

## Применение отхода вспученного перлита в составе композиционного вяжущего

Н.А. Аюбов<sup>1</sup>, Е.В. Фомина<sup>2</sup>, М.С. Агеева<sup>2</sup>, Н.В. Антошина<sup>2</sup>,  
Л.С. Сабитов<sup>3</sup>, Э.С. Сибгатуллин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова  
Российской академии наук,

<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
<sup>3</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет,

<sup>4</sup>Набережночелнинский филиал Казанского (Приволжского) федерального  
университета

**Аннотация:** Рассматривается возможность применения вспученной перлитовой пыли (ВПП) в цементных вяжущих системах. Приведен способ модифицирования вяжущего путем совместной механоактивации портландцемента, алюмосиликатного отхода и гиперпластификатора. Физико-химические особенности модифицированного ВПП позволяют регулировать процессы гидратации, фазообразования, а также формирование структурной матрицы композита. Предел прочности при сжатии вяжущего с использованием ВПП в качестве активной минеральной добавки возрастает на 36% при снижении плотности.

**Ключевые слова:** техногенное сырье, перлит, вяжущее, дисперсность, модификация, механоактивация, гидратация, структурообразование, фазообразование, ресурсосбережение

Энергетическая стратегия РФ до 2035 года в качестве основных целей и приоритетов развития государства определяет переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, а также рациональное природопользование и энергетическая эффективность. Комплексная переработка минерального сырья является актуальной задачей в строительной отрасли [1].

Вспученный перлит – широко используемый материал для придания теплоизоляционных свойств строительным материалам. Из-за низкой объемной плотности его применяют в основном в качестве наполнителя в легких композитах на основе цемента [2]. Перлит может быть использован до 100% замены природных заполнителей и позволяет снизить плотность

строительных растворов и бетонов [3]. Сформированная пористая структура перлита позволяет снизить теплопроводность строительных материалов.

Одной из основных проблем, связанных с производством вспученного перлита, является образование относительно большого количества мелкой фракции (около 5–10%) с размером частиц менее 200 мкм. Образующиеся пылевидные отходы из-за высокой удельной поверхности и запыленности сложно утилизировать, особенно в сухих условиях, поэтому они не находят практического применения и возникает необходимость разработки способов его рационального использования.

Характерной особенностью использования перлитовой пыли при получении строительных материалов является ячеистая структура частиц. Применение подобных пористых наполнителей обеспечивает систему «внутреннего ухода», позволяющую снизить аутогенную усадку бетонной смеси, а также уменьшить внутренние напряжения твердеющей системы [4]. Ячеистая структура перлита обладает высокой водопоглощающей способностью. Определенные характеристики пористой структуры могут обеспечивать комплексные изменения процессов гидратации и твердения [5]. Согласно известной классификации [6] разделяют четыре типа пор: мелкие капилляры (0–0,1 мкм), средние капилляры (0,1–1 мкм), крупные капилляры (1–10 мкм) и некапилляры (>10 мкм). На рисунке 1 отражено влияние пор разного размера и формы на процессы гидратации и твердения бетона.

Во-первых, цементный раствор и влага способны проникать в поры перлитового заполнителя и образовывать плотную растворную пленку на внутренней поверхности пор [7]. Стенка пор заполняется и расширяется внутрь, тем самым эффективно улучшая микроструктуру пор ячеистого заполнителя. Во-вторых, ячеистый заполнитель действует как внутренний резервуар для воды, а вода способна возвращаться из заполнителя во время эксплуатации. В-третьих, при образовании трещины запасенная вода в

---

пористой структуре может вступать в реакцию с частицами цемента и способствовать гидратации цемента [8].

