

Н.И. Ботошан, М.К. Болога, С.Е. Берзой

## **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В БИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ЭЛЕКТРОПЛАЗМОЛИЗОМ**

*Институт прикладной физики АН РМ,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

### **Введение**

Решающую роль в интенсификации переноса тепла при тепловой обработке биологического сырья играет жидкая фракция. В необработанном состоянии растительное сырье содержит жидкую фракцию, в основном во внутриклеточных вакуолях, закрытую для прямого доступа тепла клеточной мембраной и цитоплазмой, богатой белками. Повышение температуры до значений выше температуры коагуляции белков стабилизирует прямой доступ тепла к внутриклеточной жидкости, однако часть ее остается закрытой в оболочке коагуляции белков цитоплазмы. В таком случае линейное моделирование переноса тепла растительной среды определено составным коэффициентом теплопроводности обоих компонентов сырья, жидкой ( $\lambda_a$ ) и твердой изолирующей ( $\lambda_m$ ) фаз среды. Теплопроводность растительного сырья для стационарного распределения тепла до и после плазмолиза позволяет оценить эффективность интенсификации теплопереноса. Так как коэффициенты теплопроводности жидкой фракции и термоизоляционной клеточной оболочки – практически постоянные величины ( $\lambda_a = 0,58$  Вт/(м·К) и  $\lambda_m = 0,1$  Вт/(м·К)), то коэффициенты теплопроводности сырья оценены до и после обработки при помощи полученных в [1] формул. Доля жидкой фракции сырья принята известной для заданного вида сырья, к примеру для томатной пульпы она составляет  $x = 0,9$ .

Предварительный плазмолиз биологической среды при температурах ниже температуры коагуляции белков уравнивает роль теплопроводящих компонентов в отношении переноса тепла, разрушая термоизоляционную преграду к вакуольной жидкости, что способствует увеличению коэффициента теплопроводности от начального значения  $\lambda_n = 0,4$  Вт/(м·К) до конечного  $\lambda_p = 0,55$  Вт/(м·К). Эффективность интенсификации переноса тепла для томатной массы, подверженной предварительному плазмолизу, выраженная в процентах, равна 27,3.

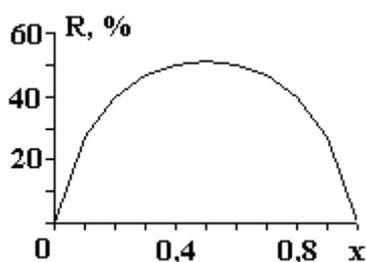


Рис. 1

На рис. 1 представлена диаграмма эффективности интенсификации тепловой обработки в зависимости от доли жидкой фракции в растительном сырье для ассортимента биологических сред, заимствованная из [1]. Максимальный эффект интенсификации ограничен значением жидкой фракции  $x = 0,5$ , с понижением вокруг  $x \neq 0,5$ . Примечательно, что для растительного сырья с содержанием влаги, равным половине полного объема среды, эффект интенсификации максимальный.

### **1. Изменение теплопереноса биологической среды плазмолизом**

Процесс передачи тепла в биологических средах характеризуется нестационарной теплопро-

водностью. В биологической среде вода является основным переносчиком тепла с коэффициентом теплопроводности примерно равным  $\lambda_a$ . Биологическая составляющая тканей обладает коэффициентом теплопроводности, уступающим по величине жидкой фракции и примерно равным  $\lambda_m$ . Если эти компоненты сырья составляли бы однородную смесь, то теплопроводность была бы стационарной характеристикой среды, которая определялась бы условием параллельного соединения тепловых сопротивлений составляющих:

$$\lambda = \lambda_a x + \lambda_m z,$$

где  $x$  и  $z$  – доли компонентов в смеси.

Однако роль воды в биологических средах, кроме химически связанной, в процессе передачи тепла неоднозначна [2]. Например, в растительных средах значительная доля воды находится во внутриклеточных вакуолях, и лишь небольшая ее часть составляет внеклеточную жидкость. Таким образом, вклад жидкой фракции в теплопроводность зависит от состояния клеточного строения биологической среды. Свежие овощи и фрукты во внутриклеточных вакуолях содержат до 90% жидкой фракции. По мере разрушения клеточного строения среды высвобождается внутриклеточная жидкость, увеличивая тем самым долю внеклеточной.

