

## Анализ механизма формирования и сохранения дисперсной газовой фазы в пенобетонных смесях

*В.Н. Моргун*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Отражена актуальность применения в строительстве газонаполненных бетонов. Перечислены проблемы формирования высококачественных ячеистых структур. Отмечено, что у газобетонов перечисленные проблемы успешно решаются рецептурными приемами, а для получения высококачественных пенобетонов необходим грамотный учет энергетических особенностей взаимодействия между дисперсной газовой фазой, упакованной в пенные пленки и цементно-песчаным шликером. Выявлены важнейшие факторы управления структурой пенобетонных смесей. Предложено рассматривать пенобетонные смеси как сложную иерархически многоуровневую систему, свойства которой определяющим образом зависят от взаимодействия между водой и молекулами ПАВ. Теоретически рассмотрен процесс перемещения молекул ПАВ из объема жидкой фазы на границу раздела «газ-жидкость». Приведены результаты экспериментальных исследований влияния расхода фибры на кинетику пластической прочности смесей, плотность получаемых бетонов и меру утраты ими дисперсной газовой фазы на этапе фазового перехода из вязкого состояния в упругое. На основе результатов эксперимента и научных обобщений сформулирован вывод о причинах и условиях сохранения дисперсной газовой фазы в структуре пенобетонных смесей.

**Ключевые слова:** пенобетонная смесь, дисперсная газовая фаза.

**Введение.** Проблемы обеспечения эксплуатационной надежности газонаполненных бетонов существуют столько же, сколько и материалы, называемые газо- и пенобетонами. Технологии их изготовления появились на рубеже 19 и 20 веков и с тех пор не прекращаются научные и практические работы по поиску рецептурно-технологических приемов, которые способны положительно влиять на свойства смесей и затвердевших бетонов [1-3].

Важнейшей причиной системного интереса специалистов к закономерностям процесса газонасыщения бетонных смесей является предельно малая теплопроводность воздуха при отсутствии конвективного теплообмена, составляющая всего  $\lambda=0,023$  Вт/(м<sup>0</sup>К). Именно воздух, дисперсно распределенный в объеме искусственного каменного материала, обеспечивает понижение его теплопроводности до уровня, который на

---

современном этапе применения пенобетонов в строительстве считается эффективным.

Хорошо известно, что насыщение цементно-песчаных растворов дисперсной газовой фазой осуществляется на этапе приготовления пенобетонных смесей. До тех пор, пока между компонентами сырья существуют преимущественно вязкие связи, обусловленные силами капиллярного стяжения воды, агрегативная устойчивость пенобетонных смесей весьма невелика, что на практике приводит к большому количеству брака. Полагаю, что научный анализ процессов массопереноса в пенобетонных смесях позволит приблизиться к пониманию приемов, опираясь на которые можно стабильно изготавливать высококачественные бетоны.

**Постановка задачи.** Газонаполненные бетонные смеси относят к ограниченно устойчивым дисперсным системам, свойства которых в период фазового перехода «от вязкого к упругому» управляются процессами массопереноса, возникающими в результате химического взаимодействия клинкерных минералов и воды [4, 5].

Если с этих позиций рассматривать структурообразование газобетонов, то можно констатировать, что процесс формирования дисперсной газовой фазы зависит от вязкости дисперсной системы и объема газа, выделяющегося в результате химического взаимодействия алюминиевой пудры со щелочью [6]. Поэтому достижение требуемых практикой плотности и прочности можно отнести к легко решаемым рецептурным задачам.

Формирование трехфазной структуры в пенобетонных смесях до последнего времени рассматривалось через призму механического смешивания технической пены с цементно-песчаным шликером различной вязкости [7, 8]. Общеизвестной, и чаще всего применяемой на практике, является двухстадийная технология их изготовления, которая крайне

---

чувствительна к колебаниям зернового состава сырья, температуре окружающей среды и ряду других факторов [9, 10]. Поэтому в настоящее время основные объемы газонаполненных бетонов в практике строительства представлены автоклавным газосиликатом, а изделия из пенобетонов, как правило, изготавливают малые предприятия стройиндустрии.

