может быть реализован при размещении матрицы в бочке объемом 200 литров. Для этого посчитали целесообразным создание модуля кондиционирования органических ЖРО методом пропитки пористых цементных матриц в контейнере и ввод его в эксплуатацию в технологический процесс кондиционирования РАО в ФГУП «Радон».

3.2 Испытания модуля пропитки цементной матрицы

Дальнейшие испытания метода пропитки цементной матрицы проводили на модуле, который был специально разработан, изготовлен, смонтирован, прошел приемочные испытания, обеспечен комплектом документации (техническое задание, программа и методика испытаний, технологическая документация) и введен в эксплуатацию в ФГУП «Радон» в составе Миниблочной растворосмесительной установки [137].

Конструкционное оформление процесса пропитки весьма разнообразно. При разработке модуля пропитки пористой цементной матрицы, размещенной в контейнере, учитывали следующие факторы:

– оборудование для подачи ЖРО в матрицу должно обеспечивать надежность, герметичность, пожаро- и взрывобезопасность процесса пропитки;

– правильный расчет времени пропитки и стабильность процесса пропитки должны обеспечиваться достаточной точностью дозирования ЖРО в матрицу;

– возможность изменения производительности процесса пропитки в зависимости от типа ЖРО или в ходе пропитки;

– оборудование модуля должно быть изготовлено из материалов, стойких к воздействию агрессивных веществ, содержащихся в органических ЖРО;

– оборудование модуля должно быть компактным, легкоразборным, удобным в эксплуатации и техническом обслуживании.

Модуль (рисунок 27) предназначен для иммобилизации органических ЖРО методом пропитки цементной матрицы, размещенной в контейнере объемом 200 л (высота 0,84 м, диаметр 0,56 м). Основными элементами модуля являются дозирующий насос и трубопровод подачи ЖРО. Модуль оснащен системами электропитания и КИПиА. Управление процессом осуществляется с пульта управления.

Рисунок 27 – Модуль кондиционирования ЖРО методом пропитки цементной матрицы, размещенной в контейнере

В Приложении А представлены техническая документация на модуль, а именно копии:

– технического задания на опытно-конструкторскую работу «Разработка и изготовление модуля кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере» (титульный лист);

– пояснительной записки «Модуль кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере» (титульный лист);

– программы и методики испытаний «Модуль кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере» (титульный лист);

– акта от 29.07.2009 г. окончания монтажных работ модуля кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере;

– протокола № 38/1 от 05.08.2009 г. проверки наличия цепи между заземленными установками и элементами заземленной установки;

– протокола от 07.08.2009 г. приемочных испытаний модуля кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере;

– акта от 14.08.2009 г. приемки и ввода в эксплуатацию модуля кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере;

– программа работ по переработке и кондиционированию органических ЖРО, доставленных из ОАО «ВНИИНМ»;

– акта опытно-промышленных испытаний модуля кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере от 24.08.2010 г.;

– копия «Технологического регламента технологического процесса РадХ-12.03/2008. Цементирование радиоактивных отходов. Миниблочная растворосмесительная установка», утв. 16.12.2008 г. с изменениями от 02.09.2010 г.

Описание модуля в соответствии с позициями на схеме (рисунок 28) и порядок работы модуля приведен ниже.

Модуль входит в состав миниблочной растворосмесительной установки и предназначен для пропитки цементных матриц в контейнере.

Класс безопасности 3 по НП 001-97 (ОПБ 88/97).

Категория сейсмостойкости II по НП 031-01.

Условия эксплуатации по ГОСТ 15150-69.

Вид климатического исполнения УХЛ 2.1-II.

Группа условий эксплуатации – 1.

Дозирующий насос предназначен для эксплуатации в помещении при следующих условиях окружающей среды:

– температура от – 15 °С до +40 °С;

– относительная влажность воздуха при температуре +15 °С составляет не более 80%.

Рабочая среда для напорного дозирования – органические ЖРО: водные растворы или органические жидкости, нейтральные или агрессивные жидкости, эмульсии или суспензии.

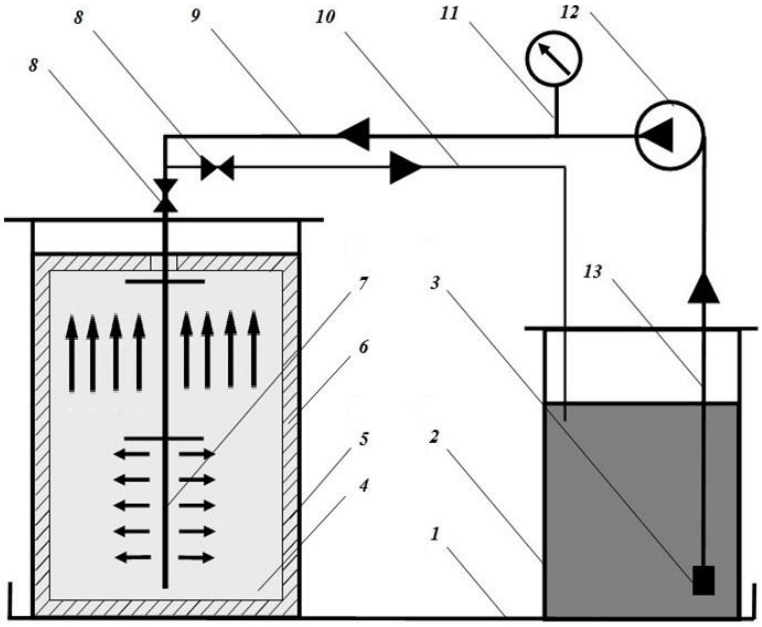
Технические характеристики модуля:

– давление рабочее в трубопроводе подачи ЖРО – не более 10 атм;

– производительность модуля – не менее 15 дм^3 ЖРО за 1 час работы;

– основной конструкционный материал – сталь нержавеющая ГОСТ 5582-72;

– назначенный срок службы – 10 лет.



1 – поддон; 2 – транспортный контейнер с жидкими органическими радиоактивными отходами; 3 – механический фильтр; 4 – контейнер с пористой цементной матрицей; 5 – питающее устройство; 6 – трубопровод подачи жидких органических радиоактивных отходов; 7 – манометр; 8 – дозирующий насос; 9 – трубопровод всасывания жидких органических радиоактивных отходов; 10-кран; 11- трубопровод аварийного слива

Рисунок 28 – Принципиальная схема модуля кондиционирования ЖРО методом пропитки цементной матрицы, размещенной в контейнере

Дозирующий насос (8) предназначен для закачки ЖРО в питающее устройство (5), находящийся в контейнере с матрицей (4). Дозирующий насос (8) имеет регулируемую производительность от 0 до 100 л/час и развивает давление на выходе до 10 атм.

Трубопровод всасывания ЖРО (9) предназначен для обеспечения перекачки ЖРО из транспортного контейнера (2) через фильтр механический (3) к дозирующему насосу (8). Трубопровод всасывания ЖРО (9) выполнен из резиновых рукавов напорных с нитяной оплеткой ГОСТ 10362-76 с d_y=8 мм. Протяженность трубопровода 15 м.

Трубопровод подачи ЖРО (6) предназначен для перекачки ЖРО от дозирующего насоса (8) в контейнер с матрицей (4). Трубопровод выполнен из рукава высокого давления с d_y=8 мм с присоединительными гайками с размером под ключ 19 мм. Протяженность трубопровода 15 м.

Фильтр механический (3) предназначен для исключения попадания механических примесей ЖРО в трубопровод всасывания ЖРО (9). Фильтр (3) представляет собой трубу с d_y=19 мм, которая с одной стороны закрыта с помощью хомута металлической сеткой с размером ячейки 2 мм и снабжена тремя упорами из металлических прутов длиной 15 мм для обеспечения зазора между фильтром и днищем транспортного контейнера (2) при откачивании из него ЖРО. С противоположной стороны на фильтре выполнен патрубок-ниппель с d_y=8 мм. Фильтр изготовлен из стали нержавеющей ГОСТ 5582-75.

Манометр (7) МП4-У с пределом измерений давления 0-16 атм. предназначен для контроля давления в трубопроводе подачи ЖРО (6). Манометр (7) расположен на патрубке нагнетательной линии дозирующего насоса (8). Для соединения манометра (7) с патрубком нагнетательной линии дозирующего насоса (8) использовано устройство разделения сред.

Во избежание загрязнения места эксплуатации модуль размещается на поддоне (1). Поддон (1) предназначен для размещения на нем всего оборудования модуля, включая контейнер с матрицей (4) и транспортного контейнера (9). Геометрические размеры поддона (6): длина 5 м, ширина 2 м, высота 0,1 м. Поддон изготовлен из стали нержавеющей ГОСТ 5582-75.

Соединение всасывающего трубопровода (9) с патрубком на всасывающей линии дозирующего насоса (8) с помощью хомута. Патрубок механического фильтра (3) закрепляется на конце трубопровода всасывания ЖРО (9) с помощью хомута. Соединение трубопровода подачи ЖРО (6) с патрубком нагнетательной линии дозирующего насоса (8) резьбовое. Соединение трубопровода подачи ЖРО (6) с закладным зондом контейнера с матрицей (4) резьбовое.

Перед пропиткой матрицы устанавливается необходимый ход плунжера дозирующего насоса, рассчитывается требуемое время пропитки ***t*** по формуле

$$t = \frac{V \cdot \varphi}{\Pi}, \qquad (31)$$

где ***V*** – объем матрицы, дм^3;

φ – ожидаемое объемное наполнение матрицы;

П – производительность дозирующего насоса, дм^3/час.

Начинается процесс пропитки цементной матрицы: включается дозирующий насос (8), начинается отсчет времени.

В процессе пропитки визуально контролируется герметичность соединений и давление в трубопроводе подачи ЖРО (6). Если давление в трубопроводе подачи ЖРО (6) превысит 10 атм, процесс пропитки останавливают отключением дозирующего насоса (8).

По окончании времени пропитки дозирующий насос (8) останавливают, трубопровод подачи ЖРО (6) не отсоединяется от питающего устройства (5) до того, пока показания манометра не будут равны «0». Давление контролируется визуально.

Трубопровод подачи ЖРО (6) отсоединяется от питающего устройства (5), на питающее устройство (5) устанавливается заглушка.

Трубопровод всасывания ЖРО (9) извлекается из транспортного контейнера (2) и помещается в пустой пластиковый бачок объемом 40 л. Свободный конец трубопровода подачи ЖРО (6) помещается в транспортный контейнер (2).

Трубопроводы (6, 9) опорожняются от остатков ЖРО включением на 1 мин дозирующего насоса (1).

В процессе эксплуатации модуля возможны аварийные ситуации, включающие в себя следующие основные типы исходных событий:

– отказ систем и элементов модуля – разрыв трубопровода подачи ЖРО;

– ошибка персонала – передозировка ЖРО при подаче в контейнер.

В соответствии с перечнем исходных событий возможны следующие аварийные ситуации – разлив ЖРО.

При испытаниях технологии пропитки эффективные параметры определяли при производительности подачи раствора ТБФ в синтине 17-90 л/ч, сцинтиллятора – 30 л/ч, масла нефтяного – 21 л/ч. Результаты пропитки матрицы в контейнере объемом 200 л раствором ТБФ в синтине, сцинтилляционным раствором и нефтяным маслом представлены в таблице 25. В силу того, что для размещения цементной матрицы использовали контейнеры объемом 200 л с внесением изменений в их конструкцию согласно рисунку 24, объем и высота матрицы в контейнере составили 172 л и 0,72 м соответственно.

Таблица 25 – Результаты испытаний технологического процесса пропитки матрицы, размещенной в стандартном 200-л контейнере

Гидравлическое сопротивление, 10^{-2} МПа	Производительность, л/ч	Скорость пропитки, см/мин	Время, ч
Раствор ТБФ в синтине			
2	17	0,3	4,1
2	17	0,3	4,2
2	17	0,3	4,6
1	17	0,2	5,6
1	17	0,2	5,6
2	21	0,3	3,9
2	30	0,4	3,3
3	45	0,5	2,2
3	45	0,6	2,0
4	75	0,9	1,4
5	90	1,1	1,1
Сцинтиллятор			
5	30	0,4	3,4
Масло нефтяное			
20	21	0,3	4,6

Процесс пропитки протекал равномерно, проскоков ЖРО не наблюдалось. В момент завершения пропитки ЖРО появляются на всей поверхности матрицы одновременно. Конструкция контейнера и питающего устройства в ходе испытаний подтвердили свою надежность. Визуальный осмотр контейнера во время и после пропитки не выявил наличия деформаций и повреждений.

Пропитка цементной матрицы в 200-л бочке показала, что при эффективной скорости пропитки 0,2-1,1 см/мин и степени пропитки 0,8-0,9 гидравлическое сопротивление цементной матрицы варьируется в эффективном интервале 0,01-0,2 МПа, что согласуется с расчетными величинами по зависимости (29) (таблица 25). Наполнение отходами цементной матрицы составляло до 64 % по объему или 52 % по массе.

Проверка адекватности математической модели пропитки (9) результатам испытаний показала, что расчетные и экспериментальные технологические параметры хорошо согласуются (расхождение не более 3 %), что доказывает обоснованность ее использования в технологическом процессе.

