



П. А. ФЕДОРОВ
Д. А. СИНИЦИН
Г. Ю. ШАГИГАЛИН

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА ЕДКОГО НАТРА НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ ИЗ ПЫЛЕУНОСА МИНЕРАЛОВАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

INFLUENCE OF CONCENTRATION OF CAUSTIC SODIUM SOLUTION
ON THE STRUCTURE FORMATION OF CEMENT MATRIX
FROM FLOW DUST FROM MINERAL WOOL PRODUCTION

Одним из способов утилизации отходов минераловатного производства является использование их в щелочном гидравлическом вяжущем. Однако это требует оценки структуры сырья и влияния щелочного активатора на него. В статье приведены результаты исследования влияния концентраций раствора едкого натра 5,6,7,8,9,10 моль/л на свойства цементно-песчаного раствора из пылеуноса системы газоочистки вагранки минераловатного производства. Изучены особенности формирования цементной матрицы при изменении концентрации. Максимальная прочность на сжатие 28 МПа и на изгиб 7,1 МПа получена при концентрации 6 моль/л. Установлено, что при затворении водой пылеуноса образуется минерал гидроалюмосиликат кальция – жисмондин. При реакции геополимеризации жисмондин значительно снижается за счет образования N-A-S-H геля и цеолитов.

Ключевые слова: пылеунос, прочность на сжатие, прочность на изгиб, пористость, щелочной активатор, концентрация щелочи, едкий натр, структурообразование цементной матрицы

Введение

Известно, что цементная промышленность является одной из углеродоемких отраслей народного хозяйства [1]. В долгосрочной перспективе объемы применения сборного и монолитного бетона в мире останутся на вы-

соких показателях. Очевидно, именно в производстве цемента должна происходить активная инновационная деятельность по достижению углеродной нейтральности. Это возможно, во-первых, за счет модернизации технологии производства цемента, включающей применение глубокой переработки сырья, использо-

Keywords: dust entrainment, compressive strength, bending strength, porosity, alkaline activator, alkali concentration, sodium hydroxide, structuring of the cement matrix

соких показателях. Очевидно, именно в производстве цемента должна происходить активная инновационная деятельность по достижению углеродной нейтральности. Это возможно, во-первых, за счет модернизации технологии производства цемента, включающей применение глубокой переработки сырья, использо-

вание альтернативных сырьевых материалов, возобновляемых источников энергии, освоение инновационных технологий улавливания парниковых газов и пр. Во-вторых, внедрением в строительство вяжущих с частичной или полной заменой клинкерного цемента альтернативными бесклинкерными вяжущими, такими как щелоче-щелочноземельными гидравлическими вяжущими или геополимерами [2–4].

Щелоче-щелочноземельные гидравлические вяжущие обладают более плотной структурой цементной матрицы по сравнению с портландцементом. Однако для достижения высоких физико-механических показателей необходимо осуществлять подбор сырьевых материалов, выбор и концентрацию водного раствора щелочи, режима твердения и пр.

Одним из перспективных сырьевых материалов для вяжущих являются отходы минераловатного производства [5, 6], в том числе пылеунос системы газоочистки ваграночных газов. Пылеунос является низкоосновным и содержит кремнеземистые и алюмосиликатные элементы, способствующие гидратации при щелочной активации раствором NaOH [5].

По данным В.Д. Глуховского и др. [7] при твердении шлакощелочных бетонов процессы твердения можно ускорить за счёт повышения щелочной среды. Так, повышение концентрации гидроксида натрия и метасиликата натрия до 30 % (9,96 М для NaOH) при твердении в нормальных условиях через 3–4 месяца приводит к кристаллизации щелочных алюмосиликатов. В работе [8] установлено, что минимальная концентрация NaOH, необходимая для структурообразования геополимера, составляет 8 М. В работе [9] установлено, что оптимальная концентрация NaOH для геополимера на основе золы уноса составляет 6 М.

Влияние концентрации раствора NaOH зависит от химического состава вяжущего. Однако большинство рассмотренных результатов исследований в этом направлении были получены на золе уноса угольных станций и гранулированном доменном шлаке с повышенным содержанием CaO. С появлением новых составов щелочного и щелочноземельного вяжущего на основе техногенных отходов и разных типов щелочных компонентов подобные результаты практически отсутствуют.

Таким образом, цель настоящего исследования состояла в том, чтобы оценить степень влияния разной концентрации щелочного активатора на структурообразование цементной матрицы и физические свойства цементно-песчаного раствора на основе вяжущего из пылеуноса системы газоочистки вагранки минераловатного производства.

Материалы и методики

Для исследования были приняты составы цементно-песчаного раствора с разной молярной концентрацией раствора едкого натра 5, 6, 7, 8, 9, 10 моль/л. Расход сырьевых компонентов приведён в таблице.

Подвижность растворной смеси всех составов принималась на уровне распыла конуса 106–107 мм, поэтому водовязующее отношение корректировалось в зависимости от плотности щелочного активатора.

Твердение образцов осуществлялось по рекомендациям [7]. Режим тепловлажностной обработки принят одноступенчатый 3+6+3 ч, максимальная температура выдержки составляла 90 °С.

