

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Ю. А. Веригин, Я. Ю. Веригина

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

Приводится энергетический анализ рабочих процессов машин и оборудования в строительстве. Предложена математическая зависимость для оптимизации процесса устойчивости стержней разрушения вещества в технологиях производства строительных материалов.

Ключевые слова: энергоемкость, синергетика, деформация, устойчивость, измельчение, разрушение, оптимизация.

В основе строительного производства, работе строительных машин и оборудования лежит потребление энергии, обеспечивающее привод машин, осуществление рабочих операций по переработке сырья и производству строительно-монтажных работ. Сложность, многообразность и необратимость рабочих процессов машин, как правило, затрудняют точно определить энергоемкость технологических операций. Поэтому основные принципы оптимизации этих процессов идут от исходного результата, либо накопленного практического опыта. Обоснование рационального выбора параметров машин и комплекта технологий строительства осуществляются без объективного фундаментального анализа и математической базы теоретически взаимосвязующей многообразные параметры процессов и технологий, качество продукции, экономическую целесообразность производства и многое другое.

Существующее разнообразие машин по переработке материалов и производству технологических операций объединяет общее условие потребления энергии

$$E_{уд} dm = kNdt, \text{ (Дж, кг*м, кал, кВт*ч и пр.)}$$

где dm – элементарная масса перерабатываемого сырья, кг; $E_{уд}$ – удельное энергопотребление на единицу продукции, Дж/кг; N – мощность, затрачиваемая на привод машины в единицу времени, т.е. Дж/с.

Параметр $(E_{уд}dm)$ определяет энергоемкость любой материальной субстанции (атом, кластерная система, машина, рабочие органы машины и пр.).

В процессах взаимодействия субстанции с внешним возмущением изменяются ее ме-

хано-физико-химические показатели, на что затрачивается определенное количество энергии. При этом в объекте воздействия проявляются такие факторы как сдвиг, сжатие, растяжение, срез следствием чего являются структурные изменения в системе на микро-, мезо- и макроуровнях.

Существующие на сегодняшний день представления об энергоемкости напряженно-деформированного состояния твердого тела принято обобщать известной зависимостью, представляемой как

$$\sigma_{сж} = \frac{\rho A}{\Delta \varepsilon_{отн}}, \text{ н/м}^2,$$

где A – энергетическая константа материала, н*м/кг; ρ – плотность вещества; $\varepsilon_{отн}$ – относительная деформация структуры объекта.

При этом скалярное произведение векторов $\sigma_{сж}$ и δ , где δ – путь перемещения деформируемого тела дает возможность определить энергию при деформации объекта.

Статистика, сопоставляющая процесс транспортировки-доставки грузов в строительстве различными видами транспорта, позволяет определить преимущество и технический уровень различных видов транспорта. При этом из наземных видов транспорта на самом выгодном уровне стоит железнодорожный, и только водный транспорт превосходит его по грузоподъемности перевозок. Из цехового транспорта наиболее экономичным является транспортерный (конвейерный) транспорт.

В качестве управляющего параметра предлагается энергоемкость процесса, подсчитываемая от исходного комплекта машины оборудования без учета выбора их наилучших режимов работы. Вполне понятно,

что существующая методика определения энергоемкости процессов не раскрывает всю сложность явлений происходящих при осуществлении технологического процесса переработки вещества, а, следовательно, и не позволяет его оптимизировать. Однако указывает на необходимость разработки математического аппарата для полного анализа необратимых технологических процессов строительства, машин и оборудования с целью оптимизации их рабочих параметров. При этом доказано, что сложные, неравновесные и необратимые процессы и технологии могут быть описаны на основе принципов синергетики, которая является синтезирующей наукой способной абсолютизировать любую рассматриваемую реальность.

С помощью синергетики возможно решение такой задачи, как установление корректной параметрической взаимосвязи в системах необратимых явлений и процессов, имеющих различную природу.

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

Граничными поверхностями системы, например в производстве материалов, являются контрольные поверхности или границы 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 смешивающихся лопастей или горная масса, измельчаемая в дробилке или металлоконструкция, нагруженная внешней силой и т.п.

Подобные системы имеют множество параметров, характеризующих орган, свойства перерабатываемой среды, а также совокупности хода процесса, подчиняющейся статистическим и вероятностным законам. Это означает, что получаемые результаты тем вернее, чем больше 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**.

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; μ_k – химический потенциал или удельная поверхностная энергия k -го компонента.

Рассматривая dF как энергию стока за счет работы внешних сил рабочего органа,

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ № 1 2016

можно допустить, что она является функцией обобщенных сил P_i , ($i = 1, 2, \dots, n$), развиваемых рабочим органом машины (лопасть смесителя, било дробилки, либо внешняя нагрузка на конструкции машины 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 (либо штока силового гидроцилиндра). При достижении критической силы $P_{кр}$ упругая линия стержня превращается в криволинейную. Потеря устойчивости может иметь различный характер – от элементарного прогиба до синусоидального волнового.

Для решения задачи устойчивости стержня метод энергетического перехода позволяет с высокой точностью определить величину нагрузки, определяющей характер потери устойчивости и место, где следует изменить сечение стержня с целью повышения его устойчивости.

При этом величина критической нагрузки $P_{кр}$, совершая работу

$$A_{кр} = P_{кр} \cdot \delta,$$

где δ – величина осевого перемещения.

