

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПАНЕЛЕЙ АНГИДРИТОВЫХ ОТДЕЛОЧНЫХ ИЗ ОТХОДОВ ФТОРОВОДОРОДНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Ю. М. Федорчук, А. С. Рыбин, М. В. Носова,
В. А. Данекер, Е. В. Солодов, Л. А. Леонова**

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», Томск, Россия;
Сахалинское ЛПУМТ ООО «Газпром трансгаз Томск», Томск,
Россия; АО «ТомскНИПИнефть», Томск, Россия*

Ключевые слова: ангидритовое вяжущее; охрана окружающей среды; промышленное производство; строительные материалы; фторангидрит; утилизация отходов.

Аннотация: Рассмотрен процесс утилизации отходов, образующихся при производстве фтороводорода в ходе химической реакции между природным инертным материалом – фторидом кальция и концентрированной серной кислотой. Текущие методы утилизации включают нейтрализацию отходов щелочью и их сброс в водные системы, что оказывает негативное воздействие на окружающую среду из-за содержания фторид- и сульфат-анионов. Предложена технологическая схема лабораторной установки, позволяющей из нейтрализованного отхода производства фтороводорода – фторангидрита, изготавливать экологически безопасные строительные материалы: панели ангидритовых отделочных. Дано описание последовательного процесса производства, начиная от загрузки исходных материалов в смесители до формирования и хранения готовых панелей, деталей спроектированной лабораторной установки, а именно ее составных узлов и производительности.

Федорчук Юрий Митрофанович – доктор технических наук, профессор отделения контроля и диагностики (ИШНКБ), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; Рыбин Александр Сергеевич – инженер по подготовке производства 1 категории, e-mail: sasha.rybin.1995@mail.ru, Сахалинское ЛПУМТ ООО «Газпром трансгаз Томск», Томск, Россия; Носова Мария Владимировна – кандидат биологических наук, ведущий инженер отдела ОВОС, АО «ТомскНИПИнефть»; Данекер Валерий Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники (ИШЭ); Солодов Егор Викторович – студент; Леонова Лилия Александровна – кандидат технических наук, доцент отделения ядерно-топливного цикла (ИЯТШ), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия.

Введение

Отходы производства фтороводорода образуются в результате химической реакции между природным инертным материалом, фторидом кальция и концентрированной серной кислотой. В настоящее время на предприятиях атомной промышленности применяют следующий способ утилизации отходов: нейтрализованный избытком щелочи фторангидрит (ФА) сбрасывается в речные воды и водотоки в пределах установленных нормативов допустимых сбросов [1, 2]. Однако данный метод приводит к накоплению фторид- и сульфат-ионов в водной среде, что оказывает негативное воздействие на экосистему и биологические организмы.

Фторид-ионы в концентрациях, превышающих предельно допустимые нормы, оказывают токсическое воздействие на живые организмы, нарушая клеточный метаболизм, проницаемость мембран и процессы транскрипции и трансляции [3]. Сульфат-ионы в воде при повышенных концентрациях могут ухудшать ее органолептические свойства, придавая горький или солоноватый вкус, а также вызывать раздражение слизистых оболочек и аллергические реакции организма [4]. Таким образом, традиционные методы утилизации отходов производства фтороводорода представляют собой серьезную экологическую проблему, требующую новых решений.

Наиболее активные исследования в области утилизации ФА проводили российские ученые Н. П. Галкин, А. Л. Гольдинов, Н. П. Курин, С. В. Островский и Б. П. Ильинский. Их работы охватывают общие проблемы утилизации отходов химической промышленности и сфокусированы на конкретных методах утилизации ФА. Методы включают химическую, физическую переработку и использование в качестве сырья для производства других материалов [5].

Одним из перспективных способов утилизации ФА является его применение в строительстве благодаря вяжущим свойствам. Нейтрализованный ФА в сочетании с цементом может использоваться для изготовления плит, блоков и других строительных материалов. Также разработаны фторангидритовые композиции с легкими заполнителями, такими как вспученный перлитовый песок, для производства конструкционно-теплоизоляционных материалов, например, пазогребневых плит и блоков для внутренних конструкций зданий [6 – 9].

Анализ российского и зарубежного опыта показывает, что текущие методы утилизации ФА имеют значительные недостатки. Переработка для получения добавки в клинкер требует значительных энергетических затрат на удаление избыточной серной кислоты и создание дополнительных участков для грануляции сульфата кальция [10 – 15]. Получение строительного гипса связано с многостадийностью процесса и высокими энергозатратами. Использование ФА в качестве наполнителя для строительных изделий требует дорогостоящего цемента [16 – 17]. Методы получения ангидритовых строительных растворов также включают сложные стадии нейтрализации и введения дополнительных добавок [18].

Таким образом, исследование альтернативных способов утилизации отходов фтороводородного производства не только способствует снижению экологической нагрузки на водные экосистемы, но и открывает возможности для создания полезных строительных материалов.

Цель исследования – разработка лабораторного устройства для изготовления панелей ангидритовых отделочных (ПАНО) из отходов фтороводородного производства.

Материалы и методы

В ходе исследования использовались методики, направленные на определение ключевых характеристик изготовленных на лабораторной установке листов ПАНО. В частности, по ГОСТ Р 51829–2022 определены предел прочности при изгибе, поверхностное водопоглощение и шероховатость поверхности. В соответствии с требованиями ГОСТ 5802–86 проведены исследования подвижности смеси, плотности смеси и прочности на сжатие опытных образцов, изготовленных из фторангидритового раствора.

Для исследования шероховатости поверхности образцов применялся стилусный профилометр KLA-Tencor Alpha-Step IQ. Оценка прочности образцов на сжатие и изгиб проводилась с использованием гидравлического пресса E161N. Показания напряжения и силы тока, подаваемых на электромагнит авторской установки, фиксировались блоком мультиметров.

Для обработки и анализа данных использовалось программное обеспечение EXCEL. Вычислены средние значения и случайные погрешности с доверительной вероятностью 0,95, что позволило оценить статистическую значимость результатов. Также применялось программное обеспечение КОМПАС-3D v20 для проектирования и визуализации прототипа лабораторной установки.

