

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ  
СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ “ЛЕГКИХ” ПЕНОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ.  
(ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ  
“ЛЕГКОЙ” ПЕНОБЕТОННОЙ СМЕСИ В ИНДУКЦИОННОМ ПЕРИОДЕ)\***

Сидоренко Ю.В., Коренькова С.Ф., Стрелкин Е.В.

*Самарский государственный архитектурно-строительный университет, г. Самара*

В настоящее время в строительстве большое внимание уделяется созданию и применению эффективных утеплителей, что связано с повышением требований к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций зданий, установленных СНиП II-3-79<sup>\*\*</sup>. К числу наиболее перспективных утеплителей относится, в частности, неавтоклавный теплоизоляционный пенобетон, отличающийся эксплуатационной совместимостью с конструкционными материалами, относительно простой технологией производства и распространенностью применяемого (чаще всего – местного) сырья, экологической и пожарной безопасностью, долговечностью и т.д. Его применение особенно востребовано в малоэтажном и сельском строительстве (коттеджи, “теплые” гаражи), для устройства межкомнатных перегородок, наружных стен с использованием керамического кирпича, сайдинга и кругляка (брёвна), чердачных перекрытий и т.п.

Однако часто производимый “легкий” пенобетон (марок D400 и ниже) характеризуется низким уровнем стабильности основных характеристик. Водная составляющая (в цементном тесте и в пене) существенно влияет на формирование структуры пенобетона низкой плотности уже на стадии заливки пенобетонной смеси в форму (индукционный период). Именно для “легких” смесей актуальны вопросы нестабильности, потери устойчивости при укладке их в формы, расслоение фаз. Очевидно, что совершенствованием одного технологического процесса не решить проблему стабильности параметров качества пенобетона. В частности, в научных разработках специалистов все еще остаются открытыми вопросы, затрагивающие теоретическое обоснование механизма потери устойчивости “легких” пенобетонных смесей с учетом гидродинамических факторов. Трудность решения подобной задачи связана с многофазностью рассматриваемой пенобетонной системы, высокой степенью нестабильности пенной структуры, полидисперсностью твердой и газовой фаз, коллективными явлениями, происходящими в системе, ее стохастичностью и другими факторами. Таким образом, разработка предложений для решения проблемы нестабильности “легкой” пенобетонной смеси, а, следовательно, и мероприятий по оптимизации неавтоклавной технологии производства теплоизоляционного пенобетона приобретают в настоящее время особую важность и актуальность.

Работы [1-14 и др.] по потере устойчивости пенной структуры показывают, что главная причина этого явления заключается в синерезисе свободной жидкости, происходящем под действием массовых сил. В частности, в [3, 4] рассмотрены частные случаи подобных систем (в основном для вертикального столба пены) и получены математические зависимости по синерезису. Однако реальная пенобетонная структура существенно отличается от классической пенной и, прежде всего - наличием твердой фазы, которая существенно меняет картину и замедляет синерезис по каналам Плато.

Потерю устойчивости легкого пенобетона можно рассматривать как на микроуровне (т.е. отдельной межпоровой перемычке), так и на макроуровне (по отношению к выделенному единичному объему). Решение второй задачи позволило бы, на наш взгляд, определить количественную теоретическую скорость расслоения пенобетонной смеси и выявить влияние на нее различных факторов.

Ценность постановки задачи моделирования устойчивости “легкой” пенобетонной смеси связана с получением модели, которая призвана помочь в прогнозировании поведения пенобетонной системы во время индукционного периода и уточнить технологические рекомендации по ее производству. Следует отметить, что к эффективным методам моделирования многофазных систем является применение механики взаимопроникающих континуумов.

