

Толстой А.Д., канд. техн. наук, доц.,  
Крымова А.И., магистрант,  
Фомина Е.В., канд. техн. наук, доц.,  
Коробков Р.А., магистрант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ПРИМЕНЕНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ САМООРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ В ТЕОРИИ ТВЕРДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

На основе исследования твердеющих высокопрочных композиций показана взаимосвязь между возможностями синергетической схемы изучения явлений природы и вопросами управления формированием структуры каменных материалов, полученных из рационально подобранных строительных смесей.

Рассмотрены перспективы применения общих принципов синергетики и концепции устойчивого развития открытых диссипативных систем к материальным объектам производственного происхождения, и их понимания как целостной саморегулируемой неравновесной системы. Данный метод был приведен в действие при помощи термодинамического принципа бельгийской школы. В рассматриваемой теме было введено понятие «Хакена», для более подробного осознания структуры как состояния, которое появляется в результате когерентного (порядочного) поведения множественного числа частиц, на понятие диссипативной структуры. Совместно с темой термодинамических процессов были рассмотрены виды термодинамических систем и выявление наличия, и влияния данных систем в нашем исследовании. В статье приведены изображения изменения энергии Гиббса. А также таблица данных явно характеризующая изменение энергии Гиббса и объемов продуктов реакции гидратообразования в твердеющих системах.

Главной целью было – показать, что принципы развития саморегулирующейся системы можно применять в технологии строительных материалов. Так же показать, что данный подход разрешает собой проводить анализ состояния основных структурных элементов открытой метастабильной системы твердеющего многокомпонентного бетона. Выявить показатели полноты процессов в неравновесной системе с фиксацией нового состояния – от вязко-текучего до камневидного, т.е. переход к новому аттрактору.

**Ключевые слова:** строительное производство, твердеющие системы, синергетический подход, соотношение производственных и природных потенциалов, сбалансированность неравновесных систем.

**Введение:** Концепция перехода к устойчивому развитию, одно из основных направлений перехода к устойчивому развитию которой – это разработка и внедрение высокоэффективных автоматизированных технологии производства и научно обоснованных способов получения новых материалов была принята в России в 1996 г.

Одной из главных задач тактики устойчивого развития является разработка путей и способов приспособления жизни к происходящим в России масштабным изменениям. В концепции показано право любого человека на положительно влияющую на него окружающую среду. Под устойчивым развитием, понимается постоянное и непрерывное социально-экономическое развитие, не изменяющая своей природной основы. Принятие в России концепции устойчивого развития предполагает под своим понятием переход к эмпирическому решению производственных задач с сохранением благоприятной окружающей среды, способствующей повышению уровня жизни [1, 2].

Развитие современных комплексных и иных инновационных технологий ускоряет научно-технический прогресс процесса создания. Все больше становятся актуальными научные разработки, направленные на создание технологий, которые находились бы в оптимальной гармонии с потребностями современного строительства.

Актуализация научных работ монолитно связана с приложением новых идей и других возможностей к теории и практике современного материаловедения в плане объяснения процессов и явлений, происходящих при изменениях структуры и свойств материалов, а также фазовых переходах.

К основам и дефинициям хакеновской синергетики (термин «синергетика», близкое к современному пониманию, ввел проф. Института теоретической физики в г. Штутгарте. Германия Г. Хакене в 1977 г.) прибегают все на много большее число исследователей в разных сферах знаний [3]. Синергетика как междисциплинарное

научное направление, изучающее изменения вещественного состава и структуры на основе принципов самоорганизации системы, получило развитие в работах И. Пригожина, И. Забуского, Князевой Е. Н., Курдюмова С. П., Иванова В. С. и др. [4-8]. Синергетика получается в роли мета-науки, подчеркивающей и делающей эффективнее общее направление тех закономерностей и зависимостей, которые другие науки считают «своими». Синергетический метод приобрел звание общенаучного метода исследования и широко используется в современной науке. Многие исследователи подчеркивают, что синергетика приходится парадигмой современной, постклассической науки. Ее категориальный аппарат (бифуркация, флуктуация, диссипативная структура, синергетический эффект и др.) помогает проанализировать изменение открытых, неравновесных, сложноорганизованных систем всей природы.

**Методология.** В работе была поставлена цель – показать возможность и правомерность использования (или, если можно сказать, приложения) методов и аппарата науки синергетики к объяснению процессов структурообразования при затвердевании синтетического камня на основе оптимально подобранной многокомпонентной смеси.