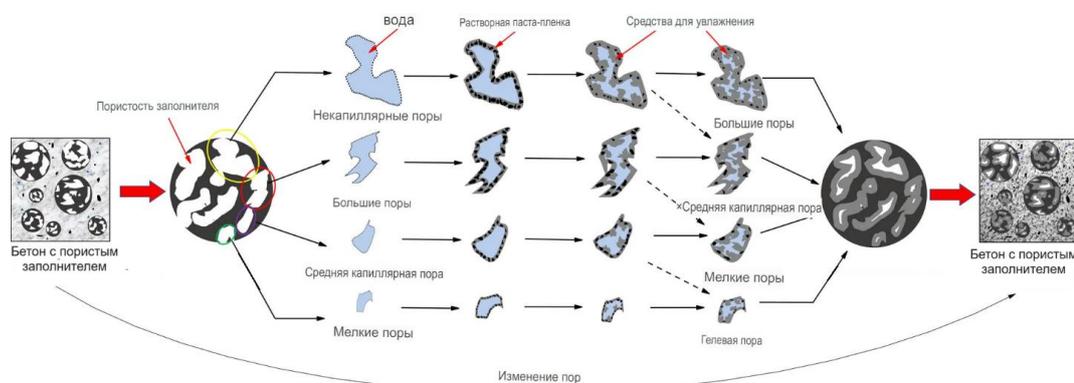


Рис. 1. – Эволюция пор перлитового заполнителя в структуре бетона [5]

Однако, задерживание воды в структуре перлита отрицательно сказывается на процессе гидратации цемента при осложнении химических реакции с участием жидкой фазы. Положительным фактором исключения данного эффекта является помол.

Для повышения эффективности применения перлитового отхода проводили механоактивацию с помощью планетарной мельницы МПП 1-4. Микроструктура перлитовых частиц представлена на рисунке 2.

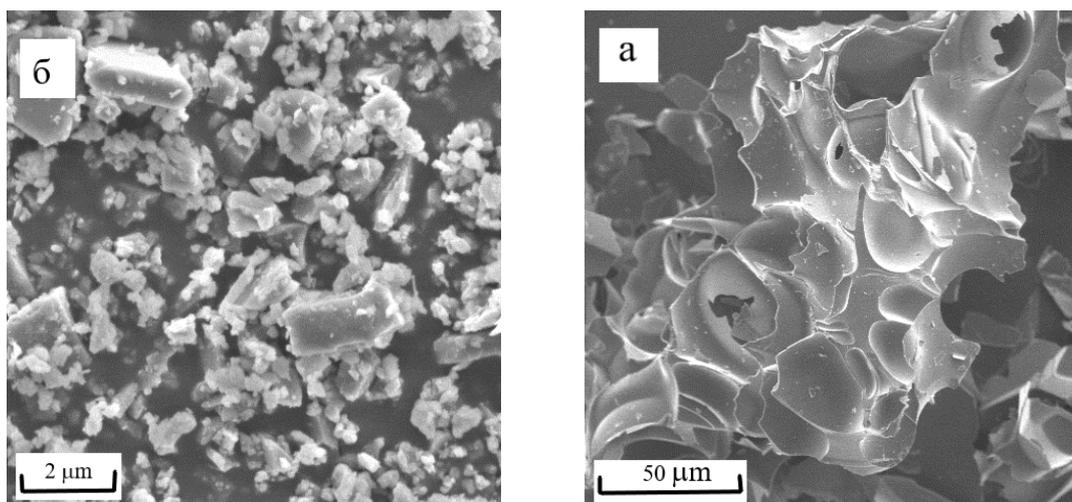


Рис. 2. – Микроструктура ВПП:  
а –  $S_{уд}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; б –  $S_{уд}=235 \text{ м}^2/\text{кг}$

Согласно проведенным микроструктурным исследованиям отмечается, что ячеистая структура сохраняется, как в исходных частицах перлита при  $S_{уд}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$ , так и после помола в течение 1,5 мин до  $S_{уд}=235 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Исследование размера частиц ВПП проводили методом лазерной гранулометрии на установке *MicroSizer 201*. Отмечается, что гранулометрия частиц ВПП без помола имеет одномодальный график с максимальным пиком в интервале значений 20–110 мкм.

