

Т.Е. КОБИДЗЕ, канд. техн. наук, В.Ф. КОРОВЯКОВ, д-р техн. наук, «НИИМосстрой»,  
С.В. ЛИСТОВ, ООО «Рутгер»

## Теоретические и практические основы получения пенобетона пониженной плотности

Традиционный метод получения пенобетона осуществляется в циклическом режиме путем перемешивания пен высокой кратности (кратность - в районе 15) с отдельно приготовленным раствором вяжущего. Эти пены представляют собой пространственную ячеисто-пленочную структуру, состоящую из пор многогранников, связанных между собой в общий, жесткий каркас разделительными тонкими «сухими» пленками. В отличие от низкократных пен (кратность - менее 6) в них практически отсутствует внутрискруктурная подвижность, «свободная» жидкая фаза и ее истечение (синерезис) в течение определенного времени после приготовления. Относительная гидростатическая устойчивость и низкое водосодержание обуславливают технологичность применения высокократных пен для поризации водной суспензии вяжущего в условиях циклического режима приготовления пенобетонной смеси. Однако наличие жесткой структуры и тонких «сухих» пленок определяют подверженность этих пен механическим разрушениям, что особенно ярко иллюстрируется в процессе их перемешивания (минерализации) с сухим порошком вяжущего (табл. 1).

Регулирование средней плотности пенобетона достигается подбором соотношения объемов пены заданной кратности и раствора вяжущего. В процессе перемешивания происходит трансформация высокократной двухфазной пены в трехфазную минерализованную пеноструктуру низкой кратности. Например, при получении легкого пенобетона 495 кг/м<sup>3</sup> - 216кг/м<sup>3</sup> конечная кратность пеномассы должна соответствовать 2,83—6,12 при коэффициенте трансформации 5,3—2,3 (табл.1).

Таблица 1

	Технологические характеристики пены при кратности								
	2	3	4	5	6	8	10	12	14
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,5	0,33	0,25	0,20	0,166	0,125	0,1	0,083	0,071
Консистенция	Текучая	Текучая	Текучая	Литьевая	Литьевая	Полужесткая	Жесткая	Жесткая	Жесткая
Подвижность (расплив), см	37	30	25	18	15	8	0	0	0
Объем воздушной фазы, %	50	67	75	80	83,33	87,5	90	91,6	92,8
Остаточный объем пены от исходного, после минерализации сухим порошком (В/Т=0,5), %	91	94	92	86	84	70	60	48	43
Средняя плотность пенобетона при В/Т=0,5, кг/м <sup>3</sup> :									
-расчетная без учета гашения пены (под чертой кратность пенобетонной смеси);	<u>871,2</u> 1,61	<u>626,6</u> 2,24	<u>495,7</u> 2,83	<u>407,8</u> 3,44	<u>345,3</u> 4,06	<u>266,2</u> 5,27	<u>216,2</u> 6,5	<u>181,3</u> 7,73	<u>157,1</u> 8,93
-с учетом гашения пены	949,6	664,3	535,3	444,5	400,6	319,4	298,3	290,0	275,0

Процесс трансформации приводит к расчленению пеноструктуры и новой пространственной переориентации пузырьков в объеме приготавливаемой пенобетонной смеси в условиях физико-механических воздействий на тонкопеночную структуру пены со стороны раствора, крупных частиц вяжущего, рабочих органов мешалки. Данный фактор, а также пониженные механические свойства высокократной пены приводят к значительным разрушениям ее объема при получении пенобетонных масс, образованию неоднородной ячеистой пористости, перерасходу пенообразователя, удлинению процесса схватывания вяжущего и твердения материала и, как следствие, снижению качественных характеристик получаемых материалов. Увеличение коэффициента использования пены в данной технологии достигается нерациональными приемами – повышением В/Т, применением специальных добавок - стабилизаторов и загустителей пены, а также низкоскоростного режима перемешивания в крупногабаритных горизонтальных мешалках циклического действия.

Особо проблематичным является получение пенобетонных масс с собственной объемной кратностью около 4 и более, что обусловлено следующими обстоятельствами.