Опытно-промышленными испытаниями подтверждено, что при реализации метода пропитки объем конечного продукта превышает исходный объем ЖРО не более чем в 2 раза. Показано, что пропитка цементной матрицы органическими ЖРО упрощает технологический процесс цементирования и способствует повышению его радиационной безопасности за счет исключения операций временного хранения, дозирования и перемешивания органических ЖРО с вяжущим материалом.

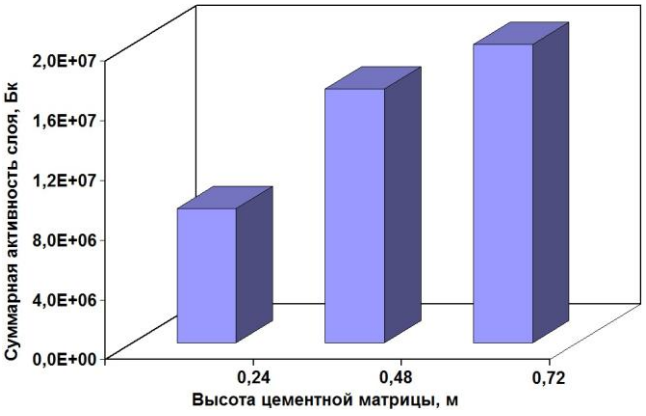
Размещение цементной матрицы для пропитки в бочке с бетонной обечайкой исключает возможность вспышки и воспламенения отходов при воздействии открытого пламени. Свойства конечного продукта соответствовали регламентированным требованиям, предъявляемым к цементной матрице ГОСТ Р 51883-2002 и НП-019-2000.

3.3 Распределение радионуклидов в цементной матрице при пропитке в 200-л бочке

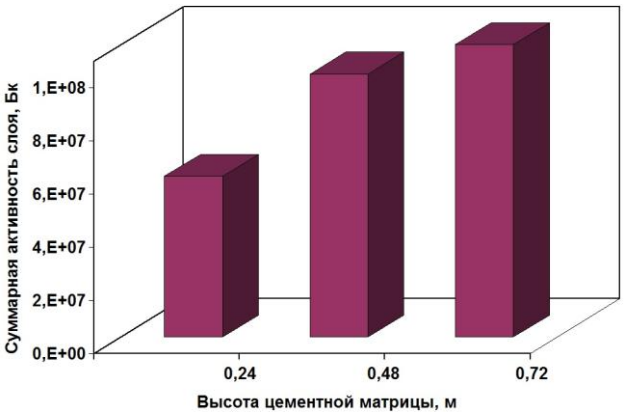
С целью оценки распределения радионуклидов в цементной матрице при пропитке в 200-л бочке последовательно измеряли активность участков цементной матрицы одинаковой высоты с помощью мобильной установки гамма-спектрометра ISOCS [138]. На рисунке 29 показана процедура измерения бочки объемом 200 л после пропитки.

Рисунок 29 – Процедура измерения 200-л бочки с цементной матрицей после пропитки

Было установлено, что активность включенных в цементную матрицу радионуклидов распределяется по высоте матрицы, состоящей из трех слоев высотой 0,24, 0,48 и 0,72 м, в соотношении 0,45-0,55:0,85-0,9:1,0 по ^{238}U и ^{137}Cs соответственно (рисунок 30).



1- U^{238}



2-Cs^{137}

Рисунок 30 – Распределение радионуклидов по высоте цементной матрицы при пропитке в 200-л бочке

Результаты измерений согласуются с расчетными данными по зависимости (30). При повторном измерении через 1 год временного хранения активность участков цементной матрицы в 200-л бочке по ^{238}U и ^{137}Cs значимо не отличалась.

3.4 Расчет экономического эффекта от реализации технологии пропитки пористой цементной матрицы органическими ЖРО

Ниже приведен расчет экономического эффекта при реализации разработанной технологии иммобилизации органических ЖРО методом пропитки пористой цементной матрицы взамен технологии цементирования органических ЖРО при предварительной адсорбции отходов на различных твердых материалах.

При расчете экономического эффекта не учитывали капитальные затраты на изготовление, ремонт или замену дозирующего или перемешивающего оборудования действующих установок, трудозатрат на текущее обслуживание, включая дезактивацию площадей, потребности в моющих реагентах и затраты на спецводоочистку дезактивационных растворов.

Для оценки экономического эффекта при кондиционировании 1 $м^3$ органических ЖРО категории НАО с долгоживущими радионуклидами (цены взяты на 2013 г.) выбраны затраты на:

– исходные материалы;

– контейнеры временного хранения и контейнеры для захоронения;

– работы по контейнеризации кондиционированных РАО;

– временное хранение кондиционированных РАО;

– передачу кондиционированных РАО на захоронение, включая транспортировку к месту захоронения.

Расчет затрат при цементировании органических ЖРО с предварительной адсобцией отходов на различных твердых материалах при В/В=0,6 ($\rho_{ц.р\text{-}ра}$=1,7 г/$см^3$):

Исходный объем органических ЖРО $V_{ЖРО}$=1 $м^3$.

Плотность органических ЖРО $\rho_{ЖРО}$=0,843 т/$м^3$.

Масса органических ЖРО $m_{ЖРО}= V_{ЖРО}\cdot\rho_{ЖРО}$=0,843 т.

Степень включения органических ЖРО в компаунд φ=30 % по массе

Масса компаунда $m_{комп.}=(m_{ЖРО}\cdot 100\ \%)/\varphi=0{,}843\cdot 100/30=2{,}8$ т.

Масса цементного раствора $m_{ц.р-ра}=m_{комп.}-m_{ЖРО}=2,81-0,843=2,0$ т.

Объем конечного компаунда

$V_{комп.}= V_{ЖРО}+V_{ц.р-ра}=1+(2,0/1,700)=2,2$ м^3.

Увеличение объема к= $V_{комп.}/V_{ЖОРО}=2,2/1=2,2$, т.е. в 2,2 раза.

Требуется контейнеров временного хранения (200-л бочек): 2,2/0,2=11 шт.

Требуется контейнеров для захоронения НЗК-150 (по четыре бочки в один контейнер): 11 шт/4 шт=3 шт.

Объем РАО для захоронения 3 шт·3,74 м^3=11,3 м^3.

Требуется портландцемента: В/В=0,6

$В/В=(m_{ц.р-ра}-В)/В=0,6$

$В= m_{ц.р-ра}/(1+В/В)=2,0/1,6=1,3$ т.

Масса воды, необходимой для затворения вяжущего материала

$m_{воды}=m_{ц.р-ра}-В=2,2-1,3=0,9$ т.

Объем воды при плотности воды 1,0 т/м^3: $V_{воды}= m_{воды}/\rho_{воды}=0,9/1,0=0,9$ м^3.

Итого затраты на кондиционирование 1 м^3 органических ЖРО при цементировании с предварительной адсорбцией отходов на твердых материалах:

Цемент: 1,3 т·6000 руб/т=7 800 руб.

Контейнеры временного хранения (200-л бочки):

1 шт·800 руб/шт = 8 800 руб.

Контейнеры для захоронения (НЗК-150): 4 шт·100 000 руб/шт=400 000 руб.

Стоимость контейнеризации: 4 шт·50 000 руб/шт=200 000 руб.

Временное (технологическое) хранение в течение 5-ти лет (ориентировочно до планируемого ввода в эксплуатацию пунктов окончательной изоляции РАО в 2016 г.): 11,3 м^3·11 000 руб/м^3·5=124 300 руб.

Передача РАО (класс 3 – твердые САО и твердые долгоживущие НАО в соответствии с критериями приемлемости) для целей захоронения с учетом стоимости транспортировки к месту захоронения (5 % от тарифа на захоронение): 11,3 м^3·114 943,05 руб/м^3·1,05 =1 363 800 руб.

Сумма затрат при цементировании 1 $м^3$ органических ЖРО с предварительной адсорбцией на различных твердых материалах: 7 800 + 8 800 + 400 000 + + 200 000 +124 300 + 1 186 500 = 2 104 700 руб.

Расчет затрат при иммобилизации органических ЖРО методом пропитки цементной матрицы:

Исходный объем органических ЖРО $V_{ЖРО}$=1 $м^3$.

Пористость цементной матрицы П=70 %.

Наполнение конечного продукта φ=64 % по объему.

Объем конечного продукта $V_{конечн.}$= $V_{матр}$=1,0/0,64=1,56 $м^3$.

Масса цементной матрицы $m_{матр.}=\rho_{матр}\cdot V_{матр.}$= 0,6·1,56=0,94 т.

Масса конечного продукта $m_{конечн.}=m_{матр}+m_{ЖРО}$= 0,94+0,84=1,78 т.

Увеличение объема к= $V_{конечн}/V_{ЖОРО}$=1,56/1=1,56, т.е. в 1,56 раза.

Требуется контейнеров временного хранения (200-л бочек): 1,56/0,2=8 шт.

Требуется контейнеров для захоронения (НЗК-150) при размещении по 4 бочки в один контейнер: 8 шт./4=2 шт.

Объем РАО для захоронения 2 шт·3,74 $м^3$=7,48 $м^3$.

Требуется портландцемента: В/В=0,6.

В/В=($m_{матр.}$-В)/В=0,6

В= $m_{матр.}$/(1+В/В)=0,94/1,6=0,59 т.

Отсюда, можно рассчитать необходимое количество сухих компонентов композиции:

– портландцемент 0,38 т;
– тонкомолотый цемент 0,13 т;
– мелкодисперсный порошок оксида железа 0,01 т;
– карбонат кальция 0,02 т;
– бентонитовый глинопорошок 0,09 т.

Итого затраты на иммобилизацию 1 $м^3$ органических ЖРО методом пропитки цементной матрицы:

Цемент: 0,38 т·6 000 руб/т=2 280 руб.

Тонкомолотый цемент: 0,13 т·15 000 руб/т=1 950 руб.

Бентонитовый глинопорошок: 0,01 т·7 500 руб/т=670 руб.

Карбонат кальция: 0,02 т·30 000 руб/т=600 руб.

Мелкодисперсный порошок оксида железа: 0,01 т·5 000 руб/т=50 руб.

Контейнеры временного хранения (200-л бочки):
8 шт·800 руб/шт = 6 400 руб.

Контейнеры для захоронения (НЗК-150):
2 шт·100 000 руб/шт=200 000 руб.

Стоимость контейнеризации: 2 шт·50 000 руб/шт=100 000 руб.

Временное (технологическое) хранение в течение 5 лет:
7,48 м^3·11 000 руб/м^3·5=83 280 руб.

Передача РАО (класс 3 – твердые САО и твердые долгоживущие НАО) для целей захоронения в соответствии с критериями приемлемости с учетом стоимости транспортировки к месту захоронения (5 % от тарифа на захоронение): 7,48 м^3·114 943,05 руб/м^3·1,05 =902 763 руб.

Сумма затрат при иммобилизации 1 м^3 органических ЖРО методом пропитки: 2 280 + 1 950 + 670 + 600 + 50 + 6 400 + 200 000 + 100 000 + 83 280 + 824 670 = = 1 297 993 руб.

В таблице 26 сведены, приведенные выше расчеты экономического эффекта от реализации сравниваемых технологий.

Таблица 26 – Затраты при цементировании в 200-л бочках 1 м^3 низкоактивных органических ЖРО

Исходные данные		Расчет затрат на 1 м^3 ЖРО			
Статьи затрат	цена	Перемешивание		Пропитка	
		Кол-во	Стоим., тыс. руб.	Кол-во	Стоим., тыс. руб.
материалы					
Портландцемент ПЦ 42,5Б Д0	6 000 руб/т	1,3 т	7,8	0,38 т	2,28
Тонкомолотый цемент ТМЦ	15 000 руб/т	-	-	0,13 т	1,95
Бентонитовый глинопорошок марки ПБМВ	7 500 руб/т	-	-	0,09 т	0,67
Карбонат кальция марки «хч»	30 000 руб/т	-	-	0,02 т	0,6
Мелкодисперсный порошок оксида железа марки «КА»	5 000 руб/т	-	-	0,01 т	0,05
Контейнер временного хранения (200-л бочка)	800 руб/шт.	11 шт.	8,8	8 шт.	6,4
Итого стоимость материалов для изготовления 1-й 200-л бочки с цементной матрицей:					~1,5
Контейнер для захоронения (НЗК-150)	100 000 руб/шт	4 шт	400	2 шт	200
Контейнеризация	50 000 руб/шт	4 шт	200	2 шт	100
Временное (технологическое) хранение (1 год)	11 000 руб/м^3	11,3 м^3	124,3	7,48 м^3	83,28
Передача на захоронение (включая транспортировку к месту захоронения)	105 000 руб/м^3	11,3 м^3	1 186,5	7,48 м^3	824,7
		Итого:	2 104,7	Итого:	1 298,0

Анализ расчета затрат на реализацию новой технологии иммобилизации 1 м^3 органических ЖРО методом пропитки пористых цементных матриц по сравнению с затратами на их цементирование при предварительной адсорбции отходов на различных твердых материалах позволяет оценить экономический эффект:

– удельные затраты на материалы (цемент, добавки) снижаются примерно на 18 %;

– удельные затраты на контейнеры (200-л бочки, НЗК-150) снижаются примерно на 50 %;

– удельные затраты на контейнеризацию, временное (технологическое) хранение снижаются на 50 %;

– суммарные оцененные удельные затраты при реализации новой технологии иммобилизации снижаются на 37 %.

