

УДК 666.973.6

Е. В. Королев, В. А. Береговой, Н. А. Прошина

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЕНОКЕРАМОБЕТОНА*

Представлена уточненная методика расчета параметров смесителя для производства пенокерамобетонов и результаты исследования влияния рецептуры смесей и параметров смесителя на свойства пеномассы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ячеистые бетоны, пенокерамобетоны, проектирование оборудования, смесители.

The specified design procedure of mixer characteristics for productions concrete skim ceramic is presented. The research finding of mix formulations and mixer characteristics influents on the properties mass skim is presented.

K e y w o r d s: foamed concrete, concrete skim ceramic, hardware design, mix.

В настоящее время в жилищном и промышленном строительстве нет технологии и строительного материала, позволяющих одновременно обеспечить возросшие требования потребителей к долговечности, экологичности, пожарной безопасности, теплопроводности, прочности и паропроницаемости. В частности, минеральные ваты и пенопласты имеют ограниченный срок службы: в процессе длительной эксплуатации минеральные ваты оседают, образуя при этом мостики холода, и экологически небезопасны, а пенопласты подвергаются окислительной и биологической деструкции, имеют низкую температуру воспламенения, а при горении выделяют токсичные вещества. Применение ячеистых бетонов (пенобетонов и газосиликатов) в качестве утеплителя ограничено их высокой сорбционной способностью, склонностью к развитию усадочных деформаций и коррозионных процессов. Относительно невысокая температура эксплуатации не позволяет использовать ячеистые бетоны на объектах теплоэнергетики и промышленности для утепления сильно нагретых поверхностей (печи, сушилки, топки и др.). Широко применяемый в 1970—1980-е гг. керамзит по теплоизоляционным свойствам не соответствует требованиям, предъявляемым к эффективным теплоизоляционным строительным материалам.

Перспективным направлением решения задачи повышения теплозащиты при реконструкции и строительстве объектов является использование новых эффективных теплоизоляционных материалов. Среди последних пеностекло и пенокерамика выделяются сочетанием уникальных эксплуатационных показателей по теплопроводности и сорбционному увлажнению, долговечности, экологической и пожарной безопасности, прочности. Такое сочетание свойств обеспечивает технико-экономическую эффективность теплоизоляции на основе ячеистого керамобетона по сравнению с другими минеральными и

* Публикуется при поддержке государственного контракта № 16.552.11.7025 от 29.04.2011 г.

полимерными материалами аналогичного назначения. Предлагаемые материалы обладают пониженным сорбционным увлажнением, высокой долговечностью (существенно превышающей срок службы полимерных аналогов и минеральной ваты), высокой степенью шумоподавления (стена из разработанных материалов плотностью 400 кг/м^3 и толщиной 8 см снижает уровень шума от 50 децибел и выше с частотой колебаний звуковой волны 500 Гц), превосходной пожаростойкостью (по принятой классификации разработанные материалы относятся к самым высоким классам по негорючести (A1) и огнестойкости (T_{90})) [1—3].

Изготовление пенокерамобетона в заводских условиях рационально проводить посредством «сухой минерализации пены», что позволит совместить процессы приготовления пены и пенокерамобетонной массы в одном аппарате, снабженном устройствами регулировки мощности и скорости вращения вала. Процесс изготовления пеномассы осуществляется в два этапа. На первом этапе генерируют пену, которую затем совмещают с минеральными компонентами.

Создание пеномассы обеспечивается протеканием процессов:

формирования центральной воронки за счет вихревых движений массы, вызванных диссипацией механической энергии от вращательного движения ротора мешалки. Основными параметрами центральной воронки, во многом определяющими процесс генерации пены, являются глубина h_v и высота поднятия раствора по внутренней поверхности мешалки h_p ;

генерации вблизи поверхности раздела раствора и воздушной воронки мельчайших пузырьков воздуха, увлекаемых турбулентными струйками, образованными быстрым вращением лопастей мешалки, а также частичным «захлопыванием» воздуха при срыве отдельных потоков, поднятых над общей поверхностью раствора [4, 5];

дробления больших пузырьков на более мелкие под влиянием инерционных сил и напряжений, возникающих под действием сил вязкого трения на воздушные включения как со стороны раствора, так и со стороны деталей мешалки.

