

УДК 658.567.1; 691.311-419; 504.054
DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4704
Шифр специальности ВАК: 2.10.2

Эколого-экономически эффективный способ утилизации фторангидрита

Ю.М. Федорчук, Л.А. Леонова[✉], Е.В. Солодов, Э.А. Губа

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]leonovala@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Одним из видов экологического неблагополучия в настоящее время является наличие сульфаткальциевых отходов в производстве фтороводорода, именуемых в научно-технической литературе как фторангидрит, которые загрязняют окружающую среду в местах расположения производств не только на территории Российской Федерации, но и за рубежом. Использование фторангидрита – твердого отхода вышеназванного производства, в качестве сырья для строительных изделий позволит не только снизить негативное воздействие на окружающую среду, но и занять новую нишу рынка строительной продукции, получив экономическую прибыль. Ранее сотрудниками Томского Политехнического Университета были разработаны несколько направлений применения фторангидрита в строительной промышленности с различными коэффициентами рентабельности. **Цель.** Разработка вариантов получения высокорентабельной ресурсосберегающей строительной продукции на основе техногенного ангидритового вяжущего, являющегося альтернативой природному минералу – ангидриту, в виде строительных изделий типа швеллер и полая стяжка. **Результаты и выводы.** Приведены сведения по безопасности данного типа строительных изделий, основанные на результатах радиологического исследования техногенного ангидрита Сибирского химического комбината, выявлено влияние интенсивности измельчения на время нейтрализации фторангидрита, определены составы компонентов новой строительной продукции, ее некоторые свойства, в том числе зависящие от соотношения воды и отсева гравия, а также времени перемешивания раствора, определена зависимость прочности и водостойкости ангидритовых строительных образцов от содержания поверхностно активных веществ, в частности сульфанола, рассмотрен экологический эффект предполагаемого предотвращенного ущерба окружающей среде, и рассчитан экономический эффект процесса энерго- и ресурсосбережения за счет утилизации твердых отходов фтороводородных производств.

Ключевые слова: фторангидрит, кальция сульфат, твердые отходы, фтороводородное производство, ангидритовая стяжка, ангидритовая бетонная площадка, минеральный швеллер, строительные изделия

Для цитирования: Эколого-экономически эффективный способ утилизации фторангидрита / Ю.М. Федорчук, Л.А. Леонова, Е.В. Солодов, Э.А. Губа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 244–252. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4704

UDC 658.567.1; 691.311-419; 504.054
DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4704

Eco-economically effective method of fluorangydrate utilization

Yu.M. Fedorchuk, L.A. Leonova[✉], E.V. Solodov, E.A. Guba

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]fedorchukum@tpu.ru

Abstract. Relevance. At this moment, one of the types of ecological disadvantage is the presence of sulphate-calcium waste in hydrogen fluoride production, referred to in scientific and technical literature as fluorangydrate, which pollutes the environment in places where the production facilities are located not only in the Russian Federation, but also in other countries. The use of fluorangydrate, a solid waste of the above-mentioned production, as a raw material for construction products will not only reduce the negative impact on the environment, but also occupy a new niche of the market of construction products,

obtaining economic profit. Earlier the employees of Tomsk Polytechnic University developed several directions of fluorangydrate application in construction industry with different profitability coefficients. **Aim.** Development of variants of obtaining highly profitable resource-saving construction products on the basis of technogenic anhydrite binder, which is an alternative to natural mineral – anhydrite, in the form of building products such as channel and floor screed. **Results and conclusions.** The paper introduces the information on safety of this type of building products based on the results of radiological study of technogenic anhydrite from Siberian chemical plant. The authors have revealed the grinding intensity impact on fluorangydrate neutralization time. They determined the compositions of components of new building products, some their properties, including those depending on the ratio of water and gravel screening, as well as on the time of mixing the mortar, the dependence of strength and water resistance of anhydrite building samples on the content of water and gravel screening.

Keywords: fluorangydrate, calcium sulphate, solid waste, hydrogen fluoride production, anhydrite screed, anhydrite concrete floor, mineral channel, building products

For citation: Fedorchuk Yu.M., Leonova L.A., Solodov E.V., Guba E.A. Eco-economically effective method of fluorangydrate utilization. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 12, pp. 244–252. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4704

Введение

В России производство фтороводорода осуществляют в промышленной зоне г. Перми и г. Северска Томской области [1]. Попутно образующийся безводный сульфат кальция, в научнотехнической литературе именуемый фторангидритом, в количестве 70000 и 15000 т в год в перечисленных регионах, соответственно, содержит в своем составе свободную серную кислоту и связанный фтор-ион, который при контакте с влагой воздуха выделяется в атмосферу в виде газообразного фтороводорода [2–8]. При рациональном способе нейтрализации фторангидрита в герметичных аппаратах высокоинтенсивного измельчения и перемешивания кислого фторангидрита и щелочного нейтрализатора с введением в смесь модификатора отход производства можно превратить в техногенное ангидритовое вяжущее [9–13]. В связи с тем, что техногенное ангидритовое вяжущее (ТАВ) по сравнению с цементом или гипсом является относительно новым видом вяжущего для строительной промышленности, возникает необходимость в разработке конкурентоспособной высокоэффективной строительной продукции на основе техногенного ангидритового вяжущего.

Начальным этапом переработки фторангидрита в Томском регионе является обезвреживание кислого фторангидрита жидкой натриевой щелочью в репульпаторе с последующим сбросом пульпы через систему канализации в близрасположенный водоем.

