

УДК 664.004.18

Современные подходы к рациональному использованию ресурсов при первичной обработке пищевого сырья

Д-р техн. наук Г.В.АЛЕКСЕЕВ, канд. техн. наук Е.И.ВЕРБОЛОЗ

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

A functional and parametric analysis of existing calculation models and operational experience of cleaning and comminuting equipment used in food industry as well as at some production facilities of meat and fish industry is presented. The results of the analysis indicate the presence of the system of creation and functioning of resource-saving equipment including the development and investigation, manufacture and designing, operation, repair and servicing.

Одной из тенденций развития рынка пищевой продукции является возрастающее потребление легкой полноценной пищи и вытеснение из рациона тяжелых продуктов питания с использованием необработанного пищевого сырья. По данным АгроНИИТЭИПП, потребление картофеля в переработанном виде на душу населения в год составляет (% от валового сбора): во Франции – 6; в Германии – 23; Нидерландах – 25; Великобритании – 50 и США – 36,5. В нашей стране этот показатель не превышает 1 %, что связано с низкой эффективностью переработки пищевого сырья в промышленных условиях.

Согласно данным Белорусского научно-производственного объединения по производству продуктов питания из картофеля, если сравнительную себестоимость 1 кг картофелепродуктов, приготовленных в домашних условиях, принять за 1, то в общественном питании она составляет 0,67, а в промышленности – 0,57, причем в промышленности она имеет тенденцию к снижению.

В масштабах отрасли это приводит к тому, что переработка 1 млн т картофеля на картофелепродукты обеспечивает уменьшение потерь при хранении такого же количества на 83 тыс. т, высвобождает 12,5 тыс. вагонов, дает возможность комплексно перерабатывать сырье с полной утилизацией и рациональным использованием отходов, а применяемые для хранения емкости могут быть сокращены в 7 – 8 раз. Тенденция роста производства продуктов в промышленных условиях наблюдается также в крупяной, кондитерской, крахмалопаточной, консервной и пищевых концентратной, рыбной и других отраслях пищевой промышленности.

Производственный процесс приготовления пищи, как известно, включает две стадии: первичную обработку сырья при изготовлении полуфабрикатов и тепловую обработку при приготовлении пищи, готовой к употреблению. Анализ около 300 видов кулинарной продукции: овощной, крупяной, рыбной и мясной показывает, что наибольшие затраты труда (до 70 %) приходятся на первую стадию. Только на разделку и филетирование рыбы, например, приходится от 27 до 50 % общей трудоемкости процесса.

Кроме экономии трудовых ресурсов новое поколение технологического оборудования призвано существенно сократить потери сырья. При первичной обработке сырья в промышленных условиях потери составляют 12 – 30 %. Причем такие результаты достигаются только на новом оборудовании, что при среднем сроке эксплуатации машин в пищевой промышленности 10 – 12 лет реализуется не более чем на 5 – 10 % всех предприятий.

Значительная трудоемкость первичной обработки и потери сырья приводят к достаточно высокой удельной энергоемкости применяемых технологических процессов и аппаратов. Очевидно несоответствие между рыночными тенденциями увеличения потребления полуфабрикатов, изготовленных промышленными методами, и ресурсоемкими процессами и аппаратами, применяемыми для переработки целого ряда продуктов питания, особенно на стадиях первичной обработки.

Ресурсосбережением считают совокупность мероприятий, снижающих ресурсопотребление при осуществлении технологического процесса или работы машины при заданных условиях, поэтому для пищевых производств особенно важны снижение потерь при обработке продуктов питания и увеличение долговечности оборудования.

Вместе с тем экономия материальных средств должна предусматриваться на всех этапах процессов и аппаратов: разработке, изготовлении, эксплуатации и утилизации отходов. Эффективность эксплуатации того или иного процесса или аппарата можно оценить следующим образом.

Пусть в результате научных исследований количество отходов пищевого сырья при переработке в аппарате снизилось с n_0 до n_1 . Откорректируем объем перерабатываемого сырья таким образом, чтобы «на выходе» получить одно и то же количество готового продукта A . С этой целью можно записать

$$A = a_0 (1 - n_0) = a_1 (1 - n_1), \quad (1)$$

откуда следует, что новый объем переработки сырья определится как

$$a_1 = a_0 (1 - n_0) / (1 - n_1), \quad (2)$$

где a_0 – первоначальный объем переработки сырья;
 n_0, n_1 – отходы соответственно на базовом и усовершенствованном оборудовании.