Полученные характеристики панелей ангидритовых отделочных сопоставлены с существующим на рынке аналогом – гипсоволокнистыми листами (ГВЛ) фирмы KNAUF.

Результаты и обсуждение

Гипсоволокнистые листы – это высококачественный отделочный материал, изготавливаемый из прессованной смеси гипсового вяжущего и волокон распушенной макулатуры по ГОСТ Р 51829–2022 [19]. Листы фирмы KNAUF применяются в системах перегородок стен, облицовок, потолков, а также для создания сборного основания пола. Системы с ГВЛ позволяют исключить «мокрые» процессы и сократить сроки ремонтно-отделочных работ.

Основными компонентами ГВЛ являются технический гипс, который служит связующим элементом и составляет большую часть листа, армирующий материал в виде волокон, добавляемый для улучшения механической прочности листа, и модификаторы, используемые для улучшения различных характеристик листа, таких как влагостойкость, устойчивость к плесени и огню. Вода используется для гидратации гипса и формирования прочной структуры [20].

Предлагается аналог листов ГВЛ, а именно импортозамещающая строительная продукция – листы ПАНО, не уступающие по своим механическим и геометрическим характеристикам ближайшему аналогу. Для производства листов ПАНО спроектирована и испытана лабораторная установка (рис. 1).

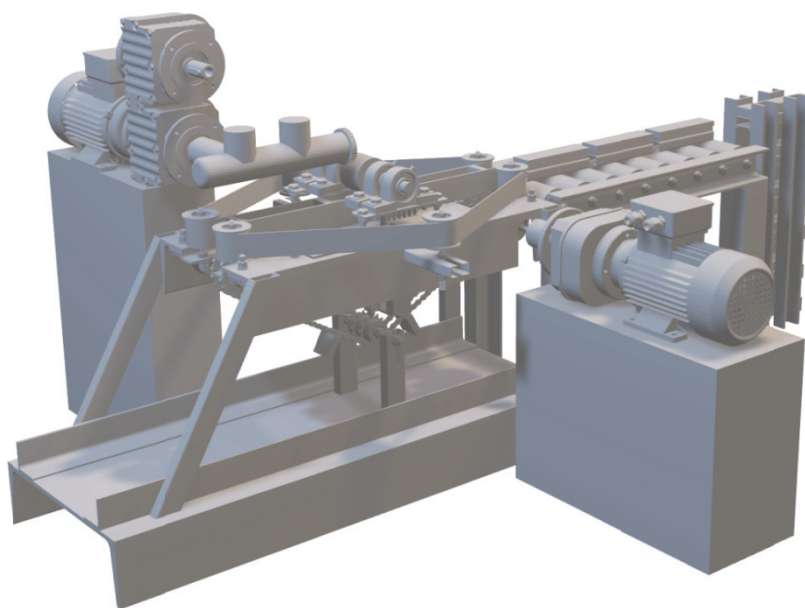


Рис. 1. Лабораторная установка по производству ПАНО (3D-модель)

Важной особенностью технологии является использование в качестве основного сырья нейтрализованного отхода – фторангидрита, что позволяет не только снизить себестоимость продукции, но и решить проблему утилизации данного отхода.

Основные элементы установки представлены на рис. 2. Рама 1 состоит из верхнего и нижнего горизонтальных швеллеров, соединенных трубами. На одном конце верхнего швеллера установлены два подшипника,

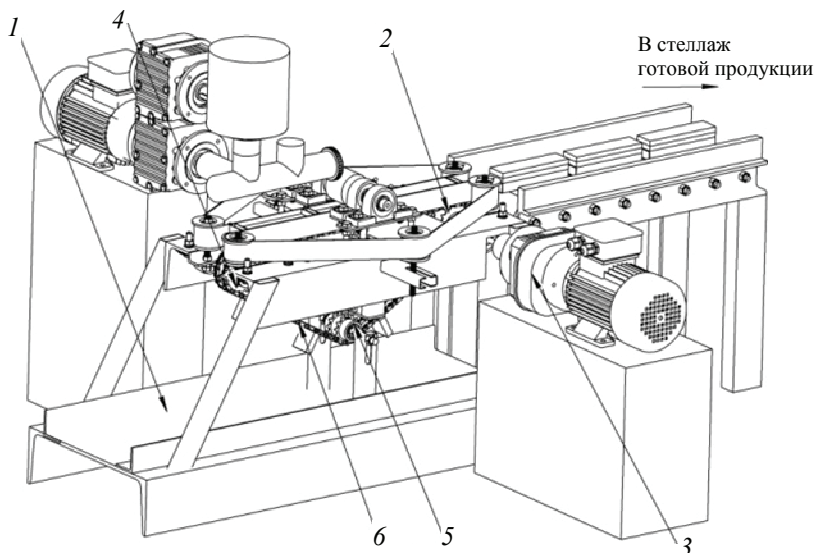


Рис. 2. Блок-схема лабораторной установки без растворобетонного узла:
 1 – рама; 2, 4, 5 – ведущие, ведомые и натяжная звездочки соответственно;
 3 – мотор-редуктор; 6 – замкнутая цепь

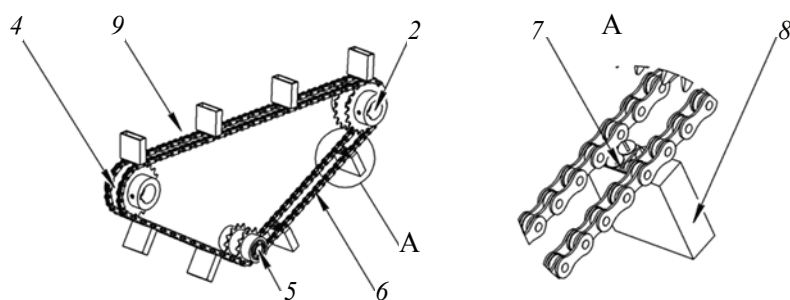


Рис. 3. Блок-схема транспортировочной цепи лабораторной установки:

2, 4, 5 – ведущие, ведомые и натяжная звездочки соответственно;
6 – замкнутая цепь; 7 – горизонтальные полочки; 8 – перегородки;
9 – технологические поддоны

внутри которых размещен ведущий вал с двумя ведущими звездочками 2, соединенный с валом мотор-редуктора 3. На противоположном конце верхнего швеллера также установлены два подшипника, с помощью которых зафиксирован ведомый вал с двумя ведомыми звездочками 4. На нижнем швеллере, на вертикальных опорах посередине закреплена ось с двухрядной звездочкой, предназначенной для натяжения цепей 5.