Переработка фторангидрита в АО «Галополлимер», г. Пермь, состоит из следующих операций: из каждой печи фторангидрит шнеком подают на скребковый транспортер, в который в самом начале загружают пылеобразную фракцию извести негашеной СаО, поставляемой с Чусовского металлургического завода, из расчета стехиометрически необходимого количества с учетом 10–15 % избытка

относительно спрогнозированного количества кислоты в отвале для всех работающих печей. Затем элеватором перегружают эту смесь в другой скребковый транспортер, расположенный над приемными патрубками силосов объемом 8000 м³ каждый. После заполнения бункера и выдержки фторангидрита в нем не менее 20 дней нейтрализованный гранулообразный (гранулы достигают 120 мм) фторангидрит вывозят на полигон хранения отвала, расположенный в пойме реки Камы.

К настоящему времени предлагаемые направления использования твердых отходов фтороводородного производства, представленных в виде окрашенных наименований строительных материалов и изделий, показанных на рис. 1, с различной степенью экономической эффективности прошли апробацию от лабораторных до полупромышленных и опытно-промышленных масштабов [14–16]. Использование отходов в качестве сырья для производства строительных материалов возможно в том случае, когда отходы имеют стабильные, неизменные на протяжении значительного периода времени свойства, необходимые для получения строительных материалов требуемого качества. До последнего времени контроль за свойствами безводного сульфата кальция осуществляли путем измерения температуры отвала на выходе из вращающейся печи. Этот показатель является косвенным параметром получаемого фтороводорода и фторангидрита. Еще один контролируемый показатель – количество серной кислоты в отвале также на выходе из печи, который на протяжении времени нахождения реакционной массы в печи – более двух часов, варьируется в весьма широких пределах – от 1,5–2 до 10–15 мас. %. В связи с тем, что избыточная кислотность отвала положительно влияет на количество извлекаемого фтороводорода из плавикового шпата, но оказывает негативное влияние на вяжущие свойства фторангидрита, возника-

ет экологическая и технологическая необходимость в тщательной нейтрализации избыточной серной кислоты в отвале. Чтобы использовать фторангидрит АО «Галополимер» в строительной промышленности, необходимо измельчить его до технологически приемлемых размеров частиц – не крупнее 250 мкм, и модифицировать ускорителем схватывания для повышения марочности техногенного ангидритового вяжущего.

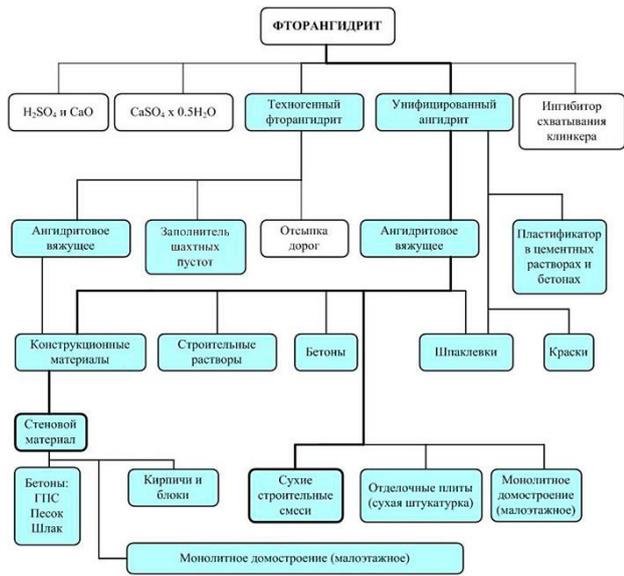


Рис. 1. Направления использования фторангидрита
 Fig. 1. Fluorangydrite applications

Согласно направлениям использования фторангидрита, показанным на рис. 1, наиболее эффективны технологии получения ангидритовых штукатурных растворов, шпаклевок, ангидритовых известковых красок, но их объемы потребления слишком малы; бетоны, кирпичи, блоки, каркасно-монолитные модульные помещения по объему потребления как техногенного ангидрита, так и ангидритовых изделий существенно выше, но обладают менее значимым удельным экономическим эффектом.

Было принято решение исследовать свойства новых ангидритовых строительных изделий, пока еще не применяемых в строительной отрасли, – это бетонные стяжки и площадки под хранение промышленного оборудования [17]. В связи с тем, что

техногенное ангидритовое вяжущее, полученное из твердых отходов фтороводородного производства, отличается от традиционных цементных и гипсовых вяжущих по прочности (марочности), срокам схватывания, водостойкости и морозостойкости, углу откоса, составу, т. е. является новым строительным материалом, при организации управления технологическими процессами обращения с сульфаткальциевым отходом, в частности, при получении половой стяжки, необходимо убедиться в безопасности применения нового строительного материала.

Методика исследования и результаты

Для достижения заданной цели проведены следующие исследования: разработана технология получения ангидритового вяжущего из твердых отходов фтороводородного производства сухим способом и строительных материалов и изделий на его основе типа швеллер и половая стяжка; в рамках полупромышленных испытаний получения новой ангидритовой строительной продукции определены режимы виброформования получаемых изделий с помощью оригинального виброформовочного оборудования; исследована зависимость прочности и водостойкости строительных образцов от содержания поверхностно активных веществ; разработаны составы композитов с использованием промышленных отходов для половых стяжек и минеральных швеллеров, отвечающих строительным нормам и правилам; проведен расчет экономической выгоды использования твердых отходов для производства вышеназванной продукции.

