

тельства, позволяющие получать долговечные бетонные конструкции, существенно снижать энергозатраты при заводском их производстве, а также быстро и качественно выполнять работы в полевых условиях.

Кроме того, следует отметить, что в последнее время многие исследователи получают прирост прочности в суперпластифицированных бетонах при содержании глинистых примесей до их количества в 7-10 %. Этот

факт находится в рамках выдвинутой концепции и позволяет сегодня совершенствовать технологию бетона в том числе и при специальном введении различных глинистых добавок.

Исследование выполнено на кафедре Строительных материалов Строительно-технологического факультета Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

УДК 621.926.519

## СИНЕРГЕТИКА И ЕЕ АДАПТАЦИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

Ю.А. Веригин, Я.Ю. Веригина

*В работе излагаются основные принципы синергетики и ее адаптивный аппарат, применительно к технологическим процессам строительства. Даются примеры энергетического анализа процессов устойчивости стержневых строительных конструкций, нагруженных осевой силой. На основе силовых характеристик измельчительного устройства строится синергетическая модель процесса измельчения, позволяющая оптимизировать процесс помола различных материалов на любой стадии измельчения.*

*Ключевые слова: синергетика, строительные технологии, конструкции, измельчаемые материалы, разрушение структуры, энергия процессов, оптимизация параметров.*

### ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы строительства, производства строительных материалов, гидротехники, металлургии, фармакологии и других отраслей, а также рабочие процессы строительно-дорожных машин и оборудования являются весьма энергоемкими и наследственно необратимыми в закономерностях течения которых властвует нелинейность

К сожалению, существующие математические модели используемые для для описания и оптимизации подобных процессов созданы на линейной основе, где изменениям одной независимой переменной величины непременно отражают 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.

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 материалов при приготовлении строительных бетонов, различные принципы оптимизации строительных конструкций, термодеформативных 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 (**синергетика**), основы которой разработаны нидерландско-бельгийской школой Де Донде с участием И. Пригожина и Г. Николаса. Будучи молодой наукой, термодинамическая теория необратимых процессов уже нашла применение в биологии, астрофизике, метеорологии и других сферах деятельности человека.

На основе этого стало возможным решение таких задач как:

## СИНЕРГЕТИКА И ЕЕ АДАПТАЦИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

1. Установление корректной параметрической взаимосвязи в системе необратимых явлений и процессов, имеющих различную природу;

2. Исследование поведения макроскопических технологических систем применительно к частным условиям.

В работе представляется краткий адаптированный обзор основных положений термодинамики необратимых процессов применительно к технологической научно-практической и отраслевой деятельности в строительстве.

**Синергетика** – это сотрудничество, совместные действия и самоорганизация, приводящее к образованию высокоупорядоченных структур из хаоса.

Все технологические системы при производстве материальной продукции являются открытыми в которых имеет место диссипация энергии.

Мерой рассеяния энергии является **энтропия** которую можно трактовать как меру потребления энергии на производство материальной субстанции. Следовательно энтропия есть функция состояния системы.

Синергетической системой можно считать макроскопическую часть материальной субстанции, выделенной граничными поверхностями где осуществляются внутренние преобразования.

Граничными поверхностями системы являются контрольные поверхности или стенки рабочего органа. Примером синергетической системы в строительной технике может быть корпус смесителя (машины, аппарата и т.п.) и приготовляемый материал, получающий движение за счет действия смешивающих лопастей или горная масса, измельчаемая дробящими плитами и строительная конструкция, нагруженная внешней силой и т.п.

Подобные системы характеризуются множеством параметров, характеризующих рабочий орган, свойства перерабатываемой среды, а также совокупности хода процесса, подчиняющееся статистическим и вероятностным законам. Это означает, что получаемые результаты тем вероятнее, чем большее число параметров учитывает система.

В синергетических системах происходит изменение состояния параметров взаимодействующих объектов. 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 рассматриваемой 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 состояния, 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, теплообмен и возможные физико-химические изменения исключают возврат системы в первоначальное состояние. Для этого потребуются 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** [1].

Основными признаками таких процессов является их развитие на основе внутренних противоречий за счет источников энергии и негэнтропии, подаваемых на вход системы «среда – рабочий орган» ведущей машины в технологии.

При этом общее состояние системы подчиняется правилам потребления и расходования энергии т.е.

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

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

Рассматривая  $dF$  как энергию стока 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, либо нагрузки на конструкции 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.

Под воздействием рабочего органа на среду в ней возникают внутренние эффекты, состояние которых совместно со стоком энергии находятся в условиях локального термодинамического равновесия в пределах изменения энтропии системы и характеризуются оператором  $\frac{dS}{dt}$  – т. е. скоростью изменения энтропии.

Это позволяет определить условия, обеспечивающие решение технологических регламентов производственных процессов с минимальным энергопотреблением.

