

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ КАК МЕТОД ЭКОНОМИИ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ МЯСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Г.Д.КОНЧАКОВ

Всесоюзный научно-исследовательский институт мясной промышленности, г.Москва, СССР

Н.Н.МИЗЕРЕЦКИЙ

Московский технологический институт мясной и молочной промышленности, г.Москва, СССР

В последние годы проблема экономного расходования энергетических ресурсов в мясной промышленности стала актуальной. Для удобства рассмотрения отдельных вопросов энергоемкости технологических процессов и соответствующего оборудования предлагается использовать алфавитно-лексикографическое расположение последних, представленное в табл. I.

Необходимо отметить, что распределение потребляемой энергии по выделенным в табл. I технологическим подсистемам отрасли является крайне неравномерным. Для примера в табл. 2 приведены минимальные (min) и максимальные (max) энергозатраты ($\frac{N}{\Pi}$) на осуществление процесса "измельчение" при выполнении различных операций колбасного производства (по данным фирм Австрии, ГДР, Голландии, США, ФРГ, Швейцарии).

Резкое, более чем 100-кратное, увеличение энергозатрат при переходе от операции снятия шкурки со шпика ($\frac{N}{\Pi} = 0,21 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}}$) к операции дообвалки кости прессованием

($\frac{N}{\Pi} = 25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}}$) может быть объяснено с позиции протекающих при этих операциях фазовых превращений.

В случае снятия шкурки со шпика модель процесса измельчения (в качестве границы взаимодействия рабочего органа и материала принята линия) базируется на явлении фазового перехода типа "плавление". В случае дообвалки кости прессованием в основу модели процесса измельчения (в качестве границы взаимодействия принять объем) положено явление фазового превращения типа "лавинное разрушение структуры материала в области напряжений, превышающих предельное напряжение сдвига".

Ясно, что для разрушения связей по линии требуется значительно меньшие энергозатраты, чем для их разрушения по всему объему материала (при механических способах разрушения связей).

перемещение его по окружности (БР-I, $\frac{N}{\Pi} = 1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}}$).

При рассмотрении энергетических аспектов фазовых переходов необходимо исходить из основных положений теории термодинамического программирования технологических подсистем мясной промышленности. Современное ее состояние позволяет утверждать, что все термодинамические величины являются степенными, а показатели степени этих величин в области критических состояний (критические индексы) выражаются друг через друга:

$$d + 2\beta + \gamma = 2, \quad (1)$$

$$\beta\delta = \beta + \gamma, \quad (2)$$

$$2\nu = \gamma + \eta\nu, \quad (3)$$

$$\alpha + d\nu = 2, \quad (4)$$

$$d + 2 - \eta = 5(d - 2 + \eta). \quad (5)$$

А.З. Паташинским и В.Д. Покровским (1975) показано, что в рамках микроскопической теории фазовых переходов критические индексы γ и η в пространстве размерности $d = 4 - \epsilon$ ($\epsilon = 0, 1, 2$) могут быть вычислены с помощью тождеств Уорда методом ϵ -разложения:

$$\gamma = 1 + \frac{1}{6}\epsilon + \frac{1}{12}\epsilon^2 - \frac{\eta}{3} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{\epsilon^2}{54} \quad (7)$$

Для критической точки "жидкость-пар" показатели степени лежат в пределах: $0,07 \leq \alpha \leq 0,14$; $0,32 \leq \beta \leq 0,36$; $1,2 \leq \gamma \leq 1,5$; $4 \leq \delta \leq 4,8$; $0 \leq \eta \leq 0,07$; $0,57 \leq \nu \leq 0,63$. С точностью до экспериментальных ошибок эти значения критических индексов подтверждаются опытами.

Для описания фазового перехода типа "коагуляция" А.А. Душниковым (1978) на основании гипо-

тезис подобия коэффициентов коагуляции ($\kappa(g, \epsilon) = g^{\lambda} \kappa(\epsilon)$) были использованы асимптотические сингулярные ветви решения модифицированного уравнения Смолуховского. Само решение в соответствии с методом близких систем И.Т. Турбовича (1954, 1961) искалось в виде разложения искомой величины в ряд по дробным степеням переменного. Было показано, что для бинарных смесей композиционный спектр первоначально мономерных частиц представляется биномиальным распределением, а критический индекс счетной концентрации частиц близок к значению $\gamma = 1,2$.