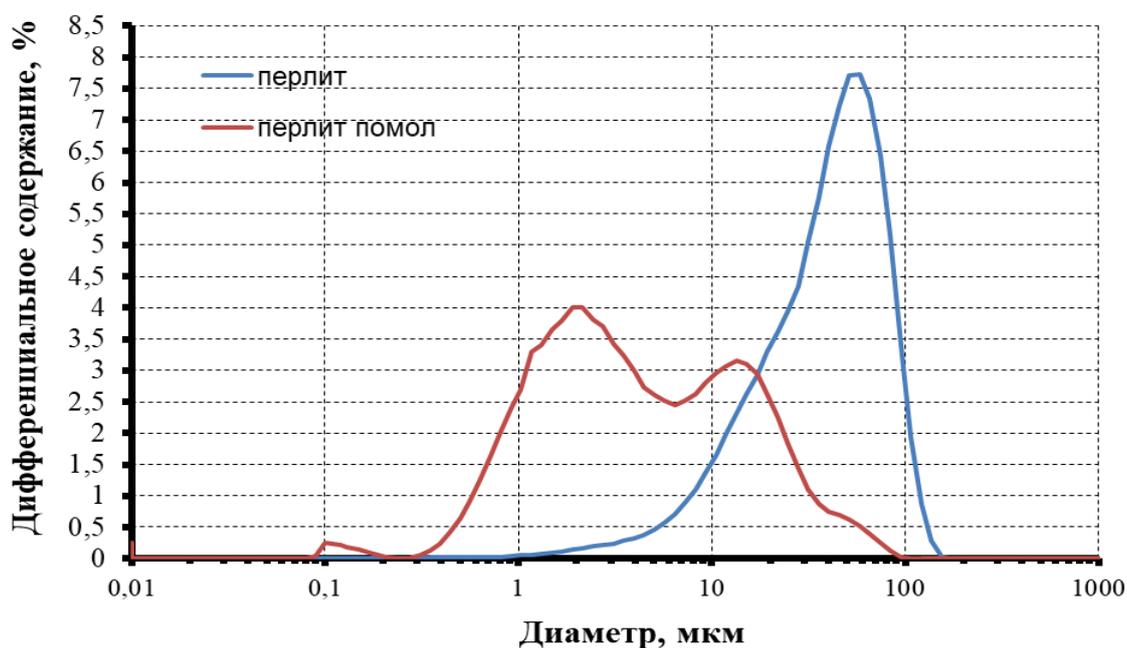


Рис. 3. – Гранулометрический анализ ВПП

В процессе помола распределение частиц по размерам изменяется и на графике отмечается значительный сдвиг кривой в область значений от 0,1 до 20 мкм. На графике появляются две моды с основными максимумами диаметров частиц в областях 1–5 мкм и 10–20 мкм.

Согласно процентному соотношению диаметра частиц перлита разных фракций, представленному в таблице 1, примерно 99% перлитового отхода обладает размером менее 110 мкм. В материале после механоактивации размер частиц уменьшается практически вдвое и составляет уже около 55 мкм.

Таблица № 1

## Процентное соотношение частиц перлита разных фракций

Перцентиль, %	Диаметр, мкм	
	ВПП с $S_{уд}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$	ВПП не молотый
5	0,64	7,04
10	0,87	10,92
25	1,54	21,01
50	3,5	38,91
75	10,85	58,47
90	20,25	76,74
95	28,96	88,17
99	55,25	108,76

Средний размер зерен ВПП приблизительно можно считать равным 39 мкм, а у ВПП после помола – 3,5 мкм.

Для оценки качества и эффективности применения алюмосиликатного отхода в силикатных системах проводили комплексное изучение реакционной способности сырья по отношению к щелочным растворам (метод Запорожца), гипсовым растворам (метод М.И. Стрелкова), величине активных центров (метод БЭТ). Для сравнения использовали кварцевый песок. Результаты исследований отражены в таблице 2.