На рисунке 3 представлена транспортировочная цепь, осуществляющая перемещение поддонов с изготавливаемыми изделиями. Ведущая 2, ведомая 4 и натяжная 5 звездочки соединены замкнутой цепью 6, к которой через равное количество звеньев смонтированы горизонтальные полочки 7. К полочкам прикреплены перегородки 8 в виде полых параллелепипедов. Между перегородками 8 на параллельно расположенные замкнутые цепи 6 загружают поддоны из металлического основания и ламинированной фанеры 9. Размер поддонов соответствует длине и ширине изготавливаемых изделий.

На рисунке 4 представлено крепление технологических лент, осуществляющих функцию подвижной опалубки и крепление вала-виброформователя.

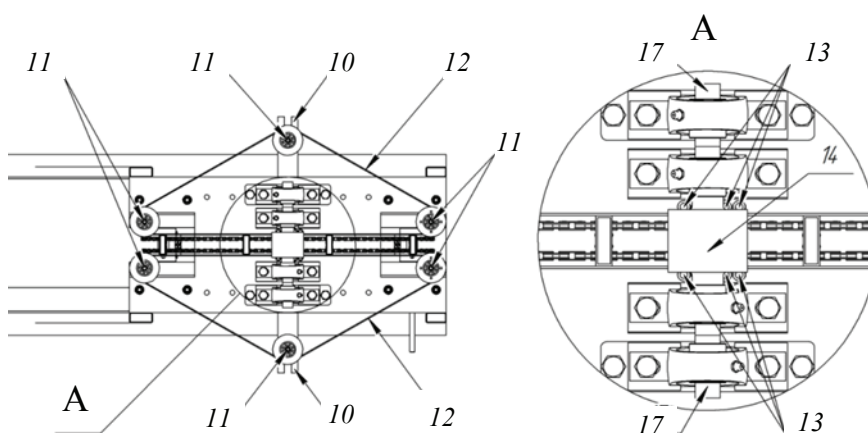


Рис. 4. Блок-схема крепления технологических лент и вала-виброформователя:

10 – прямоугольные трубки; 11 – вертикальные ролики; 12 – замкнутые технологические ленты; 13 – оси с роликами; 14 – вибровал; 17 – амортизирующие наконечники

Противоположные концы верхнего швеллера и концы трубок 10, приваренных к боковым стенкам верхнего швеллера, оснащены вертикально расположенными роликами 11, на которые натянуты две замкнутые гибкие технологические ленты 12, образующие подвижные бортики для поддонов. Высота бортиков соответствует толщине панели. Сбоку от замкнутых технологических лент на верхнем швеллере вертикально установлены оси с роликами 13, фиксирующими технологические ленты 12 от горизонтального смещения. В средней части верхнего швеллера над технологическими лентами установлен полый вибровал 14, закрепленный в четырех подшипниках. Средняя часть вала утолщена, его внешняя поверхность выполнена из капролона, а внутрь вала запрессован металлический стержень с амортизирующими наконечниками 15 на концах.

На рисунке 5 представлено крепление электромагнита на лабораторной установке. Два подшипника закреплены на верхнем швеллере, два других прикреплены к пластинам с направленными вниз шпильками, на которых зафиксирована пластина с отверстиями 16. Пластина расположена над электромагнитом 17, установленным на нижней поверхности верхнего швеллера. Работа установки осуществляется следующим образом: поддоны 9, служащие основой для формирования ПАНО, загружают на цепи 6 между перегородками 8, которые закреплены на цепях таким образом, что расстояние между ними соответствует длине изготавливаемых панелей. Мотор-редуктор 3 обеспечивает непрерывное движение цепей 6, скорость которых регулируется в зависимости от размеров панелей и характеристик вяжущего состава. Цепи перемещаются вдоль верхнего и нижнего швеллеров. Регулировка натяжения цепей 6 осуществляется через двухрядную звездочку 5, расположенную на оси, закрепленной на двух опорах.

Бортиками поддонов служат технологические ленты 12, натянутые на ролики 11, что позволяет им перемещаться вместе с цепями 6. Ролики 13 фиксируют технологические ленты в месте загрузки формируемой смеси, предотвращая их горизонтальное смещение. Верхняя поверхность поддонов 9, перегородки 8 и прилегающие к ним технологические ленты 12 формируют внутреннюю структуру прямоугольной формы для будущей панели ангидритовой отделочной (рис. 6).

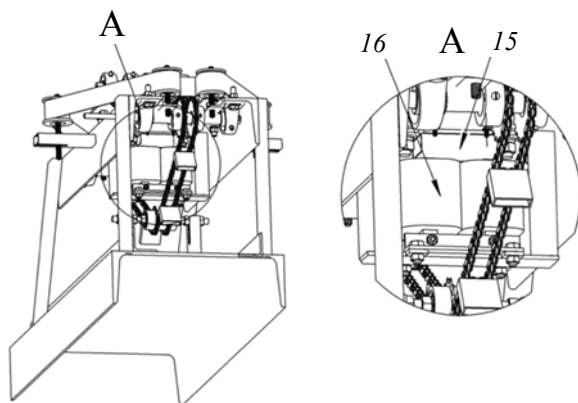


Рис. 5. Крепление электромагнита на лабораторной установке:
15 – металлическая пластина; 16 – электромагнит