Аналитическое описание фазового перехода типа "кристаллизация" (на основании исследований квадрупольного аналога модели Изинга) с использованием методов теории ветвления решений нелинейных интегральных уравнений (в частности, метода Дяпунова-Шмидта) в 1979 г. предложено Е.Е. Тареевой.

Было установлено, что в системе, представляющей собой правильную периодическую решетку, каждому из узлов которой сопоставлена трехзначная спиновая переменная S_i , взаимодействующая с ближайшим соседом S_j по закону:

$$W_{ij} = -A_1(3S_i^2 - 2)(3S_j^2 - 2) \quad (8)$$

наблюдается скачкообразный переход из состояния изотропной жидкости беспорядочно вращающихся молекул в ориентационно и пространственно упорядоченный кристалл.

Значение параметра порядка $\mathcal{L}$, соответствующее минимуму свободной энергии системы, является корнем уравнения:

$$\mathcal{L} = \frac{e^{6A_1 A_2 A_3 \mathcal{L}} - 1}{e^{6A_1 A_2 A_3 \mathcal{L}} + 2} \quad (9)$$

Это значение совпадает с $\mathcal{K} = 0,38$. Для нахождения критического значения $\mathcal{L}$ могут быть использованы и другие контуры (а не только гипербола), так как корнями уравнения (9) являются также $\sin 20^\circ 50' = \sin 22^\circ 20' = \sin 60^\circ = 0,38$. Учитывая важную роль контурных функций в теории фазовых переходов, покажем особенность их разложения в ряд Тейлора по методу Турбовича.

Будем полагать, что нелинейное количество движения $K = M \dot{\varphi}$ свободно колеблющейся без трения ($\mathcal{K} = 0$) со скоростью $\dot{\varphi} = d\varphi/d\tau$ термодинамической системы (Г.Д. Кончаков, Н.Н. Мазерекский и др., 1978) связано с ее инерционностью M , упругостью Q , смещением φ и квазиупругой силой $f = (Q\varphi)^{1/\epsilon}$ зависимостью:

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{dK}{d\tau} \right)^\epsilon + Q \left(\frac{K}{M} \right)^{\frac{1}{\alpha}} = 0, \quad (10)$$

где α, ϵ, τ - соответственно показатели степени и времени.

Используя уравнения для полной энергии термодинамической системы ($E = E_{\text{пот}} + E_{\text{кин}}$), получим выражение для определения периода собственных колебаний системы (T) в зависимости от их амплитуды (например, $L = \varphi/\gamma$, $\mathcal{K} = \dot{\varphi}/\gamma$, где γ - соответствующая контурная функция фазы колебаний φ):

$$T = 2\pi (MQ^{-1/\epsilon})^{\frac{1}{\alpha+1}} A(\alpha, \epsilon) \cdot L^{\frac{\alpha-1/\epsilon}{\alpha+1}}, \quad (11)$$

$$A(\alpha, \epsilon) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\alpha}{\alpha+1} \right)^{\frac{1}{\alpha+1}} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon+1} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha+1}} B\left(\frac{\alpha}{\alpha+1}, \frac{\epsilon}{\epsilon+1}\right), \quad (12)$$

$$T = 2\pi (M^{\frac{1}{\alpha}} Q^{-1})^{\frac{1}{\epsilon+1}} A(\epsilon, \alpha) \cdot \mathcal{K}^{\frac{\epsilon-1/\alpha}{\epsilon+1}}, \quad (13)$$

$$A(\epsilon, \alpha) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon+1} \right)^{\frac{1}{\epsilon+1}} \left(\frac{\alpha}{\alpha+1} \right)^{\frac{\epsilon}{\epsilon+1}} B\left(\frac{\alpha}{\alpha+1}, \frac{\epsilon}{\epsilon+1}\right), \quad (14)$$

где $B\left(\frac{\alpha}{\alpha+1}, \frac{\epsilon}{\epsilon+1}\right)$ - бета-функция.

