

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПЕНОБЕТОНА

В.Я. Керш, П.Н. Чабаненко (ОГАСА г.Одесса)

Анализируется раздельное влияние вида, количества и распределения твердой части межпоровых перегородок, ячеистой пористости и микропористости вспененной композиции на теплопроводность пенобетона. Выполнена компромиссная оптимизация состава по теплопроводности и прочности.

Представляя пенобетон, в соответствии с принятой моделью, двухфазной (твердая и газовая фазы) системой, можно в общем объеме образца V выделить объем собственно твердой части $V_{\text{ТВ}}$, объем, занимаемый ячеистой пористостью $V_{\text{яч}}$, и объем микропористости $V_{\text{МП}}$ (рис 1), причем

$$V = V_{\text{ТВ}} + V_{\text{газ}} \quad (1)$$

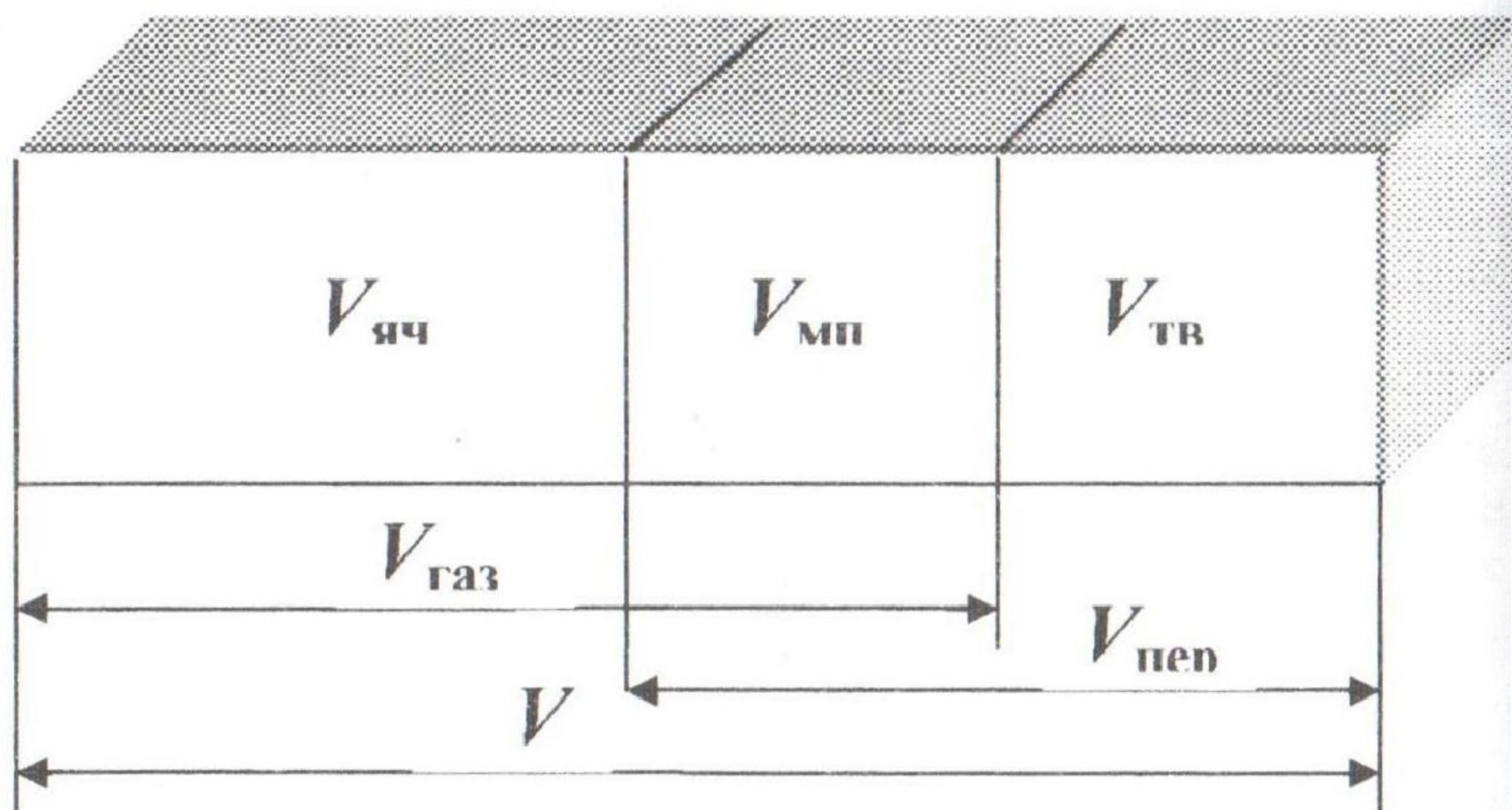


Рис. 1. Схема состава структурных элементов пенобетона

Разделение структурных элементов происходит с учетом следующих рассуждений. Объем газовой (паровоздушной) фазы рассматривается как сумма объемов ячеистых и микропор