Такой метод к исследованию материаловедческих задач еще не получил должной разработки в научной литературе. Главными предпосылками к принятию решения о применении синергетического метода стали:

1. Главный постулат синергетики – область приложения синергетических принципов точно не определена и не может там быть определенных рамок, так как ее интересы направлены на все ветви естествознания.

2. Соответствие многокомпонентных твердеющих систем главным понятиям и методологическим фактам синергетики – это сложные, неравновесные, эволюционирующие системы, в которых происходит грубое и быстрое образование новых микроскопических (локальных) новообразований и появление новых свойств системы.

3. Система твердеющей смеси является открытой, далекой от точки термодинамического равноцентрирования, в которой реализуется основной принцип самоорганизации – выявление через хаотичность нового порядка и новой структуры, из-за содержания огромного количества взаимодействующих между собой элементов.

4. Твердеющая система производит обмен веществом и энергией с окружающей средой, за счет чего получается структурированность и самоорганизация.

5. К твердеющей системе применим фундаментальный механизм синергетики – бифуркационный механизм, в нём точкой бифуркации – наиболее чувствительному состоянию к незначительным «возмущениям», «нарушениям» (флуктуациям) – можно считать момент затворения смеси водой, после чего происходит «выбор» системой наиболее лучшего направления развития, т.е. твердения, набора прочности и превращения в камневидное тело или, иначе говоря, переход к новому аттрактору.

**Основная часть.** Термодинамический принцип к самоорганизации можно увидеть в бельгийской школе И. Пригожина. [5] Эта школа заменяет такое понятие синергетики, как понятие Хакена – осознание структуры как состояния, которое появляется в результате когерентного (порядочного) поведения множественного числа частиц, на понятие диссипативной структуры. В открытых системах, которые находятся в процессе обмена с внешней средой потоками энергии или вещества, однородное состояние равновесия может потерять свою устойчивость и безвозвратно перейти в неоднородное стационарное состояние, которое будет устойчиво относительно малых возмущений.

Содержательное определение термодинамической системы как совокупности множественных единиц взаимодействующих между собой структурных частиц (атомов, молекул и др.), что определяющим в поведении такой системы являются статистические закономерности, которые помогают характеризовать ее состояние малым числом параметров. Термодинамические системы имеют предрасположенность к взаимодействию, как между собой, так и со внешней средой, обмениваясь при этом энергией и/или веществом. В зависимости от характера взаимодействия со внешней средой в термодинамике выделяют несколько разных видов систем. Система, которая лишена возможности обмена с окружающей средой веществом и энергией – изолированная. Система, обменивающаяся с окружающей средой только энергией – закрытая. И, наконец, открытая система – та, что обменивается с окружающей средой и энергией, и веществом.

По своей структуре термодинамические системы можно разбить на гомогенные и гетерогенные. Гомогенными являются системы, свойства которых изменяются пространственно непрерывно. В частном случае однородных гомогенных систем свойства любых составляющих их частей одинаковы. Гетерогенная система включает в себя несколько однородных или гомогенных частей, имеющих свои индивидуальные свойства. Таким образом, свойства гетерогенной

системы изменяются скачкообразно при переходе из одной ее гомогенной части в иную. Гомогенная часть гетерогенной системы, которая пребывает отделенной от иных частей поверхностью раздела, является фазой. Примером гетерогенной системы являются системы, состоящие из сосуществующих фаз одного или нескольких индивидуальных веществ. Термодинамический подход предполагает, что состояние термодинамической системы определяется направлением задания ряда макроскопических параметров (объем, давление, концентрация и т.д.), а также параметрами состояния, характеризующими разные состояния системы в целом (внутренняя энергия, энтальпия, энтропия и свободная энергия – энергия Гиббса). Из-за этого термодинамический подход обладает большой общностью и может применяться к самым различным системам – физическим, химическим, биологическим и т.д.

Термодинамическая система, обладает энергией, которая складывается из энергий огромного числа составляющих ее частиц (атомов, молекул и т.д.), постоянно находящихся в движении и взаимодействии между друг-другом, а также с окружающими систему телами или физическими полями, которые создаются окружением. Энергия системы за исключением ее внешней составляющей, т.е. кинетической энергии системы как единого целого и потенциальной энергии системы в поле внешних сил, называется внутренней энергией системы. Существенно, что для термодинамических систем внутренняя энергия является экстенсивным параметром. Системы, внутренняя энергия которых нелинейно зависит от числа составляющих ее частиц, не могут описываться термодинамическими методами [9].