При кратности пеноструктуры 4, объем вовлеченного воздуха составляет около 75%, что соответствует теоретическому пределу упаковки соприкасающихся сферических пор одинакового размера. Следовательно, структура пенобетонной смеси с кратностью менее 4 при любом размере пузырьков образуется из сферических пор, разделенных толстыми жидкими минерализованными прослойками (пеноструктуры эмульсионного типа). Экспериментальные и расчетные данные показывают, что отсутствие жесткого пространственного закрепления смежных пор низкократных пенобетонных масс и повышенная толщина межпоровых перегородок позволяют вести сравнительно эффективную гомогенизацию смеси при получении пенобетонных материалов со средней плотностью более  $450 - 550 \text{ кг/м}^3$  при В/Т 0,5-0,4 соответственно (табл. 1).

Пенобетонные смеси с кратностью выше 4 характеризуются «контактной» упаковкой полифракционной сферической пористой структуры, с возрастающим количеством соприкасающихся пор по мере роста кратности (рис.1). Теоретическому пределу плотной упаковки такой структуры соответствует пористость около 83% и кратность 6. Контактная упаковка резко ограничивает внутрискруктурную подвижность пенобетонной смеси, придает ее структуре жесткость, что практически исключает получение гомогенных пеномасс с однородной, бездефектной ячеистой пористостью. Из таблицы 1 видно, что к этим материалам относятся теплоизоляционный пенобетон со средней плотностью менее  $400 \text{ кг/м}^3$ .

Изложенные обстоятельства показывают, что в самой концепции традиционной технологии заложены противоречия которые затрудняют получение качественного пенобетона пониженной плотности (менее  $600 \text{ кг/м}^3$ ).

Решение указанной проблемы легло в основу при разработке технологии, характеристика которой приводится ниже.

В этой технологии в основу процессов приготовления и перекачивания пенобетонной смеси и их аппаратного оформления положен технологический метод «обжатие-релаксация» (защищен авторским свидетельством на изобретение). Согласно этому методу приготовление пенобетонной смеси производится путем минерализации предварительно обжатой пены, объем которой после минерализации релаксируется за счет постепенного снятия с готовой пеномассы обжимающего усилия.

Обжатие пены и пеносмеси вызывает искусственное снижение их кратности. Это приводит к перестройке пористой структуры и изменению свойств пеноструктур за счет уменьшения размера и взаимоудаления находящихся под избыточным давлением обжимающего усилия воздушных пузырьков, в том числе в зонах их соприкосновения, обуславливающих жесткость пеноструктуры (рис.1). С повышением степени обжатия увеличивается толщина межпоровых прослоек, плотность и тонкодисперсность пеноструктуры, устраняется жесткость ее строения, повышается внутрискруктурная подвижность и текучесть (табл. 1), что улучшает ее технологические свойства. При этом максимальная эффективность достигается при снижении кратности пеноструктуры ниже

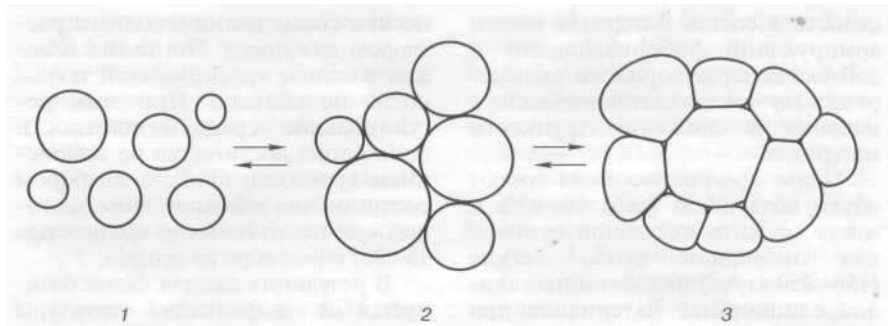


Рис. 1.Схема перестройки пеноструктур.: —> структурные изменения пены при повышении кратности в естественных условиях; «— структурные изменения пены при ее обжиге. 1 - кратность менее 4 (пеноструктуры эмульсионного типа) и 2 - кратность 4-6 Низкократные пены; 3 - кратность выше 6 (пены переходной структуры и высокократные).

Все это способствует упрочнению воздушных пузырьков, повышению удобообрабатываемости и устойчивости пеноструктур в процессе минерализации, гомогенизации и перекачки смеси. Данный метод способствует увеличению коэффициента использования пены, значительному сокращению времени приготовления пенобетонной смеси и использованию смесителей непрерывного действия, повышению однородности смеси, снижению В/Т, а после восстановления пеномассы до исходного объема - получению пенобетона с высокими структурными и физико-механическими характеристиками (рис.2, табл.2).