$$V_{\text{газ}} = V_{\text{яч}} + V_{\text{мп}}. \quad (2)$$

Объем межпоровых перегородок $V_{\text{пер}}$ состоит из собственно твердой части $V_{\text{тв}}$ и микропор $V_{\text{мп}}$, содержащихся в перегородках, причем предполагается, что объемное соотношение твердой составляющей и микропористости в затвердевшем растворе такое же, как и в межпоровых перегородках пенобетона

$$V_{\text{пер}} = V_{\text{тв}} + V_{\text{мп}}. \quad (3)$$

В качестве параметра, характеризующего количество того или иного структурного элемента в материале, принята относительная величина – объемное содержание структурного элемента в общем объеме образца – объемная доля.

Общая пористость $P_{\text{газ}}$ опытного образца определяется через содержание твердой фазы $P_{\text{тв}}$ как

$$P_{\text{газ}} = 1 - P_{\text{тв}}, \quad (4)$$

$$\text{или } P_{\text{газ}} = (V - V_{\text{тв}}) / V = 1 - V_{\text{тв}} / V = 1 - \rho_{\text{тв}} / \rho_{\text{пб}}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{тв}}$ – так называемая "истинная" плотность (плотность исключительно твердой фазы), определяемая пикнометрическим методом ($\rho_{\text{тв}} = 2550 \text{ кг/м}^3$);

$\rho_{\text{пб}}$ – плотность образца пенобетона.

По аналогичной схеме определяется объемное содержание микропор $P_{\text{мп}}$ как

$$P_{\text{мп}} = 1 - \rho_{\text{тв}} / \rho_{\text{рч}}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{рч}}$ – плотность соответствующих образцов растворной части.

Объемное содержание ячеистой пористости $P_{\text{яч}}$ определяется как

$$P_{\text{яч}} = P_{\text{газ}} - P_{\text{мп}}. \quad (7)$$

Объемное содержание перегородок с учетом микропор рассчитывается как

$$P_{\text{пер}} = 1 - P_{\text{яч}}, \text{ или } P_{\text{пер}} = P_{\text{тв}} + P_{\text{мп}}. \quad (8)$$

В соответствии с изложенной методикой определены объемные содержания структурных элементов: газовой фазы, твердой фазы, межпоровых перегородок, ячеистой и микропористости опытных образцов пенобетона. Степень влияния перечисленных структурных параметров на теплопроводность оценена с помощью корреляционного анализа.

Наиболее тесно взаимосвязано с теплопроводностью (коэффициент корреляции R более 0,75) объемное содержание твердой части перегородок – твердая фаза. Заметное влияние на теплопроводность обнаружила ячеистая (макрс-) пористость ($R = -0,56$).

Разница в значениях теплопроводности между образцами с одинаковым содержанием твердой части перегородок объясняется особенностями её распределения в материале за счет ячеистой (в основном) и микропористости. В данном случае имеется в виду изменение общей протяженности и толщины межпоровых перегородок.

Распределение твердой составляющей в объеме ячеистого пенобетона, обладающего так называемой смешанной структурой, непосредственно связано с характером ячеистой пористости и, в первую очередь, с распределением пор по размерам.

Характер распределения газовых ячеек по размерам в опытных образцах пенобетона - дифференциальная пористость - изучен методом лазерной порометрии.

Для каждой размерной группы пор построены зависимости теплопроводности от процентного содержания пор этой размерной группы.

Анализ графиков показал, что макропоры, отнесенные к разным размерным группам, оказывают различное по характеру и степени воздействия влияние на теплопроводность пенобетона в исследованном диапазоне плотностей. Степень влияния размеров пор на теплопроводность оценивалась по величине коэффициента корреляции.

Общий характер зависимостей таков, что для различных по плотности пенобетонов поры размером до 0,2 мм (условно – мелкие) повышают теплопроводность, поры размером от 0,6 до 1,0 мм (условно – крупные) уменьшают теплопроводность.

Для равноплотных образцов характер зависимостей меняется.

Управлять распределением твердой составляющей во взаимосвязанной системе “поры – межпоровые перегородки” можно за счет рецептурно-технологических факторов, изменяя дифференциальную пористость, т.е. распределение макропор по размерам. Характер и степень влияния рецептурно-технологических факторов на структурные параметры, теплофизические и механические свойства пенобетона изучены с применением математического моделирования.