Принятые допущения позволяют, зная коэффициенты нормативных или среднестатистических накладных расходов, оценить общую эффективность функционирования процесса или аппарата Э следующим соотношением:

$$\begin{aligned} \Theta = & \left\{ C(1 - n_0) \left[\frac{E}{(1 + E)^T - 1} + E_n \right] - \frac{A}{P} (A_7 + A_8 + A_9) \right\} / (1 - n_1) + \\ & + C(1 - A_1) (A_2 A_3 + A_3 A_4 + A_3 A_4 A_6 + A_3 E_n) + \frac{A(A_7 + A_8 + A_9)}{P(1 - n_0)n_0} - \\ & - \left[CA_1 - \frac{A_0(n_0 - n_1)}{(1 - n_0)(1 - n_1)} \right] \left[\frac{E}{(1 + E)^T - 1} + E_n \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где C – стоимость базового образца оборудования;
 A – объем переработанного сырья «на выходе»;
 P – производительность базового образца;
 T – срок службы базового образца;
 m – коэффициент повышения срока службы нового образца;
 n_0, n_1 – коэффициенты потерь сырья соответственно базового и нового образцов;
 E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;
 A_0 – стоимость 1 кг сырья;
 A_1 – коэффициент повышения стоимости нового образца;
 A_2 – коэффициент поправки на доставку и монтаж;
 A_3 – коэффициент сопутствующих капитальных вложений;
 A_4 – коэффициент амортизационных отчислений;
 A_5, A_6 – коэффициенты отчислений соответственно на капитальный ремонт и техобслуживание;
 A_7 – коэффициент энергозатрат;
 A_8 – коэффициент заработной платы;
 A_9 – коэффициент затрат на спецодежду.

По соотношению (3) можно выявить пути повышения эффективности процессов обработки продуктов питания. Численные расчеты по приведенным формулам подтверждают необходимость снижать отходы при обработке практически любого вида пищевого сырья и повышать долговечность оборудования, выявляя определенные тенденции по мере изменения этих параметров: даже при использовании более долговечного аппарата происходит снижение эффективности, если при реализации процесса получают значительные отходы, а переработка дорогостоящего сырья эффективна только для малоотходных процессов.

Проведенный функционально-параметрический анализ существующих расчетных моделей и опыта эксплуатации очистительного и измельчительного оборудования, используемого в консервном и овощесушильном, крахмалопаточном и кондитерском, крупяном производствах, а также на некоторых предприятиях рыбной и мясной промышленности выявил связь отдельных характери-

стик перерабатываемых продуктов питания с режимами обработки и дополнительными затратами на обслуживание.

Результаты этого анализа свидетельствуют о наличии вполне законченной системы создания и функционирования ресурсосберегающего оборудования, включающей в себя три взаимосвязанные подсистемы:

- разработка и исследование;
- изготовление и проектирование;
- эксплуатация, ремонт и техобслуживание.

В соответствии с параметрическим анализом и построенной структурой системы можно предположить, что имеется следующая функциональная связь между ее отдельными элементами: исследование механики контакта сырья с рабочими органами – исследование температурных режимов в области контакта – разработка (формулирование рабочей гипотезы) принципиального решения – проектирование оборудования (узлов или рабочих органов) – проектирование технологии и изготовление опытного образца – монтаж и отладка – опытная эксплуатация – ремонт (доводка узлов или отдельных деталей).

Изложенное выше свидетельствует о необходимости уточнения некоторых характеристик механики взаимодействия контактирующих тел.

Г.Герцем показано, что для двух тел, прижимаемых друг к другу силой P , действующей в вертикальном направлении оси OZ , и первоначально контактирующих в точке, параметры образующейся площадки находят при решении системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (\lambda + \mu)(\partial\theta / \partial x) + \mu \nabla^2 U &= 0; \\ (\lambda + \mu)(\partial\theta / \partial y) + \mu \nabla^2 V &= 0; \\ (\lambda + \mu)(\partial\theta / \partial z) + \mu \nabla^2 W &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где U, V, W – перемещения точек деформируемого тела;
 $\theta = \partial U / \partial x + \partial V / \partial y + \partial W / \partial z$ – объемное расширение;
 $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ – оператор Лапласа;
 λ, μ – коэффициенты Ламе.