Тем не менее, несмотря на ограниченную популярность в практике применения пенобетонов, интерес к совершенствованию их технологии сохраняется потому, что начиная с 80-х годов XX века появились работы, отражающие возможность заводского производства энергосберегающих изделий безавтоклавного твердения [11, 12]. Исключение этапа автоклавной обработки не только удешевляет изделия из газонаполненного бетона, но и способствует весьма существенному развитию их номенклатуры [13].

Развитие теории и практики фибропенобетонов привело к необходимости научного анализа энергетических особенностей взаимодействия между дисперсной газовой фазой, упакованной в пенные пленки и цементно-песчаным шликером, предназначенным для формирования твердой фазы в пенобетонах.

Практическое обеспечение заданных свойств пенобетонов является важной рецептурно-технологической задачей потому, что жизненный цикл формирования пеноструктур и сохранения их положительных свойств во времени требует учета факторов, оказывающих влияние на процессы массопереноса [14] в период преобладания вязких связей между компонентами сырья. Принято считать, что макроструктура пенобетонной смеси зависит от:

- индивидуальных свойств сырьевых компонентов (вида, дисперсности, формы) [15, 16];
  - рецептуры (соотношений между вяжущим и заполнителем, расходов воды и пенообразователя) [1,7,9].
-

При этом назначение рецептуры опирается не на расчетные принципы, а на методы подбора (Методические рекомендации «Изготовление и применение ячеистого фибробетона». Министерство строительства и ЖКХ РФ. ФАУ «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве»), которые не позволяют гарантированно достигать заданных свойств в затвердевшем бетоне. Практика показывает, что при фазовом переходе «из вязкого в упругое» системно наблюдаются следующие виды ухудшения структуры пенобетонных смесей:

- их «вскипание», когда часть дисперсной газовой фазы активно выделяется из смеси, уложенной в опалубку;
- осадка смеси в результате поверхностного водоотделения.

Анализ перечня факторов, способных влиять на структуру пенобетонной смеси после её укладки в формы показывает, что к ним относятся:

- гравитационные силы;
- явления массопереноса, протекающие в результате гидратации вяжущего и влияющие на подвижное соотношение между водой и поверхностно-активными веществами (ПАВ), удерживающими дисперсную газовую фазу [17].

Исключить гравитационные силы из факторов влияния невозможно, поэтому их учет на практике осуществляют нормативным ограничением высоты формуемого слоя, величина которого регламентируется заданным классом плотности материала. А вот явления массопереноса рационально рассмотреть с позиций современных достижений физической химии.

Результаты анализа дают основания рассматривать пенобетонные смеси как сложную иерархически многоуровневую систему. Из работ современных физхимиков следует [18, 19], что водные растворы ПАВ, содержащие в своем объеме дисперсную газовую фазу, то есть пены, состоят

---

из лиотропных жидких кристаллов. Молекулы таких кристаллов включают полярную «головку» (гидрофильную группу) и углеводородные «хвосты» (гидрофобные группы). Поэтому при перемешивании ПАВ с водой и образуются пены.

Все молекулы ПАВ при образовании пен не способны полностью из раствора перемещаться в пенные пленки [18, 19]. Некоторая их часть всегда остается в водном растворе и физико-механические свойства пен (прочность, дисперсность) корреляционно зависят от:

- концентрации ПАВ в воде;
- продолжительности внешнего динамического воздействия на водный раствор ПАВ [20].

Анализ формирования структуры пенобетонных смесей в период вовлечения дисперсной газовой фазы показывает, что при перемешивании сырья имеет место направленное энергетическое воздействие на обводненную дисперсную систему, в результате которого возникает градиент концентрации ПАВ в направлении газовой составляющей [19]. Поэтому происходит захват порций воздуха гидрофобными фрагментами молекул ПАВ и формирование пенных пленок в объеме цементно-песчаного шликера.

Перемещение молекул ПАВ из объема жидкой фазы на границу раздела «газ-жидкость» формирует в бетоносмесителе не только макроструктуру пенобетонной смеси, но и влечет за собой физическое связывание свободной воды затворения пенными пленками. Изменение форм связи воды с компонентами сырья в результате вовлечения дисперсной газовой фазы приводит к повышению энергопотребления на валу бетоносмесителя [14] и, как следствие, структурной устойчивости пенобетонных смесей.