В 1987 и 2004 гг. были получены положительные заключения на нейтрализованный фторангидрит СХК от Минздрава СССР и Томской СЭС соответственно о возможности использования фторангидрита в строительстве без ограничений (табл. 1). Удельная эффективная активность естественных радионуклидов (ЕРН): радия-226, тория-232, калия-40, в техногенном ангидрите составила $12,59 \pm 2,52$ Бк/кг, что не превышает допустимые уровни содержания данных радионуклидов в строительных материалах [18].

Исследованный материал по содержанию природных радионуклидов относится к 1 классу строительных материалов ($A_{эфф} \leq 370$ Бк/кг) и может использоваться во всех видах строительства.

Таблица 1. Результаты радиологического исследования фторангидрита АО «СХК»

Table 1. Results of radiological study of fluorangydrite of Stock Company «Siberian group of chemical enterprises»

Наименование строительного материала Construction material	Удельная активность радионуклидов, Бк/кг Specific activity of radionuclides, Bq/kg				A _{эфф.} , Бк/кг A _{эфф.} , Bq/kg
	Cs-137	Ra-226	Th-232	K-40	
Техногенный ангидрит/Technogenic anhydrite	0,1712±2,269	8,503±8,318	3,12±4,60	0,0±35,24	12,59±2,52
Природный гипс/Natural gypsum		85,9	82,9	82,6	≤370

Предварительными опытами было установлено влияние интенсивности нейтрализации и измельчения фторангидрита и извести в лабораторной шаровой мельнице и вертикальном шаровом виброизмельчителе на время нейтрализации фторангидрита (рис. 2).

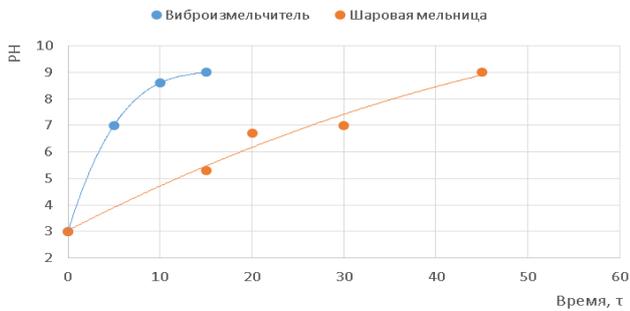


Рис. 2. Влияние интенсивности измельчения на время нейтрализации фторангидрита

Fig. 2. Effect of grinding intensity on the neutralization time of fluoroanhydrite

Из полученной партии твердых сульфаткальциевых отходов часть фторангидрита измельчали и нейтрализовывали в шаровой мельнице, а вторую часть дополнительно после этого пропускали через дисмембратор [19]. Фторангидрит, отобранный после шаровой мельницы, просеивали через сито 160 мкм, а гранулометрический состав фторангидрита механоактивированного устанавливали с помощью микроскопа с кратностью $\times 1000$. Размеры механоактивированного фторангидрита не превышали 10 мкм. Из образцов каждого нейтрализованного в процессе измельчения фторангидрита готовили штукатурный раствор одинакового состава: фторангидрит–песок–вода, после чего заполняли формочки размером (40×40×40) мм и выдерживали на воздухе при нормальных условиях. Через 7 и 28 суток образцы в форме кубиков подвергали испытаниям на сжатие. Среднее значение предела прочности сжатию кубиков без механоактивации составило 2,15 МПа, с механоактивацией – 2,5 МПа при требуемых значениях не менее 1,0 МПа. Согласно ГОСТ 18105-2018 и ГОСТ 23789-2018 образцы из цементного и гипсового вяжущего набирают максимальную прочность через 28 суток.

С целью расширения области применения строительной ангидритовой продукции была поставлена задача установить составы и определить режимы изготовления половое производственного покрытия. В табл. 2 и на рис. 3, 4 показаны результаты определения водопотребности и подвижности строительного ангидритового раствора для обустройства половое покрытия производственной площадки, в табл. 3 и на рис. 5, 6 отображена зави-

симость прочности изделий от времени приготовления.

Таблица 2. Водопотребность и подвижность ангидритового строительного раствора

Table 2. Water requirement and mobility of anhydrite mortar

Соотношение фторангидрит:отсев, вес. Fluoroanhydrite:sift ratio, weight parts	Водопотребность (отношение массы воды к массе фторангидрита), вес. Water requirement (ratio of water weight to fluoroanhydrite weight), weight parts	Диаметр растекания строительного раствора, мм Diameter of mortar spreading, mm	Подвижность (глубина погружения корпуса), см Mobility (depth of immer- sion of the body), cm
1:0	35:100	120	3,8
1:0,5	45:100	120	4,9
1:1	48:100	125	6,0
1:2	58:100	125	7,3
1:3	68:100	120	7,8

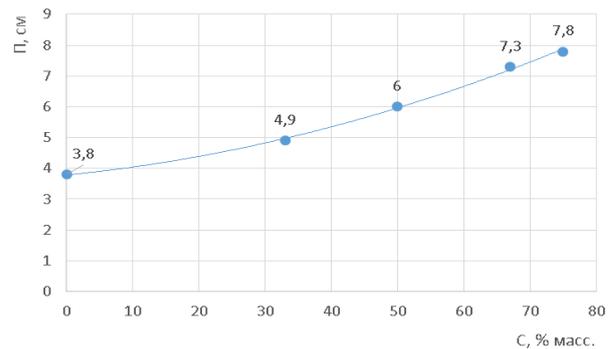


Рис. 3. Влияние соотношения воды и отсева гравия (C, %) на подвижность (P) раствора