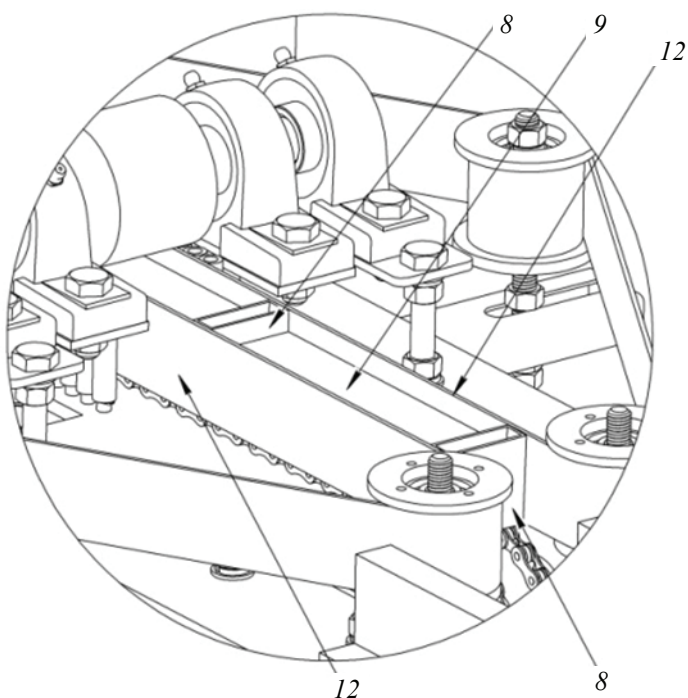


Рис. 6. Блок-схема формообразующей поверхности для панелей ангидритовых отделочных:
 8 – перегородки; 9 – технологический поддон;
 12 – замкнутые технологические ленты

Вязущий состав из нейтрализованного ФА, песка, ускорителя схватывания, волокнистого компонента и воды загружают в форму через бункер 18 и шнек 20 (рис. 7). В процессе заполнения формы вязущий состав уплотняется утолщенной частью вала 14 за счет вибрации от электромагнита 17. Вибрация передается через шпильки к пластинам и подшипникам, в которых установлен вал 14. Вакуумные резиновые трубки 15 на концах стального стержня выполняют функцию амортизатора для вала 14. Избыток раствора удаляется в полую часть перегородок и сбрасывается в отдельную передвижную емкость (на рисунках не показана). После уплотнения смеси сформированную панель направляют на рольганг 19 (см. рис. 7). Для изготовления следующей панели процесс повторяют. Готовые ПАНО направляют в стеллаж готовой продукции. Конструктивные особенности установки включают распределение вязущего вещества в форме и выравнивание лицевой поверхности панели за счет вибрации вала 14, создаваемой электромагнитом 17.

Напряжение, подаваемое на электромагнит, составляет 100 В при силе тока 1 А. Силу притяжения электромагнита регулируют путем изменения зазора между электромагнитом 17 и пластиной 16. Интенсивность колебаний регулируют с помощью лабораторного автотрансформатора, подключенного к электромагниту. Частота колебаний составляла 50 Гц. Скорость перемещения поддонов по транспортеру составляла 0,05 м/с.

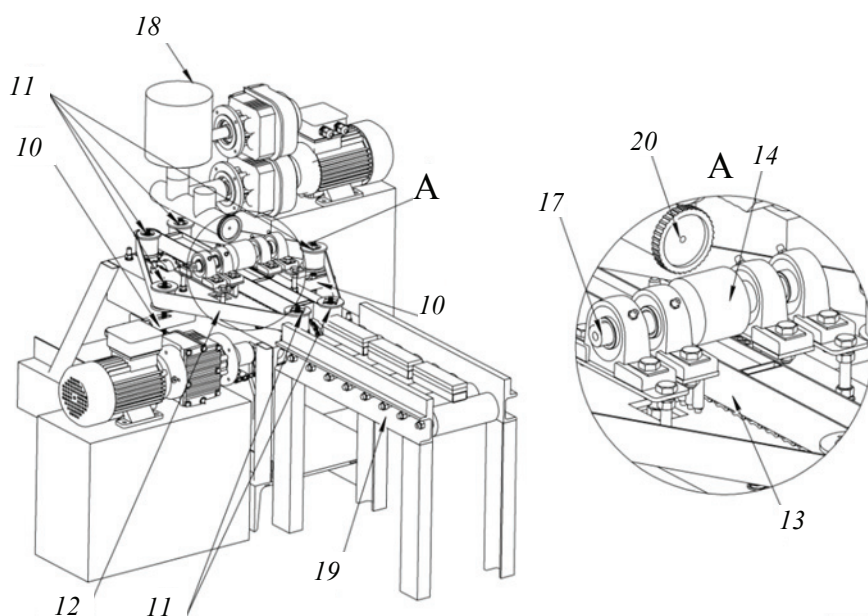


Рис. 7. Блок-схема лабораторной установки по производству ПАНО:

10 – прямоугольные трубки; 11 – вертикальные ролики;
12 – замкнутые технологические ленты; 13 – оси с роликами; 14 – вибривал;
17 – амортизирующие наконечники; 18 – бункер; 19 – рольганг; 20 – шнек

Обсуждение полученных результатов

Основные показатели созданного прототипа включают габариты лабораторной установки: длину $L = 900$ мм; ширину $W = 280$ мм; высоту $h = 720$ мм и габариты изготавливаемых ПАНО: $L = 152$ мм; $W = 40$ мм; $h = 10$ мм.

Экспериментально установлена оптимальная подвижность смеси для эффективного производства ПАНО на лабораторной установке. Данный показатель составляет $0,8 \dots 1,5$ см по ГОСТ 5802–86. При подвижности смеси ниже $0,8$ см ангидритовое вяжущее распределяется неравномерно по технологическому поддону, при этом сила вибрировала недостаточно для выравнивания лицевой поверхности листов ПАНО. Данный негативный эффект приводит к дефектам в структуре листов и снижению их качества. При подвижности смеси выше $1,5$ см ангидритовое вяжущее становится слишком текучим, обладает низкой вязкостью, что препятствует приобретению листами ПАНО необходимой геометрической формы и негативно сказывается на их конечных характеристиках.