Таблица № 2

## Свойства минерального сырья\*

Сырьевые компоненты	Сорбционная способность, мг СаО/г	Активность по поглощению гипса, мг/100 г	Величина активных центров, $\text{м}^2/\text{кг}$	Показатель активности $K_{\text{акт}} = (\text{СаО} + \text{R}_2\text{О}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$
Кварцевый песок	12	40	310	0,25
ВПП	31	288	5830	0,63

\*Указаны свойства при средней удельной поверхности материалов 300–400  $\text{м}^2/\text{кг}$ .

Многоточечный анализ удельной поверхности по методу БЭТ проводили на приборе «Sorbi®-M» в соответствии с международными

стандартами *ASTM* и *ISO*. Согласно результатам, полученным в результате адсорбции / десорбции азота, было установлено, что величина активных центров кварцевого песка (адсорбция газа в порах, рельеф поверхности частиц, аморфные части) составила  $310 \text{ м}^2/\text{кг}$ , перлита  $5830 \text{ м}^2/\text{кг}$ , что свидетельствует о высокой активности последнего.

Пористость перлита является важным фактором придания строительным растворам теплоизолирующих свойств. В данной работе изучали пористость перлита по полной изотерме сорбции, где при общем объеме пор породы до 85%, на микроуровне отмечается наличие пор нанометрического диапазона от 1,7 до 300 нм в количестве  $0,58 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{г}$ .

Наличие ячеистой структуры отражается на водоудерживающей способности ВПП. Водоудерживающую способность определяли по методике ГОСТ Р 5802-86 путем испытания слоя свежеприготовленной смеси толщиной 12 мм, уложенной на фильтрующую бумагу. Оценку производили выраженным в процентах содержанием воды в пробе до и после эксперимента. Величина водоудерживающей способности перлитовой пыли составила 98,5%. Высокая водоудерживающая способность позволит обеспечивать влагообмен между пористым компонентом и цементной матрицей. Это окажет влияние на стабилизацию влажности внутри вяжущей системы на начальных стадиях твердения и в течение всего периода гидратации. Формирование данного процесса способствует снижению аутогенной усадки бетонов с низким значением водовяжущего соотношения, что необходимо для ухода за свежеложенным бетоном, особенно в летний период.

При проведении исследований использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н АО «Себряковцемент». С целью регулирования процесса структурообразования в начальные периоды твердения и управления реологическими свойствами в вяжущее вводили пластифицирующую

---

добавку в оптимальном количестве 1% от массы цемента. Использовали жидкий гиперпластификатор «Реопласт ПКЭ 3392» (ГП) (ТУ 5745-002-25842763-2014). Испытания вяжущего выполняли в соответствии с ГОСТ 10181-2000.