Существуют различные способы обработки биологической среды с целью высвобождения внутриклеточной жидкости – начиная с механического и термического и кончая ультразвуковым плазмолизом. Чаще всего применяется термический способ как наиболее эффективный и энергосберегающий. Но и он обладает существенным недостатком, поскольку не позволяет полностью высвободить внутриклеточную жидкость. В определенном интервале температур белковая составляющая клетки – цитоплазма подвержена коагуляции. При этом образуются замкнутые объемы, в которых часть жидкости внутриклеточных вакуолей остается термически изолированной от внеклеточной жидкости в коагулированной оболочке. Поэтому наиболее эффективным способом полного высвобождения внутриклеточной жидкости растительных сред является электроплазмолиз. Предварительная обработка растительного сырья электрическим импульсным током разрушает клеточное строение среды при температуре ниже температуры коагуляции белков [3].

Предложенная аналитическая модель процесса нестационарного переноса тепла позволяет увязать уровень плазмолиза биологической среды с долей высвобожденной внутриклеточной жидкости. Для этого выделим три основные компоненты биологической среды:  $x$  – доля внеклеточной жидкости,  $y$  – доля внутриклеточной жидкости,  $z$  – доля биологических тканей среды. В таком аспекте биологическая среда состоит из трех выделенных составляющих, удовлетворяющих условию полноты:  $x + y + z = 1$ . Перенос тепла в такой среде осуществляется по двум различным каналам: 1 – через внеклеточную жидкость, 2 – через клеточные ткани и внутриклеточную жидкость. Теплопроводность по второму каналу определяется как в случае последовательного соединения тепловых сопротивлений составляющих:

$$\lambda_k = \frac{\lambda_a \lambda_m (1-x)}{\lambda_m (1-x) + z(\lambda_a - \lambda_m)}.$$

Теплопроводность среды нелинейно зависит от содержания внеклеточной жидкости, доля которой определяется уровнем плазмолиза среды. Фактически теплопроводность среды составляется как сумма тепловых сопротивлений параллельно соединенных каналов 1 и 2.

$$\lambda(x, z) = \lambda_a \frac{\lambda_m (1-x) + z(\lambda_a - \lambda_m)}{\lambda_m (1-x) + z(\lambda_a - \lambda_m)}.$$

Таким образом, свежей растительной среде соответствует  $x = 0$ , которая характеризуется коэффициентом теплопроводности

$$\lambda(0, z) = \frac{\lambda_a \lambda_m}{\lambda_m (1-z) + \lambda_a z}.$$

Эта формула указывает на то, что чем меньше доля сухой составляющей, тем ближе значение теплопроводности среды к теплопроводности воды. Это характерно для двух компонентных смесей и является вполне осмысленным результатом.

Интересен случай полного плазмолиза, когда  $x = 1 - z$ . Как уже отмечалось, полному плазмолизу соответствует гомогенизированная среда, для которой теплопроводность определяется уже известным соотношением для однородной смеси:

$$\lambda(1-z, z) = \lambda_m z + \lambda_a (1-z).$$

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента теплопереноса в биологической среде от уровня внеклеточной высвобожденной жидкости  $x$ . Изменение теплопроводности наиболее существенно для биологических сред с большим содержанием сухих веществ. Малое содержание биологических тканей указывает на необходимость разрушения малого их объема, что, естественно, позволяет незначительно интенсифицировать теплоперенос. Основным результатом предварительного плазмолиза является сближение теплопереноса биологической среды с теплопереносом в жидкости. Поэтому в конце плазмолиза различные виды биологического сырья по содержанию уровня биологических тканей имеют почти одинаковый по величине коэффициент теплопереноса. На приведенных графиках принято  $\lambda_m = 0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Доли сухих веществ указаны для каждой кривой в отдельности.

