

К вопросу о ресурсосбережении в стройиндустрии и строительстве

Л.В. Моргун

*Донской государственной технической университет,
г. Ростов-на-Дону*

Аннотация: В статье рассмотрены факторы, влияющие на ограниченность минеральных ресурсов планеты и требующие расширения сырьевой базы стройиндустрии. Отмечено негативное влияние отвалов вскрышных пород на экологическое состояние среды обитания. Подчеркнута важность их переработки в полезный продукт в связи с необходимостью реализации отраслевой программы РФ: «Вовлечение вскрышных и вмещающих горных пород, отнесенных к отходам производства, в хозяйственный оборот на 2022-2030 гг.».

Выполнен анализ свойств песка и опоки, как сырья для изготовления пенобетонов. Результат анализа позволил сформулировать перечень ограничений, в результате которых опоку нежелательно применять в бетонах слитной структуры и перечень причин, опираясь на которые можно прогнозировать целесообразность её применения в пенобетонах.

Приведены результаты экспериментальных исследований, отражающие влияние индивидуальных свойств песка и опоки на плотность пенобетонных смесей, плотность затвердевшего пенобетона и кинетику их пластической прочности в течение трех часов твердения из которых следует, что замена песка на опоку позволяет существенно улучшать технологические свойства пенобетонных смесей без ущерба для достижения их проектной плотности.

Из анализа экспериментальных данных следует, что положительное влияние на технологические свойства пенобетонных смесей оказывают структурные особенности опоки, которые обеспечивают ускорение набора пластической прочности пенобетонных смесей после их укладки в формы. Важнейшей причиной достигнутого результата следует считать мезопоры, расположенные в объеме дисперсных частиц заполнителя из опоки. Установленные научные факты позволяют прогнозировать расширенное применение вскрышной породы – опоки в целях ресурсосбережения в стройиндустрии и строительстве.

Ключевые слова: атмосферный воздух, PM2.5, датчик Nova SDS011, концентрация пылевых частиц, станции мониторинга, относительная влажность.

Введение. Вопросы ресурсосбережения при изготовлении стеновых материалов получили свое четкое оформление еще в середине XX века и усиливают свою актуальность с течением времени потому, что в связи с развитием научно-технического прогресса наблюдаются ускорение процессов урбанизации социума и рост численности населения [1,2]. Перечисленные факторы в сочетании с ограниченностью материальных ресурсов планеты,

традиционно используемых для изготовления строительных материалов, ставят перед научным сообществом задачи по расширению сырьевой базы стройиндустрии и повышению качества газонаполненных бетонов [3,4]. Производство пенобетонов, обладающих эксплуатационными свойствами, удовлетворяющими запросам практики строительства, является одной из технологических задач, решение которой важно для современного строительства [5,6].

Минеральные промышленные отходы, возникающие в результате деятельности добывающих предприятий, складировать, как правило, на площадках без защиты от атмосферных воздействий. Их называют отвалами, которые в окружающую среду выделяют оксиды серы и углерода, высокодисперсную пыль [7, 8]. Все перечисленные компоненты негативно влияют на экологическое состояние среды обитания. Поэтому существует отраслевая программа «Вовлечение вскрышных и вмещающих горных пород, отнесенных к отходам производства, в хозяйственный оборот на 2022-2030 гг.». К отраслям, на которые распространяется программа относятся «Строительство» и «Производство строительных материалов».

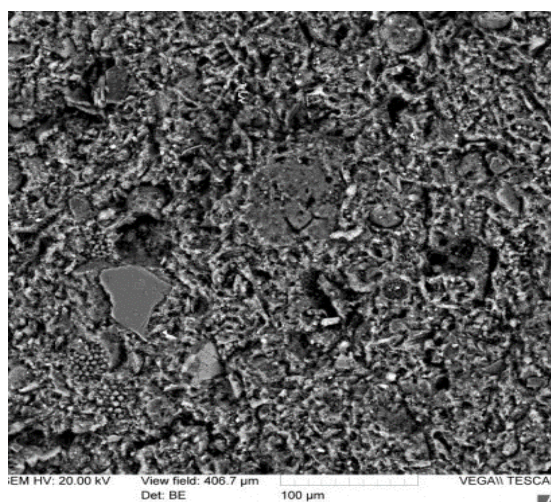
Материалы и методы. Традиционно в качестве мелкого заполнителя при изготовлении пенобетонов используют мелкие или молотые пески. Однако потребности современного строительства в песчаных заполнителях системно растут [9]. Замена песка техногенными отходами соответствует целям, обозначенным в отраслевой программе «Вовлечение вскрышных и вмещающих горных пород, отнесенных к отходам производства, в хозяйственный оборот на 2022-2030 гг.» и по мнению [10] опока может успешно применяться, как сырье для изготовления стеновых керамических материалов.