По результатам проведенных исследований установлено, что оптимальный состав техногенного ангидритового вяжущего на основе ФА соответствует следующему соотношению компонентов, % (в пересчете на 100 % ФА по массе): вода – 36, песок – 30, K_2SO_4 (ускоритель схватывания) – 1,5, базальтовая вата (армирующий материал) – 1, сульфенол – 0,02. Изготовленные ангидритовые панели подвергались механическим испытаниям спустя 28 суток после затворения состава водой.

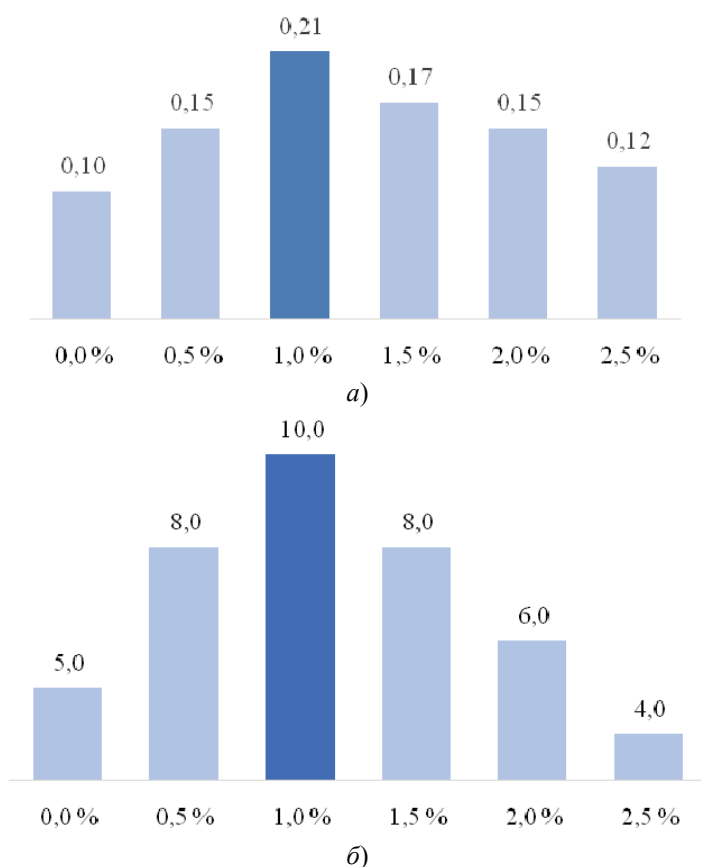


Рис. 8. Зависимость предела прочности при изгибе (а) и сжатии (б) ПАНО от содержания базальтовой ваты (содержание воды 36 %)

Испытания ПАНО при указанном составе показали следующие значения: предел прочности при изгибе – $(0,21 \pm 0,015)$ МПа (рис. 8, а), предел прочности на сжатие – $(10 \pm 0,22)$ МПа (рис. 8, б), коэффициент водостойкости – 0,81 (рис. 9), шероховатость лицевой поверхности Ra – $(15,1 \pm 0,18)$ мкм (рис. 10).

Анализ влияния компонентов смеси показал, что содержание 1 % базальтовой ваты является оптимальным для достижения необходимой минимальной прочности панелей (см. рис. 8).

Далее представлены результаты исследования влияния содержания воды в техногенном ангидритовом вяжущем на предел прочности при изгибе ПАНО. Методика испытаний заключалась в разрушении образца $152 \times 40 \times 10$ мм под действием сосредоточенной нагрузки, прикладываемой в центре пролета (рис. 11). Скорость нарастания нагрузки составляла 15...20 Н/с.

Предел прочности при изгибе, МПа, определяют согласно ГОСТ Р 51829–2022 по формуле

$$R_{\text{изг}} = \frac{3F \cdot 120}{2bs^2}, \quad (1)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н; b – ширина образца, мм; s – толщина образца, мм; 120 – расстояние между осями опор, мм.

На рисунке 12 представлены результаты исследования влияния содержания воды на прочность ПАНО, а также их сравнение с ГВЛ фирмы KNAUF. Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что ПАНО, изготовленные из техногенного ангидритового вяжущего с содержанием воды 28 – 36 %, не уступают по прочностным характеристикам ГВЛ фирмы KNAUF.

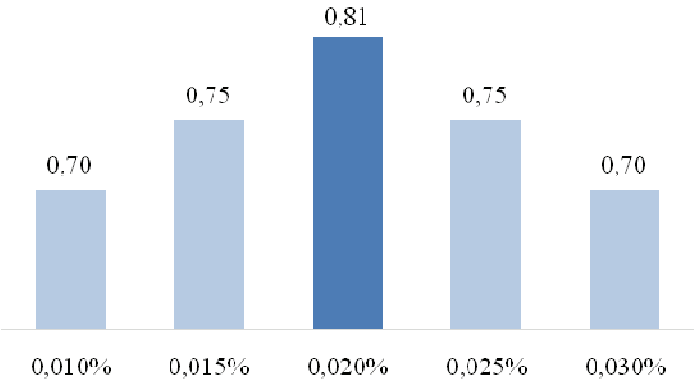


Рис. 9. Зависимость коэффициента водостойкости от содержания сульфанола

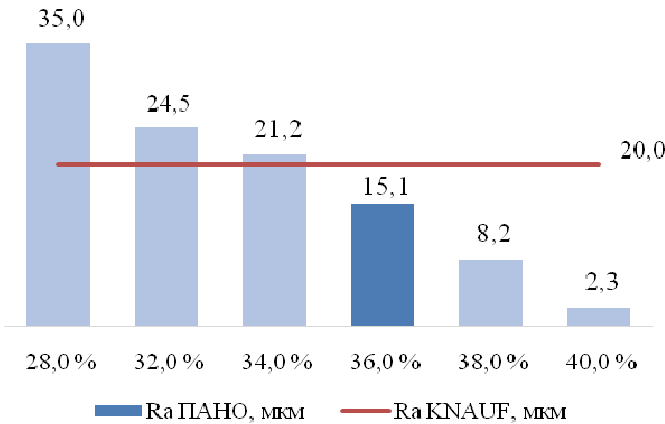


Рис. 10. Зависимость Ra лицевой поверхности панелей ангидритовых отделочных от содержания воды