После укладки в опалубку процесс газонасыщения смесей завершен. В них начинают развиваться процессы диспергации и гидратации клинкерных

---

минералов цементного вяжущего, которые предопределяют рост концентрации ПАВ в межчастичной жидкости потому, что в результате этого процесса количество свободной воды в дисперсной системе будет уменьшаться.

В этот же период начинается процесс флокуляции дисперсных частиц твердой фазы, который выглядит как сцепление обводненных частиц заполнителя и цемента друг с другом в структуре межпоровых перегородок. Флокуляция дисперсных частиц твердой фазы в объеме межпоровых перегородок часть слабо физически связанной воды отжимает из центров формирующихся агрегатов на периферию [16, 18] в сторону пенных пленок. Этот процесс смягчает негативное влияние роста концентрации ПАВ в жидкой фазе пенобетонной смеси на её устойчивость.

Ранее установлено [16], что скорость процессов флокуляции дисперсных частиц твердой фазы существенно зависит от наличия в рецептуре смесей синтетической дисперсной арматуры. Поэтому был выполнен следующий эксперимент. При массовом соотношении «цемент : заполнитель = 1:1» были приготовлены пенобетонные смеси марки D500. Смесь с маркировкой ПБ содержала твердые компоненты только зернистой формы. В смеси с маркировкой ФПБ\* 0,5% от массы песка был заменен на полипропиленовую фибру, а в ФПБ\*\* содержал 1,0% фибры от массы песка (табл.). У приготовленных пенобетонных смесей были проконтролированы средняя плотность по ГОСТ 10181-2000, пластическая прочность при их укладке в формы и через 3 часа твердения, средняя плотность сухого затвердевшего бетона по ГОСТ 25485-2019.

Из данных, представленных в таблице следует, что замена части зернистого заполнителя на волокнистый способна существенно влиять на процессы флокуляции в структуре межпоровых перегородок пенобетонных смесей. Если в момент укладки исследуемых смесей в опалубку их

---

способность противостоять внешним нагрузкам, зафиксированная показателем пластической прочности, зависела только от проектного класса плотности затвердевшего бетона и не различалась по величине (табл.), то через 3 часа твердения пенобетон без фибры обладал существенно меньшей, чем дисперсно армированные.

Влияние вида пенобетонных смесей на их способность сохранять дисперсную газовую фазу

Вид пенобетонной смеси	Плотность смеси, г/л	Пластическая прочность (Па)		Плотность сухого пенобетона, кг/м <sup>3</sup>	Мера сохранения дисперсной газовой фазы, %
		при укладке в опалубку	через 3 часа твердения		
ПБ	732	46	207	524	91,3
ФПБ*	728	46	384	495	94,0
ФПБ**	716	46	540	482	100

**Примечания:**

ПБ – пенобетонная, т.е. содержащая наполнитель только зернистой формы;

ФПБ\* - фибропенобетонная с содержанием фибры 0,5%;

ФПБ\*\* - фибропенобетонная с содержанием фибры 1,0%.

Зафиксированный результат можно объяснить только различиями в интенсивности формирования кластеров за счет введения в обводненную дисперсную систему протяженных поверхностей раздела фаз [21]. Ускоренное формирование структуры межпоровых перегородок обеспечило не только повышение их пластической прочности (табл.), но и повысило сохранность вовлеченной при перемешивании дисперсной газовой фазы.

Важно отметить, что мера сохранения вовлеченного воздуха зависит от длины фибры. Если плотность сухого пенобетона при содержании фибры 1,0% принять за 100%, то идентичный ему по составу пенобетон с фиброй в количестве 0,5% был на 6% тяжелее. Пенобетон без фибры на этапе фазового перехода из вязкого состояния в упругое утратил почти 9% вовлеченного воздуха.

Выполненный анализ механизма формирования и сохранения дисперсной газовой фазы в структуре пенобетонных смесей и результаты приведенных экспериментальных исследований позволяют заключить следующее. Процессы массопереноса жидкой фазы, протекающие на этапе флокуляции твердых дисперсных частиц в пенобетонных смесях, направлены на снижение концентрации ПАВ в объеме межчастичной жидкости. Интенсивностью протекания процесса можно управлять путем введения фибры в рецептуру смесей, что, согласно экспериментальным данным, повышает их структурную прочность и способствует сохранению вовлеченной дисперсной газовой фазы.

