

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И АППАРАТ СИНЕРГЕТИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ СТРОИТЕЛЬСТВА

Ю. А. Веригин

Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

В работе излагаются основные принципы термодинамики сложных технологических процессов строительства и средств механизации, рассмотренные с позиции синергетики. Даются основные понятия, принципы и правила применения для оптимизации рассматриваемых процессов и технологий.

Ключевые слова: энергия, энтропия, негэнтропия, нелинейность процессов, технология, параметры систем, оптимизация.

Современная эпоха характеризуется фундаментальными переменами как в науке и технологических принципах различных производств, так и в социальной сфере деятельности человечества. Поэтому особо важным моментом является определение научной парадигмы, позволяющей интенсивно эволюционизировать техническим, социальным, естественнонаучным и другим направлениям. Полагаем, что на данном этапе развития этому в значительной мере может служить синергетика.

Синергетика позволяет изучать системы, включающие в себя подсистемы различной природы, такие, как субстанции квантовой механики (электроны, фотоны, атомы и прочие частицы), микробиологии (клетки, нейроны, различные биосистемы) и Вселенские объекты. С помощью аппарата синергетики можно описать, каким образом взаимодействие подсистем обеспечивает возникновение пространственных временных структур макроскопических размеров, а также различных технологий и процессов в строительстве.

Первооткрывателем термина «Синергетика» был известный немецкий физик из Штутгарта Герман Хакен, родившийся в 1927 году. Роль коллективного поведения подсистем образующих систему путем самоорганизации он назвал синергетикой (содействие, сотрудничество) [1]. Вводя это понятие, Г. Хакен имел в виду два смысла. Первый – теория возникновения новых свойств у целого, состоящего из взаимодействующих объектов. Второй – подход, требующий для своей разработки сотрудничества специалистов из различных отраслей знаний.

Идеи, высказанные в 1973 г. Г. Хакеном на первой конференции по проблемам само-

организации, были положительно оценены научным сообществом и распространены на самоструктурирующиеся системы, которые изучались различными науками, это дало возможность интегрировать их в одно направление.

Технологические процессы строительства, производства строительных материалов, а также рабочие процессы строительного дорожного машин и оборудования являются весьма энергоемкими и наследственно необратимыми в закономерностях течения которых властвует нелинейность.

К сожалению, существующие математические модели для описания и оптимизации отмеченных отраслей и их процессов созданы на линейной основе, где изменениям одной независимой переменной величины непреложно отвечают равные перемены в зависимой. Столь упрощенное представление реально сложных процессов не позволяет объединить и описать широкий круг разрозненных явлений, обнажить их глубинную сущность и оптимизировать процесс за счет совершенствования его физики, структуры и способа производства механических воздействий.

Нелинейность широко функциональна. В физике – это учет различного рода взаимодействий, необратимых явлений и тонких эффектов, не поддающихся описанию линейными моделями. В химии нелинейность описывает обратные связи в механизмах реакций. В биологии она отражает процессы жизненно важных процессов, необходимых для функционирования систем, борющихся за выживание. В технике и технологиях нелинейность же проявляется в многофакторности параметров машин, оборудования и сред,

с которыми они взаимодействуют, а также многообразии явлений, происходящих в ходе производства рабочих операций строительства.

Отсутствие четкого математического аппарата для теоретического описания сложных необратимых процессов поставило многие отрасли технологической деятельности на уровень эмпирической линейности, например, такие, как законы дробления, измельчения, бурения и переработки горных пород, закономерности смешивания при приготовлении строительных материалов, различные принципы оптимизации строительных технологий, термомодеформативных трансформаций фракционного состава структуры мерзлых грунтов и многие другие, которые развиваются под действием непрерывного потока негэнтропии, минуя состояния равновесия.

На сегодняшний день наиболее синтезирующей наукой, способной абсолютизировать рассматриваемую реальность, является термодинамика необратимых процессов с позиции синергетики, основы которой разработаны нидерландско-бельгийской школой Де Донде с участием И. Пригожина и Г. Николиса. Будучи молодой наукой, термодинамическая теория необратимых процессов уже нашла применение в биологии, астрофизике, метеорологии и др. На ее основе стало возможным решение таких задач как:

1. установление корректной параметрической взаимосвязи в системе необратимых явлений и процессов, имеющих различную природу;
2. исследование поведения макроскопических технологических систем применительно к частным условиям.

Основным средством описания затронутых проблем может быть аппарат синергетики. **Синергетика** – «synergetike» (греч.) – сотрудничество, совместные действия, согласно Г. Хакена, – самоорганизация, спонтанное образование высокоупорядоченных структур из хаоса, переход от неупорядоченного состояния к упорядоченному за счет совместного синхронного действия многих подсистем.