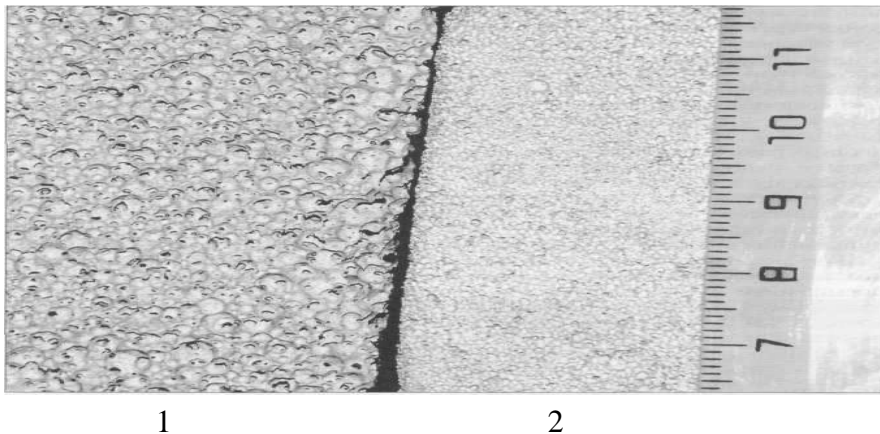


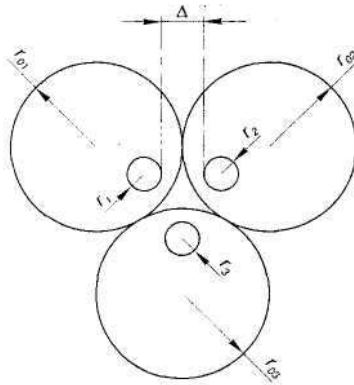
Рис. 2. Ячеистая структура пенобетона: 1- пенобетон низкой плотности традиционного изготовления; 2 - теплоизоляционный пенобетон той же плотности изготовленный методом «обжиге-релаксация»

Таблица 2

Технология приготовления пенобетона	В/Т	Диапазон времени гомогенизации (при сохранении заданной кратности пенобетонной смеси), с	Свойства пенобетона, ср. плотность 350 кг/м <sup>3</sup>		
			Средний диаметр пор, мм	Среднее квадратичное отклонение	Прочность при сжатии, МПа
Традиционная	0,8	30-90	0,32	4,3	0,42
обжиге-релаксация	0,8	до 10	0,3	4,1	0,46
Традиционная	0,6	45-120	0,28	5,2	0,54
обжиге-релаксация	0,6	до 10	0,25	4,3	0,63
Традиционная	0,5	20	0,3	7,3	0,38
обжиге-релаксация	0,5	до 10	0,22	4,6	0,7

Научно-экспериментальными исследованиями установлены зависимости между основными технологическими параметрами приготовления пенобетонных смесей при обжати и получаемыми характеристиками пенобетона. Был проведен математический анализ процесса обжатия пеноструктур, подтвердивший изменение взаиморасстояния соседних пузырьков в зонах соприкосновения при обжати системы по приведенной схеме (рис.3). Получены математические описания, отражающие взаимосвязь тех структурных параметров, подбором которых возможно направленное регулирование толщины прослоек соприкосновения соседних пузырьков ( $\Delta$ ) и, следовательно, установление условий для устранения жесткости пеноструктур разной плотности и обеспечения соизмеримости толщины данных прослоек с частицами вяжущего, обуславливающих создание оптимальных технологических условий для получения полностью и равномерно минерализованных, качественных пенобетонных масс. Этими параметрами являются радиус воздушных пузырьков до обжатия ( $r_{01}$ ), кратность пеноструктуры (пенобетонной смеси) до ( $k_0$ ) и после обжатия ( $k$ ):

$$\Delta = (r_{01} - r_{02}) \left[ \sqrt[3]{\frac{k}{k_0}} - \sqrt[3]{\frac{k-1}{k_0-1}} \right]$$



*Рис.3. Схема трансформации элементарной модели высокократной пеноструктуры при обжати:  $\Delta$  - толщина прослойки соприкосновения соседних пузырьков после обжатия;  $r_{01}$ ,  $r_{02}$ ,  $r_{03}$  исходные радиусы воздушных пузырьков;  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  - радиусы обжатых пузырьков;  $T$  - треугольник Гиббса (жидкая фаза при исходной кратности пеноструктуры)*

Эффективность метода подтверждается и тем, что технологический принцип, заложенный в его основу, позволяет применять метод и для транспортирования пенобетонных масс, совмещая процесс приготовления качественной смеси (на стадии обжатия) с процессом ее перекачивания по трубопроводу под давлением обжимающего усилия. При этом в процессе перекачивания и формирования смеси происходит релаксация пеномассы до начального объема за счет выравнивания избыточного давления с атмосферным.