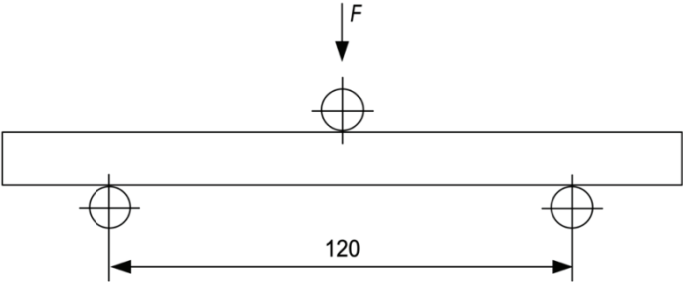


Рис. 11. Схема испытания на прочность при изгибе

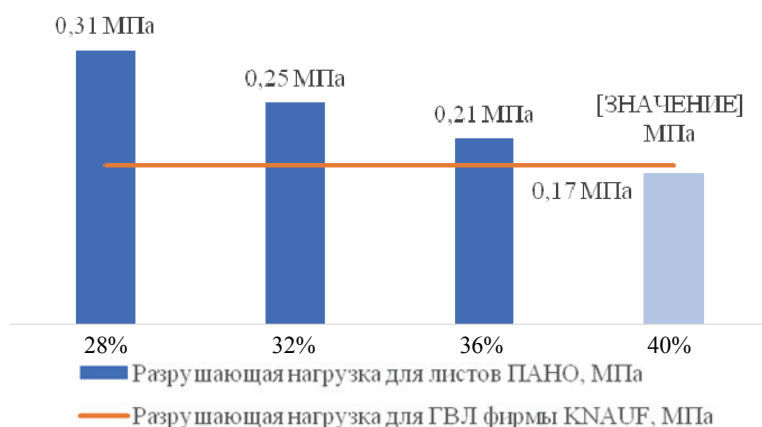


Рис. 12. Зависимость предела прочности при изгибе панелей ангидритовых отделочных от содержания воды и сравнение с ГВЛ фирмы KNAUF

Представленные результаты исследования влияния сульфенола на водостойкость панелей, показали, что добавление 0,02 % сульфенола увеличивает водостойкость до 0,81, что соответствует минимальным требованиям ГВЛ фирмы KNAUF, однако увеличение содержания сульфенола снижает прочность образцов (см. рис. 9). Ранее был установлен диапазон подвижности раствора для производства ПАНО на лабораторной установке 0,8...1,5 см, что соответствует содержанию воды 32 – 36 %. Как видно из гистограммы (см. рис. 10), при содержании воды 36 % панели имеют наименьшую шероховатость лицевой поверхности, составляющую 15,1 мкм.

Результаты испытаний техногенного ангидритового вяжущего и сравнение показателей листов ГВЛ фирмы KNAUF с панелями, произведенными из ФА, представлены соответственно в табл. 1 и 2. На основе полученных данных можно сделать вывод, что производимые панели ангидритовые отделочные соответствуют требованиям стандартов ГВЛ фирмы KNAUF.

Таблица 1

Статистические результаты испытаний техногенного ангидритового вяжущего состава в соответствии с ГОСТ 5802–86

Параметр	Результаты испытаний
Подвижность смеси, см	$1,5 \pm 0,0076$
Плотность смеси, г/см ³	$1,7 \pm 0,63$
Предел прочности при сжатии образцов из ФА, МПа	$10 \pm 0,22$

Таблица 2

Результаты испытаний панелей ангидритовых отделочных

Параметр	Требования к ГВЛ KNAUF	Результаты испытаний ПАНО
Предел прочности при изгибе	Не менее 0,18 МПа	$(0,21 \pm 0,015)$ МПа
Шероховатость поверхности, Ra	Не более 20 мкм	$(15,1 \pm 0,18)$ мкм

Заключение

Спроектированный прототип лабораторной установки для непрерывного производства листов ПАНО в ходе испытаний подтвердил свою работоспособность в части производства строительных материалов из отходов фтороводородного производства. Скорость производства панелей ангидритовых отделочных на лабораторной установке составляет 0,05 м/с. Габариты лабораторной установки: длина 900 мм, ширина 280 мм, высота 720 мм. Габариты изготавливаемого ПАНО: длина 152 мм, ширина 40 мм, высота 10 мм.

Оптимальный состав техногенного ангидритового вяжущего на основе фторангидрита соответствует следующему соотношению компонентов (в пересчете на 100 % ФА по массе): вода – 36 %, песок – 30 %, K_2SO_4 (ускоритель схватывания) – 1,5 %, базальтовая вата (армирующий материал) – 1 %, сульфоновол – 0,02 %.

Испытания панелей ангидритовых отделочных, изготовленных при указанном составе, показали следующие значения: предел прочности на сжатие – $(10 \pm 0,22)$ МПа, предел прочности при изгибе – $(0,21 \pm 0,015)$ МПа, шероховатость лицевой поверхности Ra – $(15,1 \pm 0,18)$ мкм, коэффициент водостойкости – 0,81.

Предложенная технология направлена на оптимизацию переработки отходов и снижение их негативного воздействия на окружающую среду. Внедрение данной технологии позволит более эффективно использовать ресурсы и интегрировать вторичные материалы в производственные циклы.