Реализация нового метода иммобилизации органических ЖРО методом пропитки цементной матрицы при сравнении с цементированием органических ЖРО при предварительной адсорбции отходов на различных твердых материалах позволяет получить положительный экономический эффект.

Важно заметить, что при реализации рассмотренных выше методов затраты на передачу РАО Национальному оператору составляют около 60 % от общих оцененных затрат.

При расчете затрат при реализации других методов переработки органических ЖРО, связанных с концентрированием радионуклидов (сжигание, пиролиз, очистка), следует учитывать, что тариф на захоронение для твердых САО с долгоживущими радионуклидами (класс 2) примерно в 6 раз больше, чем для твердых НАО с долгоживущими радионуклидами (класс 3). Например, после сжигания органических ЖРО объем золы может составлять до 0,01 от исходного объема ЖРО. В дальнейшем при кондиционировании золы и других вторичных РАО (фильтры газоочистки, дезактивационные стоки, загрязненное оборудование и т.д.) с целью захоронения конечный объем РАО, готовый к окончательной изоляции, может увеличиться в десятки раз. Учитывая дороговизну захоронения САО с долгоживущими радионуклидами и отсутствие достоверной информации о стоимости переработки органических ЖРО термическими методами, методами очистки и т.д., сравнить экономические показатели этих технологий по сравнению с технологией пропитки органическими ЖРО пористой цементной матрицы представляется затруднительным.

Технология иммобилизации органических ЖРО пропиткой пористых цементных матриц по сравнению с технологией цементирования, предварительно эмульгированных или адсорбированных ЖРО на твердых материалах, позволяет снизить коэффициент увеличения объема конечного продукта в 2-5 раз, значение которого составит 1,6-1,8.

Заключение

1. Разработана композиция для приготовления пористой цементной матрицы, обеспечивающей эффективную иммобилизацию органических ЖРО различного вида методом пропитки и характеризующейся пористостью около 70 % с однородными порами размером $(1\text{-}5)\cdot 10^{-5}$ м и прочностью, удовлетворяющей регламентированным требованиям к цементированным РАО: тонкомолотый цемент и портландцемент в соотношении 1:3, мелкодисперсный порошок оксида железа в количестве 1,5 % от массы, карбонат кальция – 3 % от массы, бентонитовый глинопорошок – 10 % от массы, 0,2-0,5 % водный раствор для приготовления пены при отношении В/В 0,5-0,6.

2. Обоснованы и определены эффективные параметры пропитки цементной матрицы: гидравлическое сопротивление цементной матрицы не более 0,5 МПа, степень пропитки 0,8-0,9, скорость пропитки от 0,2 см/мин до 0,9-9,9 см/мин в зависимости от вида органических ЖРО.

3. Определено, что эффективная степень пропитки при заданном качестве матрицы и отходов будет всегда достигаться при варьировании скорости и гидравлического сопротивления в определенных эффективных интервалах.

4. Определена полиномиальная зависимость эффективных параметров для оценки и прогнозирования технологии пропитки цементной матрицы органическими ЖРО различного вида.

5. Определена полиномиальная зависимость распределения радионуклидов ^{238}U и ^{137}Cs по высоте цементной матрицы при пропитке 200 л бочки.

6. Цементная матрица после пропитки характеризуется: прочностью на сжатие около 5,5 МПа; скоростью выщелачивания ^{238}U и ^{137}Cs $10^{-3}\text{-}10^{-4}$ г/(см$^2\cdot$сут); требуемой устойчивостью к перепадам температур и длительному пребыванию в воде. Свойства конечного продукта удовлетворяют требованиям, предъявляемым к цементным компаундам ГОСТ Р 51883-2002 и НП-019-2000.

7. Разработано и введено в эксплуатацию устройство для пропитки пористых цементных матриц в стандартной 200-л бочке, при испытаниях которого обоснованы технические решения эффективной технологии иммобилизации органических ЖРО методом пропитки пористой цементной матрицы.

8. Таким образом, в работе научно обоснованы технические решения для технологии, которая позволяет проводить эффективную иммобилизацию разного вида органических ЖРО методом пропитки пористой цементной матрицы, в том числе сложных для переработки, образующиеся на предприятиях в малом количестве, в которой обеспечивается высокое наполнение отходами конечного продукта, а также рационально сокращены число и продолжительность сложных радиационно опасных операций, что значительно повышает экономическую эффективность переработки, экологическую и радиационную безопасность обращения с РАО.

Список сокращений и условных обозначений

РАО	-	радиоактивные отходы
АЭС	-	атомные электрические станции
ЖРО	-	жидкие радиоактивные отходы
ТРО	-	твердые радиоактивные отходы
ОЯТ	-	отработавшее ядерное топливо
МЗУА	-	минимально значимая удельная активность
ЭДТА	-	этилендиаминтетраацетат
ОЦС	-	относительная центробежная сила
ТБФ	-	трибутилфосфат
ПАВ	-	поверхностно – активное вещество
САО	-	среднеактивные отходы
В/В	-	водовяжущее отношение
ТМЦ	-	тонкомолотый цемент

Список литературы

1. Агапов, А.М. Развитие системы обращения с РАО и ОЯТ в федеральном агентстве по атомной энергии в Российской Федерации [Текст] / А.М. Агапов / Сб. докл. выездного заседания секции №2.3 НТС–4 Федерального агентства по атомной энергии «Организация работ в отрасли по созданию оборудования радиохимических производств, изготовлению топлива и обращения с РАО по переработке ОЯТ». – Москва, 7–9 декабря 2004. – Екатеринбург, 2005. – С.3.

2. Российская Федерация. Законы. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Текст]: федер. закон: [принят Гос. Думой 29 июня 2011 г.: одобр. Советом Федерации 6 июля 2011 г.] – № 190–ФЗ от 11.07.11. гл. 4, ст. 24.

3. Российская Федерация. Законы. Об использовании атомной энергии [Текст]: федер. закон: [принят Гос. Думой 20 октября 1995 г.] – № 170–ФЗ от 21.11.95. ст. 47, 48.

4. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты [Текст] / Издание 2007 года. Международное агентство по атомной энергии, Вена, 2008. – С.141.

5. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности [Текст]. НП-019-2000: утв. постановлением Госатомнадзора России от 27.09.2000 № 7: ввод в действие с 01.01.2001 – М: Госатомнадзор России, 2000. – С.5.

6. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов. Требования безопасности [Текст]. НП-020-2000: утв. постановлением Госатомнадзора России от 27.09.2000 № 8: ввод в действие с 01.01.2001 – М: Госатомнадзор России, 2000. – С.5.

7. Варлаков, А.П. Исследование методов цементирования органических жидких радиоактивных отходов [Текст] / А.П. Варлаков, А.В. Германов // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 10. – С.42-48.

8. Пат. 2317605 Российская Федерация, МПК G21F9/16. Способ цементирования жидких радиоактивных отходов, содержащих минеральные масло и/или органические жидкости, и устройство для его осуществления [Текст] / Варлаков А.П., Невров Ю.В., Горбунова О.А., Дмитриев С.А., Баринов А.С.; заявитель и патентообладатель ГУП МосНПО «Радон» (RU). – № 2006123654/06; заявл. 04.07.2006; опубл. 20.02.2008, Бюл. № 5. – 10 с.: ил.

9. Greenhalgh, W.O. Immobilisation of Organic Liquid Wastes [Текст] / W.O. Greenhalgh // Hanford Engineering Development Lab. Richland, Rep. HEDL-SA-3377-FA, WA. – 1985. – P.7.

10. Новый материал для отверждения жидких радиоактивных отходов [Текст] / С.В. Орлов, Ю.М. Куляко, Б.Ф. Мясоедов и др. / Пятая Российская конференция по радиохимии. Радиохимия-2006: Тезисы докладов. Дубна, 23-27 октября, 2006г. – Озерск: ФГУП «ПО «Маяк», 2006. – С.268.

11. Пат. 2317605 Российская Федерация, МПК G21F9/04, G21F9/16, C04B38/00. Керамическая губка для концентрирования и отверждения жидких особоопасных отходов и способ ее получения [Текст] / Аншиц А.Г., Верещагина Т.А., Павлов В.Ф., Шаронова О.М.; заявитель и патентообладатель Аншиц Александр Георгиевич (RU). – № 99109609/06; заявл. 28.04.1999; опубл. 10.04.2001.

12. Пат. 2197763 Российская Федерация, МПК G21F9/16. Способ отверждения жидких радиоактивных отходов и керамический материал для его осуществления [Текст] / Орлов С.В., Куляко Ю.М., Мясоедов Б.Ф., Коломина М.В., Андрианов Н.Т.; заявитель и патентообладатель Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (RU). – № 2001130111/06; заявл. 08.11.2001; опубл. 27.01.2003. – 6 с.: ил.

13. Пикаев, А.К. Иммобилизация радиоактивных отходов в неорганических матрицах [Текст] / А.К. Пикаев, А.А. Минаев // Журнал неорганической химии. – М. – 2002. – Т. 47. – № 4. – С.617-624.

14. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности [Текст]. ОСПОРБ 99/2010: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 № 40: ввод в действие с 17.09.2010. – М.: Фе-

деральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.

15. Нормы радиационной безопасности [Текст]. НРБ-99/2009: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47: ввод в действие с 01.09.2009. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.

16. Classification of Radioactive Waste [Текст] / Safety Series 111–G–1.1/F. Publication within the RADWASS Programme (IAEA). Vienna. 1992. – Vienna, 1992. – 52 p.

17. Nitison, R.D. Radioactive Waste Definition, Standards, Criteria and Approaches in USA/US/USSR [Текст] / R.D. Nitison, C.W. Forsberg // Fact Finding Discussion on Environmental Restoration and Waste Management. Moscow, 1990. – Moscow, 1990.

18. Шищиц, И.Ю. Прагматическая классификация радиоактивных отходов [Текст] / И.Ю. Шищиц, Д.Д. Протопопов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов: Обзор. информ. – ВИНИТИ. – 1996. – № 1. – С.49-66.

19. Никифоров, А.С. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов [Текст] / А.С. Никифоров, В.В. Куличенко, М.И. Жихарев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 184 с.

20. Панкина, Е.Б. Обеспечение экологической безопасности и оптимизация процессов обращения с радиоактивными отходами транспортных ядерных энергетических установок: автореф. дис. … канд. техн. наук: 03.00.16 / Панкина Елена Борисовна. – СПб., 2004. – 16 с.

21. Отчет Межведомственного научного совета по радиохимии при президиуме РАН и Государственной Корпорации по атомной энергии (Росатом) за 2007 г. – Москва, 2008. – 86 с.

22. Исследование химического состава и физико-химических свойств концентратов и осадков в хранилищах ЖРО ГНЦ РФ – ФЭИ [Текст] / Н.П. Ермолаев, Л.С. Матвейчук, О.В. Старков и др. / Тез. докл. 4-ой междунар. науч.-технич. конф. «Обращение с радиоактивными отходами». – Москва, ГП ВНИИАЭС, 26-28 июня 2001 г. – М., 2001. – С.41.

23. Оценка возможности очистки концентратов ФЭИ [Текст] / Е.В. Захарова, Н.И. Родыгина, С.И. Ушаков и др. / Тез. докл. 4-ой междунар. науч.-технич. конф. «Обращение с радиоактивными отходами». – Москва, ГП ВНИИАЭС, 26-28 июня 2001 г. – М., 2001. – С.42.

24. Выбор и обоснование технических предложений по технологии и установке переработки содержимого емкости хранения Б-02/6 ХЖО РУ БН-350: отчет о НИР / Варлаков А.П. – Москва: ЗАО «Альянс–Гамма», 2006.

25. Разработка технологии цементирования горючих ЖРО с предварительным суспензированием смеси солевых ЖРО, горючих ЖРО и сыпучих комплексных добавок: отчет о НИР по теме 2.03.01.07 (промеж.) / ГУП МосНПО «Радон»; рук. Баринов А.С.; исполн.: Варлаков А.П., Горбунова О.А., Невров Ю.В., Брюхов А.А. – Сергиев Посад, 2007. – 44 с. – Инв. № 867.

26. Федеральная целевая программа «Обращение с радиоактивными отходами и отработавшими ядерными материалами, их утилизация и захоронение на 1996–2005 годы»: утверждена Постановлением Правительства РФ, № 1030 от 23.10.95.

27. Соболев И.А. Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах / И. А. Соболев, Л. М. Хомчик. – М.:Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.: ил.

28. Бломк, Д. Обращение с радиоактивными отходами [Текст] / Д. Бломк // Безопасность ядерной энергетики. – М. – 1980. – С.97-106.

29. Шульга, Н. А. Обращение с различными типами радиоактивных отходов: обзор [Текст] /Н.А. Шульга // Атомная техника за рубежом. – 2002. – № 8. – С.3-10.

30. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами [Текст]. СПОРО–2002: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 23.10.2002 № 33: ввод. в действие с 01.01.2003. – СПб.: ДЕАН, 2003. – 64 с.

31. Dirks, F. Incineration of Radioactive Waste [Текст] / F. Dirks, W. Hempelmann / Rep. CEC-EUR-9621. (Proc. CEC Sem. Arnhem, 1984), The Incinera-

tion Plant of the Karlsruhe Nuc. Resea. Cent., Graham and Trotman, London, 34-47 (1985).