При этом предполагается выполнение следующих условий:

а) на поверхности давления при $z = 0$

$$\left. \begin{aligned} \tau_{zy} = \mu(\partial V / \partial z + \partial W / \partial y) &= 0; \\ \tau_{zx} = \mu(\partial U / \partial z + \partial W / \partial x) &= 0, \end{aligned} \right\}$$

т.е. отсутствует трение покоя;

б) сумма нормальных напряжений по поверхности давления равна силе P ;

в) на поверхности давления нормальные напряжения σ равны $(\sigma_z)_1 = (\sigma_z)_2$;

г) для точек плоскости XV , лежащих вне контура давления, $\sigma_z = 0$.

Большой объем экспериментальных исследований свидетельствует о том, что для реального шероховатого тела для описания закона распределения сферических сегмен-

тов модели можно использовать степенную функцию

$$\varphi(x) = n_r/n_c = bx^v, \quad (5)$$

где n_r – число вершин, лежащих выше уровня x ;

n_c – общее число сферических сегментов;

b, v – константы.

Рассмотрим контакт двух тел – гладкого и шероховатого. Пусть шероховатость моделируется сферическими выступами, размещенными по закону (5). В ненагруженном состоянии шероховатая поверхность касается гладкой поверхности своей наиболее выступающей неровностью. После приложения нагрузки P контактирующие тела сблизятся на некоторую величину ΔH , при этом будут контактировать и другие сегменты шероховатой поверхности.

Решение задачи Герца об упругом контакте сферы с полупространством дает возможность записать функцию $N(\varepsilon - x)$ в виде

$$N(\varepsilon - x) = 4r^{1/2} R_{\max}^{3/2} (\varepsilon - x)^{3/2} / 3\theta$$

$$\text{при } \theta = (1 - \mu_1^2) / E_1 + (1 - \mu_2^2) / E_2, \quad (6)$$

где E_i и μ_i – модули упругости тел и коэффициенты Пуассона.

С учетом характеристик распределения неровностей b и v из (5) получим

$$\varepsilon = [(2\sqrt{\pi p_c \theta / k_v})(r/R_{\max} b^2)^{1/2}]^{2/(2v+1)}$$

$$\text{при } k_v = \Gamma(v+1) / \Gamma(v+3/2), \quad (7)$$

где $p_c = P/A_c$ – контурное давление.

Поскольку для площади единичного контакта $a_i = (0,75 \times P r \theta)^{1/3}$ и микрогеометрия шероховатости поверхности наиболее полно может быть описана как $\Delta^{-1} = (rb^{1/v})/R_{\max}$, то усредненное давление на площадке можно записать в виде

$$p_r = p_c^{1/(2v+1)} [(2^{v/2} k_v \Delta^{1/2}) / \theta \pi^{1/2}]^{2v/(2v+1)}. \quad (8)$$

Предположив, что пятно контакта круглое, получим выражение для определения диаметра

$$d_r = (2r/v^{1/2})(2\pi^{1/2} \Delta^v p_c \theta / k_v)^{1/(2v+1)}. \quad (9)$$

Полученные соотношения свидетельствуют о том, что при контакте реальных шероховатых тел, в частности продукта питания и абразивного рабочего органа, величина пятна контакта зависит от характера распределения неровностей, т.е. от размера зерна в выбранной фракции.

Рассмотренная выше математическая модель позволяет установить влияние различных условий контакта в том случае, когда тела тангенциально неподвижны. При абразивной обработке пищевого сырья наряду с нормальным контактом осуществляется и взаимное перемещение относительно друг друга.

Для исследования влияния такого перемещения на параметры площади контакта рассмотрим плоскую контактную квазистатическую задачу о скольжении твердого тела по границе упругой полуплоскости. При этом на всей площади контакта соблюдается закон трения

$$\tau_{xy} = \tau_0 - k\sigma_y. \quad (10)$$

Действующие на твердое тело нормальная (P) и тангенциальная (T) силы обеспечивают ему равномер-

ное движение. В системе координат, связанной с твердым телом, будут иметь место следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \sigma_y = 0; \tau_{xy} = 0 \quad (-\infty < x < -a, b < x < +\infty); v = f(x) + \eta; \\ \tau_{xy} = \tau_0 - k\sigma_y \quad (-a < x < b), \end{aligned} \quad (11)$$

где v – нормальная компонента смещений на границе ($y = 0$);

$f(x)$ – форма контактирующей поверхности твердого тела.