Список литературы

1. Оценка эффективности виброизмельчения минеральных материалов применительно к твердым отходам фтороводородного производства / Ю. М. Федорчук, В. А. Данекер, А. А. Волков [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 1–3. – С. 325 – 330.
2. Ресурсо- и энергосберегающий способ получения фтороводорода и фторангидрита / Ю. М. Федорчук, В. В. Матвиенко, Д. В. Нарыжный, А. С. Рыбин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2020. – № 3(77). – С. 32 – 39. doi: 10.17277/voprosy.2020.03.pp.032–039
3. Алехина, Д. А. Влияние малых доз неорганических соединений фтора на уровень свободнорадикального окисления и внутриклеточных защитных систем в сердце, легких и печени / Д. А. Алехина, А. Г. Жукова, Т. Г. Сазонтова // Технологии живых систем. – 2016. – Т. 13, № 6. – С. 49 – 56.
4. Сульфаты в воде [Электронный ресурс] // Экодар. – URL: <https://www.ekodar.ru/filter/water-wiki/o-problemah-s-vodoi/sulfaty-v-vode/> (дата обращения: 06.01.2025).
5. Галкин, Н. П. Улавливание и переработка фторсодержащих газов / Н. П. Галкин, В. А. Зайцев, М. Б. Серегин. – М. : Химия, 1989. – 256 с.
6. Фторангидритовые композиции с легким наполнителем на основе вспученного перлитового песка / Г. И. Яковлев, Д. А. Калабина, В. П. Грахов [и др.] // Строительные материалы. – 2019. – № 5. – С. 57 – 61. doi: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-57-61
7. Effect of Carbon-Containing Additives on the Properties of Fluoroanhydrite Compositions Used for Flooring / D. Kalabina, G. I. Yakovlev, Z. Saidova [et al.] // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 932. – P. 219 – 224. doi: 10.4028/p-1q9dt3

8. Application of Anhydrous Calcium Sulphate in Cement Bound Granular Pavement Layers: Towards a Circular Economy Approach / J. Rombi, M. Coni, M. Olinas, M. Salis, S. Portas, A. Scanu // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2021. – Vol. 12958. – P. 91 – 99. doi: 10.1007/978-3-030-87016-4_7
9. Environmental Impact and Management of Phosphogypsum / H. Tayibi, M. Choura, F. López, F. Alguacil, A. López-Delgado // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – Vol. 90, No. 8. – P. 2377 – 2386. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007
10. Volkova, O. V. Dry Mixes for Brickwork Restoration of Old Buildings / O. V. Volkova, L. A. Anikanova // *Glass and Ceramics*. – 2020. – Vol. 77, No. 7-8. – P. 322 – 326. doi: 10.1007/s10717-020-00298-1
11. High-Strength Fluoroanhydrite Composition / G. Yakovlev, Ja. Keriene, V. Grakhov [et al.] // *Selected papers of the 13th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”*, Вильнюс, 16–17 мая 2019 г. – Вильнюс, 2019. – P. 224 – 229. doi: 10.3846/mbmst.2019.042
12. Structural and Thermal Insulation Materials Based on High-Strength Anhydrite Binder / G. Yakovlev, G. Pervushin, V. Grahov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* : 4, Prague, 17–21 June 2019. – Prague, 2019. – P. 032071. doi: 10.1088/1757-899X/603/3/032071
13. Zhakupova, G. Possible Alternatives for Cost-Effective Neutralisation of Fluoroanhydrite minimising Environmental Impact / G. Zhakupova, M. Sadenova, P. S. Varbanov // *Chemical Engineering Transactions*. – 2019. – Vol. 76. – P. 1069 – 1074. doi: 10.3303/CET1976179
14. Recycling Industrial Byproduct Gypsum for Use as Plastering Materials by the Tandem Pyro-Hydro Process: Impurities Removal, Whiteness Improvement, and Regularity of Phase Evolution / Z. Zheng, C. Weng, Z. Kang, M. Zhong, C. Yu, Z. Lin, W. Liu // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. – 2024. – Vol. 26. – P. 3384 – 3396. doi: 10.1007/s10163-024-02044-z
15. The Use of Fluoro-Anhydrite for Building Materials Production / D. K. Galkina, O. V. Rudenko, M. A. Sadenova, N. A. Kulenova // *Chemical Engineering Transactions*. – 2021. – Vol. 88. – P. 589 – 594. doi: 10.3303/CET2188098
16. Development of the Composition of a Special Mixture for Floors Using Anhydrite Binders / A. F. Buryanov, N. A. Galtseva, I. V. Morozov, E. N. Buldyzhova // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 160 LNCE. – P. 183 – 189. doi: 10.1007/978-3-030-75182-1_25
17. Phosphogypsum Recycling: A Review of Environmental Issues, Current Trends, and Prospects / Y. Chernysh, O. Yakhnenko, V. Chubur, H. Roubík // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2021. – Vol. 11, No. 4. – P. 1 – 22. doi: 10.3390/app11041575
18. Порсина, А. С. Исследование влияния фторангидрита производства ОАО «Галополимер Пермь» как альтернативу гипсу Ергачинского месторождения на свойства тампонажного цемента ПЦТ I-G-CC-1 в условиях ОАО «Сухоложскцемент» / А. С. Порсина // *Актуальные проблемы развития технических наук : сб. ст.* – Екатеринбург, 2018. – С. 153 – 157.
19. Мухаметрахимов, Р. Х. Технология изготовления гипсоволокнистых листов на основе целлюлозных волокон / Р. Х. Мухаметрахимов, А. Н. Дикина // *Вестник Технологического университета*. – 2015. – Т. 18, № 15. – С. 91 – 94.
20. Пат. РФ 2812404 С1. МПК В28В 15/00 В28С 9/00 В28В 1/087. Установка для изготовления панелей ангидритовых отделочных / Федорчук Ю. М., Рыбин А. С., Данекер В. А., Леонова Л. А., Грицай С. И., Носова М. В. Опубл. 31.01.2024.