32. Фукс, И.Г. Химмотология в нефтегазовом деле. Химия смазочных масел (состав, получение, применение). Учебное пособие [Текст] / И.Г Фукс, В.Г. Спиркин, Т.Н. Шабалина. – М: – ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ Нефти и газа имени И. М. Губкина, 2004 – 280 с.

33. Евдокимов, А.Ю. Экологические проблемы утилизации отработанных смазочных материалов: автореф. дис. … д-р техн. наук: 11.00.11 / Евдокимов Александр Юрьевич. – М., 1997. – 20 с.

34. Luycx, P. Pebble bed pyrolysis for the processing of alpha contaminated organic effluents [Текст] / P. Luycx, J. Deckers / WM’99, Conference «HLW, LLW, Mixed Wastes and Environmental Restoration – Working Towards a Cleaner Environment», Feb. 28-Mar. 4 1999, Tucson, Arizona, CD-ROM Proceedings, 37-3.

35. Aly, H.F. Wet-oxidation of spent organic waste tributylphosphate diluents [Текст] / H.F. Aly // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Volume 249, Number 3, Sep. 2001, P.643-647.

36. Steele, D.F. A novel approach to organic waste disposal [Текст] / D.F. Steele // Atom 393, July 1989, P.393-396.

37. Wieczorek, H. Development and active demonstration of acid digestion of plutonium-bearing waste [Текст] / H. Wieczorek / Oser - Spectrum '86 (Proc. ANS Conf. Niagara Falls, 1986), American Nuclear Society, Hinsdale, IL, 1986, P.49-55.

38. Drobnik, S. Rep. AED-Conf-78-274-000, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematic GmbH, Eggenstein-Leopoldshafen, 1978, P.6-9.

39. Dellamano, J.C. Distillation as a pre-treatment process of waste scintillation solutions [Текст] / J.C. Dellamano / Radioactive Waste Management 2, BNES, London, 1989, P.1-7.

40. Пат. 2305335 Российская Федерация, МПК G21F9/00, G21F9/20. Способ очистки сточных вод от радиоактивных компонентов и масла [Текст] / Сыченко В.М., Харушкин В.Л., Плешков И.М., Коновалов П.В., Мочалов А.П., Смирнов А.Л., Рычков В.Н., Зонов А.Л.; заявитель и патентообладатель Федеральное госу-

дарственное унитарное предприятие «Комбинат «Электрохимприбор» (RU). – № 2005140826/06; заявл. 26.12.2005; опубл. 27.08.2007.

41. Pat. 5875406 United States, Int. CI. G21F9/00. Metod for reducing radioactive waste, particularly oils and solvents [Текст] / Weber Adolphe (FR); applicant Bernatom S.A.R.L., Rouhling (FR). – Pub. № US 860873; publication date 18.07.1996; date of patent 23.02.1999.

42. Лобачева, Н.А. Эколого-экономическая оценка деятельности предприятия по обезвреживанию радиоактивных отходов: автореф. дис. … канд. экон. наук: 08.00.05 / Лобачева Наталья Анатольевна. – М., 2005. – 25 с.

43. Захарова, К.П. Связующее для локализации отходов низкой и средней активности [Текст] / К.П. Захарова, О.И. Волкова, А.А. Орлова // Атомная энергия. – 1980. – Т. 49. - № 4. – С.258-259.

44. Технологические основы системы управления радиоактивными отходами [Текст] / С.А. Дмитриев, А.С. Баринов, О.Г. Батюхнова и др. – М.: ГУП МосНПО «Радон», 2007. – 376 с.: ил.

45. Использование вихревого смесителя при цементировании горючих жидких радиоактивных отходов [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.) по теме 2.06.01.05. «Разработка комплексной технологии цементирования радиоактивных маслосодержащих отходов» / Баринов А.С., Варлаков А.П., Горбунова О.А. – Сергиев Посад: ГУП МосНПО «Радон», 2005. – Инв. № 694.

46. Булгаков, ИС. Применение эмульгаторов при цементировании радиоактивных масел [Текст]: дипломн. раб. / И.С. Булгаков; научн. руководитель Э.П. Магомедбеков, А.П. Варлаков, РХТУ им. Менделеева. – М., 2008. – 99 с.

47. Lin, M. Tests of Absorbents and Solidification Techniques for Oil Wastes [Текст] / M. Lin, D.R. Mackenzie – rep. BNL-NUREG-51589, Brookhaven National Lab, Upton, NY, 1983.

48. Пат. 2312415 Российская Федерация, МПК G21F9/16, G21F9/20. Способ иммобилизации жидких радиоактивных отходов, содержащих воду и нефтепродукты [Текст] / Булыгин В.К., Колосенцев С.Д., Персинен А.А., Сдержиков Ю.А., Степанов Е.А., Годнев А.А., Стружка Ю.Н.; заявитель и патентообладатель

ЗАО «ЭКОАТОМ» (RU). – № 2006142550/06; заявл. 30.11.2006; опубл. 10.12.2007, Бюл. № 34.: ил.

49. Алешина, А.В. Иммобилизация масляных тритийсодержащих отходов [Текст] / А.В. Алешина, А.Б. Сазонов, Э.П. Магомедбеков / Третья Российская школа по радиохимии и ядерным технологиям: Тезисы стендовых докладов. – Озерск, 8-12 сентября 2008 г. – Озерск: РИЦ ВРБ ФГУП «ПО «Маяк», 2008. – С.58-60.

50. Авторское свидетельство SU 1526488 A1, G21F9/16. Способ переработки жидких маслосодержащих радиоактивных отходов [Текст] / Пантелеев В.И., Тимофеев Е.М., Флит В.Ю., Черкесова И.Н.; заявитель МосНПО «Радон» (SU); заявл. 03.02.88.

51. Козлов, П.В. Цементирование отработанных радиоактивно загрязненных масел [Текст] / П.В. Козлов, О.М. Слюнчев // Вопросы радиационной безопасности. – № 2. – 2010. – С.38-48.

52. ГОСТ Р 51883 – 2002. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования [Текст]. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2002.

53. Михальченко, А.Г. Полимерные матрицы, перспективные для иммобилизации тритиевых радиоактивных отходов [Текст] / А.Г. Михальченко, В.А. Старченко // Радиохимия. – 2012. – Т. 54. – № 4. – С.279-383.

54. Разработка технологии захоронения отработанных масел, содержащих радионуклиды [Текст] / В.В. Лазарчук, А.С. Козырев, А.С. Рябов и др. / Пятая Российская конференция по радиохимии. Радиохимия-2006: Тезисы докладов. Дубна, 23-27 октября, 2006 г. – Озерск: ФГУП «ПО «Маяк», 2006. – С.354.

55. Шестоперов, С.В. Технология бетона [Текст] / С.В. Шестоперов. – М., Высш. Школа, 1977. – 432 с.

56. Сулименко, Л.М. Технология минеральных вяжущих материалов и изделий на их основе: Учебник для вузов / Л.М. Сулименко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 334с.

57. Природные сорбенты [Текст] / Сб. статей Акад. Наук СССР. –

М.: «Наука», 1967. – 232 с.

58. Воропанова, Л.А. Применение бентонитовой глины для решения ряда экологических проблем [Текст] / Л.А. Воропанова, С.Г. Рубановская, О.Г. Лисицина / Труды Сев.-Кавказского госуд. технологического университета. – 1997. – № 3. – С.141-147.

59. Nuclear Technology, 1999, V. 125, № 3, P. 332.

60. Janotka, I. Материалы для защиты окружающей среды на основе бентонита [Текст] / I. Janotka, J. Frankovska, R. Baslik, V. Stresko // Geol. Carpath. – 1996. – Clays. Ser. 1, № 1-2. – С.43-48.

61. Влияние добавки глины на свойства цементных компаундов, используемых для локализации радиоактивных отходов [Текст] / Т.А. Быховская, К.П. Захарова, Т.Т. Карпова и др. // Атомная энергия. – 1995. – Т. 79. – № 1. – С.23-26.

62. Оценка цементированных радиоактивных отходов при длительном испытании в хранилище курганного типа [Текст] / Г.А. Варлакова, З.И. Голубева, А.С. Баринов А.С. и др. // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107. – № 1. – С.26-28.

63. Горбунова, О.А. Цементирование твердых радиоактивных отходов методом пропитки высокопроникающими растворами: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.17.02 / Горбунова Ольга Анатольевна. – ГУП МосНПО «Радон», 2004. – 23 с.

64. Сватовская, Л.Б. Процессы связывания жидких нефтеразливов при твердении пористых материалов на цементной основе [Текст] / Л.Б. Сватовская, Е.Н. Макарова, Е.В. Бенза / Сб. науч. стат. – СПб.: ПГУПС, 2006. – Вып. 6. – С.35–37.

65. Оганесян, А.С. Установление параметров технологии инъекционного упрочнения породных массивов тонкодисперсными цементами: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.15.02 / Оганесян Армине Сейрановна. – М., 1995. – 19 с.

66. Николаев, С.В. Ультразвуковой контроль процесса пропитки пористых материалов гидрофобизирующим раствором: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.02.11 / Николаев Сергей Викторович. – СПб., 2003. – 23 с.: ил.

67. Морозов, С.Б. Оценка влияния пористости на контактирование шероховатых поверхностей, совершенствование пропитки пористых деталей маслом и создание устойчивой зоны контакта рельсовых соединителей: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.02.04 / Морозов Самуил Беркович. – М., 1995. – С.5.

68. Пропитка бетона полимеризационными смолами: первое применение в промышленности [Текст] / ВЦП. – NA – 89430. – 21 с., ил.

69. Whitihg D. Распределение пор по размерам в цементном камне, пропитанном эпоксидной смолой [Текст] / D. Whitihg, D.E. Klin // ВЦП. – NA – 66744. – 16 с.

70. Предел прочности при сжатии бетона, пропитанного эпоксидными системами, не содержащими отверждающего вещества [Текст] / КазНИИТИ. – № 216. – 21 с.: ил.

71. Руководство по применению бетонов, пропитанных жидким стеклом, в нефтегазопромысловом строительстве [Текст] / Г.В. Тописльский, В.Н. Пантилеенко, В.В. Царев, А.Т. Мяндин. – М., 1981. – 25 с., ил.

72. Касимов, И.К. Пропитка цементного камня органическими вяжущими [Текст] / И.К. Касимов, Е.Д. Федотов. – Л., Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. – 168 с., ил.

73. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества технология и свойства: Учебник для вузов [Текст] / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. – 3-е изд., пере раб. и доп. – М.: Стройиздат, 1979. – 476 с.

74. Воробьев, В.А. Строительные материалы [Текст] / В.А. Воробьев, А.Г. Комар. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1976. – 480 с.

75. Технология изделий и силикатных бетонов [Текст] / Под ред. д-ра техн. наук проф. А.В. Саталкина. – М.: Стройиздат, 1972. – 344 с.

76. Портик, А.А. Все о пенобетоне [Текст] / А.А. Портик. – СПб.: 2003. – 224 с.

77. ГОСТ 25485-89. Бетоны ячеистые. Технические условия [Текст]. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 2001.

78. Емельянов, А.И. Разработка составов сухих смесей и технологии полу-

чения на их основе неавтоклавных пенобетонов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.05 / Емельянов Алексей Иванович. – Пенза, 2005. – 16 с.

79. Пенобетон (состав, свойства, применение) [Текст] / А.А. Прошин, В.А. Береговой, А.А. Краснощеков, А.М. Береговой. – Пенза, 2003.

80. Меркин, А.П. Формирование макроструктуры ячеистых бетонов [Текст] / А.П. Меркин, А.П. Филин, Д.Г. Земцов // Строительные материалы. – 1963. – № 12. С.16-17.

81. Величко Е.Г. Рецептурно-технологические проблемы пенобетона [Текст] / Е.Г. Величко, А.Г. Комар // Строительные материалы. – 2004. – № 3. – С.26-29.

82. Теплоизоляционный ячеистый бетон [Текст] / В.Н. Гончарах, И.А. Белов, Н.П. Богданова, Г.С. Гарнашевич // Строительные материалы. – 2004. – № 3. – С.24-25.

83. Брюшков, А.А. Газо- и пенобетоны [Текст] / А.А. Брюшков. – ОНТИ. – 1930.

84. Романенков, И.Г. Физико-механические свойства вспененных пластмасс [Текст] / И.Г. Романенков. – М.: Изд-во Гос. Ком. Станд. при СМ СССР, 1970. – 32 с.

85. Чернышев, Е.М. VI Академические чтения РААСН «Современные проблемы строительного материаловедения» [Текст] / Е.М. Чернышов, Г.С. Славчева, Е.И. Дьяченко. – Иваново, 2000. – С.585-595.

86. Горлов, Ю.П. Лабораторный практикум по технологии теплоизоляционных материалов: Учебное пособие для строит. Спец. вузов [Текст] / Ю.П. Горлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. Школа, 1982. – 239 с.

87. Горяйнов, К.Э. Технология теплоизоляционных материалов и изделий [Текст] / К.Э. Горяйнов, С.К. Горяйнова. – М.: Стройиздат, 1982. – 376 с.

88. Мартыненко, В.А. Запорожский ячеистый бетон [Текст] / В.А. Мартыненко, А.Н. Ворона. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 95 с.