После «захлопывания» пузырька он способен сформировать воздушную ячейку в пенокерамобетонной массе в том случае, если соблюдается равенство между выталкивающей силой и величиной пластической прочности пористой массы. С учетом пластической прочности пеномассы скорость всплытия отдельного газового пузырька в пенокерамобетонной массе можно выразить уравнением Адамара — Рыбчинского [6]

$$\vartheta = \frac{2}{3}(\rho_2 - \rho_1)g \frac{R^2}{\eta_2} \frac{\eta_1 + \eta_2}{2\eta_2 + 3\eta_1} \approx \frac{\rho_2 g R^2}{3\eta_2},$$

где ρ_i — плотность; η_i — динамическая вязкость; индекс 1 относится к газу, индекс 2 — к жидкости; R — радиус газового пузырька.

На скорость всплытия пузырьков также значительное влияние оказывают гидродинамические условия образования пены. При значительных скоростях перемешивания пузырьки газовой фазы при всплытии сильно деформируются, приобретая форму сплюсненного эллипсоида, вибрируют и начинают дви-

гаться по спиральной траектории; при этом скорость их всплытия определяется уравнением

$$\vartheta = 0,792g^{1/2}V^{1/6},$$

где V — объем газового пузырька.

В случае единовременного всплытия большого числа пузырьков вовлекаемого воздуха скорость их вертикального движения к поверхности раствора определяется видоизмененным законом Стокса [6]

$$\vartheta = \frac{g\rho_2 R^2}{9}(1-\varphi)^2(1-\varphi^{5/3})^{-1},$$

где φ — объем вовлекаемого воздуха.

Таким образом, процесс получения пены определяется гидродинамическими факторами, а также концентрацией, видом пенообразующего ПАВ и реологическими характеристиками поризуемого раствора.

Мощность и основные геометрические параметры смесителя, разработанного нами для получения пенокерамобетонной массы, определяли по методике [4]. Очевидно, что скорость воздухововлечения в раствор зависит от мощности распределения энергии, передаваемой пеноминеральной смеси от вращения рабочих приспособлений ротора мешалки. Распределение скоростей ψ_1 и ψ_2 по длине лопастей перемешивающего устройства зависит от крутящего момента k и геометрических параметров мешалки:

$$2,4 \frac{0,1\psi_1^2 + 0,222\psi_1\psi_2 + 0,125\psi_2^2}{\lambda_T \bar{R}(1 + 0,4\psi_1 + 0,5\psi_2 + 2(1 + \psi_1 + \psi_2)\ln \bar{R})^{1,75}} = k = \frac{\gamma}{z_M \xi_M Re_{ц}^{0,25}},$$

где γ — коэффициент, учитывающий наличие свободного пространства между поверхностью раствора и крышкой перемешивающего устройства (для аппаратов со свободным уровнем жидкости $\gamma = 4HR^{-1} + 1$, а при отсутствии свободного пространства $\gamma = 4HR^{-1} + 2$); H — высота заполнения мешалки, м; R — радиус рабочих лопастей мешалки, м; z_M — число мешалок на валу; $Re_{ц}$ — критерий Рейнольдса, равный

$$Re_{ц} = \frac{\rho n d_M^2}{\mu},$$

где n — частота вращения вала мешалки; ρ — плотность перемешиваемого раствора; μ — вязкость раствора; d_M — внутренний диаметр емкости мешалки.

Обобщенный коэффициент ξ_M , характеризующий конструкцию мешалки,

$$\xi_M = \xi_L z_L \frac{h_L}{r_L} \varphi_a,$$

где ξ_L — коэффициент, учитывающий тип перемешивающего устройства; z_L — число лопастей; h_L — высота лопасти мешалки, м; r_L — радиус лопасти, м; φ_a — коэффициент, учитывающий угол наклона лопастей к горизонтальной плоскости.

Величина коэффициента λ_T зависит от расстояния между лопастями мешалки и стенкой аппарата:

$$\lambda_T = \frac{\bar{R}}{(20,35\bar{R} - 19,1)},$$

где $\bar{R}$ — относительный радиус лопаток ($\bar{R} = Rr_{\text{л}}^{-1}$, R — внутренний радиус мешалки).