Fig. 3. Effect of the ratio of water to gravel screenings (C, %) on mortar mobility (P)

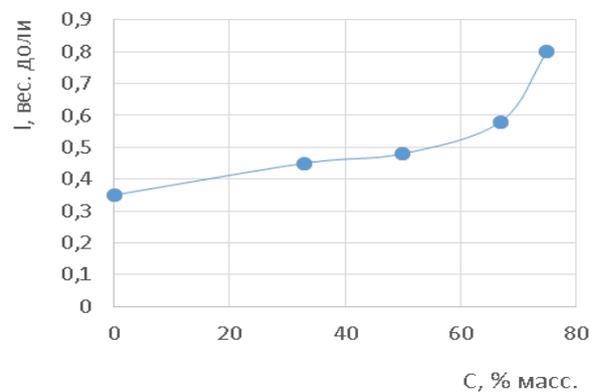


Рис. 4. Влияние соотношения воды и отсева гравия (C, %) на водопотребность (I, вес. ч.)

Fig. 4. Effect of the ratio of water to gravel screenings (C, %) on water content (I, wt. h.)

Таблица 3. Определение времени приготовления фторангидритового раствора

Table 3. Determination of the preparation time of fluorangydrite solution

Время перемешивания, мин Mixing time, min	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
Предел прочности образцов на сжатия, МПа Compressive strength of samples, MPa	7,5	8,4	10,2	12,0	13,9	15,0	16,0	16,0
Предел прочности образцов на изгиб, МПа Bending strength of samples, MPa	1,7	1,9	2,3	2,7	3,1	3,3	3,6	3,6

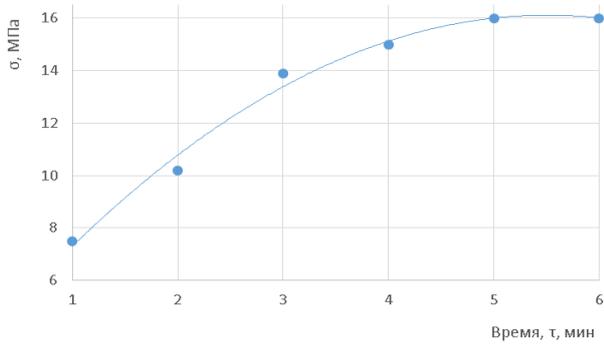


Рис. 5. Влияние времени перемешивания (τ , мин) ангидритового раствора на предел прочности сжатию (σ , МПа)

Fig. 5. Effect of mixing time (t , min.) of anhydrite mortar on compressive strength (s , MPa)

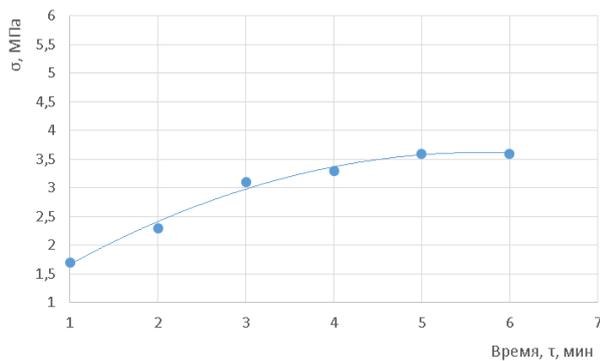


Рис. 6. Влияние времени перемешивания (τ , мин) ангидритового раствора на предел прочности изгибу (σ , МПа)

Fig. 6. Effect of mixing time (t , min.) of anhydrite mortar on flexural strength (s , MPa)

Таким образом, можно констатировать положительную динамику возрастания прочности изделий при увеличении времени перемешивания, которая выравнивается после 5 минут процесса.

Следующим этапом исследований являлось определение влияния различных видов армирова-

ния на свойства ангидритового бетонного покрытия, данные которого отображены в табл. 4.

Таблица 4. Влияние армирования на прочность строительных изделий

Table 4. Reinforcement effect on the strength of building products

Наименование технических показателей Technical indicators	Значение показателей/Value of indicators			
	Гипсовая стяжка Gypsum screed	Ангидритовая стяжка* Anhydrite screed*	Ангидритовая стяжка** Anhydrite screed**	Ангидритовая стяжка*** Anhydrite screed***
Насыпная плотность сухой смеси, кг/м ³ Bulk density of dry mix, kg/m ³	1600–1650	1650–1700	1800–1850	1750–1800
Количество воды затворения, л/кг Quantity of mixing water, l/kg	0,25–0,26	0,22–0,23	0,22–0,23	0,23–0,24
Подвижность, см Mobility, cm	2,6–2,7	2,7–2,8	2,7–2,8	2,8–2,9
Плотность затвердевшего раствора, кг/м ³ Density of hardened mortar, kg/m ³	1850–1900	1850–1900	1850–1900	1900–1950
Прочность при сжатии, МПа Compressive strength, MPa	16–17	14–15	18–19	19–20
Прочность при изгибе, кгс/см ² Bending strength, kgf/cm ²	7,0	3,3	14,4	17,3

Примечание: Материал армирования: ангидритовая стяжка* – армирующий материал – полипропиленовая сеть (ячейка (6×6) мм, толщина нити – 1 мм); ангидритовая стяжка** – армирующий материал – оцинкованная стальная сваренная сеть (ячейка (6×6) мм, толщина проволоки – 0,5 мм); ангидритовая стяжка*** – армирующий материал – два слоя оцинкованной стальной сваренной сети (ячейка (6×6) мм, толщина проволоки – 0,5 мм).