В качестве примера можно рассматривать процесс потери устойчивости двухопорного стержня

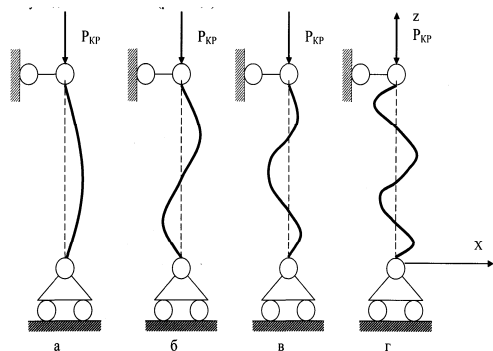


Рисунок 1 – Характер потери устойчивости двухопорного стержня, нагруженного критической силой  $P_{кр}$  нагруженного осевой силой  $P$

При достижении критической силы  $P_{кр}$ , упругая линия стержня превращается в криволинейную. Потеря устойчивости может иметь различный характер – от элементарного прогиба (рисунок 1а) до синусоидально-волнового (рисунок 1г).

Для решения задачи устойчивости стержня метод энергетического подхода позволяет с высокой точностью определить величину нагрузки, определяющей характер потери устойчивости.

При этом величина критической нагрузки  $P_{кр}$ , совершая работу  $A_{кр} = P_{кр} \cdot \delta$ , где  $\delta$  – величина осевого перемещения.

Используя уравнение 1 можно записать, что величина потенциальной энергии деформации определяется как :

$$A_{кр} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^r \int_0^{l_i} \frac{M_n X dx}{EJ k_{min}}, \quad (2)$$

где  $r$  – число участков разного поперечного сечения;  $i$  – номер текущего участка равной площади и его соответствующей длины.  $J$  – момент инерции рассматриваемого сечения; Проведя промежуточные подстановки преобразования и решая уравнение (2) относительно  $P_{кр}$ , можно получить, что

$$P_{lim} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{l_i} EJ_{min} (y'')^2 dz}{\int_0^g (y')^2 dz} \quad (3)$$

Данное уравнение показывает, что необходимым условием получения оптимального решения является наличие информации по описанию поведения упругой линии стержня. При этом уравнение кривой изгиба  $y=y(z)$  может быть представлено в явной форме, показанной на рисунок 1. [2]

Аналогичная картина наблюдается при сверхтонком измельчении материалов, когда события разрушения микрочастиц среды совмещаются с обратными процессами – «залечиванием» первичных дефектов и образованием субструктур, что ведет к укрупнению зерен вместо их уменьшения, что снижает удельную поверхность вещества (рисунок 2) – участок кривой 1-3.

График показывает что возможен путь непрерывного течения процесса разрушения после критической неустойчивости в точках 1 и 2.

Согласно [3] энергия, необходимая при измельчении тонкодисперсных сред расходуется на :

- подготовительную – накопление напряжений;
- образование зародышевых трещин – уплотнение вакансий;
- развитие микротрещины;
- слияние и размножение микротрещин;

СИНЕРГЕТИКА И ЕЕ АДАПТАЦИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

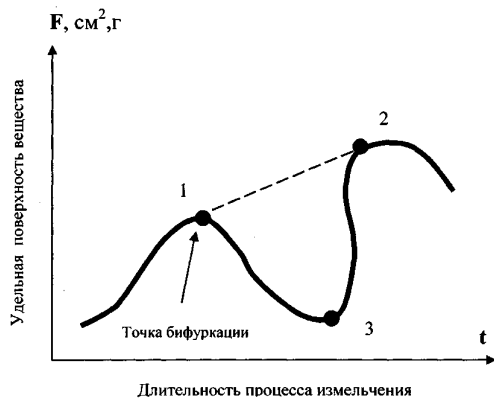


Рисунок 2 – Бифуркационная диаграмма процесса получения ультрадисперсных сред механическим измельчением

$$A_{\sigma p} = 0,32\sigma_p \cdot v \sqrt{\frac{1}{i-1}} + NRT \ln \left[ \frac{18RT}{ah} K_m \rho^* l^6 (i-1) \right] - \sigma_p \beta \Delta T l^3 - 0,239 C \Delta T \rho d l^3 \quad (4)$$

где  $\sigma_p$  – предел прочности измельчаемого материала;  $\rho$  – плотность материала;  $l$  – средний размер измельчаемого материала;  $i$  – степень измельчения материала;  $s$  – удельная теплоемкость материала;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения материала;  $\Delta T$  – градиент температуры;  $V$  – средний объем частицы, подлежащей измельчению;  $K_m$  – молярная концентрация разрушаемого вещества;  $h$  – постоянная Планка;  $R$  – постоянная Больцмана;  $N$  – число Авогадро;  $a$  – скорость распространения упругих деформаций в веществе;  $\rho^*$  – плотность дислокаций в структуре разрушаемого вещества.

Первый член уравнения определяет условия объемного деформирования и поток необходимой энергии для разрушения вещества с пределом прочности  $\sigma_p$ . Вторая составляющая определяют энергию, необходимую для обеспечения молекулярно – кинетических эффектов в структуре вещества, обеспечивающих разрушение межатомных связей, рост микротрещин и размножение и уплотнение дислокаций. Третий член уравнения учитывает количество тепловой энергии, диссипирующей в единице объема. Четвертая составляющая учитывает наличие тепловых деформаций в разрушаемой частице.