Если говорить о пределах применимости термодинамического подхода, то их определяют правила термодинамики. Постулат о термодинамическом равновесии, являющийся основным постулатом термодинамики – говорит, что всякая изолированная макроскопическая система с течением времени приходит в состояние термодинамического равновесия и никогда самопроизвольно выйти из него не может. В свою очередь, именно необратимый и самопроизвольный переход изолированной системы в состояние термодинамического равновесия является общим основным свойством всех макроскопических предметов. Очень значимое количество состояний, которые сменяют друг друга в процессе динамической эволюции макросистемы, среди которых, наравне с микросостояниями, отвечающими термодинамическому равновесию, также много микросостояний, которые явственно соответствуют различным термодинамически неравновесным

макросостояниям. Получается, что термодинамика занимается описанием только равновесных состояний и их свойств, а также в некоторых случаях, некоторых закономерностей приближенных к равновесию. Вторым постулатом является постулат о температуре. Постулат утверждает, что всякая макроскопическая система, находящаяся в состоянии термодинамического равновесия, характеризуется специальным интенсивным термодинамическим параметром – температурой, являющейся одной для всех частей системы и вместе с другими макроскопическими параметрами определяет ее состояние. Выходит, что именно равенство температур двух или нескольких систем считается необходимым условием их термодинамического равновесия между собой.

Особым следствием постулатов о температуре и различного рода равновесии есть вывод о том, что находясь в положении термодинамического равновесия внутренние параметры системы, так же и внутренняя энергия системы, будут функциями внешних параметров и температуры. Третий постулат содержит свое значение в том, что, температура равновесной системы увеличивает свое значение при повышении значения ее внутренней энергии. Позволяет сравнивать температуру различных равновесных систем, подводя их в тепловое взаимодействие с эталонным телом, которое служит термометром именно транзитивности равновесного состояния.

Например, рассматривая систему уравнений химической кинетики, описывающая уникальную ситуацию: доподлинно известный механизм  $m$ -стадийной реакции ( $m$  – число элементарных актов), в ней принимает участие  $n$  веществ. Однозначно определен алгоритм выписывания динамической системы по схеме реакции.

Направление протекания реакции можно предсказать расчетным способом через величину свободной энергии (энергии Гиббса).

*Энергия Гиббса (изобарно-изотермический потенциал, свободная энтальпия)* – функция состояния системы ( $G$ ) определяемая из выражения:

$$G = H - TS, \text{ [Дж или Дж/моль]}$$

где  $H$  – энтальпия (теплосодержание), Дж/моль;  $T$  – абсолютная температура, К;  $S$  – энтропия, Дж/моль.

В данном методе есть определенное правило: все самопроизвольно протекающие процессы сопровождаются уменьшением значения энергии Гиббса до достижения ею минимума, отвечающему состоянию равновесия системы (рис. 1).

В математических расчетах повсеместно используется именно этот параметр состояния, т.к.

убыль энергии Гиббса в равновесном процессе (при постоянном давлении и температуре) равна максимальной полезной работе [6–9].

При термодинамическом анализе  $\text{CaO}-\text{C}_3\text{A}(\text{C}_3\text{F})-\text{Ox}-\text{H}_2\text{O}$  в нормальных условиях

в качестве продуктов реакции рассмотрено образование гидроалюминатов, гидроферритов и гидросульфалюминатов кальция, портландита, аморфных гидроксидов алюминия и железа и гипса (табл. 1).

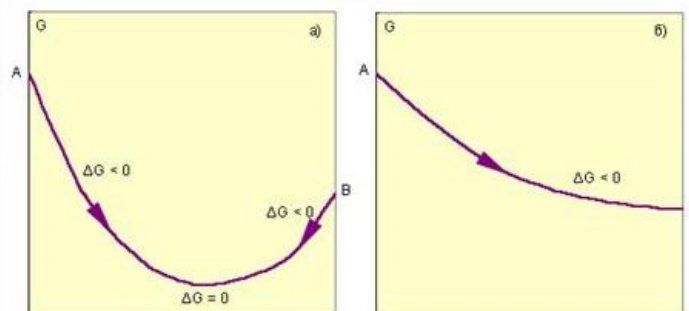


Рис. 1. Изменение энергии Гиббса:

*a* – обратимый процесс; *б* – необратимый процесс

Термодинамическую устойчивость гидроалюминатов и гидросульфалюминатов кальция при повышенных температурах анализировали по рассчитанным значениям энергии Гиббса реакций. Полученные результаты показывают, что до температуры 348,15 К термодинамически более устойчивыми продуктами реакции являются ассоциации трисульфогидроалюмината кальция

с гипсом (реакции 1, 2, табл. 1). При температуре свыше 348,15 К абсолютное значение энергии Гиббса данной реакции уменьшается, что свидетельствует о неустойчивом состоянии  $\text{C}_3\text{FCs}_3\text{H}_{32}$  в этих условиях, с его переходом в моносульфогидроферрит кальция и образованием двух молекул двуводного гипса (реакция 3, табл. 1).