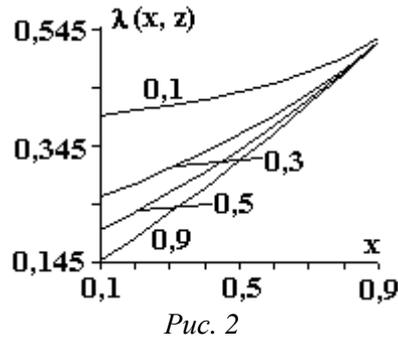


Рис. 2

## 2. Скорость и эффективность интенсификации теплопереноса электроплазмолизом

Скорость изменения теплопереноса в биологической среде зависит от величины  $z$ , характеризующей содержание биологических тканей в клеточном строении среды (см. рис. 2). Эта характеристика позволяет оценить энергетические затраты на предварительную обработку биологического сырья для интенсификации теплопереноса. Скорости изменения теплопереноса среды плазмолизом можно определить, вычисляя производную от теплопроводности  $\lambda(x, z)$  по содержанию высвобожденной влаги  $x$ .

$$k(x, z) = \lambda_a \frac{z^2 (\lambda_a - \lambda_m)^2}{[\lambda_m (1-x) + z(\lambda_a - \lambda_m)]^2}.$$

Любопытно, что в начале предварительного плазмолиза скорость изменения теплопереноса  $k(0, z)$  зависит от содержания биологических тканей в среде, а в конце обработки она перестает зависеть от него:  $k(1-z, z) = (\lambda_a - \lambda_m)^2 / \lambda_a$ . Важно то обстоятельство, что скорость изменения коэффициента теплопереноса зависит от квадрата разности  $\lambda_a - \lambda_m$ , определяющего целесообразность предварительного плазмолиза для улучшения теплопереноса биологической среды.

Другой значимой характеристикой предварительного плазмолиза биологической среды является эффективность обработки. Естественно, эффективность предварительного плазмолиза зависит от уровня содержания внутриклеточной жидкости в среде перед обработкой. Это обстоятельство накладывает определенные ограничения на уровень содержания биологических тканей – клеточных мембран и протоплазмы. Относительное изменение теплопереноса биологической среды в результате плазмолиза характеризуется отношением разности  $\lambda(1-z, z) - \lambda(0, z)$  к теплопроводности среды в конце полного плазмолиза  $\lambda(1-z, z)$ . Эта характеристика, выраженная в процентах, аналогична случаю стационарной модели [1] и определяет эффективность предварительного плазмолиза при изменении теплопереноса биологической среды:

$$R = \frac{(\lambda_a - \lambda_m)^2 z(1-z)}{(\lambda_a - \lambda_m)^2 z(1-z) + \lambda_a \lambda_m} 100\%.$$

Эффективность плазмолиза как функция содержания сухих веществ биологической среды представлена на рис. 3.

Куполообразная кривая указывает на то, что максимальная эффективность предварительного плазмолиза среды с целью интенсификации теплопереноса присуща биологическим средам с содержанием биологической массы сухих веществ, равным полному содержанию жидкой фракции. Поэтому эффективность интенсификации теплопереноса в производстве томатной пасты не может превышать 30% и определяется первоначальным отношением содержания влаги в сырье.

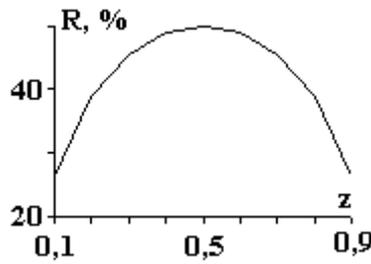


Рис. 3

### Оптимизация процесса выпаривания жидкой компоненты из биологической среды

В большинстве случаев термическая обработка биологического сырья используется для удаления части жидкой фракции среды в технологических процессах концентрации и сушки, характерных не только для пищевой промышленности. Разработаны специальные установки, проектирование которых учитывает как термические характеристики сырья, так и параметры режимов обработки. Это особенно важно в случае, когда термическая обработка может пройти с потерей качества конечного продукта. Поэтому интенсификация теплообмена всегда сталкивается с ограничениями режимов обработки и конструктивных параметров установок. Вопрос заключается в том, чем определяется область ограничений для получения высококачественного конечного продукта при максимальной интенсификации процесса термообработки. Кроме того, оптимизация процесса предполагает сведение тепловых потерь к минимуму значения. Эта задача не простая, если учесть сложности при решении уравнения теплопроводности Фурье [4]. Данное уравнение выведено при неявном предположении, что скорость распространения теплоты бесконечно большая. Поэтому для процессов умеренной интенсивности, чаще встречающихся на практике, возможность такого допущения подтверждается расчетами и опытными данными.