Таким образом, при разработке данного метода максимально использован внутренний потенциал технологических свойств пеноструктур, решены принципиальные научно-практические вопросы технологии пенобетона, а именно:

- возможность получения высокопоризованных гомогенных материалов с пониженным В/Т отношением и высоким коэффициентом использования пены за счет направленного регулирования структурных и пластично-вязких характеристик пеноструктур в процессе приготовления пенобетонных смесей;

- разработан эффективный совмещенный способ приготовления и транспортирования пенобетонных смесей к месту укладки в заводских и построечных условиях, позволяющий осуществлять эти процессы в поточном режиме с использованием высокопроизводительных смесителей непрерывного действия.

Для практического воплощения метода был разработан базовый, компактный технологический узел (установка «МК-1») по непрерывному приготовлению и перекачиванию пенобетонных материалов со средней конечной плотностью  $200\text{кг/м}^3$  и выше в заводских и построечных условиях (рис.4).



Рис.4. Мобильная установка «МК-1»: 1. растворосмесительная установка; 2. автоматический дозатор воды затворения; 9. емкости рабочего водного р-ра пенообразователя, 4. расходомер цементного р-ра, 5. поризатор, 6. ротаметры, 7. компрессор, 8. водяная станция

Отличительной особенностью разработанного оборудования, кроме непрерывного режима работы, является напорная, закрытая и единая система герметично соединенных между собой технологических агрегатов. Такая система, в отличие от традиционной технологии и оборудования, исключает возможность прорыва вовлеченного воздуха из пены и пенобетонной смеси в атмосферу на всем протяжении технологического цикла вследствие отсутствия их контакта с окружающей воздушной средой.

Сердцевиной этой установки является малогабаритный поризатор непрерывного действия нагнетательного типа (защищен Европатентом и патентом РФ). Поризатор, имея габаритные размеры 210мм (диаметр) x 700мм (высота), одновременно приготавливает пенобетонную смесь в непрерывном режиме согласно методу «обжатие-релаксация» с производительностью до  $15\text{м}^3$  смеси в час и перекачивает ее по гибкому шлангу (на 10м по горизонтали и 5м в высоту) к месту заливки в ламинарном режиме. В процессе перекачивания и заливки обжатого пенобетона происходит самопроизвольная релаксация его объема за счет постепенного выравнивания избыточного давления смеси с атмосферным. Подача в поризатор исходных компонентов - водного раствора пенообразователя и сжатого воздуха (идущих на приготовление обжатой пены) и раствора цементного вяжущего, осуществляется с помощью гибких шлангов присоединенных соответственно к водному насосу, воздушному компрессору и раствороприготовительному агрегату, снабженному героторным насосом. Это позволяет размещать и передвигать малогабаритный и легкий поризатор установленный на колесах в непосредственной близости от места укладки пенобетонной смеси в цеху или на строящемся объекте вдали от агрегатов по приготовлению исходных компонентов как в горизонтальном (до 100м), так и в вертикальном направлении (20м). Отсутствие транспортирования больших порции готовой пенобетонной смеси от места приготовления до места заливки упрощает технологическую схему, повышает однородность и качество уложенной смеси и получаемых материалов. В табл.3. приведены физико-механические свойства пенобетона базового состава получаемого на промышленной установке без упрочняющих и модифицирующих добавок,

применение которых повышает качественные характеристики материала на 15-20<sup>0</sup>/о.

Таблица 3

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/м <sup>0</sup> С	Паропроницаемость, мг/(м.ч.Па)
165-172	0,15	0,05	0,35
187-214	0,2	0,055	0,3
240-264	0,3	0,064	0,28
308-323	0,7	0,07	0,26
487-505	1,8	0,1	0,2
583-609	3,2	0,12	0,17

Указанные факторы делают применение установки «МК-1» эффективным как в заводских так и в построечных условиях, особенно, где значительные расстояния транспортирования пенобетонной смеси по различным направлениям и уровням строящегося объекта, большие объемы заливаемой смеси за короткие сроки и ее заливка на конструкции разной несущей способности, предъявляют к узлу приготовления, подачи и заливки поризованной смеси повышенные требования по производительности, компактности, массе, маневренности, дальности перекачивания, стабильности работы и свойств получаемых материалов.