Кроме того, практика изготовления строительных изделий из пенобетонных смесей отражает системную проблему, связанную с

обеспечением их структурной устойчивости [11]. Поэтому поиск новых видов заполнителей, которые в настоящее время относятся к категории слабо утилизируемых минеральных вскрышных пород, способных смягчить проблемы структурной устойчивости следует отнести к своевременным.

Сравнение опоки и песка как заполнителей для пенобетона показывает, что они обладают частью сходными, но и различными составом и свойствами. Пески, применяемые в строительстве, характеризуются мономинеральным составом и содержат преимущественно кристаллический кварц (SiO_2). Частицы обладают различной дисперсностью и имеют гладкую окатанную форму поверхности (рис.1 а).

Опоки в своем составе также содержат кварцевые частицы, но кроме них опаловый кремнезем (SiO_2) тонкозернистого строения, некоторое количество мелких зерен полевых шпатов и слюды (рис.1 б). Эти различия важно учитывать потому, что SiO_2 в зависимости от своих структурных особенностей, может по-разному вести себя при контакте с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющимся при твердении цемента.



а – кварцевый песок

б - опока

Рисунок 1. – Фото дисперсных частиц-заполнителей.

Кристаллический SiO_2 химически инертен по отношению к $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Поэтому в составе любых видов бетонных смесей кварцевый песок используется, как инертный наполнитель и успешно выполняет функцию уменьшения контракционной усадки цементного камня в результате отвердевания бетона. В опоках минералогический состав кроме кристаллического SiO_2 содержит и аморфные его компоненты, которые способны вступать в химическое взаимодействие с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и создавать таким образом низкоосновные гидросиликаты кальция, объем которых всегда уступает сумме объемов веществ, вступивших в реакцию [13].

Для бетонов слитной структуры способность инертного сырья (песка или щебня) вступать в химическое взаимодействие с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ чрезвычайно опасна потому, что с течением времени в результате такого взаимодействия нарушается сцепление между наполнителем и цементным камнем. В пенобетонах исходная дисперсность мелкого наполнителя существенно выше, чем в бетонах слитной структуры, поэтому полагаю, что:

- масштаб усадки, возникающей в результате химического взаимодействия между аморфным SiO_2 и щелочью, будет существенно меньшим, чем в бетонах слитной структуры;
- ячеистая макроструктура затвердевшего пенобетона окажет смягчающее влияние на возможность проявления негативных результатов химического взаимодействия аморфного кремнезема со щелочью потому, что часть силикатных новообразований будет контактировать с поверхностью воздушных пор и напряжения растяжения, значимые для бетонов слитной структуры, не возникнут.

Анализ структурных различий между дисперсными частицами песка и опоки (рис.1) позволяет прогнозировать способность последней положительно влиять на скорость адсорбции цементного вяжущего к её частицам в период после укладки пенобетонных смесей в формы. Этот

период характеризуется явлениями массопереноса, в результате протекания которых в объеме межпоровых перегородок пенобетонных смесей формируются кластеры из дисперсных частиц заполнителя и минерального вяжущего вещества [14, с.68;15].

Хорошо известно [16, с.53], что чем больше площадь раздела фаз на поверхности дисперсных частиц твердой фазы (адсорбата), тем большей может быть по отношению к нему скорость физической адсорбции клинкерных минералов и воды. Значимость этого явления для технологии пенобетонов трудно переоценить потому, что чем быстрее формируются плотные кластеры в структуре межпоровых перегородок уложенной в формы пенобетонной смеси, тем она устойчивее по отношению к действию гравитационных сил и тем выше может быть качество затвердевшего бетона.

Результаты исследования. Из результатов ранее выполненных исследований следует, что в силу природных различий песок и опока обладают разной начальной водопотребностью [17, с.18]. Их способность физически прочно удерживать воду после укладки смесей в формы чрезвычайно важна на этапе начального формирования твердой фазы в структуре межпоровых перегородок пенобетонов потому, что именно она влияет на процессы массопереноса, в ходе которых образуются гидратные новообразования, обеспечивающие будущую прочность пористого камня.