Величину ψ_1 определяют по номограммам [7] с учетом величины гидродинамического коэффициента E :

$$E = \frac{\gamma}{z_M \xi_M Re_{\text{ц}}^{0,25}}.$$

Размеры центральной воронки H_B и высоту поднятия раствора h_p у стенки мешалки равны:

$$H_B = h_p + \frac{\omega_0^2 r_0^2 (1 + \psi_1 + \psi_2)^2 k_B}{g},$$

$$h_p = \frac{\omega_0^2 r_0^2}{2g} \left(1 + 0,25\psi_1^2 + \frac{1}{3}\psi_2^2 + \frac{4}{7}\psi_1\psi_2 + 0,8\psi_1 + \psi_2 \right),$$

где ω_0 — угловая скорость вращения концевых участков рабочих лопаток; $k_B = 1 - \bar{R}^2$.

Общий объем центральной воздухововлекающей воронки

$$V_B = \frac{\pi \omega_0^2 r_0^2}{g} \left[0,25 + \frac{2}{7}\psi_1 + \frac{1}{3}\psi_2 + \frac{2}{9}\psi_1\psi_2 + 0,1\psi_1^2 + \frac{1}{8}\psi_2^2 + (1 + \psi_1 + \psi_2)^2 \ln \bar{R} \right].$$

Сопоставление экспериментальных данных, полученных авторами в ходе проведения исследований, и расчетных значений по методике [4] показало значительное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями. Очевидно, что различие экспериментальных данных и расчетных значений связано с особенностями перемешивания растворов, содержащих пенообразующие ПАВ. Адсорбция молекул пенообразователя на поверхности раздела фаз раствор — воздух и образование упругих межпоровых ламелл в структуре ячеистой массы сопровождается изменением реологических свойств (вязкости) поризуемого раствора.

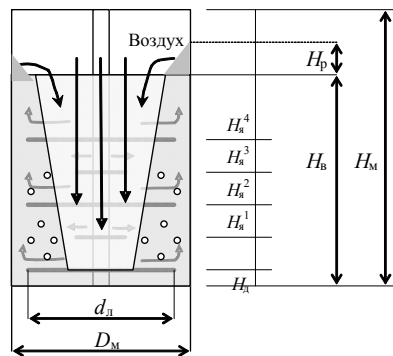


Рис. 1. Схема процесса воздухововлечения в раствор

Закономерность изменения величины динамической вязкости от кратности вспенивания и времени перемешивания исследовали на лабораторных роторных мешалках с изменяемыми геометрическими параметрами лопастей. Схема процесса воздухововлечения в раствор и основные параметры мешалки приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Основные параметры мешалки

Высота лопастей, м	Угол наклона лопастей, град.	$D_M/d_{лз}$, м	Число лопастей/ярусов, $z_{л}/z_M$	n , об/с	μ , Па·с	H_p , м расч./экс.	Мощность, кВт
0,001	90	0,015	2/5	15	0,099	0,08/ 0,032	0,6

Зависимость вязкости пены от кратности вспенивания и вида пенообразователя, полученная после обработки экспериментальных данных, приведена на рис. 2.

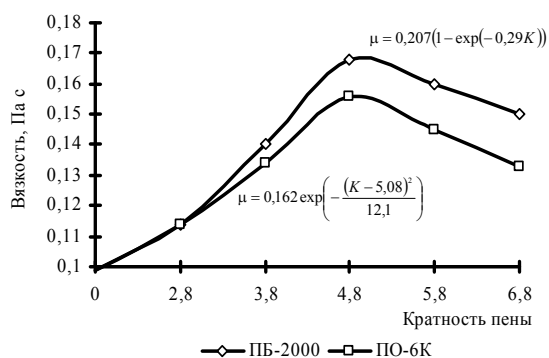


Рис. 2. Экспериментальная зависимость вязкости пены от кратности вспенивания

Для мешалок с различными типами лопастей величина кратности вспенивания раствора находится по уравнениям, приведенным в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Зависимость кратности пены K от времени перемешивания t и конструкции перемешивающего устройства (пенообразователь ПБ-2000)