Перечисленным требованиям в наибольшей степени отвечает мобильная установка «МК-1», которая в отличие от аналогов совмещает операции приготовления и перекачивания пенобетонной смеси, имеет гибкие связи между узлами-агрегатами по приготовлению и подаче исходных компонентов в поризатор и миниатюрный, легкий, мобильный совмещенный смеситель-растворонасос (поризатор) с высокой производительностью.

Перечисленные отличия упростили технологическую схему монолитного бетонирования пенобетонных масс в построечных условиях, придали «МК-1» максимальную маневренность и способность эффективной реализации процесса монолитного бетонирования в самых разнообразных и изменчивых условиях строящихся объектов, повысили управляемость работы установки, стабильность технологических процессов и свойств получаемых материалов (Рис.5).



Рис.5

При производстве изделий в заводских условиях решены следующие задачи: уход от неэффективной литьевой технологии и дорогостоящих металлических кассетных форм, сокращение производственных площадей и улучшение тепловлажностного режима созревания отформованных пенобетонных масс. Способом изготовления пенобетонных изделий была избрана резательная технология, а материалом для изготовления бортоснасток заливочных форм - опалубочная фанера.

Формы-отсеки имеют размеры 1000x1200x600мм (Рис.6). Они, ввиду своих конструктивных особенностей, могут собираться в непрерывную линию, что позволяет максимально использовать полезную площадь производственного помещения. Как показала практика, использование в отсеках полиэтиленовых вкладышей исключают протечки и адгезию пенобетона к опалубке. Кроме того, полиэтиленовые вкладыши совместно с бортами из опалубочной фанеры, имеющих повышенные теплоизолирующие свойства, создают эффект термосного режима, что благоприятно сказывается на структурные и физико-механические характеристики пенобетона. Для механизации подачи расформованного пенобетонного массива на резательный стол разработан специальный захват. Значительное снижение трудозатрат и ускорение процессов распалубки и сборки форм достигается тем, что борта, установленные на шарнирах и имеющие клиновые замки, являются несъемными. При распалубке, оставаясь закрепленными на форме, они отклоняются на  $40^{\circ}$  и не требуют дополнительного места для складирования.



Рис.6

На основе учета негативных сторон применения струнных резательных машин был разработан и включен в технологическую линию новый резательный агрегат (рис.7).



Рис.7

Агрегат работает полностью в автоматическом режиме и обслуживается одним оператором. В качестве режущего тела используется цепь, что позволило устранить ограничения по прочности разрезаемого пенобетонного массива. Производительность агрегата—до  $17\text{ м}^3/\text{час}$ , точность реза 1-2 мм.

Конструктивно агрегат состоит из трех последовательно установленных столов и двух резательных порталов. Агрегат способен обрабатывать боковые грани пенобетонных массивов и выпускать изделия четырех типоразмеров (стеновые и перегородочные блоки и теплоизоляционные плиты). Съем готовой продукции осуществляется унифицированным захватом (Рис.8) при помощи консольно-поворотного крана на поддоны размером 1000x1200мм, которые погрузчиком доставляются на склад готовой продукции.



Рис.8.

Важно отметить также следующие обстоятельства:

- налажено заводское производство и сборка мобильной установки «МК-1» и основных узлов стационарной линии, в которых применяемые приборы и агрегаты также имеют заводское происхождение;

- в разработанной технологии применяются прошедшие широкую производственную апробацию сравнительно дешевые современные пенообразователи, обеспечивающие агрегативную устойчивость пенобетонной смеси до отверждения и высокие физико-механические свойства получаемых материалов;

- разработана методика подбора оптимального состава пенобетона без и с использованием модифицирующих добавок, в зависимости от качества и вида исходного сырья, средней плотности материала и заданных физико-механических свойств, метода производства и области применения.

Мобильная установка, как и в целом стационарная технологическая линия прошли апробацию и успешно эксплуатируются в Германии, Чехии, Казахстане, Украине и ряде городов России с целью производства стеновых, перегородочных и теплоизоляционных изделий заводской готовности и монолитной заливки в построечных условиях пенобетонных утеплителей стен, кровель, мансард, полов и др.