Технология различных производств совместно со средствами их механизации обеспечивают различную форму преобразования и движения материи, представляемой иерархические структуры различных уровней состояния в порядке возрастания их сложностей – исходная продукция, ее переработка, производство материалов и монтаж (сборка) изделия (сооружения). Весь этот сложный комплекс механо-химико-физических прояв-

лений может быть описан методами неравновесной термодинамики с позиций синергетики [2].

Термодинамика – это наука о законах сохранения и движения энергии, великолепно интерпретируемая Карно-Клаузиусом в его законах (началах) превращения энергии [3]. При этом энергия рассматривается как единая мера различных форм движения материи. Механическая и тепловая энергия – это только два вида из 20 известных форм ее проявления (аннигиляционная, ядерная, химическая, гравитационная, электрическая, упругая, нейтринодинамическая, мезонная, гравидинамическая и др.).

Синергетика сформулировала принцип самодвижения в природе путем создания более сложных систем из упрощенных. С синергетикой в физику проник эволюционный подход, который позволяет осознать, что творение – это создание нового за счет потребления энергии.

Синергетика ввела случайность на макроуровень, подтвердив тем самым преемственность выводов механики микроуровня и теории относительности А. Эйнштейна о взаимопревращении вещества и энергии, а также объясняет образование материи. Язык и аппарат синергетики позволяет описать динамику образования всех макросистем, составляющих микросодержание. С позиций синергетики, энергия как бы «застывает» в виде кристаллических структур, превращаясь из кинетической в потенциальную.

Вещество – это застывшая энергия. **Энергия** – понятие, характеризующее способность объекта производить работу не только механическую, но и созидательную для создания новых вещественных структур в таких процессах, как производство строительных материалов, получение тонкодисперсных структур создания различных видов топлив, например ядерных, органических и др. видов технологической деятельности человека. Таким образом, можно обобщить, что энергия – это источник деятельности сил и меры движения всех форм материи. Великолепная модель взаимосвязи энергии и материи выражена моделью $E = mc^2$, предложенной А. Эйнштейном [4].

Поскольку все технологические системы производств материальной продукции являются открытыми, то имеет место рассеяние – диссипация энергии. Мерой рассеяния энергии является энтропия – слово греческого происхождения. «Эн» – означает «в» или «содержащаяся», «эрг» – корень слова «ра-

бота», а «тропе» – «превращение». Приводя термин энтропия к рассматриваемой проблеме, его можно понимать как меру потребления (рассеяния) энергии на производство материальной субстанции. Таким образом, чем больше рассеивается, потребляется (деградирует) энергия, тем больше растёт величина энтропии. Следовательно, энтропия – есть функция состояния системы. В изолированных (консервативных) системах энергия сохраняется, энтропия растёт, а ей противоположная величина **негоэнтропия** убывает. В открытых (неконсервативных) системах с подводом энергии энтропия уменьшается на величину, зависящую от количества подводимой и теряемой энергии.

Предметом синергетики являются закономерности состава, функционирования и развития технологических и механизированных макроскопических и статистических систем. **Синергетической системой** принято называть макроскопическую часть материальной субстанции, выделенной граничными поверхностями для исследования внутренних процессов.

Граничными поверхностями системы являются контрольные поверхности или стенки рабочего органа. Примером синергетической системы в строительной технике может быть корпус смесителя и приготовляемый бетон, получающий движение за счет действия смешивающих лопастей или горная масса, измельчаемая дробящими плитами и т.п. Подобные системы характеризуются множеством параметров, относящихся к рабочему органу, свойствам перерабатываемой среды, а также совокупности течения процесса, подчиняющейся статистическим и вероятностным законам. Это означает, что получаемые результаты тем вероятнее, чем большее число параметров учитывает система.

В синергетических системах происходит изменение их состояния и параметров. Переходы сопровождаются существенными изменениями всех показателей исходного состояния в новое качество, что, в свою очередь, можно математически точно описать и оценить с позиций изменения энергии и энтропии системы. Если при переходе системы из одного состояния в другое в каждый момент времени во всех ее точках одноименные параметры имеют подобные изменения численных значений, то процесс принято считать равновесным. Равновесные процессы обратимы, т.е. систему можно вернуть в первоначальное состояние, проводя ее в обратном направлении через те же промежуточные со-

стояния, приложив к ней воздействия той же величины. Условиями обратимости являются:

- бесконечно малые скорости течения процесса при непрерывном сохранении равновесия системы;
- отсутствие потерь на преодоление внутренних трений и тепла.

В реальных условиях любой технологии и передела сырья все процессы неравновесны и необратимы, т.к. из-за конечной скорости процесса равновесие не успевает установиться по всей протяженности системы, а наличие диссипации энергии на трение и теплообмен исключают возврат системы в первоначальное состояние. Для этого потребуется больше энергии, чем затраты на прямой процесс, если, конечно, в этом существует необходимость.