Конструкция перемешивающего устройства	Вид аппроксимирующего уравнения
Три рабочих лопасти с отверстиями (повернуты на 45°)	$K(t)=4,77(1 - \exp(-0,073t))$
Две рабочих лопасти с отверстиями (повернуты на 45°)	$K(t)=4,86(1 - \exp(-0,08t))$
Одна рабочая лопасть с отверстиями (повернута на 45°)	$K(t)=5,74(1 - \exp(-0,113t))$
Горизонтальные рабочие лопасти с отверстиями	$K(t)=6,54(1 - \exp(-0,139t))$
Сплошные горизонтальные рабочие лопасти	$K(t)=6,61(1 - \exp(-0,167t))$

Для повышения точности определения основных параметров процесса высокоскоростного перемешивания растворов с добавками пенообразующих веществ существующая методика расчета [4] была дополнена посредством введения следующих этапов:

расчет кратности пены с учетом конструктивных особенностей мешалки (см. табл. 2);

расчет вязкости пены по данным рис. 2;

расчет критерия Рейнольдса по формулам:

для пенообразователя ПБ-2000:

$$Re_{\text{п}} = \frac{\rho n d^2}{0,207(1 - \exp(-0,29K))};$$

для пенообразователя марки ПО-6К:

$$Re_{\text{п}} = \frac{\rho n d^2}{0,162 \exp\left(-\frac{(K - 5,08)^2}{12,1}\right)}.$$

Результаты исследований по определению зависимости высоты подъема поризуемого раствора от скорости вращения ротора приведены на рис. 3.

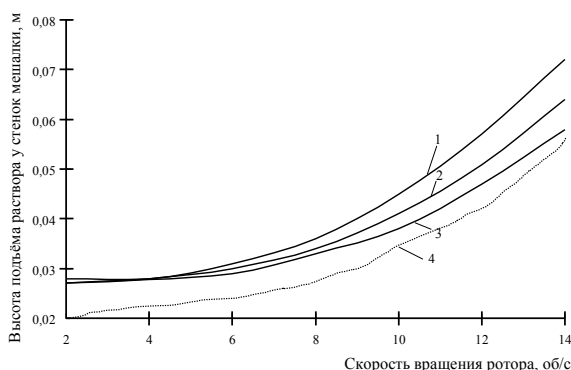


Рис. 3. Расчетные (1...3) и экспериментальная (4) зависимости высоты подъема раствора от его динамической вязкости, Па·с:

1 — $\mu=0,1$; 2 — $\mu=0,13$; 3 — $\mu=0,16$; 4 — экспериментальная при В/Т, равном 0,85

Зависимость мощности, потребляемой мешалкой на перемешивание раствора, от времени перемешивания приведена на рис. 4.

Анализ экспериментальных данных показывает, что на эффективность воздухововлечения при высокоскоростном перемешивании значительное влияние оказывает конструкция рабочих лопастей. С целью обоснования целесообразности установки дополнительных устройств, ускоряющих процесс образования пузырьков, были проведены исследования по определению влияния высоты расположения и угла наклона лопастей на скорость формирования пены. В качестве приспособлений, заметно изменяющих параметры ячеистой структуры пены, апробировано устройство дополнительных отверстий на нижних рабочих лопастях, расположенных под углом от 30 до 45° по

отношению к плоскости вращения. Воздух, увлекаемый нижней лопастью из объема центральной воронки, попадает в нижнюю часть раствора и, проходя через отверстия, разделяется на отдельные воздушные пузырьки (см. рис. 1).

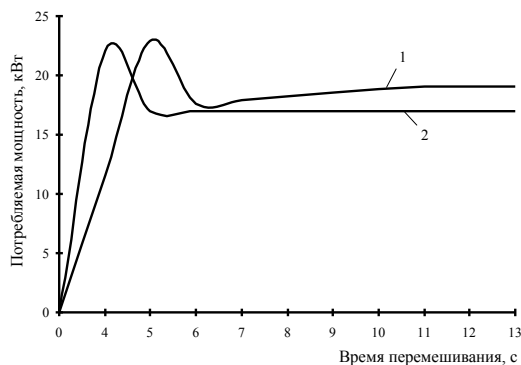


Рис. 4. Зависимость мощности, потребляемой на перемешивание, от времени

(для аппарата с параметрами $r_m=0,75$, $r_d=0,3$, $H=0,28$ м, $z_m=5$, $z_d=2$):