Анализ научных работ в этом направлении показывает, что трудность моделирования 3-х фазной системы (пенобетонная смесь) связана с оценкой межфазных взаимодействий по границам фаз. Учитывая это, для формирования математической модели в индукционном периоде (до

начала схватывания пенобетонной смеси, находящейся в форме) предлагаем рассматривать 2-х фазную модель, включающую:

- твердожидкостную несущую фазу, для которой будут справедливы следующие допущения:
  - размеры твердых частиц достаточно малы по сравнению с неоднородностями полей концентраций и скоростей;
  - между твердыми частицами отсутствуют процессы агрегации, дробления, а также пренебрегаем взаимодействием между ними;
- газотвердожидкостную фазу (так называемый комбинированный кластер), которая равномерно распределена по объему системы и для которой также справедливы вышеизложенные допущения.

Действительно, при формировании структуры легкого пенобетона газовая фаза является каркасом, на котором концентрируется твердая фаза (явление бронирования). Твердая фаза, кроме того, удерживается в области газовой поры связанной водой. Так образуется комбинированный кластер из газовой поры (пузыря), твердых частиц и связанной воды. Подобные кластеры образуют пористую систему, по каналам Плато которой стекает свободная вода в процессе расслоения смеси. Присоединение твердых частиц к кластеру будет определяться балансом Ван-дер-ваальсовой, электростатической, расклинивающей составляющими межчастичного взаимодействия, кинетической энергией присоединенной частицы. При значительной кинетической энергии частица может разрушить кластер или под действием свободной воды покинуть его зону. Частицы, не попавшие в такие кластеры, будут утолщать перемычку, т.е. тем самым способствовать увеличению плотности пенобетона или кольматировать поры. Кстати, правомерность перехода к двухфазной системе находит подтверждение, например, в работах В.Н. Феклистова [15] по оценке формирования пенобетонной структуры различной плотности.

Предложенная схема позволяет сформировать подходы к математической модели процесса для изотермических условий. Для формируемой модели будем считать справедливыми, помимо изотермичности, требования монодисперсности фаз, растворения и диффузии газа. Между введенными в рассмотрение выше фазами будем полагать действительными следующие массовые переходы: переход твердых частиц из жидкой фазы на газовый кластер (и наоборот); переход связанной жидкости в свободную (и наоборот). Присвоим несущей фазе индекс 1, а газотвердожидкостной – 2. Рассматриваем движение несущей фазы по капиллярно-пористой системе, в качестве которой будет выступать каркас из упакованных случайным образом кластеров с минимумом энергии их взаимодействия (подобная упаковка характерна для “легких” теплоизоляционных пенобетонов).

Выделим в исследуемой системе элементарный единичный объем и для каждой из фаз составим:

- уравнения сохранения массы:

$$\frac{\partial r_1}{\partial t} + \text{div}(r_1 \cdot V_1) = -I_{12}^T + I_{21}^T - I_{12}^{cg} + I_{21}^{cg}, (1)$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial t} + \text{div}(r_2 \cdot V_2) = I_{12}^T - I_{21}^T - I_{21}^{cg} + I_{12}^{cg}, (2)$$

В уравнениях (1) и (2):  $I_{12}^T$  – удельный поток твердых частиц из несущей фазы 1 на поверхность фазы 2;  $I_{21}^T$  – то же, но в обратном направлении;  $I_{21}^{cg}$  – удельный поток связанной воды с пузырька в несущую фазу;  $I_{12}^{cg}$  – то же, но в обратном направлении.

- уравнение изменения импульса несущей фазы 1:

$$r_1 a_1 \frac{dV_1}{dt} = \text{div} s_1 - F_{21} + r_1 g + (V_2 - V_1) \cdot \sum I_{1,2}^{cg,m}, (3),$$

где:  $V_1$  и  $V_2$  – векторы скоростей фаз;  $F_{21}$  – межфазное трение;  $\rho_1 g$  – массовая сила.