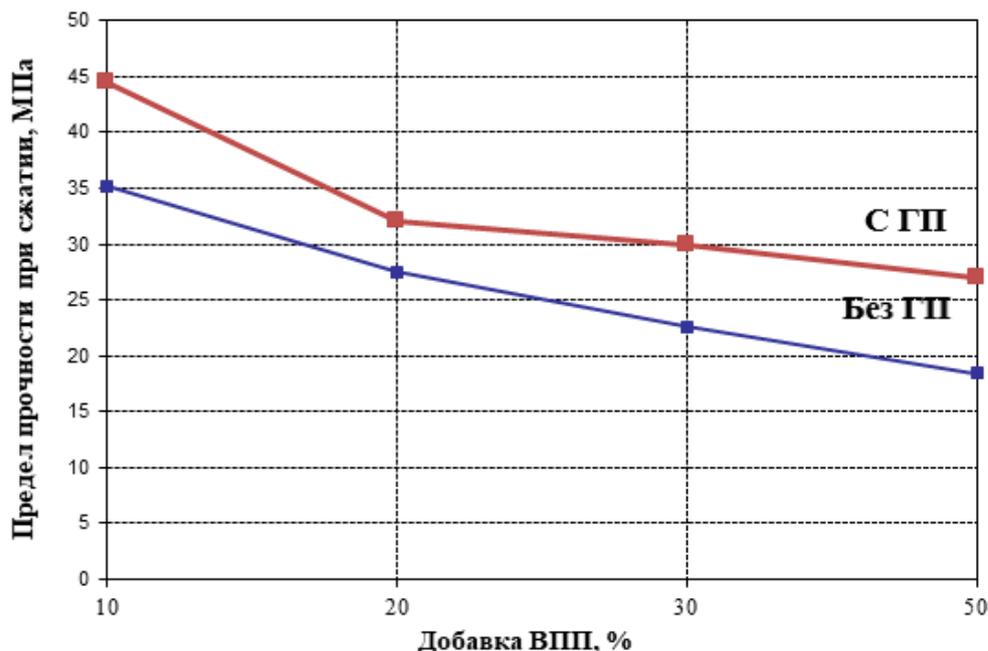


Рис. 4. – Изменение прочности при сжатии цементного вяжущего с добавкой ВПП

Согласно полученным данным с увеличением количества вводимого перлита общая прочность вяжущего снижается. Лучший синергетический эффект достигается в случае использования ВПП совместно с ГП. Введение в систему гиперпластификатора позволяет повысить прочность образцов на 28%.

При получении композиционных вяжущих использовали 2 способа:

1. Совместный помол ВПП с цементом до  $S_{уд}=500 \text{ м}^2/\text{кг}$ .
2. Совместный помол цемента, ВПП и ГП до  $S_{уд}=500 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Количество добавки ВПП производили от массы вяжущего.

Результаты физико-механических свойств вяжущего представлены в таблице 3.

Таблица № 3

## Физико-механические свойства разрабатываемого вяжущего

№	Цемент, %	ВПП, %	ГП, %	В/Ц	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа	
						7 сут	28 сут
1	100	-	-	0,26	–	39	47
2	100	-	1	0,19	2250	46	57
Совместный помол без пластификатора							
3	90	10	–	0,29	2145	33	48
4	80	20	–	0,34	2185	31	46
5	70	30	–	0,36	2222	28	30
Совместный помол с пластификатором							
6	90	10	1	0,21	2148	36	64
7	80	20	1	0,22	2135	28	59
8	70	30	1	0,24	2122	22	46

Согласно полученным данным, при помоле совместно с ГП отмечаются более высокие прочностные показатели образцов композиционных вяжущих по сравнению с образцами без ГП. Максимальная прочность при сжатии 64 МПа достигнута в составе вяжущего, полученного совместным помолом в присутствии 10% ВПП и ГП. При этом прочностные показатели вяжущих без пластификатора с заменой 10–20% перлитом сопоставимы с прочностью обычного портландцемента. Ячеистая структура перлитовых частиц позволяет снизить плотность образцов. Отмечается, что с увеличением количества ВПП плотность вяжущего снижается.

Высокая размолоспособность ВПП вследствие его морфологических особенностей приводит к повторной агрегации частиц при помоле с образованием ассоциаций, в которых частицы цемента полностью покрыты перлитовой мелкодисперсной пылью. Это снижает скорость гидратации, и как следствие, повышает водопотребность смеси, а также ведет к получению более низких значений прочности образцов по сравнению с образцами, полученными путем помола с введением гиперпластификатора.

Расклинивающий эффект ГП позволяет разрушить формирующиеся ассоциации частиц и обеспечить более полное протекание процесса гидратации, способствуя повышению прочности вяжущего.

Оценку процессов фазообразования при гидратации вяжущего осуществляли согласно данным рентгенофазового анализа, представленного на рисунке 5.