Разлагая функцию $y(\varphi)$ в ряд Тейлора в окрестности $\varphi = 0$ и $\varphi = \frac{\pi}{2}$, получим:

$$y\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} \cdot y^{(m)}\left(-\frac{\pi}{2}\right) \left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)^m, \quad (15)$$

$$y(\varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} \cdot y^{(m)}(0) \cdot \varphi^m, \quad (16)$$

где коэффициенты рядов (15) и (16) зависят от производных ванных точках $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ и $\varphi = 0$.

функции $y(\varphi)$ в фиксиро-

Если $a \neq 1$, $b = 1$, $y(\varphi) = K/\chi$, то при $n = 1, 3, 5, \dots$ и $n = 2, 4, 6, \dots$ для n -ой производной соответственно получим:

$$y^{(n)} = \sum_{m=1}^{n-1} X_{n,m} \cdot y^{c_1} \cdot \dot{y}^{c_2}, \quad (17)$$

$$y^{(n)} = \sum_{m=1}^{n/2} X_{n,m} \cdot y^{c_1} \cdot \dot{y}^{c_2}, \quad (18)$$

$$X_{n,m} = C_3 X_{n-1,m} - C_4 \cdot A^2(b,a) X_{n-1,m-1}, \quad (19)$$

$$C_1 = m\left(\frac{1}{a} + 1\right) - n + 1, \quad (20)$$

$$C_2 = n - 2m, \quad (21)$$

$$C_3 = m \frac{a+1}{a} - n + 2, \quad (22)$$

$$C_4 = n - 2m + 1 \quad (23)$$

При выводе соотношений (10) - (23) были использованы указания общей теории уравнения Эмдена-Фаулера. В соответствии с этой теорией фазовые переходы в технологических подсистемах мясной промышленности (конденсация, кипение, кристаллизация, плавление и т.д.) можно интерпретировать как стохастические процессы потери устойчивости решений дифференциальных или интегральных уравнений, описывающих эти системы.

На обсуждение конгресса выносятся вероятностная модель фазового перехода. Пусть в известном объеме находятся однородные элементы заданной природы, число которых определяет состояние этой системы. За единицу времени каждый элемент (независимо от других) может выйти из объема с вероятностью $q = \text{const}$. За этот же промежуток времени в объем может войти m элементов ($m = 0, 1, 2, \dots$) с вероятностью p_m , определяемой дискретным законом распределения вероятностей F/m .

Будем предполагать, что в процессе фазового перехода за единицу времени из объема выходит i элементов (A_i) и m элементов в него входит (B_m). Учитывая, что события A_i и B_m не зависят друг от друга, для нахождения (не зависящих от времени) переходных вероятностей p_{jk} (при $i = j - k + m$, $0 \leq k < j$) воспользуемся обрывающейся при $i = j$ суммой:

$$p_{jk} = P(A_{j-k})P(B_0) + P(A_{j-k+1})P(B_1) + \dots \quad (24)$$

Используя биномиальный закон распределения вероятностей, получим:

$$p_{jk} = C_j^{j-k} q^{j-k} p^k \cdot F(0) + C_j^{j-k+1} q^{j-k+1} p^{k-1} \cdot F(1) + \dots \quad (25)$$

При $k=j$ выражение (25) принимает вид:

$$p_{jj} = p^j \cdot F(0) + C_j^1 q p^{j-1} F(1) + \dots \quad (26)$$

Для нахождения p_{jk} при $k > j$ будем иметь:

$$p_{jk} = p^j F(0 + k - j) + C_j^1 q p^{j-1} F(1 + k - j) + \dots \quad (27)$$

Объединяя формулы (25), (26) и (27), получим выражение для определения p_{jk} в виде обрывающейся при $j > k$ суммы:

$$p_{jk} = \sum_{v=0}^j C_j^v p^v q^{j-v} F(k-v) \quad (28)$$

С помощью формулы (28) может быть построена матрица перехода (π) рассматриваемой системы из состояния E_j в состояние E_k и найдены финальные вероятности p_k ее состояний. В частности, при $F(m) = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}$ ($\lambda > 0$) все финальные вероятности системы распределены

по закону $p_k = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda/q}$. В рамках построенной математической модели фазового пе-

рехода соотношение $A_i < B_m$ предлагается рассматривать как явление парообразования, соотношение $A_i \geq B_m$ как состояние динамического равновесия и соотношение $A_i > B_m$ как явление конденсации в области пространства занимаемого системой.