Исследование нестационарных процессов высокой интенсивности передачи тепла требует учета конечной скорости распространения теплоты. Впервые это обстоятельство отмечено авторами [5, 6] независимо друг от друга. Была введена гипотеза о конечной скорости распространения теплоты  $v_r = \sqrt{a/\tau_r}$ , где  $a$  – коэффициент температуропроводности среды;  $\tau_r$  – время релаксации теплового напряжения, которое определяется условием установления квазистационарного режима теплопереноса.

Рассмотрим задачу теплопроводности однородной биологической среды, заключенной в объеме простейшей геометрической формы при наличии внутренних стоков теплоты на испарение части влаги. К контактной поверхности нагрева, определяемый ее геометрической формой, подводится тепловой поток, поддерживающий температуру поверхности  $T_0$  постоянной. Будем считать, что температурное поле нагрева изменяется только вдоль одной пространственной координаты в квазистационарном режиме  $\tau_\lambda \gg \tau_r$ , где  $\tau_\lambda$  – время изменения теплопроводности среды. Этому условию удовлетворяют три одномерные задачи теплопроводности.

Одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{v}{x} \frac{dT}{dx} + \frac{q_v(x)}{\lambda} = 0, x_1 \leq x \leq x_2,$$

где  $v$  – коэффициент формы объема среды:  $v = 0$  – параллелепипед,  $v = 1$  – цилиндр,  $v = 2$  – сфера.

Объемная плотность теплового потока при испарении  $q_v(x)$  определяется как количество теплоты, потраченное на испарение влаги в объеме  $V$  за единицу времени  $q_v(x) = dQ_{\text{нап}}/Vd\tau$ , где  $Q_{\text{нап}} = qm$  – теплота парообразования,  $m$  – масса выпаренной влаги,  $q$  – удельная теплота парообразования. Однако доля жидкой фракции в среде определена отношением объема жидкости (воды) к полному объему среды:  $y = V_a/V$ . Поэтому  $q_v = -q\rho a$ , где  $\rho$  – плотность жидкости,  $a = -\frac{dy}{d\tau}$  – скорость изменения доли жидкости в среде при испарении. Здесь рассматривается случай линейной зависимости доли жидкости в среде  $y = y_0 - a\tau$ , учитывающий убыль жидкости в среде при испарении.

В случае прямоугольной плоской поверхности нагрева общие решения для температурного поля и потока тепла имеют вид

$$T(x) = \frac{qpa}{2\lambda}x^2 + C_1x + C_2,$$

$$\Phi(x) = -\lambda\left(\frac{qpa}{\lambda}x + C_1\right).$$

Рассмотрим краевую задачу нагрева с одной поверхности  $x = 0$  при граничном условии первого рода  $T(0) = T_0$ . Затем выполним оптимизацию процесса испарения влаги следующими граничными требованиями: при  $x = d$ ,  $T(d) = T_c$ ,  $\Phi(d) = 0$ , где  $T_c$  – температура кипения жидкой фракции. Здесь применена методика оптимизации процесса испарения жидкости при помощи условия, обеспечивающего на дальней границе области нагрева температуру жидкости, равную температуре кипения с нулевым значением потока излучения. Эти условия минимизируют потери тепла на излучение в окружающем пространстве с открытой поверхности  $\Phi(d) = 0$ , поддерживая необходимый для эффективного парообразования температурный режим  $T(d) = T_c$ .