Таблица 1

#### Изменение энергии Гиббса и объемов продуктов реакции гидратообразования в твердеющих системах

№ п/п	Уравнение реакции	$\Delta V$ твердой фазы		$\Delta V$ конденсир. фазы		$-G^0_{298}$ реакции, кДж/моль
		см <sup>3</sup> /моль	%	см <sup>3</sup> /моль	%	
1	$\text{C}_3\text{A}+3\text{CsH}_2+26\text{H}_2\text{O}=\text{C}_3\text{ACs}_3\text{H}_{32}$	311,83	128,72	-67,13	8,60	235,94
2	$\text{C}_3\text{F}+\text{Ca}(\text{OH})_2+3\text{CsH}_2+25\text{H}_2\text{O}=\text{C}_3\text{FCs}_3\text{H}_3$	398,59	123,46	-51,91	6,71	107,07
3	$\text{CsH}_{0,5}+1,5\text{H}_2\text{O}=\text{CsH}_2$	21,43	40,60	-5,60	7,02	4,60
4	$\text{CaO}+\text{H}_2\text{O}=\text{Ca}(\text{OH})_2$	15,23	90,82	-2,68	7,68	55,90

В итоге, проанализированные и выверенные расчеты говорят своими значениями о термодинамической предпочтительности образования при нормальной температуре ассоциаций алюминий- и железосодержащего трисульфатного гидрата кальция и преобразование At-фаз в моносульфоалюминат кальция при высоких температурах.

Выявленные результаты дают полное основание считать, что процессом взаимодействия в твердеющей многокомпонентной системе с цементом можно управлять, изменяя окислительный потенциал системы.

**Вывод.** Прибегая к помощи синергетического подхода к процессу гидратации и использования термодинамического метода выявляется возможность управления структурообразованием твердеющих систем и направлением его протекания. Так же данный подход разрешает собой проводить анализ состояния основных струк-

турных элементов открытой метастабильной системы твердеющего многокомпонентного бетона. Выявить показатели полноты процессов в неравновесной системе с фиксацией нового состояния – от вязко-текучего до камневидного, т.е. переход к новому аттрактору. Эти определения четко поясняют механизм процесса гидратации и согласуются с положениями синергетики. Объектом дальнейших исследований представляется вычисление роли каждого компонента многокомпонентной высокопрочной твердеющей системы на основе значений их термодинамических параметров с учетом синергетических представлений.

**Источник финансирования.** Государственная программа Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы, Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, в рамках Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РА-АСН, тема 7.5.1.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Василенко В.Н. Устойчивая Россия: ноосферная концепция управления природопользованием государства: индикаторы, институты, инструменты, механизмы. Волгоград: ВолГУ, 2003. 390 с.
2. Лесовик В.С. Геоника. предмет и задачи. Белгород: БГТУ, 2012. 232 с.
3. Хакен Г. Синергетика / пер. с англ. М.: Мир, 1980. 406 с.
4. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой / пер. с англ., под общ. ред. В.И. Аршинова, Ю.Л. Климонтовича, Ю.В. Сачков. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
5. Innovative materials and techniques in concrete construction // ACES Workshop. M.N. Fardis (Ed.). Springer Science+Business Media. 2012. p. 379
6. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. М.: Наука, 1994. 236 с.
7. Толстой А.Д. Сульфатостойкость бетона с пиритосодержащим заполнителем, определяемая ускоренным методом: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Белгород, 1987. 178 с.
8. Забуский И. Nonlinear partial differential equations. N.Y.: Acad. press, 1967, 223 с.
9. Бабушкин В.И. Термодинамика реакций образования дзудовного гипса и гидросульфалюмината кальция // Журнал прикладной химии. 1973. Т. 46. Вып. 2. С. 246–251.

*Информация об авторах*

**Толстой Александр Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

E-mail: [tolstoy.ad@bstu.ru](mailto:tolstoy.ad@bstu.ru)

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Крымова Анастасия Игоревна**, магистрант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

E-mail: [krymova.a@mail.ru](mailto:krymova.a@mail.ru)

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Фомина Екатерина Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Коробков Роман Александрович**, магистрант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.