В качестве вяжущего применялся пылеунос из системы очистки газов вагранки минераловатного производства (ООО «Агидель», Респу-

Количественное содержание компонентов принятых составов для исследования
Quantitative content of components of accepted compositions for research

Тип состава	Щелочной активатор				Вязущее Пылеунос (Вж), кг/м ³	В/Вж (Ща/Вж)	Песок, кг/м ³
	Молярная концентрация $c_{\text{м}}$, моль/л	Едкий натр (сух.), кг/м ³	Вода (В), кг/м ³	Щелочной активатор (Ща), кг/м ³			
Эт	0	–	225	225	450	0.50 (0.50)	1350
Ia	5	52.15	256.85	309	450	0.51 (0.69)	1350
Iб	6	64.52	262.48	327	450	0.51 (0.73)	1350
Iв	7	75.94	262.06	338	450	0.50 (0.75)	1350
Iг	8	89.60	267.40	357	450	0.50 (0.79)	1350
Id	9	105.02	274.98	380	450	0.50 (0,84)	1350
Ie	10	118.89	276.11	395	450	0.49 (0,87)	1350

блика Башкортостан). Он представляет собой смесь серого цвета, просеянную через сито 0.16 мм и подвергнутую механической активации в шаровой мельнице в течение 120 с. Средняя удельная поверхность составляет 730 м²/кг. Согласно результатам, приведенным в работе [5], вяжущее является низкоосновным, содержание СаО не превышает 14 % масс. Минералогический состав включает кремнеземистые и алюмосиликатные образования, такие как кварц, акерманит, геленит и др. Степень кристалличности пылеуноса составляет 37 %. Аморфная фаза представляет собой стекловидные образования из минералов габбро-базальтовой группы.

Для приготовления щелочного активатора применялся натр едкий технический чешуирующий (АО «БСК», Республика Башкортостан). Для растворения гранул NaOH и приготовления состава Iэт применялась питьевая вода по ГОСТ 23732-2011.

Мелкий заполнитель представлял собой полифракционный кварцевый песок, составленный из промытого карьерного песка (п. Кабаково, Республика Башкортостан) в соответствии с требованиями ГОСТ 30744-2001.

Прочностные свойства оценивались по прочности на сжатие и изгиб образцов призм размером 40x40x160 мм. Прочность на сжатие образцов после первых суток твердения при комнатной температуре определялась неразрушающим методом контроля с помощью прибора «ОНИКС». Разрушение образцов проводили на гидравлическом прессе «ПГМ-500МГ4» по ГОСТ 30744-2001.

Для оценки влияния концентрации щелочного компонента на структурообразование цементной матрицы применялись тонкие ме-

тоды анализа: рентгенофазовый качественный анализ, электронная микроскопия, дифференциально-термический анализ. Для исследования использовались пробы из образцов с наилучшими прочностными характеристиками, а именно – составы Ia, Ib, Iv. Рентгенофазовый качественный анализ проводился с помощью дифрактометра «D2 Phaser». Дифференциально-термический анализ проб проводился на приборе синхронного термического анализа «Netzsch STA 499 F3 Jupiter». Нагрев осуществлялся до 1000 °С. Для исследования морфологии поверхности цементной матрицы, а также элементного состава применялся растровый электронный микроскоп «JEOL JSM-6610lv» с энергодисперсионным анализатором частиц.

Результаты и дискуссия

Результаты испытаний исследуемых образцов с различной концентрацией щелочного активатора на определение прочности на сжатие и изгиб после тепловлажностной обработки приведены на рис. 1.

По сравнению с образцом Iэт образцы, активированные NaOH, имеют более высокие значения прочности на сжатие и изгиб. Динамика изменения прочности на сжатие показывает пикообразный характер распределения с максимальным для состава Ib (6 моль/л). Для этого состава значение прочности на сжатие составляет 28 МПа. Минимальные значения прочности на сжатие показал состав Ie с 8,5 МПа. Разница значений прочности на сжатие, определенная при механических испытаниях с помощью пресса, совпадает со значениями, полученными при неразрушающем методе испытания. Разница для состава Iэт составляет 28 %, для состава Ib – 33 %.

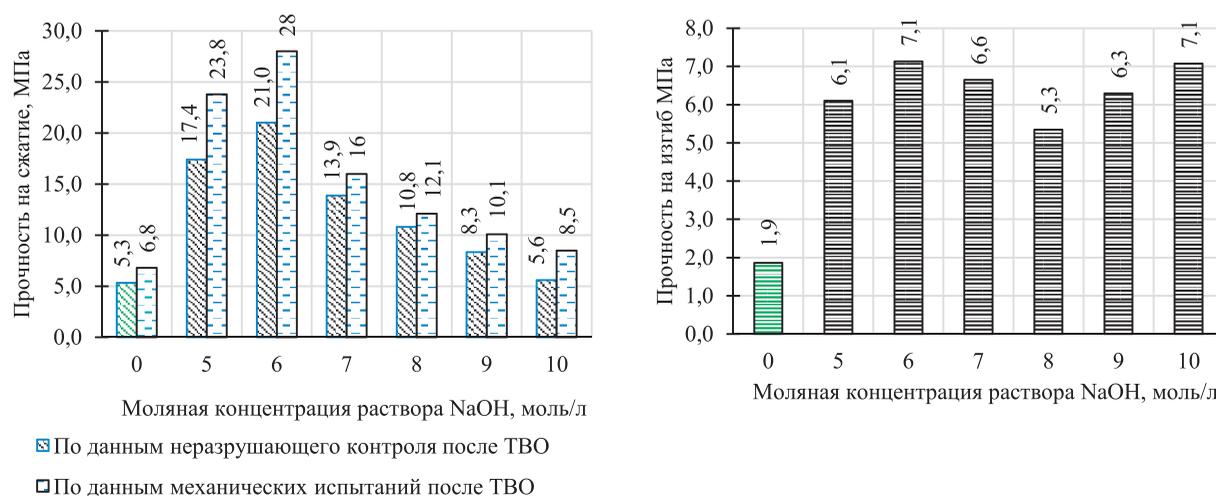


Рис.1. Результаты определения прочности на сжатие и изгиб
 Fig.1. Results of determining compressive and bending strength

Распределение значений прочности на изгиб исследуемых образцов в целом показало разнонаправленный характер распределения. Так, максимальные значения имеют составы Ib и Ic – 7,1 МПа, минимальное значение получено для образцов состава Ig – 5,3 МПа.

