

УДК 517.28+536.491+699.86

А. Д. Жуков, А. В. Чугунков, В. А. Рудницкая

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ ВАРИОТРОПИИ ДАВЛЕНИЙ

Формирование начальной структуры материала с последующей стабилизацией происходит на стадии формования. Процессы теплообмена, осложненные массопереносом, в значительной степени определяют структуру материала. Рассматриваются закономерности взаимодействия полей температуры, внутренних давлений и влажности. Характер этого взаимодействия анализируется на основе дифференциальных уравнений переноса, решение которых возможно только в частных случаях для процессов, близких к стационарным.

К л ю ч е в ы е с л о в а: теплообмен, массоперенос, напряженное состояние, давление, температура.

The basic material structure formation with the following optimization takes place on the stage of its formation. Heat exchange processes, which are complicated by mass carry, are the most determining factors which influence the structure of material. The article refers to regularities of interaction between field temperature, inside pressures and humidity. The character of this interaction is analyzed on the basis of differential equations of transfer the solutions to which are possible only in some particular cases for processes close to stationary ones.

К e y w o r d s: heat exchange, mass carry, stress condition, pressure, temperature.

Изготовление строительных изделий, в частности их формование и тепловая обработка, зачастую сопровождается созданием в материале избыточных давлений. Такие приемы широко распространены в технологии бетонов, керамических материалов, ячеистого бетона, вспученного перлита, керамзита и пеностекла. Управление процессами в макросистемах удобнее всего организовывать изнутри, влияя на процессы, протекающие на уровнях от элементарной структуры до микроструктуры изучаемых систем. Подобный подход позволяет глубже понять и создать методологию регулирования процессов переноса энергии и вещества в материале.

Объектом исследований являлся технологический прием, совмещающий в одном технологическом переделе формование (приобретение изделием заданной формы), формирование структуры и тепловую обработку (если это необходимо). В качестве материалов, принятых в исследованиях, рассматривались пенополистиролбетоны и ячеистые бетоны (газо- и пенобетон). Технология пенополистиролбетона рассматривалась в рамках метода самоуплотняющихся масс [1, 2], разработанного на кафедре ТОИМ (ТТМ), технология ячеистого бетона — в рамках технологии безвибрационного вспучивания в замкнутом объеме. Применение математического аппарата, описывающего тепло- и массоперенос [2], позволило объединить оба этих способа в единый, названный авторами способом формирования и оптимизации структуры ячеистых материалов в процессе формирования напряженного состояния в условиях вариотропии давлений.

Напряженное состояние не обязательно должно формироваться за счет воздействия внешних сил: приложения внешней нагрузки, вибрации, избы-

точного давления. Процессы теплопереноса, переноса влаги и вещества также формируют в материале, в том или ином виде, напряженное состояние. Теория тепломассопереноса, в том числе капиллярно-пористых и капиллярно-пористо-коллоидных систем, к которым относятся большинство строительных формовочных смесей, создана трудами А. В. Лыкова, Н. Н. Долгополова, В. В. Перегудова, А. Б. Заседателя, Петрова — Денисова [3].

Теория, по своей сути, базируется на трех утверждениях, касающихся природы взаимодействующих параметров и механизма этого взаимодействия. В любой капиллярно-пористой и капиллярно-пористо-коллоидной системе формируются взаимодействующие поля температуры и влажности. Характер этого взаимодействия описывают дифференциальные уравнения переноса, решение которых возможно только в частных случаях для процессов, близких к стационарным.

Температура в данном объеме материала пропорциональна теплу, подведенному к объему извне; теплу, создаваемому в данном объеме за счет внутренних источников (экзотермические реакции, механическое тепло, тепло от прохождения электрического тока промышленной или высокой частоты); теплу, удаленному из данного объема теплопроводностью и вместе с переносимой массой; теплу, забранному в данном объеме внутренними стоками (эндотермические химические реакции, теплота фазового перехода). Коэффициентами пропорциональности являются теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость и средняя плотность среды, слагающей данный объем. Эти параметры, в свою очередь, являются величинами, зависящими от температуры и влажности.