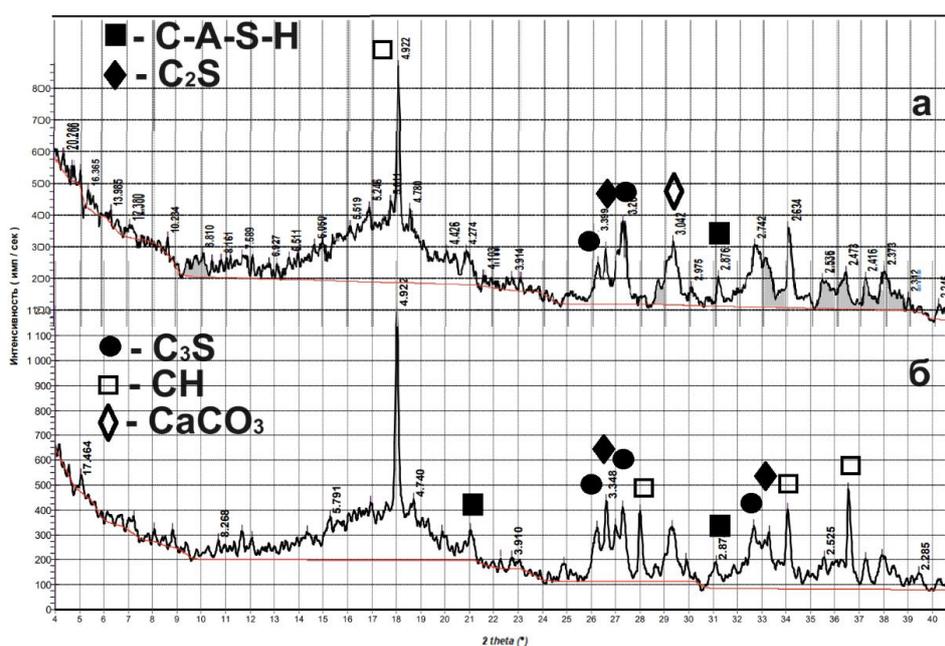


Рис. 5. – Рентгенограмма вяжущего:

а – образец №6 табл. 3; б – образец №3 табл. 3

При введении в систему ГП отмечается снижение содержания негидратированных клинкерных фаз, основные пики которых находятся в диапазоне  $26-35^{\circ}2\theta$  (рисунок 5 а). Интенсивность дифракционных максимумов алита  $Ca_3[SiO_4]O$  значительно ниже при использовании ГП, что свидетельствует о его растворимости. Высокая интенсивность дифракционных максимумов принадлежит портландиту  $Ca(OH)_2$  в области углов отражения  $2\theta = 17-19^{\circ}$  и продукту его карбонизации кальциту  $CaCO_3$  (угол отражения  $2\theta = 29-30^{\circ}$ ).

Высокодисперсные частицы ВПП равномерно располагаются в структуре вяжущего, обеспечивая доступ воды к клинкерным минералам. В

комплексе ускоряются ионообменные процессы, а также пуццолановые реакции [9]. Снижение содержания гидроксида кальция свидетельствует об протекании пуццолановой реакции. В результате реакции образуется дополнительное количество фаз  $C-S-H$  и  $C-A-S-H$ . На рентгенограмме (рис. 5 а) серым цветом выделены участки, которые могут быть отнесены к фазам  $C-S-H$ .

Амфотерные ионы  $Al$ , вносимые перлитом, в равновесном растворе вызывают качественные и количественные структурные изменения в продуктах гидратации. Прежде всего, в литературе описано его поглощение в структуре  $C-S-H$  в виде замещения кремнезема в тетраэдрическом положении, однако возможны и другие механизмы [6].

Можно отметить повышение интенсивности линий характерных для  $C-A-S-H$  соединений (рис. 5 а), что свидетельствует о внедрении в решетку гидроксида кальция ионов  $Si$ ,  $Al$  с образованием дополнительных фаз к продуктам гидратации цемента.

Изменение количества и интенсивности гидратных продуктов демонстрирует преобразование кристаллических фаз, увеличение степени аморфности гидратов, что, по мнению [5], может приводить упрочнению цементного камня, что характерно для природных пуццоланов вулканического происхождения

Для доказательства влияния алюмосиликатной природы минеральных частиц ВПП на фазообразование исследовали ИК-спектры вяжущего (рис. 6).