Таким образом, полученное уравнение учитывает все стороны явлений, происходящих при механическом диспергировании (измельчении) сред до ультрадисперсного состояния.

Содержание в уравнении (4) таких параметров, как физико-механические свойства среды ( $\sigma_p$ ,  $\rho$ ), характеристики дисперсности ( $S$ ,  $i$ ,  $l$ ,  $v$ ), позволяет установить взаимосвязь этапов разрушения с технологическими параметрами и требований нанотехнологии при получении нанокластерных систем.

Таблица 1 – Результаты ультрадисперсного вольского измельчения песка различными способами

Способ активации	Время активации, с	Удельная поверхность, $S_{БЭТ} \cdot m^2/g$	Размеры микроблоков первичных кристаллов, $D$ , нм	Значения относительных средних квадратичных микродеформаций решетки $\sqrt{\varepsilon^{-2}}, 10^{-3}$	Усредненная плотность дислокаций, $\rho^*, 1/m^2$
Исходные характеристики порошка	-	0,02	192	нет	нет
Шаровая мельница	180	0,11	161	-	-
	0	2,30	120	-	-
	360	4,19	106	-	-
	0	4,17	108	-	-
	540				
	0				
Вибрационная мельница	300	0,50	103	-	-
	600	2,17	78	-	-
	210	6,05	63	2,9	-
	0	7,12	59	2,8	-
	540	7,01	59	2,8	-
	0				
Планетарная мельница	160	2,39	68	2,7	-
	600	6,18	46	2,9	-
	120	12,03	24	5,1	$3 \cdot 10^6$
	0	11,69	20	5,3	$3 \cdot 10^6$
	180				
	0				
Шаровая мельница с энергообменником	180	4,12	56	3,8	-
	600	9,06	42	4,3	$4 \cdot 10^5$
	120	14,78	23	5,7	$3 \cdot 10^6$
	0	16,21	18	7,0	$6 \cdot 10^7$
	180				
	0				

Проведя преобразования и решив уравнение (4) относительно скорости движения рабочего органа измельчителя,  $V_{уд}$  получено, что:

$$v_{уд} = \frac{K_m \rho^* F T l i}{0,42 N_m \frac{t}{T}} \quad (5)$$

где  $V_{уд}$  - скорость ударного воздействия измельчительного органа, м/с;  $N_T$  - теоретически потребная энергия для разрушения вещества.  $F$  - удельная поверхность получаемого продукта - тонкоизмельченного вещества;  $l$  - средний размер микрочастицы;  $i$  - степень измельчения;  $t$  - длительность процесса измельчения;  $T$  - абсолютная температура процесса измельчения;  $\rho^*$  - удельная плотность дислокаций в структуре измельчаемой среды на единицу поверхности.

Эксперименты, проведенные по измельчению вольского песка в различных мельницах показали, что для каждого способа измельчения имеются характерные точки, когда имеет место «отказ» от роста удельной поверхности, т. е. наличие точки 1 (таблица 1) с переходом в точку 3 (рисунок 2)

Это достаточно убедительно подтверждается и табличными данными (таблица 1).

Исключение составляет материал получаемый с использованием мельницы с энергообменным устройством, где у нас была возможность управлять скоростью удара мельющих тел. [4]

В заключении следует отметить, что скорость разрушения  $V_{уд}$ , а следовательно и режим работы мельниц зависит от требуемой тонкости измельчения вещества. Поэтому режимные параметры различных измельчителей должны иметь устройства для изменения скоростных режимов в процессе помола

вещества, что позволяет обеспечить прямой переход от точки бифуркации 1 к точке 2 (рис. 2) и тем самым существенно сократить энергоёмкость процесса измельчения и повысить производительность мельниц.

Аналогичным образом использование уравнения (1) применительно к любому технологическому процессу с многофакторными параметрами (раработка мерзлых грунтов, приготовление и укладка бетонов и др.) позволяет определить наиважнейший параметр порядка и оптимизировать процесс, получив тем самым высокий технико-экономический эффект [3].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом для применения принципов синергетики в оптимизации технических процессов необходимо составление общего уравнения энергопотребности с последующим его решением относительно параметра порядка, т.е. оптимизирующего параметра влияющего на наивыгоднейший ход процесса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веригин Ю.А., Клименко Е.А. Введение в техническую синергетику. Барнаул. Изд-во АлтГТУ. Ползуновский Альманах № 1. 2008. с. 43-50.
2. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин. М.: изд-во АПМ. 2000 г. – 472 с.
3. Веригин Ю.А., Толстенов С.В. Синергетические основы процессов и технологий; - Барнаул изд-во АлтГТУ 2007. – 160 с. Текст.
4. Веригин Ю.А. Маликова Л.Ю. Моделирование рабочих процессов в шаровых мельницах. Строительные и дорожные машины. 2001 - №9. – с. 12-14.