

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ЯЧЕЙСТЫХ КОМПОЗИТОВ**

*Федосов Сергей Викторович*, академик РААСН, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», Россия, 129337, г. Москва, ул. Ярославское шоссе, д. 26, e-mail: FedosovSV@mgsu.ru

*Баканов Максим Олегович*, к.т.н, доцент, ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России», Россия, 153011, г. Иваново, пр-т Строителей, д. 33, e-mail: mask-13@mail.ru

*Домнина Ксения Леонидовна*, ст. преподаватель, ВФ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», Россия, 427430, Удмуртская Республика, г. Воткинск, ул. Шувалова, д. 1, e-mail: kseniya\_domnina@bk.ru

**Аннотация.** Технологический процесс получения теплоизоляционных ячеистых композитов представляет собой сложную систему, в рамках которой взаимодействуют множество элементов. На практике технологический процесс не всегда поддается контролю и регулированию ввиду наличия большого количества факторов, влияющих на ход процесса. Эта проблема решается построением математических моделей эксплуатационных и технико-экономических показателей в виде физико-механических взаимозависимостей от значений параметров технологического процесса изготовления и факторов эксплуатации.

В статье представлен метод анализа и моделирования технологического процесса получения ячеистых композитов с точки зрения системного анализа и многофакторного подхода. Представлена типовая структурная схема технологического процесса получения композита и построена структурная схема в зависимости от агрегатного состояния материала в процессе преобразования с выделением на каждом этапе входных факторов, возмущающих и управляющих воздействий, и выходных параметров. Предложен комплексный метод оптимизации технологического процесса с учетом типов и количества факторов и критериев оптимальности, а также возможных ситуаций их перехода из одного типа в другой.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, ячеистые композиты, технологический процесс, системный анализ, многофакторный подход.

## MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR OBTAINING HEAT-INSULATING CELLULAR COMPOSITES

*Fedosov Sergey Victorovich*, Academic of Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Engineering, Professor, Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavl highway 26, e-mail: FedosovSV@mgsu.ru

*Bakanov Maxim Olegovich*, Candidate of Engineering, Docent, Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Russia, 153011, Ivanovo, ave. Stroiteley 33, e-mail: mask-13@mail.ru

*Domnina Kseniia Leonidovna* Senior lecturer, Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia, 427430, Udmurt Republic, Votkinsk, st. Shuvalova 1, e-mail: [kseniya\\_domnina@bk.ru](mailto:kseniya_domnina@bk.ru)

**Annotation.** The technological process of obtaining heat-insulating cellular composites is a complex system in which many elements interact. In practice, the technological process is not always amenable to control and regulation due to the presence of a large number of factors affecting the process. This problem is solved by constructing mathematical models of operational, technical and economic indicators in the form of physical and mechanical interdependencies on the values of the parameters of the manufacturing process and operating factors.

The article presents an approach to the analysis and modeling of the technological process of obtaining cellular composites from the point of view of system analysis and a multi-factor approach. A typical block diagram of the composite obtaining process is presented and the block diagram is constructed depending on the state of aggregation of the material during the conversion process, with input factors, disturbing and controlling influences, and output parameters selected at each stage. The complex method for optimizing the technological process, taking into account the types and number of factors and optimality criteria and possible situations of their transition from one type to another, is proposed.

**Key words:** mathematical modeling, cellular composites, technological process, system

Проблема энергосбережения в строительстве определяет интенсивное развитие направления по созданию и производству эффективных недорогих композитных материалов с требуемыми теплофизическими характеристиками. Наиболее перспективными среди них выглядит группа ячеистых композитов, к которым относятся пеностекло, пено- и газобетон, полистирол и др., рациональное сочетание свойств, которых позволяет получать теплоизоляционные материалы с оптимальными свойствами [1]. По мере развития технологии производства ячеистых композитов повышаются требования к качеству технологического процесса.

Несмотря на различия в организации процесса получения ячеистых композитов основные операции и элементы технологического процесса идентичны и повторяют друг друга. Поэтому с современных позиций технологический процесс получения композитов следует рассматривать как систему, функционирующую в среде и взаимодействующую с другими системами [10], а его изучение проводить с помощью методов системного анализа, позволяющих выявлять связи и закономерности функционирования и развития таких систем, и многофакторного подхода. Это дает возможность формализовать математическую модель процесса, близкую к реальности, провести огромное число расчетных экспериментов, оценить ожидаемые результаты изменения состояния материала и выбрать теоретически оптимальное решение задачи получения требуемого по свойствам композита [12].