Анализ моделей, учитывающих зависимости плотности, теплопроводности и структурных параметров от рецептурно-технологических факторов позволяет сделать следующие выводы.

Минимальная теплопроводность в исследованном факторном пространстве определена у образцов, изготовленных с максимальным

количеством воды затворения и использованием известняка в качестве наполнителя.

При тех же уровнях факторов, как следует из моделей для ячеек, обеспечивается и соответствующее распределение твердой составляющей.

В проведенном эксперименте были изготовлены и исследованы образцы пенобетона в достаточно широком диапазоне плотностей, практически от 500 до 700 кг/м³.

Влияние плотности (или общей пористости) на теплофизические и механические свойства пенобетона достаточно изучено и вполне прогнозируемо.

Гораздо больший интерес представляет анализ взаимосвязей в системе "технология – структура – свойства" для материалов одинаковой плотности (с одинаковой общей пористостью). Как было указано ранее, теплопроводность таких материалов может колебаться в значительных пределах, и именно здесь находится дополнительный резерв её снижения.

Поскольку в опытной партии количество равноплотных образцов недостаточно для проведения прямых измерений, статистической обработки и достоверных выводов, принято решение применить один из методов компьютерного материаловедения – изопараметрический анализ (ИПА), предложенный проф. Вознесенским В.А.

Влияние рецептурно-технологических факторов на уровни нескольких свойств материала при фиксированном уровне одного из свойств, например плотности, анализируется на основе экспериментально-статистических (ЭС) моделей. Описанные ЭС моделями, в зависимости от вектора \mathbf{x} нормализованных рецептурно-технологических факторов ($|x_i| \leq 1$), свойства Y материала анализируются в условиях постоянного уровня одного из них – $A(\mathbf{x}) = A_{is} = \text{const}$. В данной работе применен усовершенствованный в рамках концепции полей свойств метод ИПА, в котором, наряду с ЭС моделями, используется метод Монте-Карло.

В выполненном вычислительном эксперименте плотность пенобетона зафиксирована на уровне 550 ± 1 кг/м³. Как показал модельный анализ зависимости плотности пенобетона от рецептурно-технологических факторов, наибольшее влияние на плотность оказывает количество воды затворения, поэтому первый фактор – диаметр распыла смеси – застabilизирован на среднем уровне (300 мм).

В результате изопараметрического анализа установлено влияние вида и количества наполнителя на теплопроводность пенобетона и общее содержание в материале структурных элементов: твердой фазы, ячеистой и микропористости.

Наибольшее влияние на теплопроводность равноплотных пенобетонов (при $\rho = 550 \text{ кг/м}^3$), изготовленных из смеси с одинаковой подвижностью (распыл по Суттарду – 300 мм), оказывает третий фактор – вид наполнителя (рис.2). Использование известняка в качестве наполнителя приводит к снижению теплопроводности. Максимальная теплопроводность в исследованной области факторного пространства соответствует составам с комбинированным наполнителем, состоящим из одной части известняка и трех частей песка.