На границе упругой полуплоскости выполняется следующее соотношение:

$$\begin{aligned} [\pi E / 2(1 - \mu^2)](\partial v / \partial x) = \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} [(\sigma_y)_{y=0} / (t - x)] dt - \pi(\tau_{xy})_{y=0} (1 - 2\mu) / (2 - 2\mu). \end{aligned} \quad (12)$$

При наличии тангенциального перемещения из-за несовершенной упругости реальных материальных тел граничные условия задачи становятся несимметричными и для решения уравнения Лапласа метод Фурье неприменим.

Введем в нижней полуплоскости функцию комплексного переменного следующего вида:

$$w(z) = U - iV = \int_{-\infty}^{+\infty} [(\sigma_y)_{y=0} / (t - x)] dt. \quad (13)$$

С учетом предельных значений записанного интеграла типа Коши граничные условия для определения $w(z)$ получим в виде

$$\left. \begin{aligned} V = 0 \quad (-\infty < x < -a, b < x < +\infty); \\ U + kV(1 - 2\mu) / (2 - 2\mu) = \pi F(x), \quad (-a < x < b), \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где $F(x) = \tau_0(1 - 2\mu) / (2 - 2\mu) + Ef'(x) / 2(1 - \mu^2)$.

Определение аналитической функции $w(z)$ в нижней полуплоскости – частный случай задачи Гильберта-Римана. Давление на площадке контакта при условии $p(x) = -(\sigma_y)_{y=0}$ рассчитываем по формуле

$$\begin{aligned} p(x) = -(V)_{y=0} / \pi = \\ = -F(x) \cos[\pi(1/2 - \beta)] / \sqrt{1 + [k(1 - 2\mu) / (2 - 2\mu)]^2} + \\ + P \sin[\pi(1/2 - \beta)] / [\pi(x + a)^{1/2+\beta} (b - x)^{1/2-\beta}] + \\ + \{ \sin[\pi(1/2 - \beta)] / [\pi \sqrt{1 + k^2(1 - 2\mu)^2 / (2 - 2\mu)^2}] \times \\ \times (x + a)^{1/2+\beta} (b - x)^{1/2-\beta} \} \times \\ \times \int_{-a}^b [F(\xi)(\xi + a)^{1/2+\beta} (b - \xi)^{1/2-\beta} / (\xi - x)] d\xi, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\beta = (1/\pi) \arctg[k(1 - 2\mu) / (2 - 2\mu)]$.

Из соотношения (15) следует, что характер распределения давления определяется видом функции $F(x)$ из (14), которая зависит от формы поверхности твердого тела, описываемой зависимостью $f(x)$.

В рассматриваемом случае абразивного воздействия на продукты питания давление по площади контакта зависит от формы поверхности твердого тела, т.е. от формы

единичного зерна на площадь контакта, что является характеристикой определенной марки абразива.

При экспериментальной проверке сформулированных теоретических представлений необходимо выявить такие зависимости для разных видов пищевого сыра.

Другой основной задачей при разработке ресурсосберегающих машин является анализ распределения температур в зоне контакта рабочего органа и обрабатываемой поверхности, т.е. выяснение глубины проникновения изотермы, негативно влияющей на пищевое сырье (клеястеризация крахмала $\cong 60$ °С, денатурация белка $\cong 70$ °С и др.). Для оценки распространения таких изотерм рассмотрим процесс проникновения температурного поля перпендикулярно обрабатываемой поверхности продукта, т.е. одномерную задачу о распределении тепла в бесконечном стержне. Для этого найдем функцию $T(x, t)$, удовлетворяющую уравнению

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (16)$$

начальному условию $T(x, 0) = \varphi(x)$ и граничному условию второго рода

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{q(t)}{\lambda} \quad (17)$$

или при равномерном тепловом потоке

$$\frac{\partial T}{\partial n/s} = -\frac{q(t)}{\lambda}. \quad (18)$$

Разделяя переменные и вводя замену $T(x, t) = U(x) f(t)$, после ряда преобразований и интегрирования получим

$$T(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{4\pi at}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4at}\right] \varphi(x') dx'. \quad (19)$$

Последнее выражение описывает распределение температуры с течением времени в бесконечном стержне от мгновенного точечного источника интенсивностью $Q = c\gamma$, действующего в начальный момент времени в некоторой точке x' .