*Поступила в июне 2018 г.*

© Толстой А.Д., Крымова А.И., Фомина Е.В., Коробков Р.А., 2018

**Tolstoy A.D., Krymova A.I., Fomina E.V., Korobcov R.A.**

**THE APPLICATION OF SYNERGETIC PRINCIPLES SELF-ORGANIZATION SYSTEM  
IN THE THEORY OF HARDENING BUILDING COMPOSITES**

*On the basis of research of hardening high-strength compositions the interrelation between of synergetic scheme opportunities of the nature phenomena studying and questions of structure formation management of the stone materials received from rationally picked up construction mixes is shown. The prospects of applying the General principles of synergetics and the concept of sustainable development of open dissipative systems to the material objects of industrial origin, and their understanding as an integral self-regulating non-equilibrium system are considered. This method was implemented using the thermodynamic principle of the Belgian school. In this topic the concept of "Hacken" was introduced, for a more detailed understanding of the structure of phase as a state, which appears in the scientific result of coherent (ordinal) flowing behavior of the plural construction of the number of particles, the direction of the concept of dissipative structure hydroxides. Together with the topic of thermodynamic processes types of thermodynamic systems and identify the availability and impact of these systems in our study were considered. The article presents images of the Gibbs energy change. As well as the data table clearly characterizing the change in Gibbs energy and the volume of hydrate reaction products in hardening systems. The main goal was to show that the principles of*

*the development of self-regulating system can be used in the technology of building materials. Also to show that this approach allows itself to carry out the analysis of a condition of the main structural elements of the open metastable system of hardening multicomponent concrete. To identify indicators of the completeness of the processes in a nonequilibrium system with the establishment of a new state of from viscous-fluid to solid, i.e., the transition to a new attractor.*

**Keywords:** building production, hardening systems, synergetic approach, correlation of production and natural potentials, balance of nonequilibrium systems.

## REFERENCES

1. Vasilenko V.N. Sustainable Russia: the concept of a noospheric environmental management of the state: indicators, institutions, and instruments. Volgograd: VolGY, 2003, 390 p.
2. Lesovic V.S. Geonickname. Subject and tasks. Belgorod: BGТУ, 2012, 232 p.
3. Haken H. Synergetics. Mir. 1980, 406 p.
4. Prigojin I. Stengers I. Order out of chaos: new dialogue between man and nature. Progress, 1986, 432 p.
5. Innovative materials and techniques in concrete construction, ACES Workshop. M.N. Fardis (Ed.). Springer Science+Business Media, 2012, 379 p.
6. Knyazeva E.N., Kyrzymov S.P. Laws of evolution and self-organization of complex systems. Nayka, 1994, 236 p.
7. Tolstoy A.D. Sulfacetamide concrete with pyrite-containing filler determined by the accelerated method. The dissertation on competition of a scientific degree. Belgorod, 1987, 178 p.
8. Zarybski I. Nonlinear partial differential equations. N.Y.: Acad. press, 1967, 223 p.
9. Babushkin V.I. Thermodynamics of reactions education zavodnaja gypsum and hydrocortamate calcium in hardened concrete. Journal of applied chemistry, 1973, vol. 46, no 2, pp. 246–251.

### Information about the author

**Alexander D. Tolstoy**, PhD, Assistant professor.

E-mail: [tolstoy.ad@bstu.ru](mailto:tolstoy.ad@bstu.ru)

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Anastasia I. Krymova**, Master student.

E-mail: [krymova.a@mail.ru](mailto:krymova.a@mail.ru)

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Ekaterina V. Fomina**, PhD, Assistant professor.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Roman A. Korobcov**, Master student.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Received in June 2018*

### Для цитирования:

Толстой А.Д., Крымова А.И., Фомина Е.В., Коробков Р.А. Применение синергетических принципов самоорганизации системы в теории твердения строительных композитов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №9. С. 24–29. DOI: [10.12737/article\\_5bab4a18907280.06517676](https://doi.org/10.12737/article_5bab4a18907280.06517676)

### For citation:

Tolstoy A.D., Krymova A.I., Fomina E.V., Korobcov R.A. The application of synergetic principles self-organization system in the theory of hardening building composites. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 9, pp. 24–29. DOI: [10.12737/article\\_5bab4a18907280.06517676](https://doi.org/10.12737/article_5bab4a18907280.06517676)