### Литература

1. Вылегжанин В.П., Пинскер В.А. Особенности пористой структуры ячеистых бетонов и ее влияние на теплопроводность // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 67-69.
2. Fu Y. et al. Foam concrete: A state-of-the-art and state-of-the-practice review //Advances in Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 2020. – pp. 1-25. URL: doi.org/10.1155/2020/6153602.
3. Моргун Л.В., Моргун В.Н. О жидкокристаллической природе агрегативной устойчивости пенобетонных смесей // Строительные материалы. 2006. №6. С.22-23.
4. Хрусталева Б.М., Леонович С.Н., Яковлев Г.И., Полянских И.С., Лахайн О., Эберхардштайнер Й., Скрипкинас Г., Пудов И.А., Карпова Е.А. Структурная модификация новообразований в цементной матрице с использованием дисперсии углеродных нанотрубок и нанокремнезема //Наука и техника. 2017. №2. С. 93 – 103.
5. Ковшар С.Н. Изменение структурно-механических характеристик цементного камня при циклическом воздействии внешней среды //

- Строительная наука и техника. Теория и исследования. 2010. №1-2. С.60-63.
6. Леонтьев С.В., Шаманов В.А., Курзанов А.Д. Изучение влияния рецептурно-технологических факторов на процессы формирования структуры и свойств автоклавного газобетона пониженной плотности // Сб. тр. «Современный автоклавный газобетон». Екатеринбург. 2017. С 39-46.
  7. Винокуров О.Н. Опыт производства и применения неавтоклавных ячеистых бетонов. // Строительные материалы. 1986. №7. С.6-8.
  8. Садукасов М.С., Шойбеков Б.М., Токмаджешвили Г.Г., Айтбаев Д.Н., Ермуханбет М.А. Putzmeister: Новая технология пенобетона// Строительные материалы, оборудование и технологии XXIвека. 2017. №9-10. С. 38-40.
  9. Ву К.З., Баженова С.И. Исследование особенностей пенобетона на местных материалах Вьетнама//Сб. тр. Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии. 2020. С. 35-40.
  10. Ву К.З. и др. Влияния входных факторов на свойства пенобетона // Строительство и реконструкция. 2021. Том. 2. Номер. 94. С. 86-96.
  11. Лобанов И.А. Основы технологии дисперсно армированных бетонов. Автореф. дисс. д.т.н., Л., ЛИСИ, 1983. - 36 с.
  12. Моргун Л.В., Моргун В. Н., Богатина А. Ю. Фибропенобетоны - аспекты их применения с целью ресурсо- и энергосбережения в строительстве // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2019. № 1. С. 501-506.
  13. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Нагорский В.В., Богатина А.Ю. Актуальность применения фибропенобетона в современном строительстве // Технологии бетонов. 2021. № 3 (176). С. 27-31.
-

14. Управление процессами технологии, структурой и свойствами бетонов/  
Под ред. Чернышева Е.М., Шмитько Е.И: Воронеж ГАСУ, 2002. С. 78-124.
15. Ушеров-Маршак, А.В. Современный бетон и его технологии. URL: [agrotermal.ru/images/stat/32.pdf](http://agrotermal.ru/images/stat/32.pdf) (Дата обращения 04.02.2021)
16. Моргун Л.В., Вотрин Д.А., Моргун В.Н. Влияние диаметра дисперсной арматуры на скорость фазового перехода в фибропенобетонных смесях // Строительные материалы. 2018. № 11. С. 27-30.
17. Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. М., «Химия». 1967. 388 с.
18. Блинов Л. М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: «ЛИБРОКОМ». 2013. 480 с.
19. Холмберг К., Йенссон Б., Кронберг Б., Линдман Б. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах. Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2007. 526 с.
20. Костыленко К.И. Закономерности обеспечения структурной устойчивости пенобетонных смесей. Автореф. дис. на соиск. уч.ст. к.т.н. Ростов-на-Дону. РГСУ. 2014. 22 с.
21. Моргун Л.В. Пенобетон: монография. Ростов-на-Дону, РГСУ, 2012. – 154 с.