Полученные результаты имеют приближенный характер, поскольку не описывают реальные размеры пятна контакта и характер теплообмена с окружающей средой, однако показывают принципиальную возможность учета распространения тепловых полей по времени и глубине проникновения.

Более точные оценки распределения температурных полей могут быть получены при решении тепловой задачи в следующей постановке. Рассмотрим температурное поле, возникающее при обработке продукта питания, не прогреваемого на всю глубину за один рабочий ход. Теплообмен при этом схематизируется следующим образом. По поверхности полубесконечного тела в положительном направлении оси z движется полосовой источник тепла шириной $2h$ и бесконечно протяженный вдоль оси y , являющейся его осью симметрии. Плотность теплового потока по всей поверхности источника будем считать постоянной. Начальную температуру продукта для простоты записи целесообразно принять равной нулю. Си-

стему координат свяжем с источником тепла, тогда можно считать, что теплопроводящая среда движется со скоростью продольной подачи в отрицательном направлении оси z . В этом случае задача сводится к решению уравнения теплопроводности

$$a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (20)$$

с разрывными граничными условиями

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0, |z|>h} + aT \Big|_{x=0, |z|>h} = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0, |z|<h} = q = \text{const}$$

и начальными условиями

$$T \Big|_{t=0} = 0. \quad (21)$$

Для решения этого уравнения использовали метод источников, записывая выражение температурного поля от элементарного источника следующим образом:

$$dT = \frac{2q dy' dz' dt'}{c\gamma [4\pi a(t-t')]^{3/2}} \times \left(\exp\left\{ -\frac{x^2 + (y-y')^2 + [z-z' + v(t-t')]^2}{4a(t-t')} \right\} - \frac{2q dy' dz' dt'}{c\gamma [4\pi a(t-t')]^{3/2}} \frac{a}{\lambda} \times \int_0^{\infty} \exp\left\{ -\frac{(x+x')^2 + (y-y')^2 + [z-z' + v(t-t')]^2}{4a(t-t')} - \frac{a}{\lambda} x' \right\} dx' \right) \quad (22)$$

В отличие от известного решения, где конечное количество тепла Q , мгновенно выделяющегося в бесконечно малом объеме, создает в начальный момент бесконечно большую температуру, последнее приведенное выражение описывает процесс выравнивания температуры от бесконечно малого количества тепла. Учитывая, что по принятой схеме источник является бесконечно протяженным по оси y , интегрирование по y' должно быть выполнено в пределах от $-\infty$ до $+\infty$.

Ширина полосы определит пределы интегрирования по z' , которые равны соответственно $-h$ и $+h$. В общем случае действия источника в течение некоторого времени t интегрирование по t' должно быть выполнено в пределах от 0 до t . С учетом того, что при шлифовании температурное поле в течение долей секунды становится стационарным, верхним пределом по t' надо считать ∞ . Таким образом, решение задачи можно записать в следующем виде:

$$T(x, z) = \int_{-h}^h dz' \int_{-\infty}^{\infty} dy' \int_0^{\infty} \frac{2q dt'}{c\gamma [4\pi a(t-t')]^{3/2}} \times \left(\exp\left\{ -\frac{x^2 + (y-y')^2 + [z-z' + v(t-t')]^2}{4a(t-t')} \right\} - \frac{a}{\lambda} \int_0^{\infty} \exp\left\{ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + [z-z' + v(t-t')]^2}{4a(t-t')} - \frac{a}{\lambda} x' \right\} dx' \right) \quad (23)$$

Преобразовав это выражение и выполнив интегрирование по времени и координате y' , запишем результат че-

рез модифицированную функцию Бесселя второго рода нулевого порядка

$$T = \frac{q}{\pi\lambda} \int_{-h}^h \exp\left[-\frac{v(z-z')}{2a}\right] K_0\left[\frac{v}{2a}\sqrt{x^2+(z-z')^2}\right] dz' - \frac{\alpha}{\lambda} \frac{q}{\pi\lambda} \int_{-h}^h \exp\left[-\frac{v(z-z')}{2a} + \frac{\alpha}{\lambda}x\right] \times \int_x^\infty \exp\left(-\frac{\alpha}{\lambda}x\right) K_0\left[\frac{v}{2a}\sqrt{x^2+(z-z')^2}\right] dx dz'. \quad (24)$$

Для анализа и практического использования полученного выражения целесообразно представить его в виде функции от безразмерных критериев.