Левая часть в уравнении (3) представляет инерционную силу от ускорения, действующего на фазу:  $V_1 = (V_{1x}, V_{1y}, V_{1z})$ . Первое слагаемое правой части определяет напряжения в фазе, второе – межфазное взаимодействие по внешним границам фаз и зависящее от  $(V_2 - V_1)$ . Третье слагаемое учитывает действие гравитационных сил, а четвертое и пятое – прирост / убыль импульса фаз от присоединенных масс твердых частиц и связанной воды.

- уравнение изменения импульса фазы 2:

$$r_2 a_2 \frac{dV_2}{dt} = \text{div} s_2 - F_{12} + r_2 g + (V_2 - V_1) \cdot \sum I_{2,1}^{m,cg}, (4),$$

где:  $\sigma_2$  – напряжение в дисперсной газотвердой фазе;  $F_{12}$  – межфазное трение.

Последнее слагаемое в уравнении (4) характеризует прирост импульса за счет присоединенных масс.

Будем считать, что нестационарный режим истечения жидкости представляет собой совокупность микроравновесных состояний, то есть:

$$\frac{\partial a_1}{\partial t} = \frac{\partial a_2}{\partial t} = 0.$$

Так как движущей силой синерезиса жидкости является гравитационная составляющая  $g$ , то целесообразно в дальнейшем ограничиться одномерным случаем (по оси Z). Поскольку индукционный период начинается после: розлива пенобетонной смеси в формы; замедления действия инерционных сил, то ими в дальнейшем упрощении модели можно пренебречь (по сравнению с массовыми силами). Поскольку формирование кластеров обычно заканчивается на этапе приготовления пенобетонной смеси, то присоединенными массами твердых частиц к газовому пузырьку можно пренебречь. Также для упрощения пренебрегаем в математической модели эффектами физико-химической природы (электрокинетические явления, смачиваемость поверхностей и т.п.).

Система уравнений (1 - 4) после упрощений примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial z} (a_1 \cdot V_{1z}) = I_{21}^{cs}, (5),$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (a_2 \cdot V_{2z}) = -I_{12}^{cs}, (6),$$

$$0 = \frac{\partial s_1}{\partial z} - f_{12} (V_{1z} - V_{2z}) + r_1 g + I_{21}^{cs} (V_{1z} - V_{2z}), (7),$$

$$0 = \frac{\partial s_2}{\partial z} + f_{21} (V_{2z} - V_{1z}) + r_2 g - I_{12}^{cs} (V_{2z} - V_{1z}), (8),$$

$$f_{12} = f_{21}.$$

Последние слагаемые в уравнениях (7) и (8) являются приращениями импульсов фаз за счет перехода связанной воды из фазы 2 в вязкую жидкость фазы 1.

Для нахождения межфазного трения  $f$  можно воспользоваться зависимостью:

$$f = a_2 \cdot V_{2z} \frac{e}{as},$$

где:  $e = a_1 / a_2$  – объемное соотношение фаз;  $S$  – удельная поверхность межфазного трения;  $a$  – коэффициент фильтрации при синерезисе. Для ячеистой модели:

$$a = \frac{a_1^3}{k \cdot a_2^2 \cdot S^2 \cdot m},$$

где:  $k$  – суммарная константа Козени-Кармана;  $\mu$  – вязкость несущей фазы, которую можно определить по формуле Эйнштейна:

$$\mu_1 = \mu_{жс} (1 + 5 a_{мжс} / 2 a_1),$$

где:  $\mu_{жс}$  – вязкость жидкости;  $a_{мжс}$  – объемная доля твердой фазы в жидкости.

Напряжение в вязкой несущей среде определяется:

$$s_1^{kl} = -P_1 \cdot d^{kl} + t_1^{kl};$$

$$t_1 = I_1 \nabla u_1 + 2 m_1 \cdot e_1^{kl}, (9),$$

где:  $\delta^{kl}$  – символ Кронекера;  $\tau^{kl}_1$  – тензор вязких напряжений;  $P_1$  – давление;  $e^{kl}_1$  – тензор скоростей деформаций несущей фазы.