Для исследования технологических процессов системный анализ рекомендует провести построение принципиальной, структурной и функциональной схем [5, 6, 9]. Принципиальная и функциональная схемы будут напрямую зависеть от организации производства искомого композитного материала. Поэтому целесообразно построить структурную схему технологического процесса в общем виде. Применительно к технологическому процессу это означает расшифровку его механизма на стадии, т.е. элементарные операции. Исходя из обобщенной схемы производства ячеистых композитов, необходимо представить схему внешних связей технологического процесса как систему с детализацией по основным технологическим операциям (рис. 1). При этом процедуру детализации продолжают до получения таких операций, которые в условиях данной задачи будут признаны достаточно простыми и удобными для непосредственного математического описания и применения электронно-вычислительных комплексов [11]. В зависимости от особенностей технологического процесса, который может вестись по автоклавной (с подведением теплоты извне при твердении композита) или неавтоклавной технологии, при котором источником является теплота гидратации, типовая структурная схема будет видоизменяться [13].

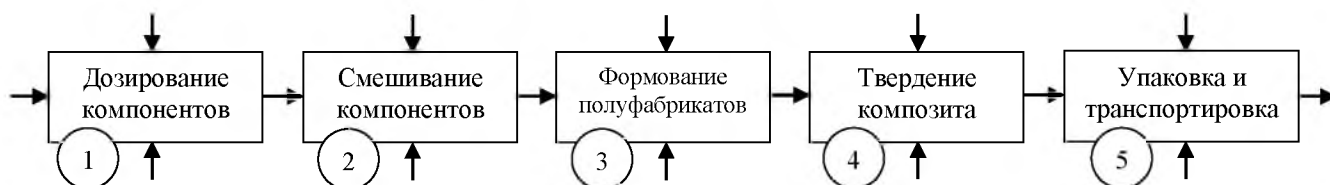


Рис. 1. Типовая структурная схема технологического процесса получения композита

Для упрощения задачи последующего моделирования технологического процесса предлагается представить его схему в зависимости от агрегатного состояния композита в процессе его преобразования. В этом случае математическая модель процесса может стать универсальным инструментом для оптимизации структуры технологического процесса и его построения для получения материала с требуемыми свойствами на базе имеющегося оборудования. Изменение агрегатного состояния большинства теплоизоляционных ячеистых композитов в рамках технологического процесса можно представить как:  $T \rightarrow A \rightarrow T+\Gamma$  (рис. 2), где  $T$  – твердое,  $\Gamma$  – газообразное,  $A$  – аморфное состояния.

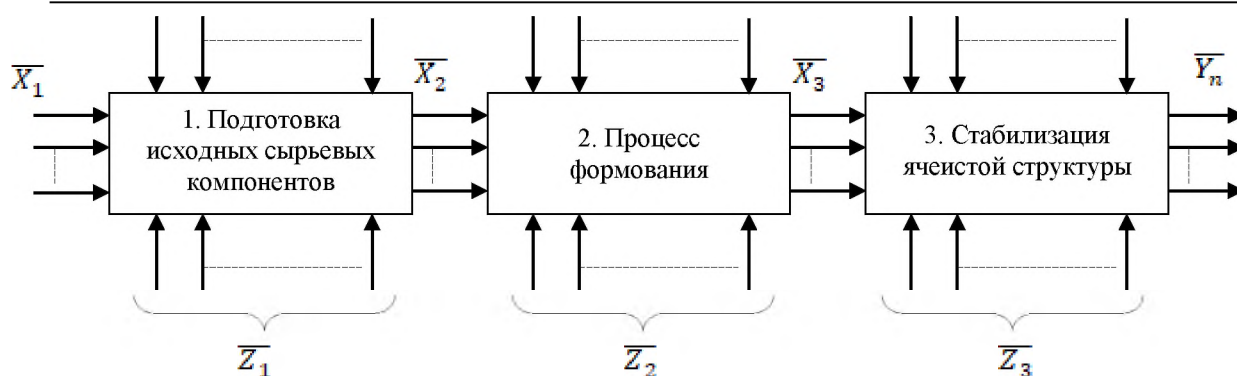


Рис. 2. Структурная схема технологического процесса изготовления композита в зависимости от агрегатного состояния

Каждая операция технологического процесса обладает собственными свойствами, которые оцениваются комплексом параметров. Здесь:

$\bar{X}_1$  – совокупность параметров исходных сырьевых компонентов;

$\bar{X}_2$  – совокупность контролируемых параметров и параметров надежности композитной смеси;

$\bar{X}_3$  – совокупность параметров надежности ячеистой смеси;

$\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \bar{Z}_3$  – векторы неконтролируемых возмущений, воздействующих на технологический процесс;

$\bar{W}_1, \bar{W}_2, \bar{W}_3$  – векторы контролируемых воздействий на технологический процесс;

$\bar{Y}_n$  – вектор выходных показателей надежности готового изделия.