Обозначим безразмерные комплексы типа критерия Пекле следующим образом:

$$\frac{v(z-z')}{2a} = \xi; \quad \frac{vz}{2a} = Z; \quad \frac{vx}{2a} = X; \quad \frac{vh}{2a} = H. \quad (25)$$

Подставив эти обозначения в выражение (24), получим

$$T(X, Z) = \frac{2qa}{\pi\lambda v} \int_{z-H}^{z+H} \exp(-\xi) K_0\sqrt{X^2 + \xi^2} \times \left[1 - \frac{2\alpha a}{\lambda v} \exp\left(\frac{2\alpha a}{\lambda v} X\right) \frac{\int_x^\infty \exp\left(-\frac{2\alpha a}{\lambda v} X\right) K_0\sqrt{X^2 + \xi^2} dX}{K_0\sqrt{X^2 + \xi^2}} \right] d\xi.$$

Для практического использования полученного решения необходимо дополнительно преобразовать его так, чтобы оно отвечало наложенным на переменные граничным условиям. Выполнив такие преобразования, получим решение задачи, удовлетворяющее условию теплообмена под источником

$$Q = \frac{1}{1 - \frac{\beta}{2H\pi} \int_{-H}^H Q(Z) dZ} \left[\int_{z-H}^{z+H} \exp(-\xi) K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2}) d\xi - \beta \int_{z-H}^{z+H} \exp(\beta X - \xi) \int_x^\infty \exp(-\beta X) K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2}) dX d\xi \right]$$

где β – безразмерный комплекс, характеризующий интенсивность теплообмена.

$$\beta = (2\alpha a)/(\lambda v).$$

Численные оценки характера проникновения «опасных» изотерм в глубь продукта связаны с результатами решения прочностной задачи и могут быть получены после экспериментального подтверждения моделей.

Основной целью проводимых исследований является решение проблемы создания научных основ рационального использования ресурсов при первичной обработке пищевого сырья. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- на базе системного анализа уточнить структуру системы создания абразивного оборудования и сформулировать

последовательность проблем исследования;

- методами механики твердого тела изучить процесс контакта пищевого сырья с абразивными рабочими органами;

- методами теплофизики с использованием решений, полученных при анализе условий механического контакта, рассмотреть процесс формирования температурных полей в зоне обработки пищевого сырья;

- рекомендации, полученные при решении прочностной и тепловой задач, реализовать в виде взаимоувязанного парка ресурсосберегающего оборудования;

- разработать методику оптимизации системы создания оборудования абразивного воздействия для обработки пищевого сырья с учетом ресурсосбережения.

В рамках решения прочностной задачи предполагается проведение исследования для различных видов пищевого сырья с использованием разных видов абразивных покрытий по выявлению закономерностей влияния формы единичного зерна и его физико-механических характеристик на площадь контакта рабочего органа и обрабатываемого пищевого сырья.

С этой целью предполагается исследование профилограмм поверхностей обработанного пищевого сырья по известным методикам для определения параметров опорной поверхности b, v и уточнения функции $F(x)$.

На основании решения прочностной задачи предполагается с помощью разработанной тепловой модели процесса контакта рабочего органа и пищевого сырья провести численный эксперимент для уточнения влияния ограниченности пятна контакта на полученные аналитические решения. Скорректированные решения предполагается проверить экспериментально при абразивной обработке модельного пищевого сырья, например рыбы.

Полученный характер распределения «опасных» изотерм предполагается использовать для уточнения режимов работы оборудования для первичной обработки пищевого сырья, после чего на основании доработанной целевой функции провести оценку эффективности работы оборудования с точки зрения рационального использования ресурсов (трудовых, энергетических и сырьевых).

Таким образом, для решения поставленной проблемы необходимо решить следующие задачи:

- подготовить базу данных для модельного вида пищевого сырья и методики их обработки;

- исследовать разные виды пищевого сырья с получением профилограмм и их анализом, обработать полученные данные, откорректировать решения прочностной задачи;

- провести численный эксперимент по выяснению влияния ограниченности пятна контакта на аналитические решения тепловой задачи, откорректировать аналитические решения с лабораторной экспериментальной проверкой;

- осуществить корректировку режимов работы технологического оборудования, оценить эффективность работы оборудования в этих режимах, построить модели ресурсосберегающего оборудования и разработать его принципиальные конструктивные схемы.