Напряжение в дисперсной фазе в общем виде:

$$s_2 = s(r_0, a_1^{жс}, s_{ноб}), (10).$$

Примеры компрессионной характеристики дисперсной фазы приведены, например, в [16-19].

Для завершения формирования вышеприведенной модели необходимо добавить граничные условия, основываясь на данных:

- для верхней границы – скорость поступления свободной жидкости к верхней границе равна нулю, то есть  $V_{1z} = 0$ ;
- на нижней границе раздела жидкости и пенной структуры концентрация дисперсной фазы минимальна, то есть  $\alpha_2 \rightarrow \min$ .

Наши дальнейшие исследования по разработке модели предполагают анализ ее замыкания, получение численного решения системы дифференциальных уравнений для граничных условий, проведение экспериментальных исследований по анализу устойчивости модельных систем и сравнение полученных данных с теоретическими предположениями.

\* Данная работа выполнена в рамках тематического плана, финансируемого Федеральным агентством по образованию РФ в 2006 г., тема НИР: “Теоретические основы формирования пористой структуры в наполненных ячеистых бетонах”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983.
2. Трапезников А.А. Некоторые свойства пленок и пен и вопросы их устойчивости. // Пены. Получение и применение. / Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. Часть 1. Физико-химия пен.- М.: 1974. - С.6-37.
3. Канн К.Б. Некоторые закономерности синерезиса пен. // Коллоидный журнал.- 1978.- т. 40.- с.858.
4. Кротов В.В. Обобщенные уравнения синерезиса. // Коллоидный журнал.- 1984.- т. 4 – с. 14.
5. Канн К.Б. Капиллярная гидродинамика пен. - Новосибирск: Наука, 1989.
6. Волков П.К. Гидродинамика всплывающих пузырей и капель: Автореферат дисс.... д-ра физ.-мат.наук:-Новосибирск, 1992. -34 с.
7. Гудов А.М. Численное моделирование взаимодействия пузыря с различными типами границ в жидкости: Автореферат дисс... канд. физ.- мат. наук: - Кемерово, 1996. -24 с.
8. Сахабутдинов А.Ж. Численное трехмерное моделирование динамики газового пузырька: Автореферат дисс... канд. физ.-мат. наук: - Уфа, 1999. -19 с.
9. Кондратьев С.А. Развитие теоретической базы интенсификации процесса пенной флотации на основе оптимизации гидродинамики и физико-химических свойств поверхности раздела "газ - жидкость": Автореферат дисс... д-ра техн. наук: -М., 2002. -36 с.
10. Хисматуллин Д.Б. Математическое моделирование резонансных явлений в динамике пузырьков жидкостей: Автореферат дисс... канд. физ.-мат. наук: 05.13.16. -Уфа, 1998. - 23 с.:
11. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. –М.: Энергия, 1976. - С.295.
12. Гегузин Я.Е. Пузыри – М.: Наука, Физматгиз, библи. «Квант», вып. 46. - 1985.- С. 177.
13. Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных систем. – СПб.: Наука, 2000. - С. 359.
14. Островский Г.М., Некрасов В.А. Математическое моделирование процессов истечения жидкости из пен. // ТОХТ- 1966.- Т.30. - №6. - С.657 - 661.
15. Феклистов В.Н. К оценке формирования пенобетонной структуры различной плотности. // Строительные материалы. – 2002.- №10.- С.16.
16. Штакельберг Д.И., Сычев М.М. Самоорганизация в дисперсных системах. - Рига: Зинатне, 1990. - 175 с.
17. Федоткин И.М. Интенсификация технологических процессов. – Киев: Вища школа, 1979. - 342 с.
18. Федоткин И.М., Воробьев Е.И., Вьюн В.И. Гидродинамическая теория фильтрования суспензий. – Киев: Вища школа, 1986. - 166 с.
19. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред.– М.: Наука, 1987. - 360 с.