Дериватограммы дифференциально-термического анализа исследуемых составов Iэт, Ia, Ib, Ic приведены на рис. 2. Для всех составов на кривой ДСК характерно два больших колебания. Первый участок с эндотермическим эффектом, вызванным процессом дегидратации составов, протекает в диапазоне от 50 до 375 °С. При этом наиболее раннее окончание этого процесса получено для состава Ia на уровне 348,5 °С. Площадь эндотермического эффекта для всех составов разная. Наибольшую площадь 627,3 Дж/г показал состав Iэт, наименьшее значение 375,5 Дж/г – состав Ia.

Экзотермический эффект, вызванный, очевидно, разложением карбонатных пород и высвобождением CO₂, наблюдается в диапазоне: начало процесса от 356,7 до 505 °С; конец процесса – от 774 до 915,3 °С. Наибольшую площадь экзотермического эффекта имеет состав Iэт – 667, Дж/г, наименьшую 600,8 Дж/г – Ib. Для состава Iэт характерно более плавное протекание реакции. Для составов Ia, Ib и Ic характерен излом на начальном этапе реакции, последующий – более острый пик, площадка стабилизации реакции и последующее окончание реакции в виде кривой с изломами. Период стабилизации наибольший у состава Ib, у состава Ia – практически отсутствует.

Экзотермический эффект, вызванный, очевидно, разложением карбонатных пород и высвобождением CO₂, наблюдается в диапазоне: начало процесса от 356,7 до 505 °С; конец процесса – от 774 до 915,3 °С. Наибольшую площадь экзотермического эффекта имеет состав Iэт – 667, Дж/г, наименьшую 600,8 Дж/г – Ib. Для состава Iэт характерно более плавное протекание реакции. Для составов Ia, Ib и Ic характерен излом на начальном этапе реакции, последующий – более острый пик, площадка стабилизации реакции и последующее окончание реакции в виде кривой с изломами. Период стабилизации наибольший у состава Ib, у состава Ia – практически отсутствует.

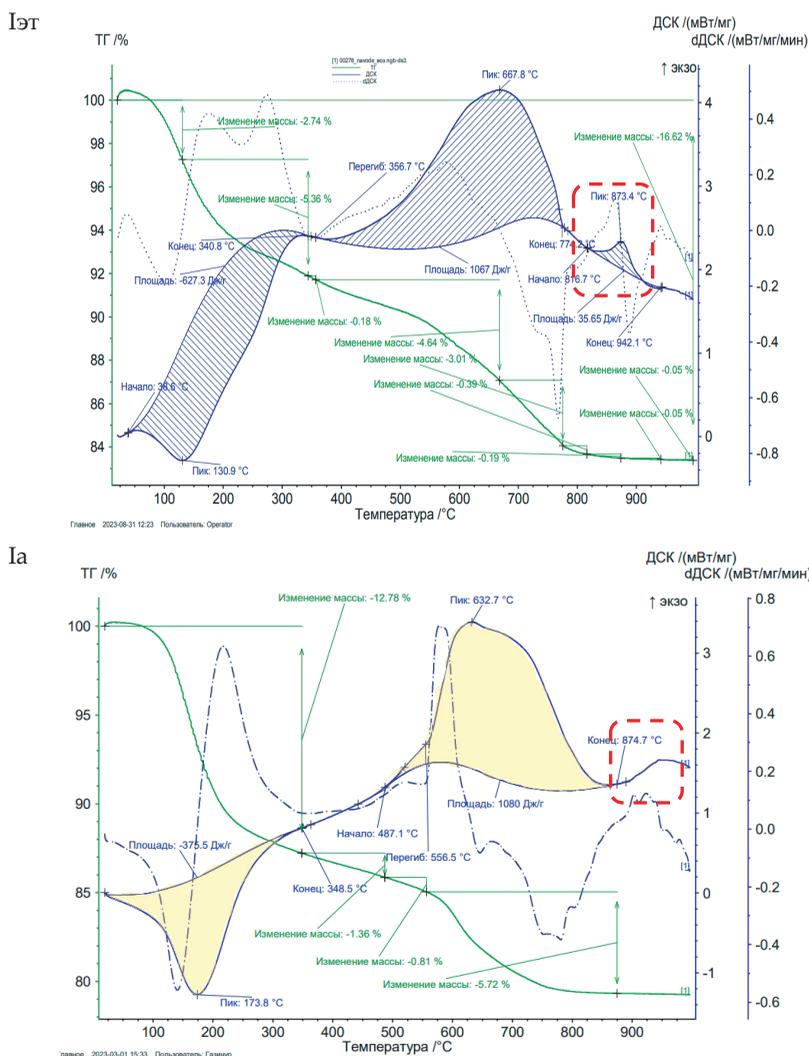


Рис. 2. Дериватограммы исследуемых составов Iэт, Ia
 Fig. 2. Derivatograms of the studied compositions Iet, Ia