Note: Reinforcement material: anhydrite screed* – reinforcement material – polypropylene mesh (cell (6×6) mm, thread thickness – 1 mm); anhydrite screed** – reinforcement material – galvanized steel welded mesh (cell (6×6) mm, wire thickness – 0,5 mm); anhydrite screed*** – reinforcement material – two layers of galvanized steel welded mesh (cell (6×6) mm, wire thickness – 0,5 mm).

Было проведено исследование условий получения, составов и свойств минеральных швеллеров на основе техногенного ангидритового вяжущего [20]. Наиболее практичным является минеральный ангидритовый швеллер с габаритными размерами 2700×120×60 мм и толщиной ребер и полочки, равной 30 мм (рис. 7).

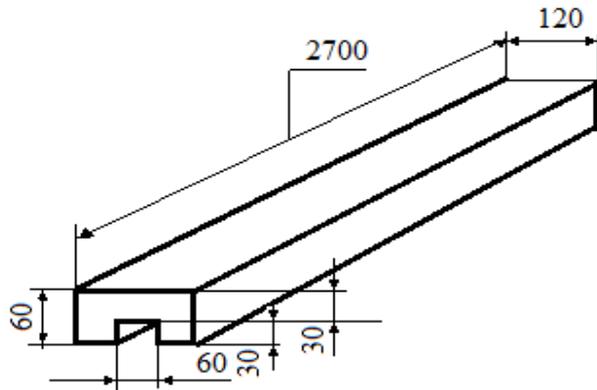


Рис. 7. Минеральный швеллер
Fig. 7. Mineral channel

Прочностные характеристики определяли с помощью стандартных образцов – балок размером (160×40×40) мм. За минимальный предел прочности на изгиб выбрали значение 0,5 МПа, если швеллер будут применять в качестве тротуарного покрытия (0,03 МПа – это среднее значение давления ступней ног человека на основание).

Влияние вида армирования и времени схватывания ангидритового бетона в швеллере представлены в табл. 5 и на рис. 8.

Таблица 5. Влияние армирования на предел прочности изгибу ангидритовых швеллеров

Table 5. Reinforcement effect on flexural strength of anhydrite channels

Время выдержки образцов, сутки Sample holding time, day	Армирование ПП ¹ σ _{изг} Reinforcement PP ¹	Армирование СС ² σ _{изг} Reinforcement WS ²	Армирование СС ³ σ _{изг} Reinforcement WS ³
	σ _{bend}	σ _{bend}	σ _{bend}
	Мпа/МПа		
7	0,23	1,32	1,73
14	0,40	2,48	3,28
28	0,59	3,38	4,44

Примечание: 1 – армирование полипропиленовой сеткой (ячейка (6×6) мм, толщина нити – 0,5 мм); 2 – армирование металлической сеткой в один слой (ячейка (6×6) мм, толщина проволоки – 0,5 мм); 3 – армирование металлической сеткой в два слоя (ячейка (6×6) мм, толщина проволоки – 0,5 мм).

Note: 1 – reinforcement with polypropylene mesh (cell (6×6) mm, thread thickness – 0,5 mm); 2 – reinforcement with one-layer metal mesh (cell (6×6) mm, wire thickness – 0,5 mm); 3 – reinforcement with two-layer metal mesh (cell (6×6) mm, wire thickness – 0,5 mm).

Немаловажным качеством для строительных изделий является их водостойкость. Одним из путей повышения гидрофобности твердых материалов является адсорбционное модифицирование с помощью поверхностно-активных веществ (ПАВ).

В опытах использовали анионные ПАВ в качестве образца: сульфенол – C_nH_{2n+1}CH₂SO₃Na, n=12–18.

В табл. 6 и на рис. 9 приведены результаты испытаний образцов на сжатие после 7 суток выдержки после замачивания образцов и без него.

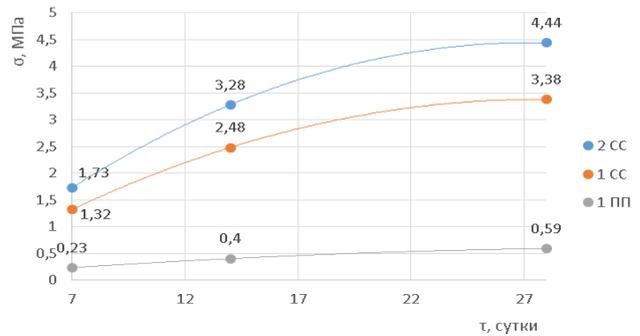


Рис. 8. Влияние армирования и времени выдержки ангидритового швеллера на прочность образцов при изгибе

Fig. 8. Effect of reinforcement and curing time of anhydrite channel on flexural strength of specimens

Таблица 6. Зависимость прочности и водостойкости ангидритовых образцов от содержания ПАВ

Table 6. Dependence of strength and water resistance of anhydrite samples on surfactant content