Детализированный анализ иерархической структуры технологических процессов и их структур позволяет отнести их к **сложным несаморазвивающимся и наследственно необратимым**. Основными признаками таких процессов является их развитие на основе внутренних противоречий за счет источников энергии и негоэнтропии, подаваемых на вход системы «среда – рабочий орган» ведущей машины в технологии.

Сложность процессов заключается в том, что исходные параметры системы дискретны, с обширной прерывистостью и по-разному проявляются при взаимодействии внутри системы. Так, например, при приготовлении строительных бетонов параллельно смешиванию и сепарации проявляются эффекты физико-химического синтеза, обеспечивающие гидратацию мелкодисперсной фазы с водой, образование коллоидной среды и изменение реологических характеристик несущей фазы бетона по всему объему. Благодаря этому, среда (материал) в ходе приготовления переходит от состояния сыпучего тела в упруговязкоколлистическое, подготовленное к жесткой кристаллизации.

Наследственность процессов определяется правилом их организации, например, качеством дозировки компонентов, скоростными режимами технологических машин и оборудования, свойствами исходного сырья, опытности оператора и т.п.

Для осмысления синергетики и разработки математической модели процессов, есть необходимость проиллюстрировать ее основные постулаты, изложенные в упомянутых источниках.

Правило потребления и расходования энергии: ни одна материальная система не

может развиваться и функционировать, не потребляя энергии ΔE , расходуемой на совершение работы A , на изменение внутренней энергии ΔU и на диссипацию тепла в окружающую среду $Q_{о.с.}$.

$$\Delta E = \Delta U + A + Q_{о.с.} \quad (1)$$

Работа A может совершаться в различных формах (механическая, электрическая и др.) и расходуется на изменение состояния системы (перемещение тел в пространстве, создание напряженного состояния в структуре вещества и т.п.).

Правило функционирования энтропии: реально изолированные системы стремятся самопроизвольно перейти из менее вероятного состояния в более вероятное, т.е. из упорядоченного в менее упорядоченное или наоборот. При этом энтропия возрастает по закону $S = k \cdot \ln A$

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq 0. \quad (2)$$

Для всех реальных, неравновесных и необратимых систем правомочно условие ($>$), условие ($=$) справедливо к идеальным обратимым процессам и системам.

Скорость возрастания энтропии $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ определяет степень необратимости процессов. В соответствии с этим закон возрастания энтропии можно записать как

$$\frac{dS}{dt} \geq \frac{1}{T} \int j_i dx_i, \quad (3)$$

где j_i – потоки энергии на вход системы «среда-рабочий орган»; dx_i – энергоэнтропийные движущие силы сопротивления, возникающие на рабочем органе или в технологическом процессе строительства (монтаж конструкций и т.п.)

В изолированных системах энтропия возрастает, а негэнтропия убывает. Следовательно, негэнтропия характеризует количество и качество энергии на входе в систему, а приведенное уравнение выражает закономерность деградации – потребления энергии. Поэтому система, производящая механическую или электрическую работу, может рассматриваться как источник негэнтропии (вращающаяся лопасть бетоносмесителя, поднимаемый груз с помощью монтажного крана и т.п.). Поэтому система привода ма-

шин и механизмов может рассматриваться как источник негэнтропии.

Прогрессивное развитие систем, или третье правило синергетики. В данном случае рассматривается явление содержания энтропии в открытых системах. Энтропия открытых систем в процессе их прогрессивного развития всегда уменьшается за счет потребления энергии от внешних источников. Для этого случая энтропия энергоисточника возрастает. Тогда справедливо утверждение, что любое внешнее воздействие осуществляется за счет расхода энергии и роста энтропии внешних систем.

Четвертое правило синергетики гласит: материальные системы при прогрессивном развитии (смешивание, измельчение, монтаж строительного объекта и т.п.) достигают предела, который можно выразить максимальными значениями соответствующего уровня негэнтропии (ΔS_{max}). Иными словами: для достижения технологических требований во взаимодействующих системах существует минимум энергии для получения максимального качества продукции или производственного результата.

Подобная постановка в достижении технологических результатов имеет важнейшее значение для совершенствования производства, конструкции машин и оборудования, оптимизации параметров переработки материалов и т.д. Следовательно, коэффициентом использования может быть КПД системы – η , либо коэффициент использования энергии

$$\eta_s = (-\Delta S) / \Delta E_{затр.} \quad (4)$$

Пятое правило синергетики формулируется как постулат конкуренции: в каждом классе материальных систем преимущественное развитие получают те, которые в соответствии с принятой совокупностью внутренних и внешних воздействий достигают максимального значения негэнтропии или минимальной энергопотребности. В обычных технологиях – это достижение максимальной производительности, долговечности и надежности изделия, высокой экономичности и т.п.