Влагосодержание данного объема среды (ее влажность) пропорционально количеству влаги, пришедшей из окружающих объемов за счет градиентов концентраций, давлений и температуры, количеству влаги, освобожденной в данном объеме (отжатой из матрицы, испаренной в поры и капилляры), количеству влаги, иммобилизованной в объеме (гидратация, хемо- и адсорбция, поверхностное натяжение), количеству влаги, удаленной из данного объема за счет градиентов концентраций, давлений и температуры. Коэффициентами пропорциональности являются массопроводность среды, ее реологические характеристики. Эти параметры зависят от физического состояния переносимой влаги (капельно-жидкое состояние, паровоздушная смесь), от температуры среды и ее фильтрационных характеристик. Большую роль играют граничные условия, условия внешнего тепло- и массообмена.

Структура среды принимается близкой к однородной, так как в противном случае пришлось бы говорить о ее дискретности, что привело бы к невозможности применения дифференциальных уравнений математической физики. Отметим, что носители индивидуальных свойств (монополя) поля температур настолько невелики, что относительно них это поле может рассматриваться как однородное. Другое дело поле влажности: перенос вещества (в том числе влаги, пара и пр.) осуществляется по капиллярам, образованным частицами твердой матрицы, имеющими развитую поверхность. Процессы не только происходят в поле действия сторонних сил (поверхностного натяжения, гравитационных), не учитываемых диффуравнениями, но и размер самих «монополь»

видим глазом. Подобные рассуждения приводят к необходимости введения характеристики — носительницы свойств среды, к необходимости введения понятия «элементарного» объема.

В качестве «элементарного» принимается такой элемент объема капиллярно-пористо-коллоидного тела, в котором сосредоточены все его характеристики структуры. Учитывая, что упаковка частиц в реальном теле находится между кубической и ромбоэдрической (как шары в пирамиде), в качестве элементарного объема принят тетраэдр, построенный на центрах масс (или геометрических центрах) четырех граничащих друг с другом объемных элементов. В качестве подобных элементов могут быть приняты частицы твердой фазы, слагающей матрицу, частицы заполнителя, поры в материале или ячейки его структуры. Размер «элементарного объема», таким образом, зависит от геометрических характеристик этих элементов и толщины прослойки между ними.

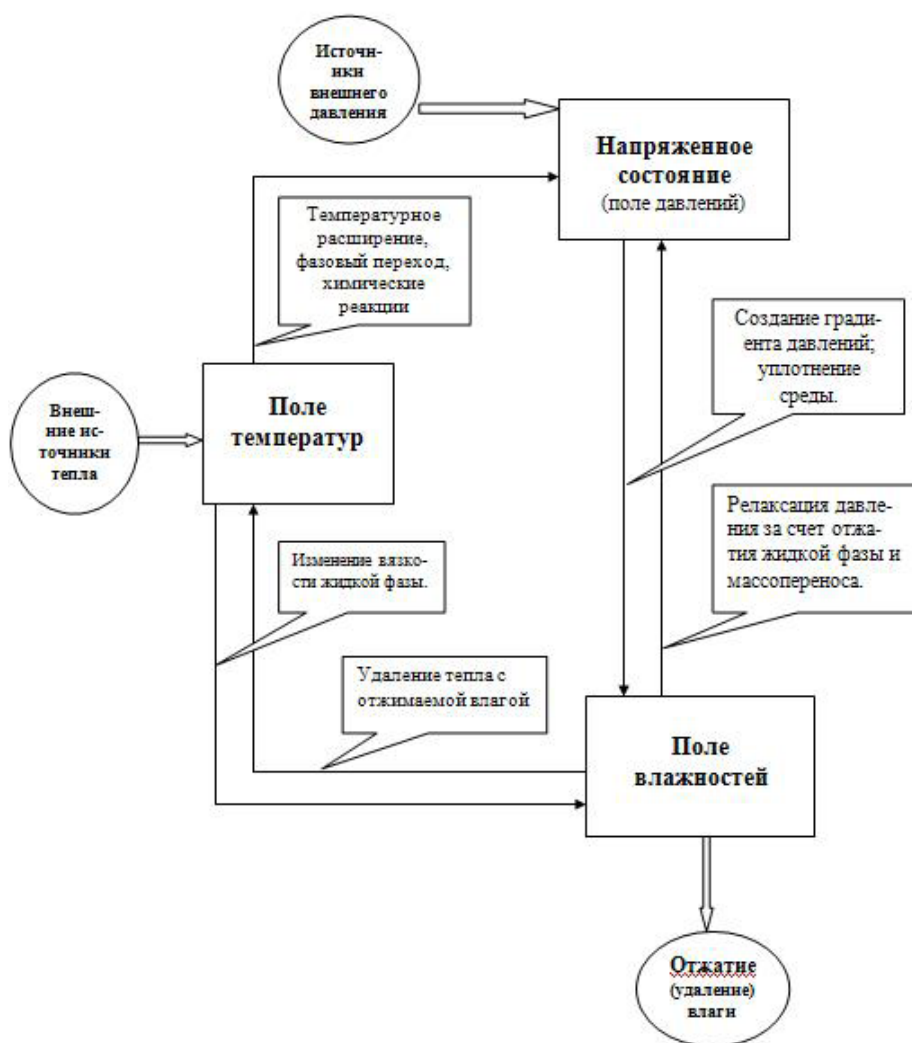
В традиционных видах тепломассопереноса, сопровождающих такие процессы, как сушка, тепловлажностная обработка, давление (внутреннее напряжение в среде) является второстепенным по значимости процессом. Давление рассматривают как одну из причин массопереноса и фактор, определяющий изменение фильтрационных характеристик среды. Подобный подход полностью соответствует динамике процессов, растянутых во времени. Ситуация меняется, когда внутренние напряжения создаются в объеме специально. Подобные приемы позволяют как улучшить структуру материала (что отражается на его эксплуатационных свойствах), так и регулировать ее формирование, то есть оперативно вмешиваться в технологический процесс.