Валентные колебания в диапазоне  $800-900\text{ см}^{-1}$  могут быть отнесены к асимметричным и симметричным колебаниям групп связи  $Si-O-Si$  и  $Si-O-Al$ . В области высоких частот  $1500\text{ см}^{-1}$  некоторое смещение оснований свидетельствует о внедрении ионов  $Si$ ,  $Al$  в фазой  $C-S-H$ . Полосы при  $1630\text{ см}^{-1}$  (колебания при изгибе  $H-O-H$ ) относят к ионам  $OH$  и молекулам воды,

---

присутствующим в структуре пуццоланов, количество которых больше в образцах с перлитом и СП (рис. 6 а).

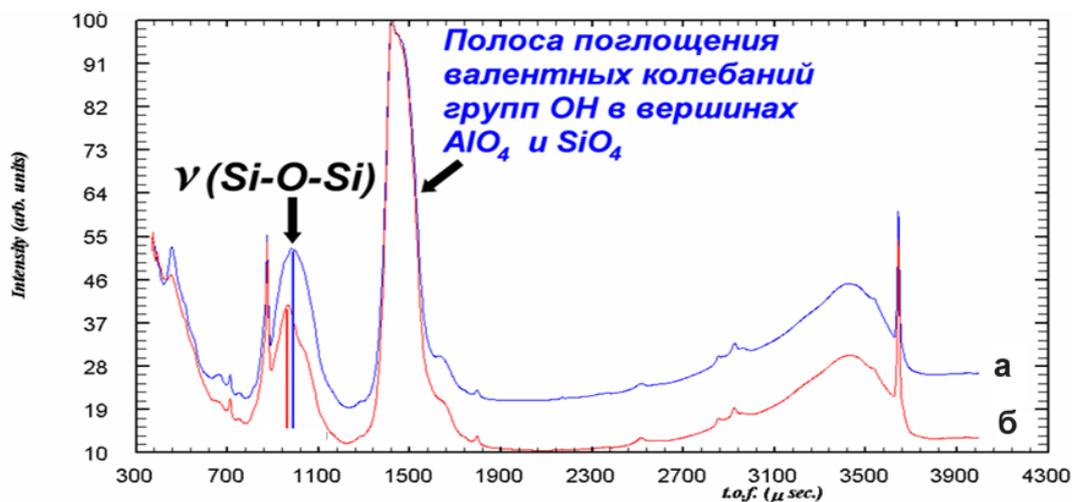


Рис. 6. – ИК-спектральный анализ вяжущего:  
а – образец №6 табл. 3; б – образец №3 табл. 3

Кроме того, пуццоланы оказывают положительное влияние на цементные композиты за счет модификации межфазной зоны «цементная матрица – наполнитель». Это самая слабая часть структуры композита, характеризующаяся высокой пористостью. Эта зона контакта заполнена кристаллами портландита, количество которых сокращается за счет пуццолановой реакции. Полосы при  $700\text{ см}^{-1}$  можно объяснить делокализованными валентными и частично деформационными колебаниями связей  $Si-O-Si$  ( $Al$ ) с искажением тетраэдрических и октаэдрических слоев (рис. 6 а). Алюминатные фазы, вносимые перлитом и присутствующие в цементе, участвуют в образовании соединений алюминий замещенного тоберморита. Согласно литературным данным [10], внедрение ионов  $Al$  в фазы  $C-S-H$  с синтезом новообразований  $C-A-S-H$  является положительным фактором влияния на долговечность строительных изделий с увеличением их срока службы.

Таким образом, применение высокодисперсной перлитовой пыли оказывает многофакторное воздействие на процессы структурообразования.

Во-первых, физическое взаимодействие, связанное с высокой дисперсностью частиц заполняющие свободные пространства между зернами клинкера. Во-вторых, физико-химический эффект: высокоактивная поверхность частиц действует как центр кристаллизации продуктов гидратации. В-третьих, химический эффект за счет пуццолановых реакции с гидроксидом кальция и за счет внесения алюминатных фаз образуется дополнительное количество соединений *C-S-H*, *C-A-S-H*, уплотняющих структуру на микроуровне.