Содержание ПАВ относительно ТАВ, мас. % Surfactant content relative to TAB, wt %	Сульфенол/Sulfonol		Коэффициент водостойкости образцов, k Water resistance coefficient, k
	Предел прочности на сжатие, МПа Compressive strength, MPa		
	Без замачивания Without soaking	После замачивания After soaking	
0,005	8,90	7,34	0,83
0,01	7,87	7,33	0,93
0,02	6,69	5,53	0,83

Полученные данные показали, что добавка ПАВ существенно повышает коэффициент водостойкости. Причем добавка сульфенола в количестве 0,02 мас. % относительно водорастворимого сульфата кальция (ВСК) во фторангидрите фракции 0,2–0,63 мм позволяет получать растворы, обладающие прочностью после твердения через 28 суток, требуемой для строительства зданий высотой до 5 этажей и требуемой водостойкостью не ниже 0,75. В связи с тем, что ПАВ – это целевой продукт для тушения пожаров за счет повышения пенообразования огнетушащего средства, это основа стиральных порошков, было предложено заменить в производстве строительных материалов сульфенол на ил гидрорезки материалов, направляемый в настоящее время в отвал.

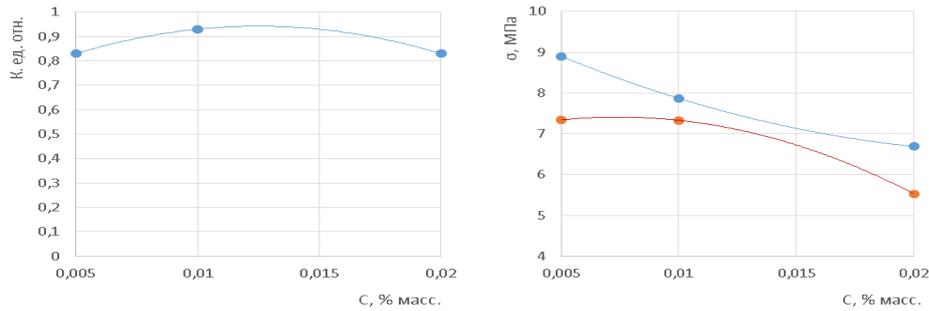


Рис. 9. Влияние содержания сульфонола (C) на водостойкость (K, ед. отн.) и на прочность (σ, МПа) ангидритовых образцов

Fig. 9. Sulfonol concentration (C) effect on water resistance (K, r.m.s.) and on strength (σ, MPa) of anhydrite specimens

В табл. 7 отображены данные влияния ила на прочность и водостойкость образцов, время выдержки которых составляло 7 суток. В опытах использовали ТАВ 10 (техногенное ангидритовое вяжущее, марочность которого составляет 10 МПа), отсев гравия, высушенный ил гидрорезки материалов, воду техническую.

Таблица 7. Влияние ила на прочность и водостойкость ангидритовых образцов (время выдержки – 7 суток)

Table 7. Silt effect on strength and water resistance of anhydrite specimens (curing time 7 days)

Количество Amount of				Предел прочности сжатию Compressive strength		Коэф. водо- стойкости, к Water re- sistance coefficient, k
ТАВ	отсева screenings	высушенного ила dried sludge	воды water	до замачивания before soaking	после замачивания after soaking	
г/г				МПа/МПа		
800	80	4,0	220	9,0	7,8	86,7
800	80	8,0	225	11,5	10,6	92,0
800	80	12,0	225	11,3	10,3	91,1
800	80	16,0	225	10,0	9,0	90,0
800	80	24,0	225	8,0	7,0	87,5



Рис. 10. Лабораторные образцы ангидритовых швеллеров размером 240×60×30 мм

Fig. 10. Laboratory specimens of anhydrite channels with dimensions of 240×60×30 mm

Как видно по результатам табл. 7, ил гидрорезки в количестве 1–2 мас. % относительно техногенно-ангидритового вяжущего обеспечивает стабильно высокий коэффициент водостойкости (выше 90 %) ангидритового строительного материала. На рис. 10 показаны ангидритовые швеллеры в лабораторных испытаниях получения вышеназванных строительных изделий (габаритные размеры 240×60×30 мм).

Заключение

Проведенные лабораторные и полупромышленные испытания технологии получения техногенно-ангидритового вяжущего посредством усовершенствования процесса сухого способа нейтрализации фторангидрита с одновременной механоактивацией оригинальным измельчителем – дисмембратором, а также установления составов и режимов изготовления позволили получить варианты ресурсосберегающей строительной продукции требуемого качества.

Проведен расчет экономической выгоды переработки твердых отходов фтороводородного производства в Томском регионе согласно методике расчета исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства, утвержденной приказом Министерства природных ресурсов России 30.03.2007 г. [21].