Существует группа технологических приемов, когда в состав исходной смеси вводятся специальные добавки, расширяющиеся (или инициирующие газообразование) в процессе формования и (или) последующей тепловой обработки. Низкотемпературные добавки широко применяются в технологии газобетона; в технологии пенополистиролбетонов используется подвспененный полистирол, в технологии пеностекла используются мел или сажа, в технологии перлита — пары воды. Принципы действия расширяющихся добавок основаны на выделении газообразных продуктов либо за счет химических реакций, либо за счет фазового перехода — испарения воды или порофоров.

Формирование поля напряжений как во всем уплотняемом объеме, так и в его микрообъемах в значительной степени изменяет характер массообменных процессов в системе по сравнению с классическими теориями тепломассопереноса. Напряженное состояние в данном микрообъеме складывается (аддитивность давлений) из давления, переданного на данный элементарный объем через жесткую матрицу, переданного через жидкую фазу (закон Паскаля); из давления, создаваемого собственно в элементарном объеме (температурное расширение твердой, жидкой и газовой фаз, фазовый переход и химические реакции, сопровождающиеся газовыделением); давления, релаксируемого в элементарном объеме за счет уплотнения структуры (минеральной матрицы), за счет потерь на вязкое трение, а также за счет отжатия жидкой фазы или перемещения вязкопластичной массы в соседние микрообъемы за счет градиента давлений.

Взаимосвязь тепломассопереноса и формирования напряженного состояния проявляется по многим параметрам. Внешние источники тепла, давления, задачи наружного тепломассообмена относятся к краевым условиям и устанавливаются в каждом конкретном случае. Если забыть на какое-то время, что рассматриваемые процессы архинестационарны, что среда, в которой они протекают, не однородна, то описанные взаимосвязи могут быть представлены системой дифференциальных уравнений.

Использование математического аппарата тепломассопереноса с учетом фактора напряженного состояния [2] позволяет установить общие теоретические предпосылки формирования внутреннего напряженного состояния массопереноса. Логическая схема взаимодействия параметров, характеризующих процесс, представлена на рис.