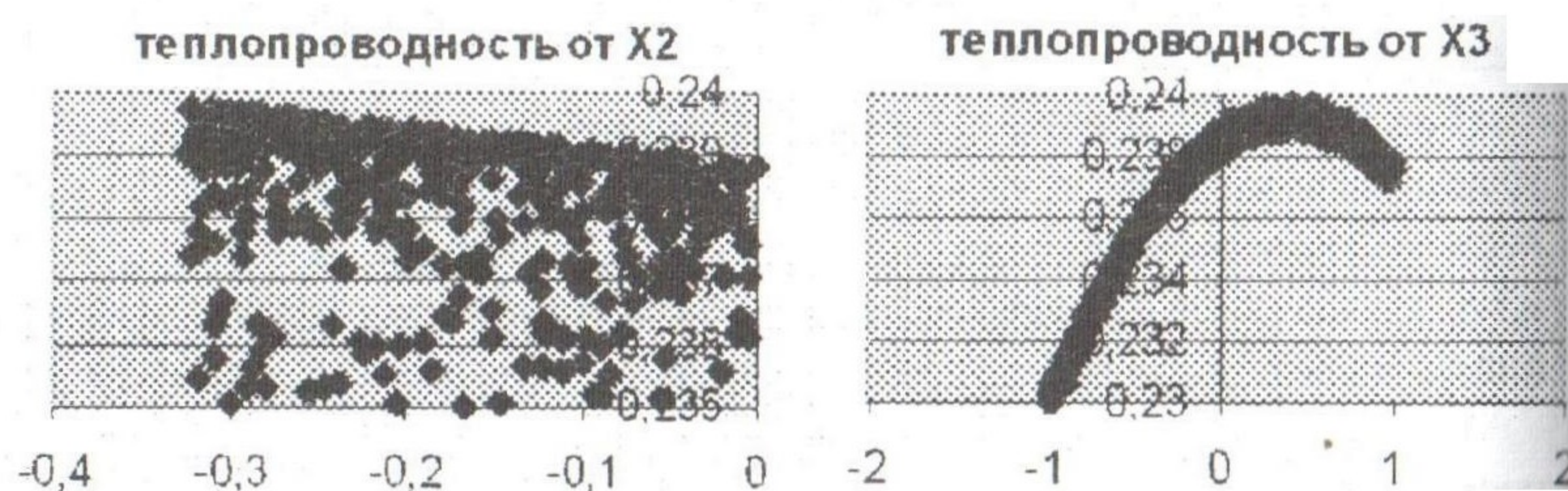


Рис. 2. Зависимость теплопроводности от количества (X2) и вида (X3) наполнителя.

Второй фактор – количество наполнителя не оказывает заметного влияния на теплопроводность. Необходимо отметить, что по результатам модельного анализа можно говорить об отсутствии влияния этого фактора в исследованном факторном пространстве и на структурные параметры – содержание ячеистых и микропор, а также на дифференциальную макропористость.

Изопараметрический анализ в исследованном факторном пространстве позволил установить оптимальное, с точки зрения теплопроводности, объемное содержание структурных элементов.

При постоянном (для пенобетона плотностью 550 кг/м^3) объемном содержании твердой фазы – 0,14, содержание ячеистых пор должно составлять 0,61, а микропор – 0,25 объемных долей. В свою очередь ячеистая пористость также должна быть оптимальной по соотношению пор разных размеров. Так, например, содержание ячеек размером до 0,1 мм, соответствующее минимальной теплопроводности, должно

составлять 13,5%, а ячеек размером от 0,9 до 1,0 мм – 3,5% от их общего количества.

С переходом от известняка к песку в качестве наполнителя доля мелких пор уменьшается. Зависимость количества крупных пор (1,0 мм) от вида наполнителя имеет параболический характер с минимумом в зоне равной смеси "известняк-песок" и максимальными значениями при $X3 = -1$ (известняк) и $X2 = +1$ (песок).

Оптимизацию структуры пенобетона необходимо проводить с учетом не только теплозащитных свойств, но и прочностных характеристик. Стремление снизить теплопроводность пенобетона только за счет уменьшения плотности приводит к падению его прочности. Поэтому в работе выполнен поиск компромиссного решения: при минимально возможной в исследованном факторном пространстве теплопроводности прочность материала должна быть не ниже допустимой ДСТУ для ячеистого бетона соответствующей плотности. Условиями компромисса приняты: $\lambda \leq 0,230$ Вт/м·К; $R_{сж} \geq 1,5$ МПа.

В результате компьютерного расчета по программе, разработанной на кафедре ПАТСМ, определены 8 комбинаций рецептурно-технологических факторов, соответствующих заданным условиям компромисса. Из трех выбранных решений, примерно одинаковых по степени приближения к заданным условиям оптимизации, лучшим является вариант, при котором $\lambda \leq 0,223$ Вт/м·К и $R_{сж} \geq 1,62$ МПа. Этому решению соответствует следующее сочетание рецептурно-технологических факторов: количество воды затворения должно обеспечивать распыл смеси 380-395 мм; количество наполнителя – 18 - 19% от массы сухих составляющих; в качестве наполнителя должен использоваться известняк.

Литература.

1. Керш В.Я., Чабаненко П.Н., Выровой В.Н. Теплозащитные свойства ячеистых материалов. // В сб. научн. трудов "Современные строительные конструкции из металла и древесины". - Одесса, ОГАСА, 2006. - с. 89-95.
2. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Меркин А.П. Ячеистые структуры: физическое структурно-субстанциональное моделирование // Материалы 44-го международного семинара МОК'44.- Одесса: издательство «Астропринт».- 2005.- с. 5-8.
3. Ляшенко Т.В., Довгань А.Д., Гара А.А., Подагелис И., Шаршунов А.Б. Моделирование критериев эффективности модификации эпоксидных композитов (по нефтепоглощению) // Материалы 45-го международного семинара МОК'45. - Одесса: изд.-во «Астропринт».- 2006.- с. 49-51.