Особой чертой рассматриваемых технологических систем является то, что они относятся к несаморазвивающимся системам, т.к. их существование обеспечивают источники энергии и негэнтропии. При этом развитие является сложным интегральным процессом, включающим изменчивость состояния, рассеяние вещества и энергии.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И АППАРАТ СИНЕРГЕТИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ СТРОИТЕЛЬСТВА

Основы термодинамической теории необратимых процессов, начиная с 1931 года, развивались Л. Онсагером, И. Пригожиным, И. Мейкснером, К. Денбигом, И. Дьярмати, С. де Гроотом и другими учеными.

Для адаптации этой теории к строительным машинам и технологиям мы, используя аппарат теории поля, перевели основные принципы классической термодинамики в локальную форму. При этом приняли допущения о том, что элементы объемов континуумов находятся в условиях целлулярного равновесия. В соответствии с этим состояние структуры процессов строительства и её технологий можно выразить в виде дифференциального уравнения состояния

$$du = TdS - dF + \sum_{k=1}^k \mu_k dc_k, \quad (k = 1, 2 \dots k), \quad (1.1)$$

где du – внутренняя потенциальная энергия системы; T – абсолютная температура процесса; dS – энтропия системы; dF – сток энергии (негоэнтропии) со стороны рабочего органа ведущей машины; dc_k – массовая доля k -го химически активного компонента системы, например вяжущего; μ_k – химический потенциал или удельная поверхностная энергия k -го компонента.

Рассматривая dF как энергию стока за счет работы внешних сил, можно допустить, что она является функцией обобщенных сил P_i , ($i = 1, 2 \dots n$), развиваемых рабочим органом машины (лопасть смесителя, било дробилки и т.п.) по границе раздела с обрабатываемой средой. Отсюда следует, что в стационарном состоянии dS имеет минимум, соответствующий принятой константе качества исходного продукта.

Сток энергии способствует приращению энтропии как за счет притока энергии извне, так и за счет внутренних межфазовых изменений в системе «среда – рабочий орган машины», что приводит ее к заданному устойчивому состоянию, обусловленному требованиями технологии к готовой продукции.

Предположив, что под воздействием рабочего органа на среду в ней возникают внутренние эффекты, состояние которых совместно со стоком энергии находится в условиях локального термодинамического равновесия в пределах изменения энтропии системы и характеризуются оператором $\frac{dS}{dt}$.

Под локальным термодинамическим равновесием понимается состояние, при ко-

тором в любой точке системы или в любом локальном объеме рабочей зоны существует термодинамическое равновесие каждой из фаз (несущая фаза, отдельные частицы, элемент рабочего органа и др. всего ($i = 1, 2, 3 \dots m+1$)), но отсутствует общее межфазное объемное равновесие. При таком условии полная энтропия S , связанная с внешними и внутренними процессами в локальных объемах системы по И. Дьярмати [5] описывается уравнениями

$$\frac{d_e S}{dt} = -\oint J_S dF \quad u, \quad \frac{d_i S}{dt} = \int_V \sigma dV, \quad (6)$$

где $d_e S$ – приток энтропии со стороны рабочего органа; $d_i S$ – изменение энтропии внутри системы, связанные с физико-химическими превращениями в системе; J_S – плотность субстанционального притока энтропии; σ – производство энтропии (это либо напряжения в среде, либо напряжения на рабочем органе аппарата и т.п.); dF – поверхность межфазового контакта.

Для того, чтобы использовать предложенный аппарат синергетики необходимо все параметры исследуемого процесса «объект воздействия-технологическая машина» привести в единую систему измерения, составить необходимые уравнения [5], и решить эти уравнения относительно искомого параметра, который может рассматриваться как оптимизирующий технологический процесс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полак, А. Ф. Твердение мономинеральных вяжущих средств / А. Ф. Полак. – М. : Стройиздат, 1966. – 398 с.
2. Безручко, Б. П. Путь в синергетику. Экскурсы в десяти лекциях / Б. П. Безручко, А. А. Короновский. – М. : Ком. книга. 2005. – 304 с.
3. Базарбаев, Н. Б. Энергетика технологических процессов в строительном производстве / Н. Б. Базарбаев, Д. М. Ярошев; – Ташкент : Изд-во «Фон», 1980. – С. 110.
4. Веригин, Ю. А. Концепции современного естествознания / Ю. А. Веригин. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2002. – 250 с.
5. Дьярмати, И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы / И. Дьярмати. – М. : Мир, 1974. – 304 с.

Веригин Ю.А. – д.т.н., профессор кафедры «Технология и механизация строительства», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: XVerigin2005@mail.ru.