89. Мартыненко, В.А. Влияние характеристик межпоровой перегородки на физико-технические свойства ячеистого бетона [Текст] / В.А. Мартыненко //

Строительные материалы и изделия. – 2003. – № 4. – С.35-37.

90. Горлов, Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов [Текст] / Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, А.А. Устенко. – М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.

91. Ячеистые бетоны: Технология, свойства и конструкции [Текст] / М.Я. Кривицкий, Н.И. Левин, В.В. Макаричев. – М.: Стройиздат, 1972. – 136 с.

92. Хейфец, Л.И. Многофазные процессы в пористых средах [Текст] / Л.И. Хейфец, А.В. Неймарк. – М.: Химия, 1982, – 320 с., ил.

93. Шахова, Л.Д. Технология пенобетона. Теория и практика: монография [Текст] / Л.Д. Шахова. – Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2010. – 248 с.

94. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. – М.: Высш. шк., 1989. – 384 с.

95. Пат. 2247097 Российская Федерация, МПК С04В38/10. Сырьевая смесь и способ приготовления пенобетона [Текст] / Косых А.В., Лохова Н.А., Лужнова Е.В., Ли-ми-лун Л.Н.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Братский государственный технический университет» (RU). – № 2003119815/03; заявл. 30.06.2003; опубл. 27.02.2005, Бюл. № 6. – 5 с.: ил.

96. Пат. 2001131576 Российская Федерация, МПК С04В38/10. Способ получения пенобетона с использованием белкового пенообразователя [Текст] / Винаров А.Ю., Соколов Д.П., Шитиков Е.С., Бурмистров Б.В.; заявитель и патентообладатель Винаров Александр Юрьевич (RU). – № 2001131576/03; заявл. 23.11.2001; опубл. 10.04.2002.

97. Пат. 2245866 Российская Федерация, МПК С04В38/10. Пенобетон [Текст] / Удачкин И.Б., Глушков А.М., Удачкин В.И., Смирнов В.М., Галкин С.Д; заявитель и патентообладатель Удачкин Игорь Борисович, Глушков Александр Макарович, Удачкин Вячеслав Игоревич, Смирнов Виктор Макарович, Галкин Сергей Дмитриевич (RU). – № 2003119641/03; заявл. 03.07.2003; опубл. 10.02.2005.

98. Пат. 2263575 Российская Федерация, МПК В28С5/38. Устройство для получения пенобетона аэрированием [Текст] / Акаев А.А.; заявитель и патентооб-

ладатель Акаев Абакар Ахмедпашаевич (RU). – № 2003127176/03; заявл. 08.09.2003; опубл. 10.11.2005.

99. Пат. 2003131104 Российская Федерация, МПК B28C5/38. Способ приготовления пенобетона и устройство для его осуществления [Текст] / Комаров Г.Ф., Абложей Л.И., Рахимбердин М.Н.; заявитель и патентообладатель Комаров Георгий Федорович, Абложей Леонид Иосифович, Рахимбердин Мансур Нагимович (RU). – № 2003131104/03; заявл. 23.10.2003; опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12.: ил.

100. Мурадов, Э.Г. Материалы для приготовления бетонной смеси и строительного раствора: Учебное пособие для СПТУ [Текст] /Э.Г. Мурадов. – М.: Высш. шк., 1987, 58 с.

101. Бабков, В.В. Механизм упрочнения цементных связок при использовании тонкодисперсных наполнителей [Текст] / В.В. Бабков, Комохов П.Г., Капитонов С.М. и др. // Цемент. – 1991. – № 9-10. – С.34-41.

102. Коломацкий, С.А. Теплоизоляционный пенобетон на высокодисперсных цементах: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.05 / Коломацкий Сергей Александрович. – Белгород, 2001. – 16 с.: ил.

103. Из сборника научных трудов «Инженерно-химические проблемы пеноматериалов третьего тысячелетия» [Текст] – СПб, 1999. – С.62-63.

104. Бутт, Ю.М. Вяжущие вещества с поверхностно-активными добавками [Текст] / Ю.М. Бутт, Т.М. Беркович, под ред. П.А. Ребиндера. – М.: Промстройиздат, 1953. – 248 с.

105. Лурье, Ю.С. Портландцемент [Текст] / Ю.С. Лурье. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Госстройиздат, 1963. – 397 с.: ил.

106. Ратинов, В.Б Добавки в бетон [Текст] / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1973. – 207 с.

107. Ахвердов, Н.Н. Основы физики бетона [Текст] / Н.Н. Ахвердов. – М.:Стройиздат,1981. – 461 с.

108. Веревкин, О.А. Наполненные пенобетоны и ограждающие конструкции с их применением: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.05 / Веревкин Олег

Александрович. – Самара, 2000. – 19 с.

109. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов [Текст] /Ю.И. Дытнерский. – Изд. 2-е. В 2-х кн. Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М.: Химия, 1995. – 400 с.: ил.

110. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 830 с.

111. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию [Текст] / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. – 2-е изд., перераб. и дополн. – М.: Химия, 1991. – 17 с.

112. Проницаемые пористые материалы в промышленности [Текст] / В.А. Будаев, Н.В. Велин, Ю.А. Кульков, Н.Н. Павлов. – Самара, 1996. – 160 с.

113. Гидравлическое сопротивление капиллярно-пористых структур (анализ и обобщение данных) [Текст] / Н.М. Матюхин, А.Г. Портяной, А.П. Сорокин, П.А. Титов. – ФЭИ-2528, Обнинск, 1996. – С.39.

114. Математические модели процессов коррозии бетона [Текст] / Б.В. Гусев, А.С. Файвусович, В.Ф. Степенова, Н.К. Розенталь. – Информационно-издательский центр «ТИМР», 1996. – 22 с.

115. Гидрофобизация [Текст] / А.А. Пащенко, М.Г. Воронков, Л.А. Михайленко и др. – Киев: Наукова думка, 1973. – 240 с.

116. Салихов, М.Г. Разработка научно-практических основ объемной пропитки малопрочных каменных материалов жидкими вяжущими для дорожного строительства: автореф. дис. … д-р техн. наук: 05.23.11, 05.23.05 / Салихов Мухаммет Габдулхаевич. – М., 1999. – 37 с.

117. Шалгунов, С.И. Исследование физико-химических основ процесса пропитки стекловолокнистых наполнителей полимерными связующими: автореф. дис. … канд. хим. наук: 01.04.19 /Шалгунов Сергей Иосифович. – М., 1995. – 22 с.

118. Большой энциклопедический словарь. Химия [Текст] / 2-е изд. «Химического энциклопедического словаря». – Научн. изд-во «Большая Российская энциклопедия». – М., 1998. – С.589-590.

119. ТУ 2322-166-05011907-98. Пигмент железоокисный красный [Текст].

120. ГОСТ 22551 – 77. Песок кварцевый, молотые песчаник, кварцит и жильный кварц для стекольной промышленности. Технические условия [Текст]. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1977.

121. ТУ 2481-019-40245042-01. Вещество поверхностно-активное «Пентапав-430» (марок А, Б, В) [Текст].

122. ТУ 2164-001-97176409-2007. Глинопорошки для буровых растворов. Технические условия [Текст].

123. ГОСТ 12730.4-78. Бетоны. Методы определения показателей пористости [Текст]. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1977.

124. ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности [Текст]. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1978.

125. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-химических испытаний [Текст]. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1997.

126. ГОСТ 25485-89. Бетоны ячеистые. Технические условия [Текст]. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1989.

127. ГОСТ 12.1.044-89. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения [Текст]. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1989.

128. МВИ-54-00. Цемент. Определение удельной поверхности порошков методом воздухопроницаемости [Текст]. – Аналитическая лаборатория ГУП МосНПО «Радон».

129. МВИ-24-02. Цементный раствор. Определение плотности цементного раствора. Расчет Р/Ц и В/Ц соотношения в процессе цементирования ЖРО [Текст]. – Аналитическая лаборатория ГУП МосНПО «Радон».

130. Паспорт на вискозиметр марки ВСН-3 [Текст].

131. МВИ-18-02. Цементные компаунды на основе РАО. Определение предела прочности на разрывной машине марки ИР-5047-50С [Текст]. – Аналитиче-

ская лаборатория ГУП МосНПО «Радон».

132. МПИ-04-07. Методика проведения испытаний. Определение морозостойкости цементных компаундов, содержащих РАО, в климатической камере МК-53 [Текст]. – Аналитическая лаборатория ГУП МосНПО «Радон».

133. МПИ-01-01. Методика проведения испытаний. Цементные компаунды. Определение устойчивости к длительному пребыванию в воде [Текст]. – Аналитическая лаборатория ГУП МосНПО «Радон».

134. ГОСТ 52126-2003. Отходы радиоактивные. Определение химической устойчивости отвержденных высокоактивных отходов методом длительного выщелачивания [Текст]. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2003.

135. МВИ-90-01. Подготовка водных проб к измерению суммарного бета-излучения и гаммаспектрометрии [Текст]. – Аналитическая лаборатория ГУП МосНПО «Радон».

136. МВИ-53-09. Определение активности гамма – излучающих радионуклидов в счетных образцах на гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «LSRM» [Текст]. – Аналитическая лаборатория ГУП МосНПО «Радон».

137. Технологический регламент ТП Рад Х-12.03/2008. Цементирование радиоактивных отходов. Миниблочная растворосмесительная установка [Текст]. – ГУП МосНПО «Радон», утв.16.12.2008 г., инв. № 818, с изменениями от 02.09.2010 г.

138. МИ-161-10. Определение удельной суммарной активности гамма-излучающих радионуклидов в упаковках с радиоактивными отходами на установке гамма-спектрометра мобильного ISOCS [Текст]. Сертификат об утверждении типов средств измерений, выданный Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии, № Y.S.S. 38.001.A № 19791.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Технологическая документация на модуль пропитки

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ГУП МосНПО "Радон"

_____ С.А. Дмитриев

"2" _____ 2008 г.

Техническое задание

на опытно-конструкторскую работу

«Разработка и изготовление модуля кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере»

Регистрационный номер ТЗ на ОКР ТЗ НИОКР-392-09

2008 г.

ГУП МосНПО «Радон»

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
директора ГУП МосНПО «Радон» -
Технический директор
_____ А.С. Баринов
«___» _____ 2009 г.

Модуль кондиционирования ЖРО
методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере

Пояснительная записка

02.0259.00.00.00.00 ПЗ

СОГЛАСОВАНО

Главный технолог
ГУП МосНПО "Радон"
_____ А.С. Волков
«___» _____ 2009 г.

Директор ЦМСиС ЭТД
_____ Н.М. Кузнецова
«___» _____ 2009 г.

Первый зам. директора НПК –
Директор ОЗГРТ
_____ А.П. Кобелев
«___» _____ 2009 г.

Начальник СРБ НПК
_____ А.Э. Шуркус
«___» _____ 2009 г.

2009 г.

Подп. и дата | Инв.№ дубл. | Взам. инв.№ | Подп. и дата | Инв.№ подл

Титульный лист ГОСТ 2.105-95

Формат А4

ГУП МосНПО «Радон»

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
директора ГУП МосНПО «Радон» -
Технический директор
_____ А.С. Баринов
«___» _____ 2009 г.

Модуль кондиционирования ЖРО
методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере

Программа и методика испытаний

02.0259.00.00.00.00 ПМ

СОГЛАСОВАНО

Главный технолог
ГУП МосНПО "Радон"
_____ А.С. Волков
«___» _____ 2009 г.

Директор ЦМСиС ЭТД
_____ Н.М. Кузнецова
«2» _____ 2009 г.

Первый зам. директора НПК –
Директор ОЗИРТ
_____ А.П. Кобелев
«___» _____ 2009 г.

Начальник СРБ НПК
_____ А.Э. Шуркус
«___» _____ 2009 г.

2009 г.

Подп. и дата | Инв.№ дубл. | Взам. инв.№ | Подп. и дата | Инв.№ подл

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер ОЗПРТ
_____ Ю.В. Мышкин
«30» июля 2009 г.

АКТ № ____

от «29» июля 2009 г.

об окончании монтажных работ модуля кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере

составлен комиссией в составе:

председатель:	главный технолог ОЗПРТ	В.Ю. Флит
члены комиссии:	главный энергетик ОЗПРТ	Ю.А. Васильев
	начальник цеха № 21	Ю.Н. Тарасов
	начальник цеха № 23	А.П. Варлаков
	начальник отделения цеха № 23	А.В. Германов

Настоящим актом подтверждается, модуль смонтирован в соответствии с техническим заданием ТЗ НИОКР 392-09, схемой функциональной 02.0259.00.00.00.00 ПЗ (приложение А), схемой электрической принципиальной 02.0259.00.00.00.00 ПЗ (приложение Б).

Заключение комиссии: на установке разрешается проводить испытания согласно СТП Рад.11- 01.

Председатель комиссии 29.07.2009 г. В.Ю. Флит

Члены комиссии:

29.07.2009. Ю.А. Васильев

29.07.2009. Ю.Н.Тарасов

29.07.2009. А.П. Варлаков

29.07.2009г. А.В. Германов

С-П.Ф.ГУП Мос НПО «Радон»
Тел.254-6-22-38,ЭТЛ 41-45
Лицензия №
Выдана
Действительна: до «____»_____200_г.