Температурное поле и тепловой поток принимают следующий вид:

$$T(x) = T_0 - \frac{2x}{d}(T_0 - T_c) + \frac{qpa}{2\lambda}x^2,$$

$$\Phi(x) = \frac{2\lambda}{d}(T_0 - T_c) - qpax.$$

Условие  $\Phi(d) = 0$  позволяет увязать скорость выпаривания в оптимальном режиме с характеристиками среды и температурами нагрева  $T_0$  и кипения  $T_c$ :

$$a_I = \frac{2\lambda(T_0 - T_c)}{qpd^2}.$$

Для обеспечения хорошей скорости выпаривания жидкости из биологической среды необходимо увязать градиент температур  $(T_0 - T_c)/d$  с расстоянием между поверхностями нагрева и излучения тепла  $d$ . Кроме того, полученное соотношение для скорости нагрева позволяет регулировать процесс нагрева путем переопределения произведения  $\lambda(T_0 - T_c)$  по мере изменения коэффициента теплопроводности среды.

Продолжим оптимизацию процесса выпаривания путем модификации конструктивных особенностей тепловой установки. Предположим, что нагрев среды осуществляется с двух сторон при температуре нагрева  $T_0$ , то есть  $T(0) = T_0$  и  $T(d) = T_0$ .

В этом случае температурное поле и тепловой поток принимают вид

$$T(x) = T_0 - \frac{qpdax}{2\lambda}x\left(1 - \frac{x}{d}\right),$$

$$\Phi(x) = \frac{qpa}{2}d\left(1 - \frac{2x}{d}\right).$$

Из выражения для потока видно, что он равен нулю при  $x = d/2$ , то есть посередине интервала  $(0, d)$ . Потребуем, чтобы на этой изотермической поверхности температура соответствовала температуре кипения жидкости  $T(d/2) = T_c$ .

Скорость испарения в случае нагрева с двух поверхностей зависит от характеристик среды, параметров режима и установки следующим образом:

$$a_{II} = \frac{8\lambda(T_0 - T_c)}{qpd^2}.$$

Видно, что скорость испарения возрастает в 4 раза, что является принципиальным для интенсификации процесса выпаривания. Характерно то, что испарение при этих условиях будет проходить в оптимальном режиме  $T(d/2) = T_c$  и  $\Phi(d/2) = 0$ . В этом случае потоки тепла от различных поверхностей нагрева симметричны относительно изотермической поверхности при температуре кипения. Например, на поверхностях нагрева тепловые потоки равны  $qpad/2$  и направлены в противоположные стороны. Заметим, что тепловое напряжение на поверхности нагрева, обеспечивающее оптимальный режим испарения, спадает в два раза по сравнению с нагревом с одной поверхности. Здесь не будем останавливаться на решениях одномерных задач для случаев цилиндрической и сферической поверхностей нагрева. Однако отметим, что совершенствование установок, основанных на плоских поверхностях нагрева, предполагает максимально возможное уменьшение разности темпера-

тур ( $T_0 - T_c$ ) с целью улучшение качества готового продукта. Это возможно в случае применения многосекционного нагревателя с узким интервалом между поверхностями нагрева.

### Интенсификация и длительность процесса выпаривания влаги из биологической среды

Выпаривание влаги из биологической среды применяется в пищевой промышленности при получении концентрированных соков и паст из овощей и фруктов, а также в целях удаления влаги из различных растворов и смесей. Для получения высококачественного конечного продукта необходимо предостеречь биологическую среду от перегрева с образованием пригара на поверхностях нагревателя. Уязвимым моментом термообработки биологической среды является достижение предела концентрации сухого вещества в продукте, когда уровень содержания влаги очень низкий.

Исходя из определения скорости выпаривания  $a = -dy/d\tau$  можно вычислить длительность процесса термообработки для получения необходимой концентрации сухого вещества  $z$  в конечном продукте:

$$\tau_{обп} = \frac{q\rho d^2}{k(T_0 - T_c)} \int_{z_0}^z \frac{dz}{\lambda(z)},$$

где  $k = 2$  или  $k = 8$  в зависимости от способа нагрева – с одной или с двух поверхностей;  $z_0$  и  $z$  – начальная и конечная доли содержания сухих веществ. В определение времени обработки для выпаривания влаги входит интеграл, содержащий функцию теплопроводности, которую следует заменить на  $\lambda(0, z)$  для необработанного или на  $\lambda(1 - z, z)$  для обработанного плазмолизом биологического сырья.