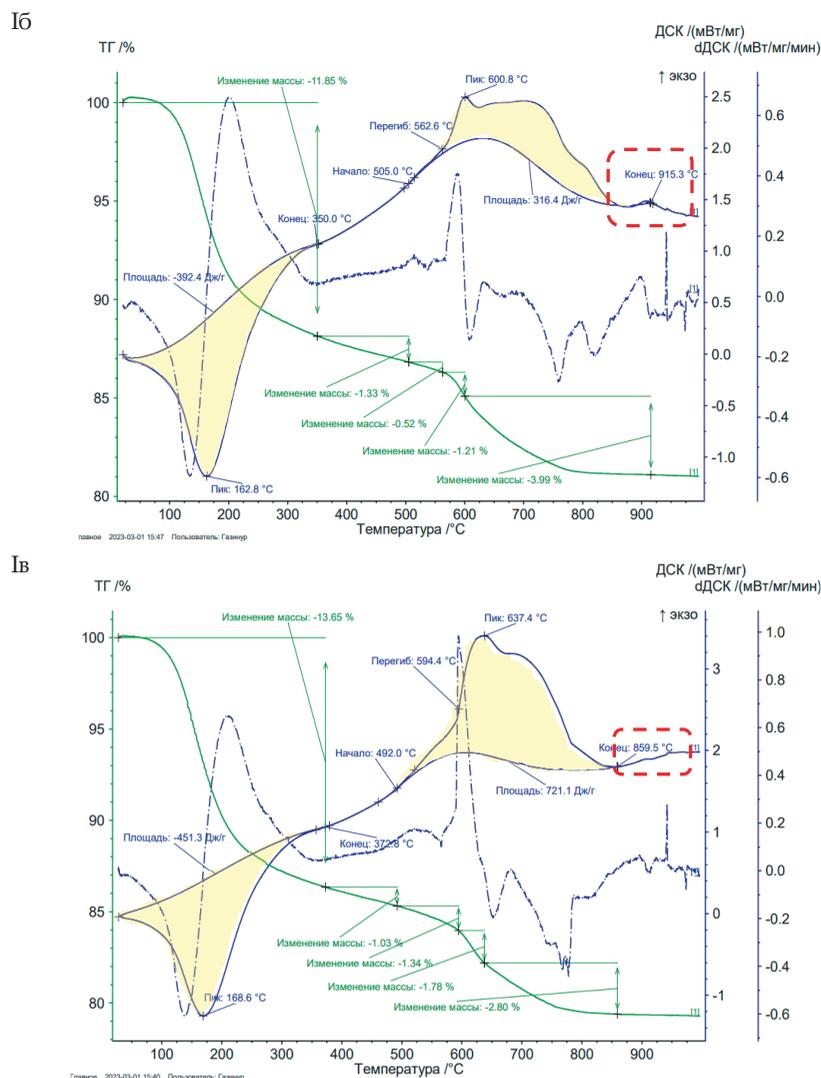


Рис. 2. Дериватограммы исследуемых составов Иб, Ив
Fig. 2. Derivatograms of the studied compositions Ib, Iv

Необходимо отметить, что для состава Иэт также присутствует третье колебание кривой ДСК – ярко выраженный экзотермический эффект в диапазоне 817-942 °С с пиком 873,4 °С. Возможно, он вызван продолжением разложения карбонатных соединений, таких как кальцит. Для составов Ia, Ib и Iv это колебание сглаживается. Динамика выравнивания кривой ДСК, как видно из рис. 4, зависит от концентрации щелочного активатора.

Термогравиметрический анализ показал, что потеря массы при протекании эндотермической реакции для состава Иэт составила 8,1 %, для состава Ia – 12,78 %, Ib – 11,85 %, Iv – 13,65 %. Низкие значения потери массы у эталонного состава объясняются тем, что перед испытанием образцы этого состава отдали часть влаги в атмосферу ввиду высокой

степени пористости. Состав Ib показал низкую степень потери массы, очевидно, из-за низкой степени пористой структуры по отношению к другим составам.

С целью изучения влияния концентрации щелочного активатора на морфологическую структуру сформированной цементной матрицы была получена серия изображений (рис. 3) трех типов образцов, полученных с помощью растрового электронного микроскопа.

Из рис. 3 видно, что образцы в целом имеют плотную структуру, однако существуют микротрещины с разной степенью раскрытия. Наиболее плотная структура характерна для состава с высокой прочностью Ib. Для состава Iv характерно увеличенное раскрытие трещин. Возможно, это связано с появлением щелочной коррозии заполнителя, вызванной реакцией

щелоче-кремниевой кислоты на его поверхность и последующим появлением значительного объема геля рыхлой структуры [10]. Так, из микроснимков видно, что на поверхности частиц пылеуноса и мелкого заполнителя образуются в виде паутины или наложения из геля N-A-S-H и кристаллических структур новообразований. Степень этого наложения ме-

няется в зависимости от концентрации щелочно-го активатора. Наибольшая степень образования геля соответствует составу Iв с концентрацией 7М. В целом анализ морфологии образцов свидетельствует о габитусе гидратных фаз, который схож с минералогической группой цеолитов листоватой или пластинчатой формы (особенно для состава Iв) или волокнистой формы.