Форма по ГОСТ Р 50571.16.99
Заказчик: ОЗПРТ
Объект: Сооружение №30
Дата проведения измерений «5» 08 2009г

ПРОТОКОЛ № 38/1

Проверки наличия цепи между заземленными установками и элементами заземленной установки

Климатические условия при проведении измерений.

Температура воздуха 21. Влажность воздуха 60. Атмосферное давление 748 мм.рт.ст.

Цель измерений (испытаний)

эксплуатационные

(приемо-сдаточные, сличительные, контрольные испытания, эксплуатационные, для целей сертификации)

Нормативные и технические документы, на соответствие требованиям которых проведены измерения (испытания): ПУЭ, ПТЭЭП.

1.Результаты измерений:

№	Месторасположение и наименование электрооборудования	Кол-во проверенных контактов	R перех. измерен. Ом
1	2	3	4
	Миниблочная ут-ка цементирования		ч. 23
1	Дозатор цемента	1	0.05
2	Смеситель	1	0.05
3	Перестальтический насос	1	0.05
4	Пульт управления	1	0.05
5	Погружной насос	1	0.05
6	Насос плунжерный	1	0.05

Проверена целостность проводников заземления и зануления, стабилизация разъемных контактных соединений по II классу в соответствии с ГОСТ 10434 визуальным осмотром, надежность сварных соединений – ударом молотка.

2 Измерения проведены приборами:

№	Тип	Заводской номер	Метрологические. характеристики		Дата проверки		№ аттестата (свиде-тельства)	Орган Гос. метролог. службы, проводивш ий проверку
			Диапазон измерения	Класс точности	Послед.	Очеред.		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	MIC-3	345514	0-199.9 Ом	2%	6.08	6.09		

Выводы: переходное сопротивление в контактах заземляющих проводников сост. не более 0,05.

Заключение: : состояние металлосвязь эл. двигателей и аппаратов удовлетворительное

Испытания провели: *эл.монтер* (должность) (подпись) *Кожин С.Н.* (ф.и.о.)

(должность) (подпись) (ф.и.о.)

Протоколы проверил: *нач. ЭТО ц.№21* (должность) (подпись) *Юдин А.А.* (ф.и.о.)

Протокол приемочных испытаний

модуля кондиционирования ЖРО методом пропитки

пористых бетонных матриц в контейнере

от «7» августа 2009 г.

На испытания предъявлен модуль кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере, состоящий из дозирующего насоса, установленного в поддоне и соединенного с трубопроводом всасывания ЖРО и трубопроводом подачи ЖРО, а также механического фильтра, установленного на трубопроводе всасывания ЖРО, и манометра, установленного на патрубке нагнетательной линии дозирующего насоса.

Комиссия в составе:

председатель комиссии	главный технолог ОЗПРТ	В.Ю. Флит
и члены комиссии:	ведущий инженер ОРБ-1	Ж.В. Потапова
	начальник цеха 23	А.П. Варлаков
	начальник отделения цеха 23	А.А. Брюхов
	начальник отделения цеха 23	А.В. Германов

провела испытания модуля кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере.

В результате испытания комиссия установила следующее:

Раздел 1. Результаты проверки соответствия состава и комплектности изделия технической документации.

1.1. Рассмотрению комиссии был предоставлен комплект документации:

- техническое задание ТЗ НИОКР 392-09;
- пояснительная записка 02.0259.00.00.00.00 ПЗ;
- программа и методика испытаний 02.0259.00.00.00.00 ПМ;
- акт об окончании монтажных работ от 29.07.2009 г.

Проверка соответствия состава и комплектности модуля рабочей документации производилась на основании осмотра и измерений.

1.2. Проверкой установлено, что состав и комплектность изделия соответствуют предоставленной технической документации.

Раздел 2. Данные и результаты испытаний.

2.1. В соответствии с программой и методикой испытаний модуля в два этапа:

- построение номограммы для настоящих условий эксплуатации дозирующего насоса;
- испытание модуля на работоспособность при кондиционировании ЖРО в контейнере с пористой бетонной матрицей.

2.2. Результаты испытаний показали, что модуль работоспособен.

Раздел 3. Данные и результаты проверки работоспособности узла.

3.1. Количественные и качественные данные и результаты проверки технологического процесса сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

№ п.п.	Наименование показателей	Единица измерения	Значение показателей	
			по проекту (рабочее)	по результатам замеров
1.	Производительность модуля (объем ЖРО за 1 час работы)	$дм^3/ч$	15	15,5
2.	Рабочее давление во время работы модуля	атм	<10	2,5

3.2. Результаты проверки модуля показали, что данный модуль:

- работоспособен и значения параметров модуля не выходят за допустимые отклонения от проектных показателей;
- обеспечивает требуемое наполнение конечного компаунда по ЖРО (не менее 30 % об.).

Раздел 4. Результаты оценки технического уровня модуля.

4.1 Технический уровень модуля отвечает современным требованиям промышленной санитарии и технологии.

4.2 Удобство обслуживания.

Испытания модуля показали, что процесс обслуживания и управления узлом удобен.

4.3 Требования техники безопасности.

Испытания модуля показали, что процесс обслуживания и управления узлом удобен.

4.3 Требования техники безопасности.

В результате испытаний установлено, что управление, обслуживание и ремонт оборудования модуля отвечают требованиям техники безопасности.

4.4 Требования радиационной безопасности.

В результате испытаний установлено, технологический процесс отвечает требованиям радиационной безопасности.

Раздел 5. Выводы и предложения комиссии.

В результате проведения приемочных испытаний модуля комиссия установила:

5.1 Предъявленный комиссии модуль кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере отвечает своему назначению.

5.2 Модуль кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере считать выдержавшим испытания и принять в эксплуатацию в составе миниблочной растворосмесительной установки.

Председатель комиссии _____ В.Ю. Флит

члены комиссии: _____ Ж.В. Потапова

_____ А.П. Варлаков

_____ А.А. Брюхов

_____ А.В. Германов

«УТВЕРЖДАЮ»
Первый заместитель генерального директора –
Технический директор
_____ А.С. Баринов
«24» августа 2010 г.

АКТ

опытно-промышленных испытаний модуля кондиционирования ЖРО
методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере
от «24» августа 2010 г.

Комиссия в составе:

председатель комиссии	Первый зам. директора НПК - Директор ОЗПРТ	А.П. Кобелев
и члены комиссии:	зам. директора ОЗПРТ по науке	А.Е. Савкин
	начальник цеха №23	А.П. Варлаков
	начальник отделения цеха №23	А.В. Германов
	ведущий инженер ОРБ-1	Ж.В. Потапова

установила следующее:

Раздел 1. Результаты проверки соответствия состава и комплектности изделия технической документации.

1.1. Рассмотрению комиссии был предоставлен комплект документации:

- техническое задание ТЗ НИОКР 392-09;
- пояснительная записка 02.0259.00.00.00.00 ПЗ;
- программа и методика испытаний 02.0259.00.00.00.00 ПМ;
- акт об окончании монтажных работ от 29.07.2009 г.;
- протокола проверки наличия цепи между заземленными установками и элементами заземленной установки от 05.08.2009 г.;
- протокола приемочных испытаний от 07.08.2009 г.;
- акта приемки и ввода в эксплуатацию от 14.08.2009 г.

Проверка соответствия состава и комплектности модуля рабочей документации производилась на основании осмотра и измерений.

1.2. Проверкой установлено, что состав и комплектность изделия соответствуют предоставленной технической документации.

Раздел 2. Технологические параметры процесса кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере.

2.1 При проведении испытаний использована опытная партия контейнеров «ВКПБ-200» объемом 200 дм^3 в количестве 10 штук (изготовлены ООО «ТриоЛ» по договору поставки № 01 от 11.03.2010 г.). Схема контейнера «ВКПБ-200» представлена на рис. 1.

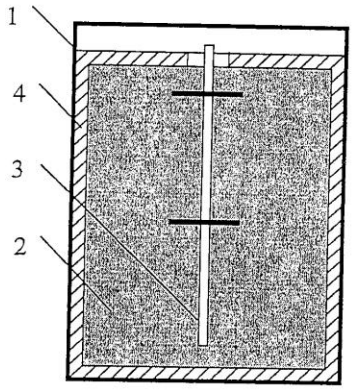


Рис. 1 – Схема контейнера «ВКПБ-200»:

1 - стальная бочка объемом 200 дм^3; 2 - пористая бетонная матрица; 3 - питающее устройство; 4 - бетонная обечайка (толщина 30 мм).

2.2 Объектом кондиционирования являлись жидкие органические радиоактивные отходы (ЖОРО), основные характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики ЖОРО

Наименование по паспорту	Внешний вид	Плотность, г/см^3	Удельная активность[1], Бк/м^3	Основные радионуклиды[1]
раствор трибутилфосфата в синтине	Масляная жидкость темно-коричневого цвета, примеси воды, осадки, запах керосина	0,84	$\Sigma\alpha$ 2,0·10^8	U^{238}, U^{235}
отработанное масло	Масляная жидкость темно-коричневого цвета, без запаха	0,87	$\Sigma\alpha$ 1,6·10^4	U^{238}, U^{235}, U^{234}
жидкий сцинтиллятор	Масляная жидкость фиолетового цвета с резким запахом	0,99	$\Sigma\alpha$ 4,6·10^6 $\Sigma\beta$ 1,1·10^9	Cs^{137}, Pu^{239}, Am^{241}

[1] копии сопроводительных, паспортов РАО и карточки учета переработки РАО прилагаются к настоящему акту.

2.3 Описание технологического процесса пропитки.

Технологический процесс проводили на модуле кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в составе миниблочной растворосмесительной установки. Схема модуля представлена на рис. 2.

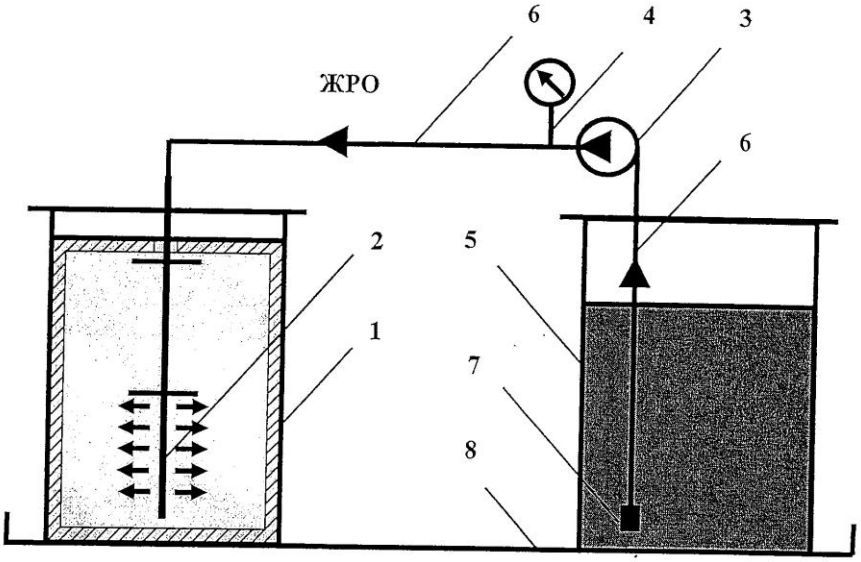


Рис. 2 – Схема модуля пропитки:

1 – контейнер «ВКПБ-200» с пористой бетонной матрицей; 2 – питающее устройство; 3 – дозирующий насос; 4 – манометр; 5 – транспортировочный контейнер с ЖРО; 6 – трубопровод подачи ЖРО; 7 – механический фильтр; 8 – поддон.

Из транспортировочного контейнера (5) ЖРО подаются с помощью дозирующего насоса (3) через питающее устройство (2) по трубопроводу (6) в донную часть контейнера с пористой бетонной матрицей (1). Контейнер с пористой бетонной матрицей (1) и питающее устройство (2) имеют специальную конструкцию, которая предотвращает движение ЖРО вдоль питающего устройства (2) и стенок контейнера (1) и обеспечивает пропитку наибольшего объема пористой бетонной матрицы. Давление подачи ЖРО в трубопроводе (6) контролируется с помощью манометра (4). Механический фильтр (7) предотвращает попадание твердых частиц в трубопровод (6). Все оборудование модуля размещено на поддоне (8).

2.4 Количественные и качественные результаты опытно-промышленных испытаний технологического процесса пропитки представлены в таблице 2.

Таблица 2. Технологические параметры процесса пропитки

№ контейнера	Тип ЖОРО	Производительность процесса, л/час	Диапазон давления подачи ЖОРО, ати	Наполнение[1] (общее наполнение[2]), % об.	Объем переработанных ЖОРО, л
1.	раствор ТБФ в синтине	17	0,10÷0,15	44 (35)	70
2.		17	0,15÷0,20	38 (31)	71
3.		17	0,10÷0,15	45 (36)	82
4.		17	0,10÷0,15	49 (39)	78
5.		21	0,20÷0,25	51 (41)	87
6.		21	0,25÷0,30	62 (50)	99
7.		30	0,30÷0,40	61 (49)	98
				Итого:	**585**
8.	масло	21	1,20÷1,40	59 (48)	95
9.	сцинтиллятор	30	0,50÷0,65	64 (51)	102

[1] наполнение пористой бетонной матрицы (160 л);

[2] наполнение контейнера (200 л).