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

$$A_{кр} \equiv \frac{1}{2} \sum_{k=1}^r \int \frac{MnXdx}{EJK \min}, \quad (2)$$

где r – число участков разного поперечного сечения; i – номер текущего участка равной площади и его соответствующей длины. J – момент инерции рассматриваемого сечения; E – модуль упругости материала.

Проведя промежуточные подстановки преобразования и решая уравнение (2) относительно $P_{кр}$, получено, что

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

Данное уравнение показывает, что необходимым условием достижения 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 рисунке 1 [2].

Аналогичная картина наблюдается при сверхтонком измельчении материалов, когда события разрушения микрочастиц среды совмещаются с обратными процессами – «залечиванием» первичных дефектов и образованием новых кластерных структур, что ведет к укрупнению зерен вместо их уменьшения, что снижает удельную поверхность вещества.

Согласно [3] энергия $A_{др}$, необходимая при измельчении тонкодисперсных сред расходуется на:

- подготовительную – накопление напряжений;
- образование зародышевых трещин – уплотнение вакансий;
- развитие микротрещины;
- последующее разрушение структуры вещества;
- диссипацию тепловых эффектов.

Перечисленные эффекты можно выразить следующими выражениями

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

Содержание в уравнении (4) таких параметров, как физико-механические свойства среды (σ_p , ρ^*), характеристики дисперсности (V , l , v , i), позволяет установить взаимосвязь этапов разрушения с технологическими параметрами и требований нанотехнологии при получении нанокластерных систем, где σ_p –

предел прочности измельчаемого материала; ρ – плотность материала; l – средний размер измельчаемого материала; i – степень измельчения материала; ΔT – 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.

Первый член уравнения определяет условия объемного деформирования и поток необходимой энергии для разрушения вещества с пределом прочности – σ_p .

Вторая составляющая определяет энергию, необходимую для обеспечения молекулярно-кинетических эффектов в структуре вещества, обеспечивающих разрушение межатомных связей, рост микротрещин, 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 со-

стояния, чего в имеющихся теоретических моделях не учитывалось.

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

$$u_{y\partial} = \frac{K_m \rho^* \cdot F T l i}{0,42 N_m \frac{t}{T}}, \quad (5)$$

где $V_{y\partial}$ – 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; ρ^* – 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.

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

Таблица 1 – Результаты ультрадисперсного измельчения вольского и песка различными способами

Способ активации	Время активации, с	Уд. поверхность, $S_{БЭТ}$, м ² /г	Размеры микроблоков первичных кристаллов, D, нм	Значения относит. сред. кв. микродеформаций решетки, $\sqrt{\varepsilon^{-2}}, 10^{-3}$	Усредненная плотность дислокаций, ρ^* , 1/м ²
Исходные характеристики порошка	-	0,02	192	нет	нет
Шаровая мельница	1800	0,11	161	-	-
	3600	2,30	120	-	-
	5400	4,19	106	-	-
	9000	4,17	108	-	-
Вибрационная мельница	300	0,50	103	-	-
	600	2,17	78	-	-
	2100	6,05	63	2,9	-
	5400	7,12	59	2,8	-
	7200	7,01	59	2,8	-
Планетарная мельница	160	2,39	68	2,7	-
	600	6,18	46	2,9	-
	1200	12,03	24	5,1	$3 \cdot 10^6$
	1800	11,69	20	5,3	$3 \cdot 10^6$
Шаровая мельница с козырьковым энергообменником	180	4,12	56	3,8	-
	600	9,06	42	4,3	$4 \cdot 10^5$
	1200	14,78	23	5,7	$3 \cdot 10^6$
	1800	16,21	18	7,0	$6 \cdot 10^7$

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 $u_{уд}$, а следовательно 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 (рисунк 2) и тем самым существенно сократить энергоемкость процесса измельчения и повысить производительность мельниц.

Аналогичным образом использование уравнения (1) применительно к любому технологическому процессу с многофакторными параметрами (разработка 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 энергетического анализа в оптимизации технических процессов необходимо составление общего уравнения энергопотребности с последующим его решением относительно параметра порядка, т.е. оптимизи-

рующего параметра влияющего на наивыгоднейший ход процесса.

Для составления общего энергетического уравнения подобно формуле (4) необходимо все происходящие явления записать в единой системе измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веригин, Ю. А. Введение в техническую синергетику / Ю. А. Веригин, Е. А. Клименко // Ползуновский альманах. – 2008. – № 1. – С. 43-50.
2. Шелофаст, В. В. Основы проектирования машин / В. В. Шелофаст. – М.: Изд-во АПМ, 2000. – 472 с.
3. Веригина, Я.Ю. Моделирование процессов измельчения тонких сред в технологиях производства материалов / Я. Ю. Веригина // Изв. вузов. Строительство. – 2010. – № 1. – С. 3-6.
4. Веригин, Ю. А. Моделирование рабочих процессов в шаровых мельницах / Ю. А. Веригин, Л. Ю. Маликова // Строительные и дорожные машины. – 2001. – № 9. – С. 12-14.

Веригин Ю.А. – д.т.н., профессор кафедры «Технология и механизация строительства» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: xvergin2005@mail.ru.

Веригина Я.Ю. – старший преподаватель кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: xvergin2005@mail.ru.