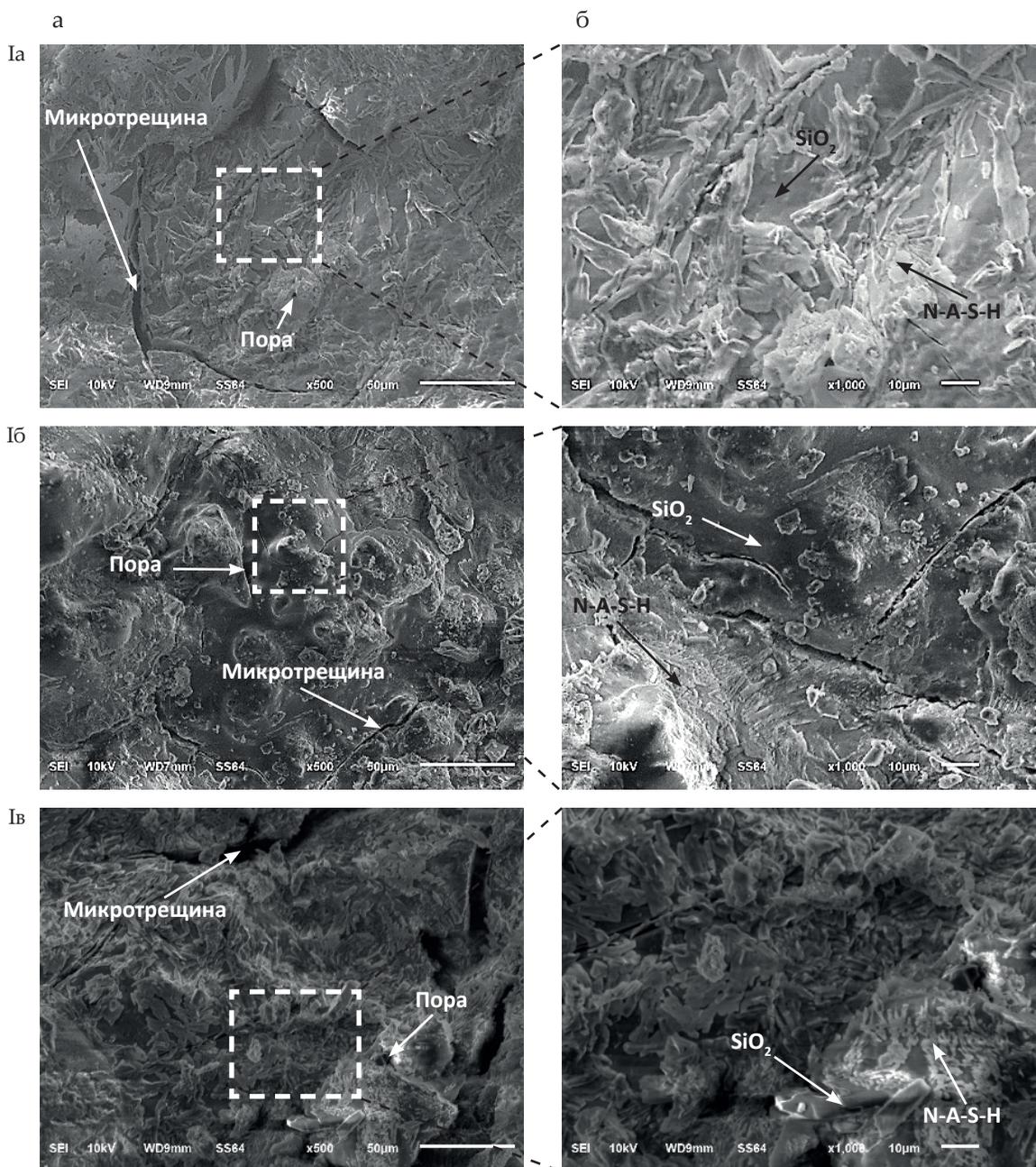


Рис. 3. Снимки морфологической структуры исследуемых составов Iа, Iб, Iв, выполненные при x500 (а) и x1000 (б) кратном увеличении
 Fig. 3. Photographs of the morphological structure of the studied compositions Iа, Iб, Iс taken at x500 (а) and x1000 (б) multiple magnification

Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭРС) проводилась для новообразований образца Ib, так как он показал наибольшее скопление геля N-A-S-H. Для исследования было выбрано две характерные точки – спектры (рис. 4). Первый спектр показывает структуру нижнего слоя новообразований. Верхний спектр – содержание элементов в поверхностном слое.

Как видно из рис. 4, структура пластинчатых кристаллов для двух спектров преимущественно состоит из элементов Na, O, Mg, Si и Ca. Также отмечается присутствие элементов Al и Fe. Количественный анализ показал, что максимальные пропорции элементов характерны для O (спектр 1 – 53,59 %, спектр 2 – 56,63 %). Так как щелочной активатор на частицу пылиносителя влияет с внешней стороны, то содержание элемента Na ниже в спектре 1 (7,44 %) в отличие от поверхностных слоев спектра 2 (10,45 %). В свою очередь, количество элементов Si в спектре 1 составляет 24,55 %, в спектре 2 – 19,06 %. Содержание Al и Ca в двух спектрах – менее 2 %. Это означает, что для рассматриваемого образца формирование цементной матрицы, очевидно, связано с реакцией между щелочным активатором

и частицами пылиносителя, состоящими преимущественно из кремнеземистых структур. На основе анализа морфологии и спектроскопии можно предположить, что в образце из-за геля N-A-S-H фактически отсутствуют гидратные фазы взаимодействия активного CaO с водным раствором щелочи.

Результаты качественного анализа дифрактограмм исследуемых образцов, полученных из составов Iэт, Ia, Ib и Iv, приведены на рис. 5. На всех дифрактограммах отчетливо определяется кварц с пиками в двойных углах 20.92°, 26.69°, 50.20° и т. д. Это связано с тем, что он присутствует в сухом компоненте вяжущего и заполнителя.