Таким образом, время термической обработки не подверженного плазмолизу биологического сырья определяется соотношением

$$\tau_{обп}^n = \frac{q\rho d^2 (z - z_0)}{k(T_0 - T_c)} \left[ 1 + \frac{(\lambda_a - \lambda_m)(z + z_0)}{2\lambda_m} \right].$$

Для предварительно обработанного плазмолизом биологического сырья время термической обработки при выпаривании влаги

$$\tau_{обп}^p = \frac{q\rho d^2}{k(T_0 - T_c)(\lambda_a - \lambda_m)} \ln \frac{\lambda_a - z_0(\lambda_a - \lambda_m)}{\lambda_a - z(\lambda_a - \lambda_m)}.$$

Интенсификацию процесса выпаривания электроплазмолизом можно оценить отношением времен обработки, определяя степень интенсификации выпаривания предварительным плазмолизом соотношением

$$I = \frac{\tau_{обп}^n}{\tau_{обп}^p}.$$

Заметим, что при прочих равных условиях эксплуатации установки для выпаривания влаги (режима нагрева и параметров установки) эффект интенсификации выпаривания влаги предварительным плазмолизом среды определяется соотношением:

$$I = \frac{\lambda_a - \lambda_m}{\lambda_m} (z - z_0) \frac{1 + \frac{\lambda_a - \lambda_m}{2\lambda_m} (z + z_0)}{\ln(\lambda_a - z_0(\lambda_a - \lambda_m)) - \ln(\lambda_a - z(\lambda_a - \lambda_m))}.$$

Зависимости интенсификации выпаривания томатной пасты с начальным содержанием сухих веществ  $z_0 = 0,01$  и  $z_0 = 0,09$  представлены на рис. 4: эффект интенсификации выпаривания зависит от доли содержания сухих веществ в начале термообработки незначительно. Поэтому на рисунке представлены только две крайние кривые:  $z_0 = 0,01$  и  $z_0 = 0,09$ .

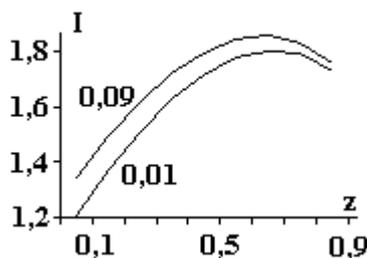


Рис. 4

Динамика процесса для других  $z_0$  приведена в таблице значений степени интенсификации.

$z$	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09
0,1	1,21	1,24	1,28	1,31	1,34
0,2	1,37	1,40	1,43	1,46	1,49
0,3	1,51	1,54	1,57	1,59	1,62
0,4	1,63	1,65	1,68	1,70	1,72
0,5	1,72	1,74	1,76	1,78	1,80
0,6	1,78	1,80	1,81	1,83	1,84
0,7	1,80	1,82	1,83	1,85	1,86
0,8	1,79	1,80	1,81	1,82	1,83
0,9	1,73	1,74	1,75	1,76	1,76

Эффект интенсификации выпаривания до заданной концентрации сухих веществ увеличивается с ростом начального значения  $z_0$ .

Оценки длительности процесса выпаривания при выработке томатной пасты с концентрацией 30% из сырья с начальным содержанием сухих веществ 10% проведены с помощью полученных выражений для времени обработки при следующих параметрах:

$$q = 538,9 \text{ ккал/кг}, \rho = 1000 \text{ кг/м}^3, k = 8,$$

$$\lambda_a = 0,5 \text{ ккал/(м} \cdot \text{К} \cdot \text{ч)}, \lambda_m = 0,1 \text{ ккал/(м} \cdot \text{К} \cdot \text{ч)}, z = 0,3, z_0 = 0,1.$$

Длительность процесса выпаривания для необработанного и обработанного плазмолизом сырья определяется выражениями

$$\tau_{обп}^n = 48,50 \cdot 10^3 \frac{d^2}{T_0 - T_c}, \quad \tau_{обп}^p = 32,18 \cdot 10^3 \frac{d^2}{T_0 - T_c}.$$