В таблице приведены экспериментальные данные по кинетике пластической прочности смесей, полученные при исследованиях процессов формирования структуры пенобетона класса D700 дисперсно армированного полипропиленовой фиброй в количестве 1% от массы заполнителя.

Таблица – Влияние индивидуальных свойств заполнителей на плотность пенобетонных смесей и динамику изменения их пластической прочности

Проектный класс бетона	Плотность, кг/л		Пластическая прочность смесей, Па		
	пенобетонной смеси	сухого бетона	сразу после приготовления	через 30 минут после укладки в формы	через 3 часа после укладки в формы
D700 _п	0,833	706	101	134	200
D700 _о	1,232	695	96	165	592

Обсуждение и заключение. Анализируя данные, приведенные в таблице, важно обратить внимание на физические свойства исследуемых пенобетонов. В сухом состоянии по плотности они четко соответствуют классу D700, а на этапе вязко-пластичного состояния смеси, содержавшие в качестве заполнителя опоку, более чем на 30% тяжелее пенобетонных смесей с песком.

Тем не менее, сразу после приготовления пластическая прочность пенобетонных смесей, содержащих песок, несколько выше, чем в смесях с опокой. Эти результаты коррелируют с количеством слабо связанной воды в дисперсной системе. Чем больше свободной и слабо связанной с поверхностью частиц твердой фазы воды в исследуемой системе, тем меньше её пластическая прочность. Следовательно, в производственных условиях проще транспортировать и укладывать в формы такие пенобетонные смеси.

Через 30 минут после укладки смесей в формы соотношение между показателями пластической прочности изменяется на противоположное. Вязкость в пенобетонных смесях с опокой достигла величины более, чем на 20%, превышающей песчаные. Установленный результат отражает способность опоки продолжать физически прочно связывать воду затворения в период после завершения перемешивания сырья и, таким образом способствовать улучшению технологических свойств пенобетонных смесей за счет ускоренного роста их вязкости.

Известно [18, с.186], что чем выше пластическая прочность сырца в газонаполненных пенобетонных смесях, тем более прочными могут быть

затвердевшие бетоны, потому, что на этапе преобладания вязких связей между дисперсными частицами твердого сырья они не накапливают дефектов в межпоровых перегородках из-за колебаний температуры среды твердения и толчков при транспортировании оснастки.

Через 3 часа твердения (см. табл.) различия в показателях пластической прочности между смесями на песке и опоке достигают 3-х кратной величины. Полученный результат отражает влияние структурных особенностей заполнителя из опоки на процессы массопереноса при формировании плотных кластеров в межпоровых перегородках пенобетонных смесей.

Согласно [19, с.227] структура заполнителя из опоки создает в составе пенобетонной смеси, уложенной в формы, условия для протекания такого физического явления, которое физхимики называют капиллярной конденсацией жидкой фазы. По классификации М.М. Дубинина, которая принята за основу Международным союзом по теоретической и прикладной химии (IUPAC), поры в материалах размеры которых превышают 50 нм, считаются **макропорами**.

При таком размере пор кривизной поверхности по сравнению с размерами молекул минералов пренебрегают и рассматривают поверхность стенок пор как плоскую (рис.1). Адсорбционная пленка в таких порах при контакте с водой формируется быстро и является функцией их суммарной удельной поверхности.

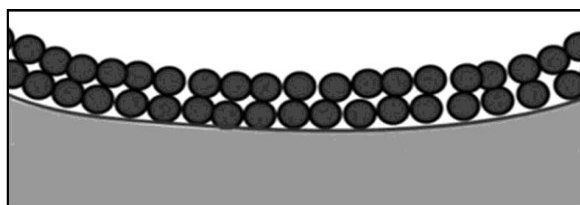


Рисунок 2 – Схема макropоры [20].

Если в материале имеются мезопоры, их размеры находятся в интервале от 2 до 50 нм. Геометрические параметры пор накладывают ограничения на скорость адсорбции [20, с.10] потому, что кривизна их

поверхности предопределяет развитие капиллярной конденсации, требующей времени.