Основными минералами, не вступившими в процесс гидратации пылиносителя в составе Iэт, являются минералы геленит (28.97°, 31.19°, 51.93° и т. д.), нефелин (20.82°, 23.03°, 27.15° и т. д.) и полевые шпаты. Присутствие нефелина и полевых шпатов связано с тем, что их добавляют при производстве минеральной ваты. Продуктами гидратации пылиносителя с водой для этого состава является кальциевый цеолит жисмондин (20.82°, 27.90°, 28.53° и т. д.) и муско-

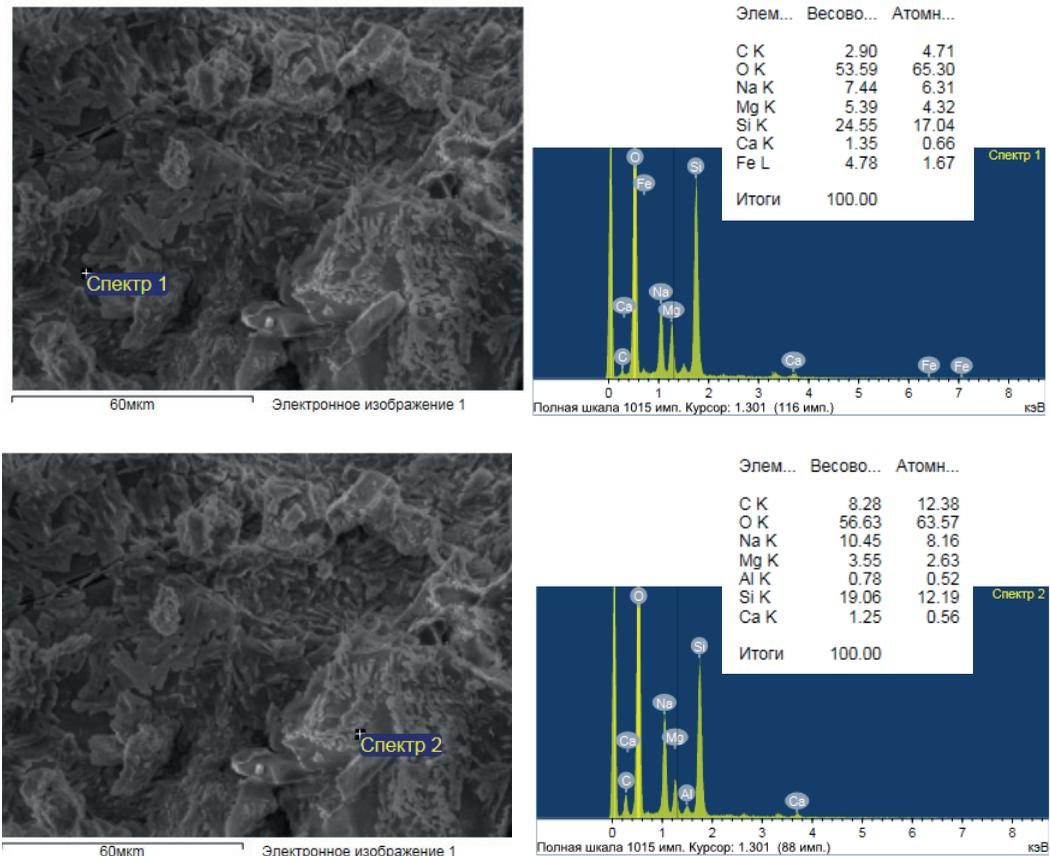


Рис. 4. Результаты ЭРС
Fig. 4. EDS results

вит (23.03°, 23.93°, 27.90° и т. д.). Ввиду низкой основности химического состава пылеуноса основным ресурсным минералом для гидратации является геленит.

Продуктами гидратации составов Ia, Ib, Iv являются N-A-S-H гель (22.05°, 27.95°, 29.05° и т. д.) и жисмондин. Кроме того, возможно, присутствуют в незначительных количествах минералы типа пиктолита (26.63°, 29.05°, 32.83° и т. д.) и гмелинита (20.86, 22.05, 31.22 и т. д.).

При сравнении дифрактограмм эталонного состава Iэт с составами на основе щелочной активации раствором NaOH Ia, Ib и Iv видно, что интенсивность пиков жисмондина уменьшается. Так, в двойном угле 20.82° интенсивность при вычете фона для Iэт составляет 537, а для Iv – 213. Кроме того, уменьшаются пики для геленита и нефелина. Это связано с более активным процессом геополимеризации и связыванием этих минералов в структуры N-A-S-H геля и минералов цеолитовой группы. Для образца Ib характерен большой пик в двойном угле 29.48°. Образование этого пика, возможно, связано с содержанием в пробе большого количества гидратных фаз цеолитовой группы.

Полученные результаты показывают, что концентрированные щелочные растворы едкого натра способствуют активации низкоосновной щелочной пылеуноса. Особенности начала реакции взаимодействия кремнеземистых и алюмосиликатных соединений и последующий переход в другие фазы определяются ха-

рактеристиками реакции геополимеризации пылеуноса и концентрацией NaOH. В работе [11] указывается, что в основе перехода от начала реакции геополимеризации до ее окончания лежит растворение сырья в условиях действия водных растворов щелочей металлов, приводящее к образованию реакционноспособных предшественников $Si(OH)_4$ и $Al(OH)_4$, а также полимеризация и осаждение системы, приводящие к конденсации молекул Si-O-Al в различные соединения.

При малых концентрациях (до 6М) прочность достигается при совместном образовании части гидратных фаз при воздействии воды на активный CaO в сырье (без образования гидрата силиката кальция «портландит») и воздействии на кремнеземистые и алюмосиликатные минералы NaOH. Однако при высоких концентрациях (более 7М) прочность понижается. Возможно, это связано с исчерпанием резерва из кремнеземистых соединений из-за образования геля N-A-S-H и минералов цеолитовой группы. Этот вывод согласуется с результатами Marvila и др. в работе [12]. Они установили, что при высоких концентрациях (более 7,5М) происходит насыщение цементной матрицы соединениями, содержащими элемент Na, вызывая формирование внутри образца хрупкой области черного цвета, а на поверхности появляются высолы белого цвета. Кроме того, может проходить процесс щелочной коррозии заполнителя, вызывающей также растрескивание структуры матрицы.