2.5 Результаты кондиционирования ЖОРО методом пропитки на модуле показали, что модуль работоспособен и значения рабочих параметров не выходят за допустимые отклонения от проектных показателей модуля:

– наполнение конечного компаунда по ЖОРО составляет 38-64 % об. при проектном показателе - не менее 30 % об.;

– производительность процесса пропитки составляет 17-30 л/час (время пропитки контейнера 3,3-4,8 ч) при проектном показателе – не менее 15 л/час;

– давление в трубопроводе подачи ЖОРО составляет 0,10-1,40 ати при проектном показателе – не более 10 ати.

2.6 В процессе пропитки резкие перепады давления при подаче ЖРО в контейнер, а также деформации стенок и днища контейнера с пористой бетонной матрицей не наблюдаются.

Процесс пропитки заканчивали выключением дозирующего насоса в момент появления ЖОРО на поверхности пористой бетонной матрицы .

После завершения процесса кондиционирования ЖОРО при хранении герметично закрытого контейнера в течение 1 месяца деформация крышки, стенок, днища контейнера не наблюдается.

Раздел 3. Результаты оценки технического уровня модуля.

3.1 Технический уровень модуля отвечает современным требованиям промышленной санитарии и технологии.

3.2 Удобство обслуживания.

Процесс обслуживания и управления модулем пропитки удобен и надежен.

3.3 Требования техники безопасности.

В результате испытаний установлено, что управление, обслуживание и ремонт оборудования модуля отвечают требованиям техники безопасности.

3.4 Требования радиационной безопасности.

Технологический процесс пропитки отвечает требованиям радиационной безопасности. Мощность дозы на поверхности контейнера после завершения процесса пропитки не превышает 100 мкР/час.

Раздел 4. Выводы и предложения комиссии.

В результате проведения опытно-промышленных испытаний модуля пропитки пористых бетонных матриц в контейнере комиссия установила:

4.1 Контейнер «ВКПБ-200» пригоден для кондиционирования ЖРО на модуле пропитки пористых бетонных матриц и обеспечивает соблюдение проектных показателей.

4.2 Модуль кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере работоспособен и пригоден для промышленной переработки ЖРО в составе миниблочной растворосмесительной установки.

Председатель комиссии _____ А.П. Кобелев

члены комиссии:

_____ А.Е. Савкин

_____ А.П. Варлаков

_____ А.В. Германов

_____ Ж.В. Потапова

УТВЕРЖДАЮ
Первый зам. генерального директора –
технический директор

А.С.Баринов
«22» 08 2009 г.

АКТ № ____

от «14» августа 2009 г.

приемки и ввода в эксплуатацию модуля кондиционирования жидких радиоактивных отходов методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере.

Приемочная комиссия в составе:

председатель комиссии:	главный инженер НПК – зам. технического директора	А.И. Дмитриев
и членов комиссии:	зам директора ПТЦ	В.С. Хан
	директор ЦРЭБ	Ю.Н. Зубков
	главный технолог НПК	А.С. Волков
	главный механик НПК	С.А. Брюхов
	главный энергетик НПК	Е.В. Зайцев
	начальник отдела ОТ, ТБ и ПС ЦОТиРП	Г.А. Дербенев
	начальник отдела пром. безопасности ЦОТиРП	В.Б. Хвалько
	начальник отдела пож. безопасности ЦОТиРП	А.Ф. Гербов
	начальник цеха № 23	А.П. Варлаков

назначенная приказом по ГУП МосНПО «Радон» № 103 от « 10» 04 2007 г, на основании представленных следующих документов на модуль кондиционирования жидких радиоактивных отходов методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере:

- техническое задание ТЗ НИОКР 392-09;
- пояснительная записка 02.0259.00.00.00 ПЗ;
- программы и методики испытаний 02.0259.00.00.00 ПМ;
- акт об окончании монтажных работ от 29.07.2009 г.;
- протокола приемочных испытаний от 07.08.2009 г.;
- протокола проверки наличия цепи между заземленными установками и элементами заземленной установки от 05.08.2009 г.

считает, что модуль соответствует заданным требованиям.

Предлагается: 1. Модуль кондиционирования жидких радиоактивных отходов методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере принять в эксплуатацию в составе миниблочной растворосмесительной установки.

2. Внести изменения в технологический регламент ТП Рад Х-12.03/2008 «Цементирование радиоактивных отходов. Миниблочная растворосмесительная установка».

Протокол приемочных испытаний прилагается.

Председатель комиссии: _____ А.И. Дмитриев

Члены комиссии:

_____ В.С. Хан

_____ Ю.Н. Зубков

_____ А.С. Волков

_____ С.А. Брюхов

_____ Е.В. Зайцев

_____ Г.А. Дербенев

_____ В.Б. Хвалько

_____ А.Ф. Гербов

_____ А.П. Варлаков

«Согласовано»
Главный технолог ГУП МосНПО «Радон»
_____ Волков А.С.
«____»_____ 2009 г.

Директор ОЗПРТ
_____ Кобелев А.П.
«01»_____12_____ 2009 г.

«Утверждаю»
Технический директор ГУП МосНПО «Радон»
_____ Баринов А.С.
«____»_____ 2009 г.

Программа работ по переработке и кондиционированию жидких органических радиоактивных отходов (ЖОРО), доставленных из ВНИИНМ
(ТБФ + синтин + уран)

№	Наименование работ	Сроки выполнения	Ответственный
1.	Инвентаризация бочек с ЖОРО на содержание водной и органической фаз, определение состава газа, находящегося в бочках. Проведение работ по разделению фаз и безопасному хранению ЖОРО.	12. 2009	Цеха 9, 10 Цех № 9
2.	Проведение работ по переработке и кондиционированию ЖОРО с использованием минеральных добавок		
2.1.	Разработка технологии отверждения ЖОРО в 200 – литровой бочке. Опытное отверждение ЖОРО в бочке с целью последующего наблюдения (2 – 3 бочки).	12. 2009	Цех 10 Цех 9,10
2.2.	Разработка технологии отверждения ЖОРО с целью последующей переработки на установке «Плутон». Опытная переработка отвержденных ЖОРО на установке «Плутон» (200 – 300 л ЖОРО)	12. 2009 01. 2010	Цех 10
3.	Разработка технологии отверждения ЖОРО с помощью пористых матриц и дальнейшей переработки на установке «Плутон».		
3.1.	Проведение лабораторных экспериментов	12. 2009	Цех 10
3.2.	Опытная переработка ЖОРО на установке «Плутон» (200 – 300 л ЖОРО)	01. 2010	Цех 10
4.	Разработка технологии включения ЖОРО в цементный компаунд		
4.1.	Определение рецептуры цементного компаунда с включением ЖОРО. Опытная переработка ЖОРО на установке цементирования	12.2009 Постоянно при переработке ЖРО	Цех 23
4.2.	Разработка рецептуры включения ЖОРО в цементный компаунд с предварительным суспензированием ЖОРО. Опытная переработка ЖОРО на установке цементирования	12.2009 05.2010	Цех 23

2

5.	Разработка технологии кондиционирования ЖОРО с помощью пенобетонов. Опытная переработка ЖОРО (2 – 3 100 – литровых бочки)	12. 2009 01. 2010	Цех 23

Зам. директора ОЗПРТ Савкин А.Е.

Начальник цеха №10 Полканов М.А.

Начальник цеха №9 Селицкий В.А.

Начальник цеха №23 Варлаков А.П.

ИНВ. № 971
ЭКЗ. № 3

Государственное унитарное предприятие города Москвы –
объединенный эколого-технологический и научно-исследовательский центр
по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды

ГУП МосНПО "Радон"

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор ГУП МосНПО "Радон"

_____ Ю.В. Мышкин

"08" июня 2012 г.

Технологический регламент

Кондиционирование радиоактивных отходов.

Миниблочная растворосмесительная установка

ТП Рад Х-12.04/2012

Введен в действие
приказом № 406 от 27.06.2012
с 28 июня 2012 г.
Взамен ТП Рад Х-12.03/2008

Содержание технологического регламента

№ раздела	Наименование разделов	Страница
1.	Общая характеристика технологического процесса	5
2.	Критерии приема и порядок передачи РАО, цемента и технологических добавок	9
3.	Характеристика конечных продуктов	13
4.	Оборудование	15
5.	Порядок ведения технологического процесса	25
6.	Возможные нарушения нормального режима эксплуатации	46
7.	Правила безопасного ведения процесса	54
8.	Контроль технологического процесса	56
9.	Воздействие на окружающую среду	63
10.	Нормы трудозатрат, материалов и энергоресурсов	65
11.	Перечень документации	72
Приложения	1. Общий вид установки	80 – 84
	2. Схема технологического процесса	85

Экз. № 3

Приложения	3. Схема принципиальная	86 - 87
	4. Формы журналов поступления ТРО и ЖРО на цементирование	88 - 89
	5. Рабочий технологический журнал	90
	6. Рабочий лабораторный журнал	91 - 93
	7. Форма «Журнала передачи РАО»	94
	8. Журналы миниблочной растворосмесительной установки	95
	9. Журнал учета поставок цемента	96
	10. Пульт управления	97 - 100
	11. Основной пульт управления (панели)	101 – 102
	12. Матрица ответственности за технологический процесс	103
	13. Протокол технологического контроля в ходе процесса	104
	14. Карта аналитического контроля	105 - 106
	15. Операционный контроль технологического процесса	107 – 110
	16. Перечень персонала участвующего в технологическом процессе	111 - 114

Экз. № 3

ГУП МосНПО "Радон"	Технологический регламент.	
ТП Рад Х-12.04/2012	Кондиционирование радиоактивных отходов. Миниблочная растворосмесительная установка	2

Разработано:

Руководитель подразделения, начальник цеха № 9 — С.В. Карлин "10" 05. 2012г.

Начальник ОТПП — М.Л. Гончарова "27" 04. 2012г.

Начальник бюро ОТПП — Е.Д. Перфильева "27" 04. 2012г.

Согласовано:

Главный технолог ГУП МосНПО «Радон» — С.М. Лащенов "22" 05. 2012г.

Главный технолог ОЗПРТ — А.А. Богачев "21" 05. 2012г.

Начальник отдела нормирования труда Центра организации и оплаты труда — С.Н. Капашинова "18" 05. 2012г.

Начальник ПЭО — Л.С. Бычкова "18" 05 2012г.

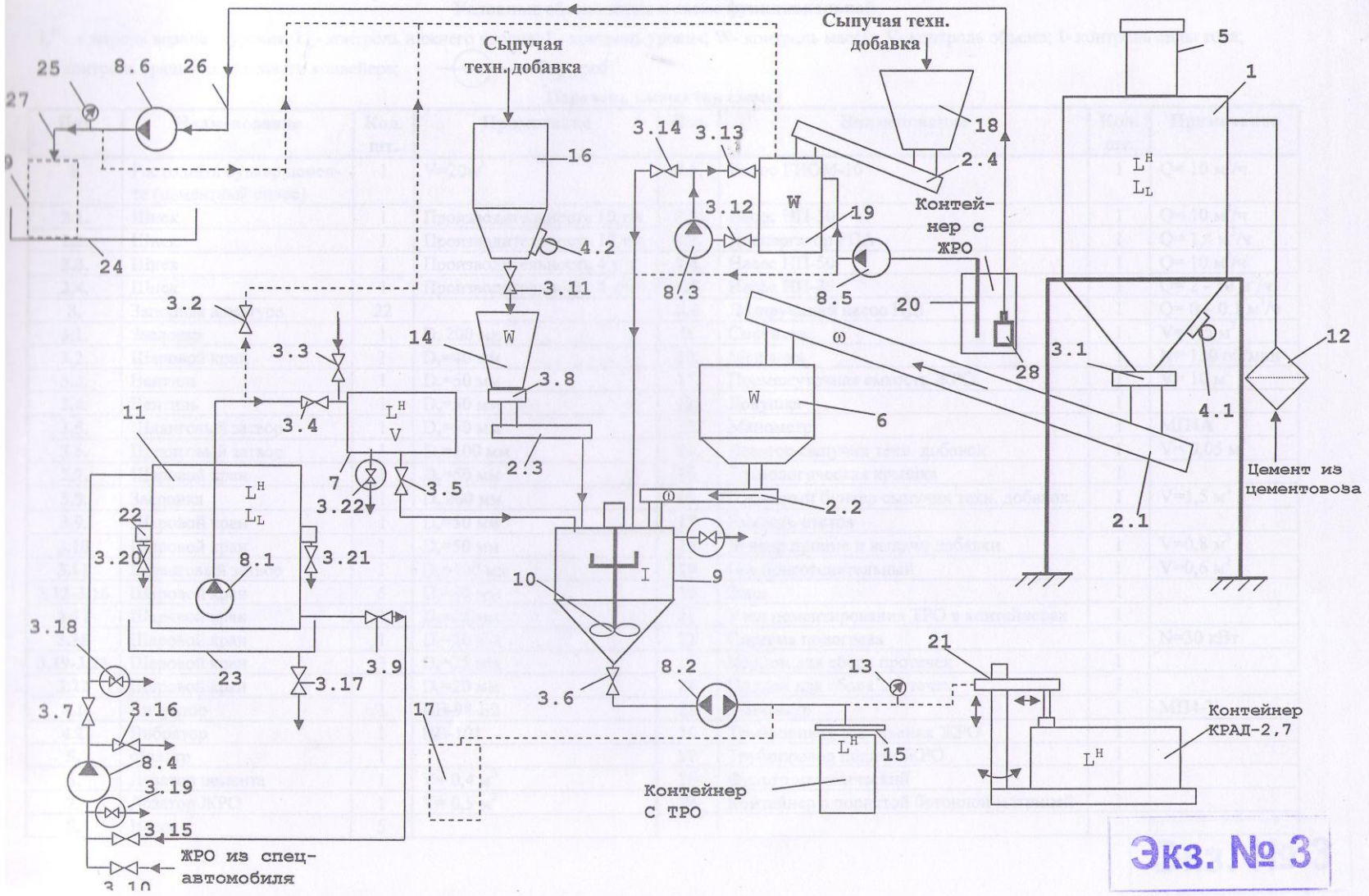
Начальник цеха № 3 — С.Ю. Зайченко "17" 05. 2012г.