### References

1. Vylegzhanin V.P., Pinsker V.A. Stroitel'nye materialy. 2021. № 8. pp. 67-69.
  2. Fu Y. et al. Advances in Materials Science and Engineering. 2020. V. 2020. pp. 1-25. URL: [doi.org/10.1155/2020/6153602](https://doi.org/10.1155/2020/6153602).
  3. 3. Morgun L.V., Morgun V.N. Stroitel'nye materialy. 2006. №6. pp.22-23.
-

4. Hrustalev B.M., Leonovich S.N., YAKovlev G.I., Polyanski I.S., Lahajjn O., Eberhardshtajner J., Skripkinas G., Pudov I.A., Karpova E.A. Nauka i tekhnika. 2017. №2. pp. 93 – 103.
  5. Kovshar S.N. Stroitel'naya nauka i tekhnika. Teoriya i issledovaniya. 2010. №1-2. pp.60-63.
  6. Leont'ev S.V., SHamanov V.A., Kurzanov A.D. Sb. tr. «Sovremennyj avtoklavnyj gazobeton». Ekaterinburg. 2017. pp. 39-46.
  7. Vinokurov O.N. Stroitel'nye materialy. 1986. №7. pp.6-8.
  8. Sadukasov M.S., SHojbekov B.M., Tokmadzheshvili G.G., Ajtbaev D.N., Ermuhanbet M.A. Putzmeister: Stroitel'nye materialy, oborudovanie i tekhnologii HKHiveka. 2017. №9-10. pp. 38-40.
  9. Vu K.Z., Bazhenova S.I. Sb. tr. Aktual'nye problemy stroitel'stva i stroitel'noj industrii. 2020. pp. 35-40.
  10. Vu K.Z. i dr. Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2021. Tom. 2. Nomer. 94. pp. 86-96.
  - 9.11 Vu K.Z., Bazhenova S.I. Sb. tr. Aktual'nye problemy stroitel'stva i stroitel'noj industrii. 2020. pp. 35-40.
  10. Vu K.Z. i dr. Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2021. Tom. 2. Nomer. 94. pp. 86-96.
  11. Lobanov I.A. Osnovy tekhnologii dispersno armirovannyh betonov. [Fundamentals of the technology of dispersion-reinforced concrete]. Avtoref. diss. d.t.n., L., LISI, 1983. 36 p.
  12. Morgun L.V., Morgun V. N., Bogatina A. YU. Innovacionnye, informacionnye i kommunikacionnye tekhnologii. 2019. № 1. pp. 501-506.
  13. Morgun V.N., Morgun L.V., Nagorskij V.V., Bogatina A.YU. Tekhnologii betonov. 2021. № 3 (176). pp. 27-31.
  14. Upravlenie processami tekhnologii, strukturoj i svojstvami betonov. [Management of concrete technology processes, structure and properties].
-

- Pod red. CHernysheva E.M., SHmit'ko E.I.: Voronezh GASU, 2002. pp. 78-124.
15. Usherov-Marshak, A.V. Sovremennyj beton i ego tekhnologii. [Modern concrete and its technologies]. URL: [agrotermal.ru/images/stat/32.pdf](http://agrotermal.ru/images/stat/32.pdf) (Date assessed 04.02.2021)
16. Morgun L.V., Votrin D.A., Morgun V.N. Stroitel'nye materialy. 2018. № 11. pp. 27-30.
17. Rusanov A.I. Fazovye ravnovesiya i poverhnostnye yavleniya. [Phase equilibria and surface phenomena]. M., «Himiya». 1967. 388 p.
18. Blinov L. M. ZHidkie kristally: Struktura i svoystva. [Liquid Crystals: Structure and Properties]. M.: «LIBROKOM». 2013. 480 p.
19. Holmberg K., Jansson B., Kronberg B., Lindman B. Poverhnostno-aktivnye veshchestva i polimery v vodnyh rastvorah. [Surfactants and Polymers in Aqueous Solutions]. Per. s angl. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy. 2007. 526p.
20. Kostylenko K.I. Zakonomernosti obespecheniya strukturnoj ustojchivosti penobetonnyh smesey. [Regularities of Ensuring Structural Stability of Foam Concrete Mixtures]. Avtoref. dis. na soisk. uch.st. k.t.n. Rostov-na-Donu. RGSU. 2014. 22 p.
21. Morgun L.V. Penobeton: monografiya. [Foam concrete: monograph]. Rostov-na-Donu, RGSU, 2012. 154 p.

**Дата поступления: 23.12.2025**

**Дата публикации: 1.02.2025**