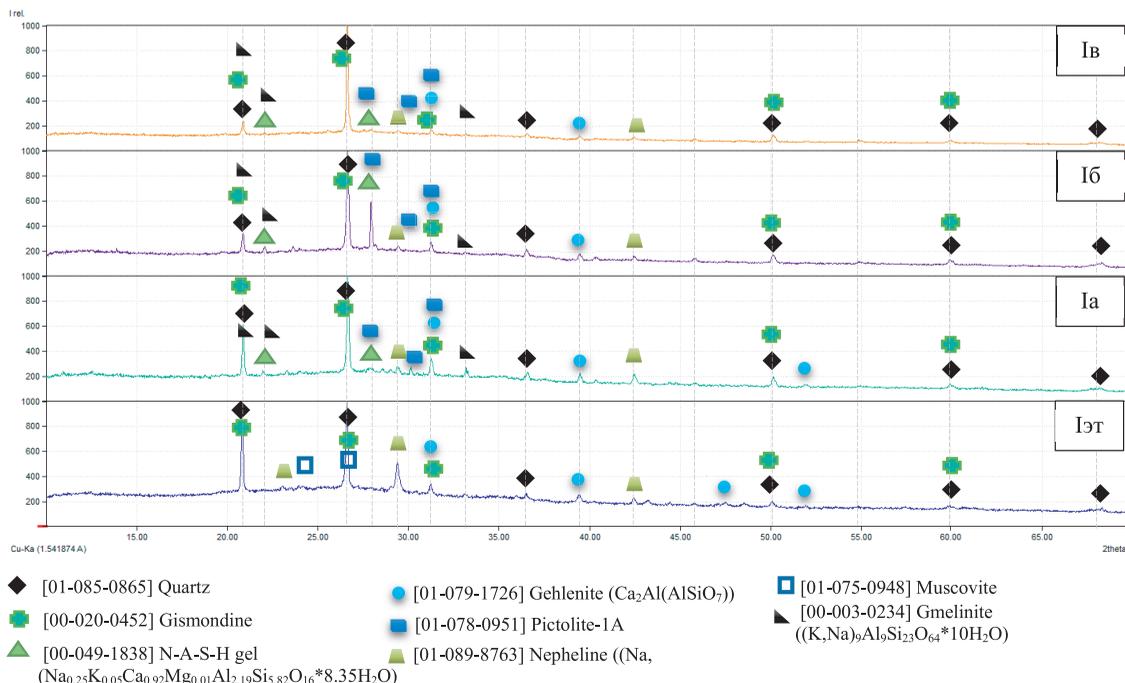


Рис. 5. Рентгенограммы исследуемых составов
 Fig. 5. X-ray patterns of the studied compositions

Выводы. 1. При использовании пылеуноса из системы газоочистки вагранки минераловатного производства наибольшая прочность на сжатие составляет 28 МПа и прочность на изгиб 7,1 МПа после выдержки в камере тепловлажностной обработки достигается при концентрации щелочи едкого натра 6М. Наименьшую прочность на сжатие 6,8 МПа и прочность на изгиб 1,9МПа имеет состав на основе пылеуноса, затворенный водой.

2. Водопоглощение по массе повышается с увеличением концентрации, при этом наибольшая разница наблюдается для составов, активированных щелочью с концентрацией 7М и 9М. Изменение концентрации с 5М до 10М щелочного активатора существенно не влияет на среднюю плотность образцов.

3. Основным продуктом гидратации при затворении водой пылеуноса является минерал жисмондин. При щелочной активации количество этого минерала снижается с увеличением концентрации щелочного активатора. При малых концентрациях цементная матрица формируется двумя реакциями: первая – реакция взаимодействия активного СаО с водой, с образованием жисмондина; вторая – реакция геополимеризации с образованием геля N-A-S-H и минерала пиктолита.

4. При высоких концентрациях более 7М образуются микротрещины, вызванные либо исчерпанием резервного фонда из активных кремнеземистых алюмосиликатных соединений и образованием геля N-A-S-H и минералов диалитовой группы, либо щелочной коррозией заполнителя.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Приоритет 2030». Тема исследования СП4_ТД_Б6 «Разработка низкоуглеродистых цементных систем».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Хегде С.Б. Цементная промышленность стремится к углеродной нейтральности // Цемент и его применение. 2023. № 1. С. 66–69.
- Саламанова М.Ш., Муртазаев С.-А.Ю., Нахаев М.Р. Возможные пути альтернативного решения проблем в цементной индустрии // Строительные материалы. 2020. № 1–2. С.73–77. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77.
- Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Композиционные шлакощелочные вяжущие с минеральными добавками различного типа активности // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2013. № 16. С.204–216.
- Ерошкина Н.А., Коровкин М.О. Геополимерные строительные материалы на основе промышленных отходов. Пенза: ПГУАС, 2014. 128 с.
- Fedorov P., Sinitsin D. Alkali-Activated Binder Based on Cupola Dust of Mineral Wool Production with Mechanical Activation // Buildings. 2022. Vol. 12, No. 10. P. 1565. DOI: 0.3390/buildings12101565.
- Ерофеев В.Т., Родин А.И., Якунин В.В., Богатов А.Д., Бочкин В.С. Шлакощелочные вяжущие из отходов производства минеральной ваты // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 6(82). С. 219–227. DOI: 10.18720/МСЕ.82.20.
- Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны. Киев: Будівельник, 1978. 184 с.
- Geetha S., Ramamurthy K. Properties of sintered low calcium bottom ash aggregate with clay binders // Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. № 4. P. 2002–2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.051
- Görhan G., Kürklü G. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures // Composites Part B: Engineering. 2014. Vol. 58. P. 371–377. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.10.082
- Штарк И., Вухт Б. Долговечность бетона. Киев: Оранта, 2004. 295 с.
- Burduhos Nergis D.D., Abdullah M.M.A.B., Sandu A.V., Vizureanu P. XRD and TG-DTA Study of New Alkali Activated Materials Based on Fly Ash with Sand and Glass Powder // Materials. 2020. Vol. 13. № 2. P. 343. DOI:10.3390/ma13020343.
- Marvila M.T., Azevedo A.R.G., Zanelato E.B., Lima T.E.S., Delaqua G.C.G., Vieira C.M.F., Pedroti L.G., Monteiro S.N. Study of Pathologies in Alkali-Activated Materials Based on Slag // Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2021 : The Minerals, Metals & Materials Series/ eds. J. Li et al. Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 523–531. DOI: 10.1007/978-3-030-65493-1_53.