Модель напряженного состояния: структура взаимодействия основных аналитических характеристик

Изменение давления в уплотняемом объеме устанавливается исходя из условия неразрывности потоков вещества и аддитивности самого интенсивного параметра с учетом потерь на вязкое трение ε_p и за счет релаксационных процессов, обусловливаемых массопереносом q_m . Закон формирования напряженного состояния в уплотняемом объеме приобретает вид

$$dP/d\tau = P(x, y, z, \tau) + \frac{1}{\eta\rho} \varepsilon_p + \frac{1}{\rho} \nabla q_m.$$

Дифференциальное уравнение влагопереноса в условиях гидротеплосилового воздействия сформулировано с использованием методологической базы теории А. В. Лыкова. Бесконечно малое локальное изменение влагосодержания в уплотняемом объеме равно бесконечно малому изменению влагосодержаний за счет удаления (переноса, отжатия жидкости q_m , ее химической иммобилизаций ε_a и фазового перехода ε_m :

$$dU/d\tau = \nabla q_m + (\varepsilon_a + \varepsilon_m).$$

Для систем, в которых формируются внутренние напряжения на стадии формирования, определяющими составляющими потенциала массопереноса являются градиенты давлений и температур. В условиях среднеинтенсивного напряженного состояния температуры являются вспомогательными факторами.

Общий поток массы (влаги) можно представить как сумму плотностей частных потоков. Коэффициент a_p характеризует влагопроницаемость материала при движении влаги в виде жидкости за счет избыточного давления, a_t — паропроницаемость при наличии молярного переноса.

$$q_m = a_p \nabla P + a_t \rho \delta_t \nabla t.$$

Функция $P(x, y, z, t)$ в уравнении, описывающем напряженное состояние, характеризует закономерность связи между потенциалопределяющими факторами (температурой и (или) скоростью химических реакций) и создаваемым давлением.

В основе этой связи лежат химические (физико-химические) процессы расширения паров воды, паровоздушной смеси, химического газообразования, поэтому точное аналитическое определение этой функции крайне сложно и весьма громоздко. Функция $P(x, y, z, t)$ проявляет себя по-разному в зависимости от давлений, создаваемых в материале. В [3] рассмотрены два случая: массоперенос и формирование напряженного состояния при средних давлениях (от 0,1 до 0,02 МПа) и при давлениях, не превышающих 0,02 МПа.

Первый вариант изучен в рамках исследования технологии пенополистиролбетона, второй — технологии ячеистого бетона. Результатом стало создание группы теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных материалов с улучшенными эксплуатационными и эффективными теплозащитными свойствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бижанов А. Х.* Технология теплоизоляционно-конструкционных корундовых изделий из самоуплотняющихся масс : автореф. дисс... канд. техн. наук. М., 1984. 24 с.

2. *Соков В. Н., Жуков А. Д.* Теоретические основы создания теплоизоляционных материалов в условиях гидротеплосилового воздействия // Известия вузов. Сер.: Строительство и архитектура. 1998. № 9.

3. *Жуков А. Д., Чугунков А. В., Рудницкая В. А.* Решение технологических задач методами математического моделирования. М. : МГСУ, 2011. 176 с.

1. *Bizhanov A. Kh.* Tekhnologiya teploizolyatsionno-konstruktsionnykh korundovykh izdeliy iz samouplotnyayushchikhsya mass : avtoref. diss... kand. tekhn. nauk. M., 1984. 24 s.

2. *Sokov V. N., Zhukov A. D.* Teoreticheskie osnovy sozdaniya teploizolyatsionnykh materialov v usloviyakh gidroteplosilovogo vozdeystviya // Izvestiya vuzov. Ser.: Stroitel'stvo i arkhitektura. 1998. № 9.

3. *Zhukov A. D., Chugunkov A. V., Rudnitskaya V. A.* Reshenie tekhnologicheskikh zadach metodami matematicheskogo modelirovaniya. M. : MGSU, 2011. 176 s.

© Жуков А. Д., Чугунков А. В., Рудницкая В. А., 2012

*Поступила в редакцию
в ноябре 2012 г.*

Ссылка для цитирования:

Жуков А. Д., Чугунков А. В., Рудницкая В. А. Закономерности формирования структуры материала в условиях вариотропии давлений // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 3(23).