В ценах 2007 года, пересчитанных посредством инфляционных коэффициентов на 2022 г., ориентировочно около 18000 р. составляют денежные сборы с 1 т фторангидрита, при этом 1 м³ ангидритового бетона принесет 1300 р. экономического эффекта, т.е. предотвращенный вред составит для Томского региона (18000 р.·15000 т фторангидрита)=270 млн р., а предполагаемый экономический эффект будет равен (1300 р/м³·(15000 т/год/0,9 т/м³))=21,6 м. р. в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронков Н.Н. Организация отделения активации, нейтрализации и отгрузки твердого отхода фтороводородного производства на сублиматном заводе АО «СХК» // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции. – Томск, 23–27 мая 2016. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 3. – С. 68–71.
2. The safety of fluoride compounds and their effect on the human body – a narrative review / A. Lubojanski, D. Piesiak-Panczyszyn, W. Zakrzewski, W. Dobrzynski, M. Szymonowicz, Z. Rybak, M. Dobrzynski // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – № 3. – P. 1241–1242.
3. Behavior and distribution of nuclides in the fluoride volatility process of uranium containing molten salt fuel / L. Sun, Y. Niu, C. Hu, X. Wang, Z. Zhao, J. Chen, Q. Li // *Journal of Fluorine Chemistry*. – 2022. – Vol. 261. – P. 110016–110017.
4. Lindley A. A. An inventory of fluorspar production, industrial use, and emissions of trifluoroacetic acid (TFA) in the period 1930 to 1999 // *Journal of Geoscience and Environment Protection*. – 2023. – Vol. 11. – № 3. – P. 1–16.
5. Villalba G., Ayres R. U., Schroder H. Accounting for fluorine: production, use, and loss // *Journal of Industrial Ecology*. – 2007. – Vol. 11. – № 1. – P. 85–101.
6. Meshri D.T. The modern inorganic fluorochemical industry // *Journal of fluorine chemistry*. – 1986. – Vol. 33. – № 1–4. – P. 195–226.
7. Fuge R. Fluorine in the environment, a review of its sources and geochemistry // *Applied Geochemistry*. – 2019. – Vol. 100. – P. 393–406.
8. Шашкель П.П. Отходы фосфогипса // *Химия и жизнь*. – 1982. – № 8. – С. 46–48.
9. Способ получения ангидритового вяжущего: пат. № 2277515, Российская Федерация, С2; заявл. 01.04.2002; опубл. 10.06.2006, Бюл. № 16. – 3 с.
10. Low energy synthesis of anhydrite cement from waste lime mud / M. Kamarou, D. Moskovskikh, H.L. Chan, H. Wang, T. Li, A.A. Akinwande, V. Romanovski // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. – 2023. – Vol. 98. – № 3. – С. 789–791.
11. Волкова О.В., Аниканова Л.А. Отвальный фторангидрит, как микронаполнитель для гипсовых и ангидритовых вяжущих // Наука и образование: отечественный и зарубежный опыт: Сборник трудов конференции Двадцать первой Международной научно-практической конференции. – Белгород, 17 июня 2019. – Белгород: ООО ГиК, 2019. – С. 13–18.
12. Зольно-ангидритовое вяжущее: пат. № 2620673, Российская Федерация, С2; заявл. 16.11.2015; опубл. 29.05.2017, Бюл. № 16. – 3 с.
13. High-quality gypsum binders based on synthetic calcium sulfate dihydrate produced from industrial waste / M. Kamarou, N. Korob, W. Kwapinski, V. Romanovski // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2021. – Vol. 100. – P. 324–332.
14. Анализ перспективности использования техногенного ангидрита в строительной промышленности / Ю.М. Федорчук, Ю.П. Похолков, А.А. Волков, И.А. Каратаев, Е.К. Прохорец // *Экология и промышленность России*. – 2009. – № 7. – С. 54–55.
15. Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar / C. Sun, L. Chen, J. Xiao, A. Singh, J. Zeng // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2021. – Vol. 170. – P. 105561.
16. Воробьев Х.С. Гипсовые вяжущие изделия (Зарубежный опыт). – М.: Стройиздат, 1983. – 201 с.
17. Болтенкова О.И., Новокщенова Т.А. Совершенствование технологии устройства бетонных полов с самовыравнивающимися стяжками // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Студент и наука*. – 2016. – № 10. – С. 20–24.
18. Протокол № 45/209 радиологического исследования строительного материала от 07 июня 2004 г. // ФГУ "Центр госсанэпиднадзора в Томской области", отделение радиационной гигиены. – Томск: «ЦГСЭН в Томской области», 2004. – 1 с.
19. Дисембратор: пат. № 2694313, Российская Федерация, С1; заявл. 18.09.2018; опубл. 11.07.2019, Бюл. № 20. – 5 с.
20. Некоторые особенности ресурсосберегающей технологии получения минеральных швеллеров из твердых отходов сублиматного производства ОА «СХК» / Ю.М. Федорчук, Д.В. Нарьжний, Л.А. Аниканова, М.А. Саденова, Н.В. Замятин // *Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития (SEWAN-2021)*. – 2021. – С. 247–248.
21. Российская Федерация. Министерство природных ресурсов и экологии. Приказ от 13 апреля 2009 г. № 87. Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства // Министерство юстиции Российской Федерации. – 2009. – № 87.