REFERENCES

- Herge S.B. Cement industry striving for carbon neutrality. *Cement i ego primenenie* [Cement and its use], 2023, no. 1, pp. 66–69. (in Russian)
- Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A. Yu., Nakhaev M.R. Possible alternative solutions to problems in the cement industry. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2020, no. 1–2, pp.73–77. (in Russian) DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2- 73-77.
- Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Composite slag-alkali binders with mineral additives of various types of activity. *Vestnik volzhskogo regional'nogo otdelenija rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nyh nauk* [Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences], 2013, no. 16, pp. 204–216. (in Russian)
- Eroshkina N.A., Korovkin M.O. *Geopolimernye stroitel'nye materialy na osnove promyshlennyh othodov* [Geopolymer building materials based on industrial waste]. Penza, PGUAS Publ., 2014. 128 p.

5. Fedorov P., Sinitsin D. Alkali-Activated Binder Based on Cupola Dust of Mineral Wool Production with Mechanical Activation. *Buildings*. 2022. V. 12, N. 10. P. 1565. DOI: 10.3390/buildings12101565.
6. Erofeev V.T., Rodin A.I., Jakunin V.V., Bogatov A.D., Bochkin V.S. Slag-alkaline binders from mineral wool production waste. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2018, no. 6(82), pp. 219–227. (in Russian) DOI: 10.18720/MCE.82.20.
7. Gluhovskij V.D., Pahomov V.A. *Shlakoshhelochnyye cementy i betony* [Slag-alkaline cements and concretes]. Kyiv, Budivelnik Publ., 1978. 184 p.
8. Geetha S., Ramamurthy K. Properties of sintered low calcium bottom ash aggregate with clay binders. *Construction and Building Materials*. 2011. V. 25. N. 4. pp. 2002–2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.051.
9. Görhan G., Kürklü G. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymers cured at different temperatures. *Composites Part B: Engineering*. 2014. V. 58. P. 371–377. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.10.082.
10. Shtark I., Viht B. *Dolgovechnost' betona* [Durability of concrete]. Kyiv, Oranta Publ., 2004. 295 p.
11. Burduhos Nergis D.D., Abdullah M.M.A.B., Sandu A.V., Vizureanu P. XRD and TG-DTA Study of New Alkali Activated Materials Based on Fly Ash with Sand and Glass Powder. *Materials*. 2020. V. 13. N. 2. P. 343. DOI: 10.3390/ma13020343.
12. Marvila M.T., Azevedo A.R.G., Zanelato E.B., Lima T.E.S., Delaqua G.C.G., Vieira C.M.F., Pedroti L.G., Monteiro S.N. Study of Pathologies in Alkali-Activated Materials Based on Slag. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2021: The Minerals, Metals & Materials Series*/ eds. J. Li et al. Cham, Springer International Publishing. 2021. P. 523–531. DOI: 10.1007/978-3-030-65493-1_53.

Об авторах:

ФЕДОРОВ Павел Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций Уфимский государственный нефтяной технический университет (Архитектурно-строительный институт) 450064, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
Email: fpa_idpo@mail.ru

FEDOROV Pavel A.

PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Building Structures Chair Ufa State Petroleum Technical University (Architectural and Construction Institute) 450064, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1
Email: fpa_idpo@mail.ru

СЕНИЦИН Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой строительных конструкций Уфимский государственный нефтяной технический университет (Архитектурно-строительный институт) 450064, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
Email: d4013438@yandex.ru

SINITSIN Dmitry A.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Building Structures Chair Ufa State Petroleum Technical University (Architectural and Construction Institute) 450064, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1
Email: d4013438@yandex.ru

ШАГИГАЛИН Газинур Юлдашевич

инженер, заведующий лабораторией кафедры строительных конструкций Уфимский государственный нефтяной технический университет (Архитектурно-строительный институт) 450064, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
Email: ufa-gazinur@mail.ru

SHAGIGALIN Gazinur Yu.

Engineer, Head of Laboratory of the Building Structures Chair Ufa State Petroleum Technical University (Architectural and Construction Institute) 450064, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1
Email: ufa-gazinur@mail.ru

Для цитирования: Федоров П.А., Синицин Д.А., Шагигалин Г.Ю. Влияние концентрации раствора едкого натра на структурообразование цементной матрицы из пылеуноса минераловатного производства // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 1. С. 69–78. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.09.

For citation: Fedorov P.A., Sinitsin D.A., Shagigalin G.Yu. Influence of Concentration of Causid Sodium Solution on the Structure Formation of Cement Matrix from Flow Dust from Mineral Wool Production. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2024, vol. 14, no. 1, pp. 69–78. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.09.