Директор Центра метрологии,стандартизации и сертификации ЭТД
Главный метролог — Н.М. Кузнецова "16" 05. 2012г.

Директор Центральной лаборатории — Р.М. Минигалиев "14" 05. 2012г.

ИНВ. № 971
ЭКЗ. № 3

ГУП МосНПО "Радон"	Технологический регламент.	Цементирование радиоактивных отходов. Миниблочная растворосмесительная установка	
ТП Рад Х-12.04/2012	Приложение 3.	Схема принципиальная	86



Условные обозначения к схеме функциональной

L^H - контроль верхнего уровня; L_L- контроль нижнего уровня; L- контроль уровня; W- контроль массы; V- контроль объема; I- контроль силы тока; ω- контроль вращения винтового конвейера; - отбор проб

Перечень элементов схемы

Поз.	Наименование	Кол. шт.	Примечание	Поз.	Наименование	Кол. шт.	Примечание
1.	Расходный бункер цемента (цементный силос)	1	V=20м^3	8.1.	Насос ГНОМ-10	1	Q= 10 м^3/ч
2.1.	Шнек	1	Производительность 10 т/ч	8.2.	Насос НП-50	1	Q= 10 м^3/ч
2.2.	Шнек	1	Производительность 10 т/ч	8.3.	Диспергатор РПА	1	Q= 1,4 м^3/ч
2.3.	Шнек	1	Производительность 4 т/ч	8.4.	Насос НП-50	1	Q= 10 м^3/ч
2.4.	Шнек	1	Производительность 4 т/ч	8.5	Насос НП-25	1	Q= 2 - 10 м^3/ч
3.	Запорная арматура	22		8.6	Дозирующий насос НДГ	1	Q= 0 – 0,1 м^3/ч
3.1.	Заслонка	1	D_y 200 мм	9.	Смеситель	1	V= 0,5 м^3
3.2.	Шаровой кран	1	D_y=40 мм	10.	Мешалка	1	N= 130 об/мин
3.3.	Вентиль	1	D_y=50 мм	11.	Промежуточная емкость ЖРО	1	V= 10 м^3
3.4.	Вентиль	1	D_y=50 мм	12.	Ловушка	1	
3.5.	Шланговый затвор	1	D_y=50 мм	13.	Манометр	1	МП4А
3.6.	Шланговый затвор	1	D_y=100 мм	14.	Дозатор сыпучих техн. добавок	1	V= 0,05 м^3
3.7.	Шаровой кран	1	D_y=50 мм	15.	Технологическая крышка	1	
3.8.	Заслонка	1	D_y 200 мм	16.	Приемный бункер сыпучих техн. добавок	1	V=1,5 м^3
3.9.	Шаровой кран	1	D_y=50 мм	17	Емкость отстоя	1	
3.10	Шаровой кран	1	D_y=50 мм	18	Бункер приема и выдачи добавки	1	V=0,8 м^3
3.11	Шланговый затвор	1	D_y=100 мм	19	Бак приготовительный	1	V=0,6 м^3
3.12-3.16	Шаровой кран	5	D_y=40 мм	20	Зонд	1	
3.17	Шаровой кран	1	D_y=25 мм	21	Узел цементирования ТРО в контейнерах	1	
3.18	Шаровой кран	1	D_y=20 мм	22	Система подогрева	1	N=30 кВт
3.19-3.21	Шаровой кран	3	D_y=25 мм	23	Поддон для сбора протечек	1	
3.22	Шаровой кран	1	D_y=20 мм	24	Поддон для сбора протечек	1	
4.1	Вибратор	1	ИВ-98-Б2	25	Манометр	1	МП4-У
4.2	Вибратор	1	ИВ-101	26	Трубопровод всасывания ЖРО	1	
5.	Фильтр	1		27	Трубопровод подачи ЖРО	1	
6.	Дозатор цемента	1	V= 0,4 м^3	28	Фильтр механический	1	
7.	Дозатор ЖРО	1	V= 0,5 м^3	29	Контейнер с пористой бетонной матрицей	1	
8.	Насос	5					

Экз. № 3

– включить насос (8.5) кнопкой «Пуск» насоса подачи масла и закачать в смеситель (9) порцию ЖРО из транспортного контейнера;

– контролировать количество загружаемых ЖРО визуально,

– отключить насос (8.5), нажав кнопку «Стоп» насоса подачи масла, когда в смесителе необходимое количество ЖРО;

– загрузить в смеситель цемент и добавку согласно п.5.2.7.5;

– продолжить операции согласно пунктам 5.7.8, 5.9.

При необходимости повторять операции данного пункта.

5.11 Кондиционирование ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере «ВКПБ-200»:

– опустить трубопровод всасывания ЖРО (26) с механическим фильтром (28) в транспортный контейнер с ЖРО;

– установить необходимую производительность дозирующего насоса (8.6);

– рассчитать (начальник установки и начальник отделения опытного кондиционирования РАО и контроля технологических процессов цеха) достаточное время пропитки одного контейнера «ВКПБ-200» (29);

– подсоединить трубопровод подачи ЖРО (27) с отводом к контейнеру «ВКПБ-200» (29);

– опустить дополнительный трубопровод в транспортный контейнер с ЖРО и закрыть шаровой кран на отводе трубопровода подачи ЖРО (27);

– включить дозирующий насос (8.6) кнопкой «Пуск» и начать отсчет времени по секундомеру;

– контролировать давление в процессе пропитки визуально по манометру (25):

- при увеличении давления в процессе пропитки более 10 кгс/см^2 остановить процесс, отключив дозирующий насос (8.6) нажатием кнопки «Стоп»;

- открыть шаровой кран на отводе трубопровода подачи ЖРО (27) и слить ЖРО по дополнительному трубопроводу обратно в транспортный контейнер с ЖРО до достижения избыточного давления в трубопроводе подачи ЖРО (27) нулевого значения;

- закрыть шаровой кран на отводе трубопровода подачи ЖРО (27), отсоединить трубопровод подачи ЖРО (27) от контейнера «ВКПБ-200» (29), закрыть крышкой и отправить его на долговременное хранение в отделение хранения РАО цеха № 9;

– выключить дозирующий насос (8.6) кнопкой «Стоп» по истечении расчетного времени пропитки;

– открыть шаровой кран на отводе трубопровода подачи ЖРО (27) и слить ЖРО по дополнительному трубопроводу обратно в

Экз. № 3

транспортный контейнер с ЖРО до достижения избыточного давления в трубопроводе подачи ЖРО (27) нулевого значения;

– отсоединить трубопровод подачи ЖРО (27) от контейнера «ВКПБ-200» (29), закрыть его крышкой и отправить на долговременное хранение в цех № 9.

Примерный расчет необходимого времени для пропитки жидкими радиоактивными отходами одного контейнера «ВКПБ-200»:

1) Объем контейнера «ВКПБ-200» - 200 дм^3,
степень заполнения контейнера пористой бетонной матрицей – 80 %;
необходимое объемное наполнение пористой бетонной матрицы по ЖРО – 30%;
установленная производительность насоса - 15 дм^3/ч;
время пропитки: $(200 \cdot 80 \cdot 30)/(10000 \cdot 15) = 3{,}2$ ч.

2) Объем контейнера «ВКПБ-200» - 200 дм^3,
степень заполнения контейнера пористой бетонной матрицей – 80 %,
необходимое объемное наполнение пористой бетонной матрицы по ЖРО – 40%,
установленная производительность насоса - 25 дм^3/ч,
время пропитки: $(200 \cdot 80 \cdot 40)/(10000 \cdot 25) = 2{,}56$ ч.

5.12 Цементирование ТРО в контейнерах КРАД-2,7:

– нажатием кнопок на переносном пульте управления прямоходными механизмами (см. приложение 10 рис.10.3) соединить стыковочную систему узла цементирования ТРО в контейнерах КРАД-2,7 с трубой контейнера;

– соединить трубопровод цементного раствора узла с насосом (8.2);

– приготовить цементный раствор (см. пункт 5.2.7);

– запорную арматуру (3.6) открыть на линии слива цементного раствора, для этого последовательно перевести переключатели:
- SA11 в положение «Затвор 1»;
- SA10 в положение "Затвор открыт" (на панели индикации загорается сигнальная лампа "затвор 1");

– нажать кнопку «Пуск» ручки «Регулировка частоты вращения вала насоса» в шкафу управления узлом цементирования в контейнерах КРАД-2,7 (см. приложение 10 рис.10.3) и задать максимальную производительность насоса (8.2) - цементный раствор подается в контейнер КРАД-2,7;

- контролировать давление по манометру (13):
- при увеличении давления до 2 атм. поворотом ручки «Регулировка частоты вращения» уменьшить производительность насоса (8.2)),

Экз. № 3

Контейнер КРАД-2,7 устанавливается на станину. Трубопровод подачи цементного раствора соединяется с контейнером при помощи стыковочной системы. Уровень раствора в контейнере контролируется датчиком уровня. Стыковочная система крепится на стреле и перемещается по ней при помощи механизма МЭП. Стрела перемещается при помощи двух механизмов МЭП.

4.11 Модуль кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере предназначен для пропитки под давлением ЖРО пористых бетонных матриц в контейнере «ВКПБ-200» и дозировки ЖРО в приготовительный бак (19) узла для цементирования ЖРО, содержащих минеральные масла и/или органические жидкости. Составляющие модуля:

- дозирующий насос (8.6);
- трубопровод всасывания ЖРО (26);
- трубопровод подачи ЖРО (27);
- фильтр механический (28);
- манометр (25);
- поддон (24).

4.11.1 Дозирующий насос (8.6) предназначен для закачки ЖРО в контейнер «ВКПБ-200» (29) или в приготовительный бак (19) узла цементирования ЖРО, содержащих минеральные масла и/или органические жидкости, миниблочной растворосмесительной установки. Для фиксации и удобства обслуживания дозирующий насос (8.6) закреплен на опорной раме.

Производительность дозирующего насоса (8.6) регулируемая - от 0 до 0,1 $м^3$/час.

Наибольшее давление на выходе - 40 атм.

4.11.2 Трубопровод всасывания ЖРО (26) предназначен для обеспечения перекачки ЖРО из контейнера с ЖРО через фильтр механический (28) к дозирующему насосу (8.6).

4.11.3 Трубопровод подачи ЖРО (27) предназначен для перекачки ЖРО от дозирующего насоса (8.6) в контейнер с пористой бетонной матрицей (29) или в приготовительный бак (19) узла цементирования ЖРО, содержащих минеральные масла и/или органические жидкости. Трубопровод подачи ЖРО (27) снабжен отводом с шаровым краном и соединенным с ним дополнительным трубопроводом для сброса ЖРО обратно в транспортный контейнер или отбора проб ЖРО.

Экз. № 3

4.11.4 Фильтр механический (28) предназначен для исключения попадания механических примесей ЖРО в трубопровод всасывания ЖРО (26).

4.11.5 Во избежание загрязнения площадки пункта хранения РАО все оборудование модуля, включая контейнер с пористой бетонной матрицей (29), размещено на поддоне (24)

4.12 Система электропитания предназначена для снабжения электроэнергией аппаратов и механизмов установки, для питания осветительных приборов и КИПиА, а также для функционирования АСУТП.

Напряжение питания 380/220В, 24В, 12 В.

Система состоит из кабельных сетей, распределительных пунктов и пусковых аппаратов. Распределительные пункты и пусковые аппараты размещены на пульте управления.

4.13 Система КИПиА и АСУТП осуществляет:

– контроль за состоянием систем и оборудованием установки;

– оперативное и эффективное управление при эксплуатации установки;

– безопасную работу при ведении технологического процесса.

В состав системы входят:

– средства контроля физических параметров процесса;

– преобразователи;

– вторичные приборы.

4.14 Пульт управления установки состоит из шести пультов:

– основной пульт (см. приложение 11);

– пульт управления блоком дозатора сыпучих технологических добавок (см. приложение 10 рис.10.1);

– пульт управления узлом для цементирования ЖРО, содержащих минеральные масла и/или органические жидкости (см. приложение 10 рис.10.2);

– пульт управления узла приема и хранения ЖРО (см. приложение 10 рис.10.4);

– пульт управления узлом цементирования ТРО в контейнерах КРАД-2,7 (см. приложение 10 рис.10.3);

– пульт управления модулем кондиционирования ЖРО методом пропитки пористых бетонных матриц в контейнере.

Экз. № 3