При этом можно принять, что  $\bar{X}_2 = \bar{Y}_1$ ,  $\bar{X}_3 = \bar{Y}_2$ , т.е. отклики предыдущей операции будут представлять входы последующей, что является условием обеспечения совместности работы системы.

Для каждой операции важно не только определить комплекс параметров, оказывающих наибольшее влияние на ход процесса, но и установить для каждого из них диапазон изменений. Предполагается, что когда значения параметров выходят из установленного диапазона, наступает проблемная (критическая) ситуация [8]. Ее развитие приводит к предельному состоянию – моменту, когда изменение свойств композита становится необратимым, а технологический процесс становится неуправляемым. Идентификация таких параметров и диапазонов их изменения также позволит определить наиболее энергозатратные или критические стадии процесса, требующие пристального контроля.

Одним из источников информации, определяющим взаимосвязь указанных параметров, сущность которых отражена в ключевых этапах технологического процесса, является математическая модель [2]. Математические модели эксплуатационных и технико-экономических показателей в виде физико-механических взаимозависимостей от значений параметров технологического процесса изготовления и факторов эксплуатации позволяют теоретически охватить всю динамику процесса производства ячеистых композитов – от проектирования состава до применения готового изделия [4].

Основой для реального эксперимента является выбор показателей качества  $Y_n$  согласно теоретическим выводам, варьируемых факторов  $X_k$  и управляющих воздействий  $W_p$ . Общее число варьируемых факторов, возмущений и воздействий, оказывающих влияние на основные свойства композита, может быть очень большим. Для технологического процесса это означает построение математического соотношения между всеми указанными параметрами:

$$Y_n = F(X_k, Z_m, W_p). \quad (1)$$

Обычно в математических моделях технологических процессов получения композитов

используется ограниченное число параметров и факторов и не производится учет возникновения критических состояний на отдельных стадиях изготовления. Это приводит к расхождению между расчетными и экспериментальными показателями качества готового изделия. Для повышения качества и точности описания технологического процесса получения ячеистых композитов предлагается после построения структурной схемы применять многофакторный подход, который позволяет исследовать и анализировать сложные системы, включающие много элементов и связей, и на основе подобного анализа отыскивать оптимальные решения, наилучшим образом удовлетворяющие поставленным целям [3].

Многофакторная математическая модель технологического процесса представляет собой набор целевых функций  $Y(S, X_s)$ , определяющий требования заказчика к создаваемому объекту, и векторов трех типов [7]:

а) вектора экстремального типа  $Y_j(S, X_s) \rightarrow \text{extr}; X_s \in D_{x_s}; S \in D_s; j \in 1, 2, \dots$ , которые для оптимальности решения задачи требуют достижения своего экстремума;

б) ограничения типа равенств  $g_i(S, X_s) = g_{i_0} = \text{const}; X_s \in D_{x_s}; S \in D_s; i = 1, 2, \dots$ , определяющие условия точного осуществления течения конкретных операций при функционировании готовой конструкции;

в) ограничения типа неравенств  $h_y(S, X_s) \geq h_{y_0}; X_s \in D_{x_s}; S \in D_s; y = 1, 2, \dots$ , т.е. условия-ограничения уровней достижения возможных значений явлений или процессов.

В качестве векторов трех типов рекомендуется использовать параметры, выделенные по итогам анализа структурной схемы технологического процесса как наиболее опасные для наступления критической ситуации.

Тогда математическая задача оптимизации технологического процесса будет представлена в виде:

$$Y(S, X_s) = \{Y_1(S, X_s), Y_2(S, X_s), \dots, Y_p(S, X_s)\} \rightarrow \text{extr}; S, X_s \in \psi; \quad (2)$$

$$\psi = \begin{cases} g_i(S, X_s) = g_{i_0}; i = 1, 2, \dots \\ h_y(S, X_s) \geq h_{y_0}; y = 1, 2, \dots \\ X_s \in D_{x_s}; S \in D_s. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $\psi$  – условия-ограничения реального проектирования;  $X_s$  – решение, возможные варианты которого определены на их допустимом множестве  $D_x(S)$  при  $S \in D_s$ , где  $S$  – технологический процесс,  $D_s$  – множество вариантов построения технологического процесса.