Технической характеристикой процесса выпаривания является величина  $\gamma$ , равная отношению расстояния  $d$  к градиенту температуры  $(T_0 - T_c)/d$ . Для уменьшения длительности выпаривания необходимо минимизировать отношение  $\gamma = d^2/(T_0 - T_c)$ . Заметим, что чрезмерное увеличение разности температур невозможно из-за подгорания продукта на поверхностях нагрева, а чрезмерное уменьшение расстояния между ними уменьшает скорость течения вязкого продукта и способствует его прилипанию к стенкам нагревателя. Поэтому конструктивные характеристики выпарных установок должны предусмотреть эти особенности нагреваемого объема сырья. В случае нагрева с двух плоских поверхностей лучше применить многосекционные нагреватели со сравнительно небольшим расстоянием между поверхностями нагрева при умеренном градиенте температур. Представляют интерес и конструктивные особенности выпарных установок с цилиндрическими или сферическими поверхностями нагрева, принцип оптимизации работы которых заслуживает самостоятельного рассмотрения.

#### Выводы

Проведенный анализ коэффициента теплопроводности подтверждает целесообразность применения предварительного плазмолиза для эффективной интенсификации теплопереноса в биологической среде.

Интенсификация термообработки биологической среды при выпаривании влаги основывается на изменении коэффициента теплопроводности. В биологической среде жидкая фракция содержится в клеточном и межклеточном объемах, поэтому доступ теплового потока к ней неоднозначен и зависит от места локализации. Преодоление термоизоляционного барьера тепловым потоком к части внутриклеточной жидкости, а также замкнутость внутриклеточного объема требуют дополнительных затрат тепловой энергии и повышения градиента температуры.

Принят принцип оптимизации путем поддержания фиксированной температуры и нулевого потока тепла на самой отдаленной изотермической поверхности от поверхностей нагрева. Используемая методика исследований процесса выпаривания позволяет увязать основные характеристики - степени интенсификации и продолжительности термической обработки для достижения заданного процента содержания сухих веществ с тепловыми характеристиками среды, режимом нагрева и параметрами установки. Результаты представляют основу для улучшения конструктивных параметров выпарных установок и являются методической основой новых исследований.

Производственные оценки характеристик интенсификации теплопереноса подтверждаются результатами аналитической модели. Модельные характеристики позволяют прогнозировать как эффективность предварительного плазмолиза для интенсификации теплопереноса, так и энергетические затраты на предварительную обработку сырья.

Результаты основываются на решении квазистационарного уравнения теплопроводности. Критерием обоснованности приближения служит различие времен изменения тепловых характеристик и распространения теплоты, а также адекватность полученных результатов с данными опытов. Применительно к процессу выпаривания при производстве томатной пасты точность расчетов отличается от экспериментальных данных не более чем на 5%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Болога М.К., Ботошан Н.И., Берзой С.Е.* Интенсификация переноса тепла электроплазмолитом. Промышленная теплотехника. 2003. Т. 25. № 4. С. 290–292.
2. *Нобел П.* Физиология растительной клетки. М., 1973.
3. *Берзой С.Е., Ботошан Н.И., Болога М.К.* Электроплазмолит – состояние развития и некоторые перспективы // Электронная обработка материалов. 2000. № 5. С. 126–132.
4. *Беляев Н.М., Рядно А.А.* Методы теории теплопроводности. М., 1982.
5. *Vernotte P.* Le depouillement des mesures sans hypothese prealable. Comptes. Redus Hebdomadaires des seances de l'Academie de sciences. Paris. 1958. 246. N 3. P. 339–401.
6. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М., 1967.

*Поступила 17.06.04*

## Summary

Technique of heat transfer optimization for electroplasmolysed biological raw materials have been developed on the basis of results of simulation of the coefficient of heat conduction. Criteria of optimization are conditions of minimum heat consumption at effective simulated by electroplasmolysis coefficient of heat conduction. Conditions, at which for selected one-dimensional Fourier problem, designing characteristics of installation for moisture vaporization promote further heat transfer enhancing, are considered.

---