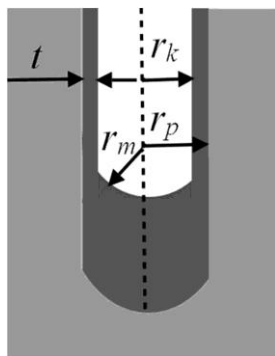


Рисунок 3. - Схема мезопоры и параметров, учитывающих те её размеры, которые управляют скоростью адсорбции [20]

r_p - радиус поры, r_k - радиус адсорбционной пленки на стенке поры, r_m - равновесный радиус кривизны мениска жидкости, t - толщина адсорбционной плёнки

Если полагать, что в структуре дисперсных частиц опоки имеются мезопоры, то становятся понятными причины существенного ускорения роста пластической прочности после укладки пенобетонных смесей в формы. В этот период исключается энергетическое воздействие рабочего органа смесителя на жидкую фазу исследуемых смесей. Все их компоненты после укладки в формы подвержены воздействию только межчастичных энергетических потенциалов компонентов сырья и гравитационных сил. Поскольку процесс капиллярной конденсации в мезопорах требует времени, то его развитие положительно сказывается на процессах массопереноса, что и получило экспериментальное подтверждение (см. табл.).

Обобщая изложенное, можно заключить, что использованная в ходе исследований опока может на основе полученных результатов переместиться из отходов вскрышных пород в категорию эффективного сырья при производстве газонаполненных бетонов потому, что замена ею песка позволяет существенно улучшать технологические свойства пенобетонных

смесей, и таким образом способствовать ресурсосбережению в стройиндустрии и строительстве.

***Благодарности:** Автор выражает благодарность за участие в формировании экспериментальных образцов студентам и магистрантам инженерно-строительного факультета ДГТУ.*

Литература

1. Михеев А.А., Шутикова Е.А. Социальные проблемы урбанизации и сити-менеджмент на этапе постмодерна // Государственное управление: проблемы и перспективы. №2(35), 2015. С.73-78.
2. Седунов Б.И. Модель роста численности населения Земли в XXI веке // Вестник РосНОУ. 2015. researchgate.net/publication/280223141_Model_rosta_cislennosti_naselenia_Zemli_v_XXI_veke (дата обращения: 21.10.2023).
3. Рациональное использование вторичных минеральных ресурсов в условиях экологизации и внедрения наилучших доступных технологий: монография / под ред. Ларичкина Ф. Д. и Кныша В. А. - Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2019. 252 с.
4. Славчева Г.С., Чернышов Е.М., Новиков М.В. Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства // Строительные материалы, 2017, №7. С.20-23.
5. Сиротин О.В. Бондаренко С.И. Стеновые материалы. Особенности отечественного рынка // Бетон, 2016, №1. С.12-17.
6. Славчева Г.С., Чернышов Е.М., Новиков М.В. Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства // Строительные материалы, 2017, №7. С.20-23.

7. Фаррахов А.Г. Особенности ресурсосбережения в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015, № 11 (296). С. 53-60.
 8. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Основные направления ресурсоэнергосбережения при строительстве и эксплуатации зданий. Часть 1. Ресурсоэнергосбережение на стадии производства строительных материалов, стеновых изделий и ограждающих конструкций// Строительные материалы, 2013, № 7. С. 12-18.
 9. Львович К.И. Песчаный бетон и его применение в строительстве. – СПб. Стройбетон, 2007. 320 с.
 10. Котляр В.Д., Лапунова К.А., Терёхина Ю.В. Перспективы производства фигурного керамического кирпича на основе опок // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/946
 11. Костыленко К.И., Моргун Л.В., Моргун В.Н. Эволюция структуры дисперсной газовой фазы при изготовлении пенобетонной смеси // Строительные материалы», 2014, №6. С.15-17.
 12. Котляр В.Д., Терёхина Ю.В. Минералого-химические и структурные особенности опоковидных опал-кристобалитовых пород как сырья для стройиндустрии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 1. С.145 -155.
 13. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Изд. АСВ, 2006. 368 с.
 14. Блинов Л. М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 480 с.
 15. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Нагорский В.В. Влияние формы дисперсных частиц твердой фазы на механические свойства пенобетонных смесей/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - Vol. 698. - Article 022088. - (International Scientific
-

- Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development" 1–5 October 2019, Kislovodsk, Russian Federation). – URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/698/2/022088
16. Кривошапкин П.В., Кривошапкина Е.Ф., Назарова Е.А., Сталюгин В.В. Основы коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – СПб: Университет ИТМО, 2019. 138 с.
17. Амрагова И.В., Липодаева А.Е., Слепко В.А., Гербу Б.К. Влияние водопотребности заполнителей на свойства пенобетонов // Строительство. Архитектура. Дизайн – 2023: Материалы Четвертой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, г. Курск, 21 апреля 2023 года. / Курский государственный университет (КГУ), Курск: 2023. С. 17-19.
18. Моргун Л.В., Нагорский В.В., Малова П.А. К вопросу о причинах обретения агрегативной устойчивости пенобетонными смесями// Химия, физика и механика материалов. 2022. № 1 (32). С. 15-25.
19. Карнаухов А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. - Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. 470 с.
20. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. 132 с.