References

1. Fedorchuk Yu.M., Daneker V.A., Volkov A.A. [et al.] [Evaluation of the efficiency of vibratory grinding of mineral materials applied to solid waste of hydrofluoric acid production]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2016, no. 1-3, pp. 325-330. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Fedorchuk Yu.M., Matvienko V.V., Naryzhny D.V., Rybin A.S. [Resource and energy-saving method for producing hydrogen and fluoranhydrite]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2020, no. 3(77), pp. 32-39. doi: 10.17277/voprosy.2020.03.pp.032-039 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Alekhina D.A., Zhukova A.G., Sazontova T.G. [Effect of small doses of inorganic fluorine compounds on the level of free radical oxidation and intracellular defense systems in the heart, lungs, and liver], *Tekhnologii zhivyykh sistem* [Living Systems Technologies], 2016, vol. 13, no. 6, pp. 49-56. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Available at: <https://www.ekodar.ru/filter/water-wiki/o-problemah-s-vodoi/sulfaty-v-vode/> (accessed 06.01.2025).
5. Galkin N.P., Zaytsev V.A., Seregin M.B. *Ulavlivaniye i pererabotka flosoderzhashchikh gazov* [Capture and processing of fluorine-containing gases], Moscow: Khimiya, 1989, 256 p. (In Russ.)
6. Yakovlev G.I., Kalabina D.A., Grakhov V.P. [et al.] [Fluoroanhydrite compositions with lightweight filler based on expanded perlite sand], *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2019, no. 5, pp. 57-61. doi: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-57-61 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Kalabina D., Yakovlev G.I., Saidova Z. [et al.] Effect of carbon-containing additives on the properties of fluoroanhydrite compositions used for flooring, *Key Engineering Materials*, 2022, vol. 932, pp. 219-224. doi: 10.4028/p-1q9dt3
8. Rombi J., Coni M., Olianias M., [et al.] Application of anhydrous calcium sulphate in cement bound granular pavement layers: Towards a circular economy approach, *Lecture Notes in Computer Science*, 2021, vol. 12958, pp. 91-99. doi: 10.1007/978-3-030-87016-4_7
9. Tayibi H., Choura M., López F., [et al.] Environmental impact and management of phosphogypsum, *Journal of Environmental Management*, 2009, vol. 90, no. 8, pp. 2377-2386. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007
10. Volkova O.V., Anikanova L.A. Dry mixes for brickwork restoration of old buildings, *Glass and Ceramics*, 2020, vol. 77, no. 7-8, pp. 322-326. doi: 10.1007/s10717-020-00298-1
11. Yakovlev G., Keriene J., Grakhov V., [et al.] High-strength fluoroanhydrite composition. In: *Proceedings of the 13th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques"*, Vilnius, May 16-17, 2019. Vilnius, 2019, pp. 224-229. doi: 10.3846/mbmst.2019.042
12. Yakovlev G., Pervushin G., Grakhov V., [et al.] Structural and thermal insulation materials based on high-strength anhydrite binder, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Prague, June 17-21, 2019, p. 032071. doi: 10.1088/1757-899X/603/3/032071
13. Zhakupova G., Sadenova M., Varbanov P.S. Possible alternatives for cost-effective neutralisation of fluoroanhydrite minimising environmental impact, *Chemical Engineering Transactions*, 2019, vol. 76, pp. 1069-1074. doi: 10.3303/CET1976179
14. Zheng Z., Weng C., Kang Z., [et al.] Recycling industrial byproduct gypsum for use as plastering materials by the tandem pyro-hydro process: impurities removal, whiteness improvement, and regularity of phase evolution, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2024, vol. 26, pp. 3384-3396. doi: 10.1007/s10163-024-02044-z

15. Galkina D.K., Rudenko O.V., Sadenova M.A., Kulenova N.A. The use of fluoro-anhydrite for building materials production, *Chemical Engineering Transactions*, 2021, vol. 88, pp. 589-594. doi: 10.3303/CET2188098
16. Buryanov A.F., Galtseva N.A., Morozov I.V., Buldyzhova E.N. Development of the composition of a special mixture for floors using anhydrite binders, *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021, vol. 160, pp. 183-189. doi: 10.1007/978-3-030-75182-1_25
17. Chernysh Y., Yakhnenko O., Chubur V., Roubík H. Phosphogypsum recycling: A review of environmental issues, current trends, and prospects, *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 4, article 1575. doi: 10.3390/app11041575
18. Porsina A.S. [Investigation of the influence of fluoroanhydrite from OAO "Galopolymer Perm" as an alternative to gypsum from the Ergachinskoye deposit on the properties of well cement PCT I-G-CC-1 under the conditions of OAO "Sukholozhskcement"]. In: *Proceedings of the Conference on Actual Problems of Technical Sciences Development*, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, 2018, pp. 153-157. (In Russ.)
19. Mukhametrakhimov R.Kh., Dikina A.N. [Technology for the production of gypsum fiber boards based on cellulose fibers], *Vestnik Technologicheskogo Universiteta*, 2015, vol. 18, no. 15, pp. 91-94. (In Russ.)
20. Fedorchuk Yu.M., Rybin A.S., Daneker V.A., Leonova L.A., Gritsay S.I., Nosova M.V. *Ustanovka dlya izgotovleniya paneley angidritovykh otdelochnykh* [Installation for the production of anhydrite finishing panels], Russian Federation, 2024, Pat. 2812404 (In Russ.)

Development and Study of Properties of Anhydrite Finishing Panels from Hydrofluoride Waste Products

**Yu. M. Fedorchuk, A. S. Rybin, M. V. Nosova,
V. A. Daneker, E. V. Solodov, L. A. Leonova**

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;
Sakhalin LPUMT LLC Gazprom Transgaz Tomsk; Tomsk, Russia;
JSC TomskNIPIneft, Tomsk, Russia*

Keywords: anhydrite binder; environmental protection; industrial production; building materials; fluoroanhydrite; waste disposal.

Abstract: The article considers the process of disposal of waste generated during the production of hydrogen fluoride during the chemical reaction between a natural inert material – calcium fluoride and concentrated sulfuric acid. Current disposal methods include neutralization of waste with alkali and its discharge into water systems, which has a negative impact on the environment due to the content of fluoride and sulfate anions. A process flow diagram of a laboratory installation is proposed that allows for the production of environmentally friendly building materials: anhydrite finishing panels, from neutralized hydrogen fluoride production waste – fluoroanhydrite. A description of the sequential production process is given, starting from loading the raw materials into mixers to the formation and storage of finished panels, parts of the designed laboratory installation, namely its component units and productivity.

© Ю. М. Федорчук, А. С. Рыбин, М. В. Носова,
В. А. Данекер, Е. В. Солодов, Л. А. Леонова, 2025