Информация об авторах

Юрий Митрофанович Федорчук, доктор технических наук, профессор отделения общетехнических дисциплин Школы базовой инженерной подготовки, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. fedorchukum@tpu.ru

Лилия Александровна Леонова, кандидат технических наук, доцент, руководитель образовательной программы отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. leonovala@tpu.ru

Егор Викторович Солодов, студент отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. evs71@tpu.ru

Элина Александровна Губа, студент отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. eag40@tpu.ru

Поступила в редакцию: 20.05.2024

Поступила после рецензирования: 18.10.2024

Принята к публикации: 28.11.2024

REFERENCES

1. Voronkov N.N. Organisation of activation, neutralisation and shipment of solid waste of hydrogen fluoride production at the sublimate plant of Stock Company «Siberian group of chemical enterprises». *Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference "Non-destructive testing: electronic instrumentation, technology, safety"*. Tomsk, TPU Publ. House, 2016. Vol. 3, pp. 68–71. (In Russ.)
2. Lubojanski A., Piesiak-Panczysyn D., Zakrzewski W., Dobrzynski W., Szymonowicz M., Rybak Z., Dobrzynski M. The safety of fluoride compounds and their effect on the human body – a narrative review. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 1241–1242. DOI: 10.3390/ma16031242.
3. Sun L., Niu Y., Hu C., Wang X., Zhao Z., Chen J., Li Q. Behavior and distribution of nuclides in the fluoride volatility process of uranium containing molten salt fuel. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2022, vol. 261, pp. 110016–110017. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2022.110016.
4. Lindley A.A. An inventory of fluorspar production, industrial use, and emissions of trifluoroacetic acid (TFA) in the period 1930 to 1999. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 1–16. DOI: 10.4236/gep.2023.113001.
5. Villalba G., Ayres R.U., Schroder H. Accounting for fluorine: production, use, and loss. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, vol. 11, no. 1, pp. 85–101. DOI: 10.1162/jiec.2007.1075.
6. Meshri D.T. The modern inorganic fluorochemical industry. *Journal of fluorine chemistry*, 1986, vol. 33, no. 1–4, pp. 195–226. DOI: 10.1016/S0022-1139(00)85278-1.
7. Fuge R. Fluorine in the environment, a review of its sources and geochemistry. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 100, pp. 393–406. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.12.016.
8. Shashkel P.P. Phosphogypsum wastes. *Chemistry and Life*, 1982, no. 8, pp. 46–48.
9. Fedorchuk Yu.M. *Method of obtaining anhydrite binder*. Patent RF, no 2277515, 2015. (In Russ.)
10. Kamarou M., Moskovskikh D., Chan H.L., Wang H., Li T., Akinwande A.A., Romanovski V. Low energy synthesis of anhydrite cement from waste lime mud. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2023, vol. 98, no. 3, pp. 789–791. DOI: 10.1002/JCTB.7284.
11. Volkova O.V., Anikanova L.A. Spoil fluorohydrate as a microfiller for gypsum and anhydrite binders. *Science and Education: domestic and foreign experience. Proceedings of the Twenty-first International Scientific and Practical Conference*. Belgorod, LLC GIK, 2019. pp. 13–18. (In Russ.)
12. Kozlova V.K., Konshin V.V., Afankov A.N., Afankova A.V., Roslyakova T.V. *Ash-anhydrite binder*. Patent RF, no. 2620673, 2017. (In Russ.)
13. Kamarou M., Korob N., Kwapinski W., Romanovski V. High-quality gypsum binders based on synthetic calcium sulfate dihydrate produced from industrial waste. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2021, vol. 100, pp. 324–332. DOI: 10.1016/j.jiec.2021.05.006.
14. Fedorchuk Y.M., Pokholkov Y.P., Volkov A.A., Karataev I.A., Prokhorets E.K. Prospectivity analysis of technogenic anhydrite use in construction industry. *Ecology and industry of Russia*, 2009, no. 7, pp. 54–55. (In Russ.)
15. Sun C., Chen L., Xiao J., Singh A., Zeng J. Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 170, 105561 p. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105561.
16. Vorobyev Kh.S. *Gypsum binders (foreign experience)*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 201 p. (In Russ.)
17. Boltenkova O.I., Novokshchenova T.A. Improvement of the technology of concrete floors with self-levelling screeds. *Scientific Bulletin of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Student and Science*, 2016, no. 10, pp. 20–24. (In Russ.)
18. Protocol No. 45/209 of radiological examination of construction material dated June 07, 2004. *Federal State Institution 'Centre of Gossanepidnadzor in Tomsk Region', Department of Radiation Hygiene*. Tomsk, «CSSS in Tomsk region», 2004. (In Russ.)
19. Zamyatin N.V., Fedorchuk Y.M., Matvienko V.V., Smirnov G.V., Naryzhny D.V., Voronkov N.N., Ryabtsev S.V., Sadenova M.A., Malinnikova T.P. *Dismembrator*. Patent RF, no. 2694313, 2019. (In Russ.)
20. Fedorchuk Y.M., Naryzhny D.V., Anikanova L.A., Sadenova M.A., Zamyatin N.V. Some features of resource-saving technology for obtaining mineral channels from solid wastes of Stock Company «Siberiangroup of chemical enterprises». *Sustainable and efficient use of energy, water and natural resources (SEWAN – 2021)*, 2021, pp. 247–248. (In Russ.)
21. Russian Federation. Ministry of Natural Resources and Ecology. Order no. 87 of 13 April 2009. *On Approval of the Methodology for Calculating the Amount of Harm Caused to Water Bodies as a Result of Violation of Water Legislation*. Ministry of Justice of the Russian Federation, 2009, no. 87. (In Russ.)

Information about the authors

Yuri M. Fedorchuk, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. fedorchukum@tpu.ru

Lilia A. Leonova, Cand. Sc., Associate Professor, Head of the General Education Program, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. leonovala@tpu.ru

Egor V. Solodov, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. evs71@tpu.ru

Elina A. Guba, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. eag40@tpu.ru

Received: 20.05.2024

Revised: 18.10.2024

Accepted: 28.11.2024