References

1. Miheev A.A., SHutikova E.A. Gosudarstvennoe upravlenie: problemy i perspektivy. №2 (35), 2015. pp.73-78.
 2. Sedunov B.I. Vestnik RosNOU. 2015. researchgate.net/publication/280223141_Model_rosta_cislennosti_naselenia_Zemli_v_XXI_veke (date accessed 21.10.2023).
 3. Racional'noe ispol'zovanie vtorichnyh mineral'nyh resursov v usloviyah ekologizacii i vnedreniya nailuchshih dostupnyh tekhnologij: monografiya
-



[Rational use of secondary mineral resources in the conditions of ecologization and implementation of the best available technologies: monograph]. Pod red. Larichkina F. D. i Knysha V. A. Apatity: Izd-vo FIC KNC RAN, 2019. 252 p.

4. Slavcheva G.S., CHernyshov E.M., Novikov M.V. Stroitel'nye materialy, 2017, №7. pp.20-23.

5. Sirotin O.V. Bondarenko S.I. Beton, 2016, №1. pp.12-17.

6. Slavcheva G.S., CHernyshov E.M., Novikov M.V. Stroitel'nye materialy, 2017, №7. pp.20-23.

7. Farrahov A.G. Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost'. 2015, № 11 (296). pp. 53-60.

8. Karpenko N.I., YArmakovskij V.N. Stroitel'nye materialy, 2013, № 7. pp. 12-18.

9. L'vovich K.I. Peschanyj beton i ego primenenie v stroitel'stve. [Sandy concrete and its application in construction]. SPb. Strojbeton, 2007. 320 p.

10. Kotlyar V.D., Lapunova K.A., Teryohina YU.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/946

11. Kostylenko K.I., Morgun L.V., Morgun V.N. Stroitel'nye materialy», 2014, №6. pp.15-17.

12. Kotlyar V.D., Teryohina YU.V. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2023. T. 334. № 1. pp.145 -155.

13. Bazhenov YU.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I. Modificirovannye vysokokachestvennye betony. [Modified high quality concretes]. M.: Izd. ASV, 2006. 368 p.

14. Blinov L. M. ZHidkie kristally: Struktura i svojstva. [Liquid crystals: Structure and properties]. M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2013. 480 p.

15. Morgun V.N., Morgun L.V., Nagorskij V.V. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. Article 022088. - (International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and

Practice of Innovative Development" 1–5 October 2019, Kislovodsk, Russian Federation). URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/698/2/022088.

16. Krivoshapkin P.V., Krivoshapkina E.F., Nazarova E.A., Stalyugin V.V. Osnovy kolloidnoj himii. Poverhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy. [Fundamentals of colloid chemistry. Surface phenomena and dispersed systems]. SPb: Universitet ITMO, 2019. 138 s.

17. Amragova I.V., Lipodaeva A.E., Slepko V.A., Gerbu B.K. Stroitel'stvo. Arhitektura. Dizajn – 2023: Materialy CHetvertoj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh, g. Kursk, 21 aprelya 2023 goda. Kurskij gosudarstvennyj universitet (KGU), Kursk: 2023. pp. 17-19.

18. Morgun L.V., Nagorskij V.V., Malova P.A. Himiya, fizika i mekhanika materialov. 2022. № 1 (32). pp. 15-25.

19. Karnauhov A. P. Adsorbciya. Tekstura dispersnyh i poristyh materialov. [Adsorption. Texture of dispersed and porous materials]. Novosibirsk: Nauka. Sib. predpriyatie RAN, 1999. 470 p.

20. Gavrilova N.N., Nazarov V.V. Analiz poristoj struktury na osnove adsorbcionnyh dannyh. [Porous structure analysis based on adsorption data]. M. RHTU im. D. I. Mendeleeva, 2015. 132 p.