1 — расчетная (по уточненной методике); 2 — экспериментальная (с учетом изменения вязкости от кратности вспенивания)

Установлено, что размер формируемых воздушных ячеек можно задавать посредством подбора соответствующего диаметра отверстий, а также угла наклона и скорости вращения лопаток. В ходе лабораторных исследований установлены границы применения данной расчетной схемы. Эффективное воздухововлечение, оцениваемое по кратности вспенивания, наблюдалось только до определенного граничного соотношения между высотой поризованного раствора и диаметром емкости мешалки. Для всех использованных в работе пенообразователей эта величина находилась в пределах от 3,5 до 5. Высота расположения отдельных лопастей по отношению к поверхности поризуемого раствора не оказывала заметного влияния на максимально возможную кратность вспенивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Beregovoi V.A., Eremkin A.I., Beregovoi A.M.* Heat-resisting foam concrete based on aluminum silicate // Proceedings of the International Congress. «Concrete: constructions sustainable option». Vol. Concrete for fire Engineering, 2008. Scotland, UK, University of Dandy, published by Bre press, P. 263—272.
2. *Береговой В.А.* Эффективные пенокерамобетоны для жилищного и специального строительства // Строительные материалы. 2008. № 9. С. 93—96.
3. Методика подбора и обоснование компонентного состава сырьевых смесей для изготовления пенокерамобетонов / В.А. Береговой, Е.В. Королев, Н.А. Прошина, А.М. Береговой // Строительные материалы. 2011. № 6. С. 40—47.
4. *Агабальянц Э.Г., Овчаренко Ф.Д.* Влияние гидроокиси кальция на физико-химические свойства глинистых суспензий // Физико-химическая механика почв, грунтов, глин и строительных материалов. Ташкент : ФАН, 1966. 477 с.
5. *Русанов А.И.* Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. СПб. : Химия, 1992. 280 с.
6. *Мартыненко В.А.* Тенденции развития формовочно-резательного оборудования для производства мелкоштучных ячеисто-бетонных изделий // Строительные материалы. 2004. № 3. С. 18—19.
7. *Петров Г.С., Рабинович А.Ю.* Нефтяные сульфокислоты и их техническое применение. М., 1932.

1. *Beregovoi V. A., Eremkin A. I., Beregovoi A. M.* Heat-resisting foam concrete based on aluminum silicate // Proceedings of the International Congress. «Concrete: constructions sustainable option», Vol. Concrete for fire Engineering, 2008. Scotland, UK, University of Dandy, published by Bre press, P. 263—272.
2. *Beregovoi V. A.* Effektivnye penokeramobetonny dlya zhilishchnogo i spetsialnogo stroitelstva // Stroitelnye materialy. 2008. № 9. S. 93—96.
3. Metodika podbora i obosnovanie komponentnogo sostava syrevykh smesey dlya izgotovleniya penokeramobetonov v / V.A. *Beregovoy*, E.V. Korolev, N.A. Proshina, A.M. Beregovoy // Stroitelnye materialy. 2011. № 6. S. 40—47.
4. *Agabalyants E.G., Ovcharenko F.D.* Vliyanie gidrookisi kaltsiya na fiziko-khimicheskie svoystva glinistykh suspenzi // Fiziko-khimicheskaya mekhanika pochv, gruntov, glin i stroitelnykh materialov. Tashkent : FAN, 1966. 477 s.
5. *Rusanov A.I.* Mitselloobrazovanie v rastvorakh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv. SPb. : KHiMiya, 1992. 280 s.
6. *Martynenko V.A.* Tendentsii razvitiya formovochno-rezatel'nogo oborudovaniya dlya proizvodstva melkoshtuchnykh yacheisto-betonnykh izdeli // Stroitelnye materialy. 2004. № 3. S. 18—19.
7. *Petrov G.S., Rabinovich A.Yu.* Neftyanye csulfokisloty i ih tekhnicheskoe primenenie. M., 1932.

© Королев Е.В., Береговой В.А., Прошина Н.А., 2011

Поступила в редакцию
в августе 2011 г.

Ссылка для цитирования:

Королев Е.В., Береговой В.А., Прошина Н.А. Расчет и конструирование технологических аппаратов для производства изделий из пенокерамобетона // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2011. Вып. 3(17). Режим доступа: www.vestnik.vgasu.ru.