Качество решений оценивается  $p$  скалярными критериями  $Y_1(S, X_s), Y_2(S, X_s), \dots, Y_p(S, X_s)$ , образующими вектор эффективности  $Y(S, X_s)$ . Вектор эффективности  $Y(S, X_s)$  связан с решением функционального отображения  $X_s \rightarrow Y(S, X_s) = F(S, X_s)$ , заданным аналитически или статистически. В зависимости от количества критериев экстремального типа  $Y_j(S, X_s)$  задача (2) – (3) будет являться задачей скалярной или многокритериальной оптимизации. Понятие экстремальности (2) имеет смысл достижения наилучшего значения функции  $Y(S, X_s)$ , исходя из конкретной постановки задачи при выполнении требований  $\psi$ . Формулировка (2) – (3) полностью учитывает все типы и количество критериев оптимальности, а также и возможные ситуации их перехода из одного типа в другой. В случае многокритериальной задачи ее целевой функцией является обобщенный критерий экстремального типа, построенный на базе всех показателей критериев  $Y_j(S, X_s)$  в соответствии со свойствами проектируемого композита и требованиями к технологическому процессу.

### Заключение

При моделировании технологических процессов на разных этапах его реализации необходимо учитывать тот факт, что система является динамической. Это свойство присуще большому количеству технологий в строительстве т.к. происходит взаимодействие между разнотипными частями динамической системы, и формируются выходные сигналы, которые, впоследствии, играют ключевую роль при оценке качества продукции. При моделировании можно в разной степени детализировать модели и подвергать формализации различные явления, что дает возможность управлять технологическим процессом в целом на различных стадиях производства теплоизоляционных ячеистых композитов. Представленные в работе математические подходы дают основание полагать, что степень ее адекватности тем выше, чем качественнее произведена оценка и определен приоритет выходных показателей надежности готового изделия, что в свою очередь определяет качество готовой продукции в целом. Безусловно, предложенные подходы в дальнейшем могут дополняться и детализироваться в части усовершенствования методики моделирования и более детального раскрытия физико-химических явлений, активизирующихся на различных этапах производства теплоизоляционных ячеистых композитов.

### Литература

1. Бардзокас Д.И., Зобнин А.И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры. М.: Едиториал УРСС, 2003. 376 с.
2. Григорович В.Г., Юдин С.В., Козлова Н.О., Шильдин В.В. Информационные методы в управлении качеством. М.: РИА «Стандарты и качество», 2001. 208 с.
3. Дворкин Л.И. Практическая методология проектирования составов бетона : учеб. пособие. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 604 с.
4. Домнина К.Л., Каракулов М.Н., Федосов С.В. Разработка математической модели оптимального технологического процесса получения пенобетонов неавтоклавного твердения // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. №4 (Том 17). С. 88-93.
5. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. М.: Наука, 1976. 500 с.
6. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем.: учеб. для вузов. М.: Химия, 1991. 432 с.
7. Репко В.Н. Многокритериальная оптимизация структурных стержневых систем при нескольких нагружениях: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 1978. 207 с.
8. Харинова Ю.Ю. Методика прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки: дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2017. 195 с.
9. Химико-технологические системы. Синтез, оптимизация и управление / под ред. И.П. Мухленова. Л.: Химия, 1986. 424 с.
10. Шахова Л.Д. Повышение эффективности производства неавтоклавных пенобетонов с заданными свойствами: дис. ... д-ра техн. наук. Белгород, 2007. 417 с.
11. Ядыкин И.Б., Шумский В.М., Овсеян Ф.А. Адаптивное управление непрерывными технологическими процессами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
12. Fedosov S., Domnina K., Pivarčiová E. The construction of the function of the ultimate goal of the technological process of non-autoclaved foam concrete obtaining // Acta Technologia Slovaca. 2019. Vol. 5, Is. 3. P. 59-62.
13. Fedosov S.V., Bakanov M.O., Nikishov S.N. Modeling of macro-physical parameters of foam glass under exposure of cyclic thermal effects // Materials science forum. 2019. Vol. 974. P. 464-470.