Для определения вероятности $p_n(\tau)$ наличия в заданном объеме к моменту времени τ одновременно n элементов при $q = \text{const}$ и $p_m = p_i = p = \text{const}$ ($q > 0, p > 0$) путем рассуждений, аналогичных приведенным выше, можно получить зависимости:

$$p_0(\tau) = \frac{q(1-E)}{p-qE}, \quad (29)$$

$$p_n(\tau) = \frac{(q-p)^2 E [p(1-E)]^2}{(p-qE)^{n+1}}, \quad (30)$$

$$E = e^{(q-p)\tau} \quad (31)$$

В ближайшей перспективе важную роль в энергетическом балансе технологических подсистем будет играть теплота конденсации рабочих веществ холодильных машин мясной промышленности. Температурный напор, создаваемый в теплообменном аппарате при ее использовании, достаточно высок:

$$\Delta t = \frac{Q}{Mpc} \quad (32)$$

Это обстоятельство дает основание считать, что энергия фазовых переходов (в частности, теплота конденсации) с успехом может быть утилизирована при осуществлении ряда технологических процессов, связанных с затратой тепла (варка, выпаривание, коагуляция, обезвоживание, сушка, экстракция и т.п.). Для аналитического описания тепло-массообменных особенностей этих процессов предлагается уравнение:

$$f_1(m) \frac{\partial}{\partial x} \int_a^b y_n^{f_2(m)} dx = \int_a^b y_n^{f_3(m)} \frac{\partial^2 y_n}{\partial x^2} dx, \quad (33)$$

$$M(0, n) = 2n(n+1), \quad (34)$$

где F - критерий Фурье или Фика.

Взаимосвязь между известными в настоящее время вероятностными моделями фазовых переходов представлена на рис.2. Как видно из рис.2 при переходе от одного семейства технологических подсистем мясной промышленности к другому (в горизонтальном и вертикальном направлениях) один или несколько параметров, характеризующих эти семейства, принимают вполне конкретные критические значения. Например, при $\alpha = -1$ семейство M переходит в семейство $\Gamma\Gamma$.