### Литература

1. Кондратенко Т.О., Сайбель А.В. Экологическая оценка при выборе строительных материалов для нового строительства, реконструкции и реставрации // Инженерный вестник Дона, 2011, № 4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1299](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1299)
  2. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Shchekina N.A., Shorstova E.S., Lesovik R.V., Ayubov N.A. Experimental studies of the processes of structure formation of composite mixtures with technogenic mechanoactivated silica component // Construction Materials and Products. 2023. 6 (2). P. 5 – 18. URL: [doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18](https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18)
  3. Овчинникова С.В., Лямина А.А. Технико-экономическое обоснование применения различных наполнителей в составе гипсовых композиций // Инженерный вестник Дона, 2023. № 8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8619](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8619)
  4. Фомина Е.В., Лесовик В.С., Айзенштадт А.М. Снижение аутогенной усадки композиционного вяжущего с использованием туфа // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 4(41). С. 48–55.
  5. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Lesovik R.V., Ageeva M.S., Fomina E.V., Ayubov N.A. Development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials // Construction Materials and Products. 2023. №6 (1). P. 60 – 73. URL: [doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73](https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73).
-

6. Kumar R., Bhattacharjee B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete // *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 331. Pp. 155–164. URL: [doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00942-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00942-0).
7. Gao S., Huang K., Chu W., Wang W. Feasibility Study of Pervious Concrete with Ceramsite as Aggregate Considering Mechanical Properties, Permeability, and Durability // *Materials*. 2023. Vol. 16. 5127.
8. Aglan H., Morsy M., Allie A., Fouad F. Evaluation of fiber reinforced nanostructured perlite-cementitious surface compounds for building skin applications // *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23(1). Pp. 138–145.
9. Лесовик Р.В., Елистраткин М.Ю., Рамазанов Р.Г., Бухтияров И.Ю. Звукоизоляционный материал на основе вспученного вермикулита // *Университетская наука*. 2023. № 2(16). С. 45-47.
10. Овчаренко Г.И., Фомичев Ю.Ю., Францен В.Б. Особенности формирования фазового состава силикатного камня из высококальциевых зол ТЭЦ // *Ползуновский вестник*. 2012. № 1-2. С. 88–93.

### References

1. Kondratenko T.O., Sajbel' A.V. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2011, № 4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1299](https://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1299)
2. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Shchekina N.A., Shorstova E.S., Lesovik R.V., Ayubov N.A. Experimental studies of the processes of structure formation of composite mixtures with technogenic mechanoactivated silica component. *Construction Materials and Products*. 2023. 6 (2). Pp. 5 – 18. URL: [doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18](https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18)
3. Ovchinnikova S.V., Ljamina A.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2023. № 8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8619](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8619).
4. Fomina E.V., Lesovik V.S., Ajzenshtadt A.M. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo*. 2019. № 4(41). pp. 48–55.



5. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Lesovik R.V., Ageeva M.S., Fomina E.V., Ayubov N.A. Development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials. *Construction Materials and Products*. 2023. №6 (1). Pp. 60 – 73. URL: [doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73](https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73)
6. Kumar R., Bhattacharjee B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 331. Pp. 155–164. URL: [doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00942-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00942-0)
7. Gao S., Huang K., Chu W., Wang W. Feasibility Study of Pervious Concrete with Ceramsite as Aggregate Considering Mechanical Properties, Permeability, and Durability. *Materials*. 2023. Vol. 16. 5127.
8. Aglan H., Morsy M., Allie A., Fouad F. Evaluation of fiber reinforced nanostructured perlite-cementitious surface compounds for building skin applications. *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23(1). Pp. 138–145.
9. Lesovik R.V., Elistratkin M.YU, Ramazanov R.G., Buhtiyarov I.YU. *Universitetskaya nauka*. 2023. № 2(16). pp. 45-47.
10. Ovcharenko G.I., Fomichev Ju.Ju., Francen V.B. *Polzunovskij vestnik*. 2012. № 1–2. pp. 88–93.

**Дата поступления: 6.07.2024**

**Дата публикации: 10.08.2024**