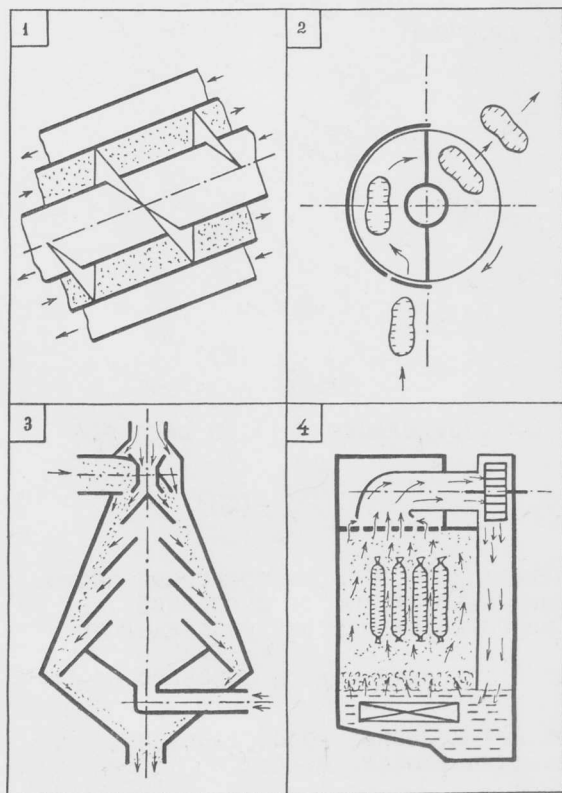


Рис.1

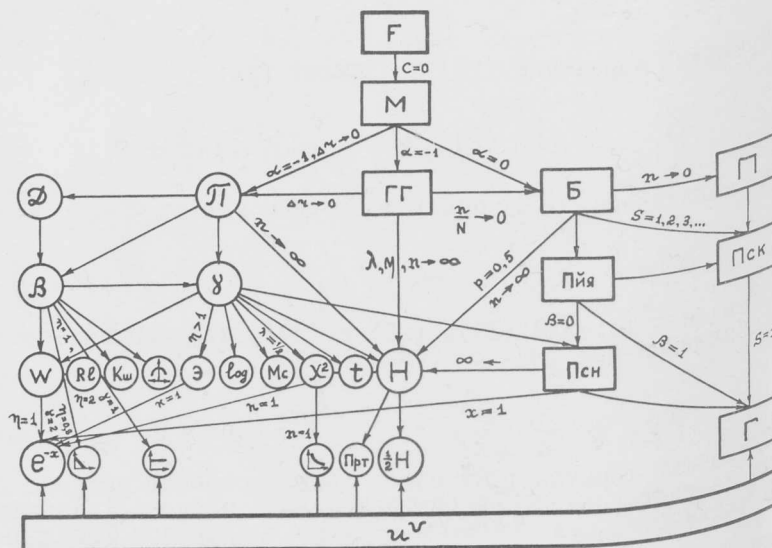


Рис.2

Таблица 1

Абсорбция Агломерация	Бактериофугирование	Варка Выпаривание Выпечка	Дробовалка Дымообразование
Замораживание	Измельчение	Коагуляция Концентрирование	Мойка
Нагрев	Обезвоживание Обездвиживание Обезжиривание Отстаивание Охлаждение Очистка	Перемешивание Посол	Растворение Регенерация Резание
Сушка	Фильтрация	Центрифугирование Циклонирование	Экстракция

Таблица 2

Операция	$\frac{N}{\Pi} \cdot 10^3$, $\frac{\text{кВт.ч}}{\text{кг}}$	
	$\min$	$\max$
Снятие шкурки со шпика	0,21	0,34
Измельчение замороженных мясных блоков	0,79	6,34
Нарезание шпика и полуфабрикатов	2,70	8,60
Измельчение сырья на волчке и куттере	3,00	11,20
Дробовалка кости прессованием	13,70	25,00

Рассмотренные примеры подчеркивают важность детального изучения энергетических особенностей фазовых переходов при технологической обработке мяса. Не меньшее влияние на экономику мясоперерабатывающего производства оказывает и степень соответствия выбранного способа энергоподвода в рабочую зону оборудования механике фазового перехода. Полнота использования подведенной при этом тепло- или электроэнергии может быть увеличена за счет применения (на основе принципа активизации границ взаимодействия $\gamma = \gamma^*$) различного рода активаторов (энергетически активных микроорганизмов, поверхностно-активных и гидродинамически-активных веществ и т.п.).

В табл. 3 приведены примеры активизированных технологических процессов мясной промышленности и их математические модели. Принцип действия аппаратов показан на рис. 1, где 1 - шнековый обезвоживатель ИВС-300 для варки, обезвоживания и транспортировки сырья при производстве ливерных колбас; 2 - ротационный бокс БР-1 для эмульгирования крупного рогатого скота; 3 - реактивно-струйный плавитель РСП-1 для обезжиривания мягкого сырья; 4 - установка ВВО-1 для охлаждения вареных колбасных изделий.

Интересно отметить, что энергозатраты на перемещение сырья в процессе технологической обработки по винтовой линии (ИВС-300, $\frac{N}{\Pi} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кВт.ч}}{\text{кг}}$) существенно выше, чем на

Таблица 3

Процесс	Аппарат	Активатор	Математическая модель
Обезвоживание мягкого сырья	ИВС-300	Шнек	$W_2 = W_1 e^{-\frac{\Delta t \cdot \psi \cdot \epsilon \cdot F}{100 G}}$
Обезвоживание к.р.с.	ВС - I	Ротор	$\Pi = \frac{240}{1,66 + I/n} \cdot M$
Обезжиривание мягкого сырья	РСП-1	NaCO_3	$W_2 = W_1 (1 - e^{-\frac{\alpha \cdot p \cdot \epsilon}{20 d}})$
Охлаждение колбасных изделий	ВВО - I	Воздух	$t = c_1 (1 + c_2 H) \times$ $\times (1 + c_3 \epsilon)^{c_4 (1 + c_5 H)}$