7.18

ETUDE DU CHAMP THERMIQUE DU COAGULATEUR À COUCHES MINCES DE LA VIANDE

A.M.BRAJNIKOV, V.A.KARPITCHÈV, B.P.FILIPENKO, N.S.NIKOLAÈV.

Institut technologique de l'industrie de la viande et du lait de Moscou, URSS .

Pour le traitement thermique de haute intensité il est utile d'effectuer le chauffage de la couche mince du produit s'écoulant le long du paroi vertical par le contact direct du produit avec la vapeur. De tels appareils ayant le type indiqué de l'échange thermique de l'échange thermique prennent une grande extension dans l'industrie bouchère. Notamment ce principe est réalisé dans les appareils pour la production des produits de la viande pour l'alimentation infantile, les problèmes de l'échange thermique dans la chouche mince du produit et les problèmes hydrodynamiques étant résolus. L'examen du problème hydrodynamique permet d'évaluer le champ des vitesses dans la chouche mince du produit et de trouver la solution du problème convectif de l'échange thermique.

К РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ТОНКО-СЛОЙНОГО КОАГУЛЯТОРА МЯСНОГО СЫРЬЯ

А.М.БРАЖНИКОВ,В.А.КАРПЫЧЕВ,Б.П.ФИЛИПЕНКО,Н.С.НИКОЛАЕВ

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

С целью организации высокоинтенсивной тепловой обработки целесообразным оказывается осуществлять нагрев стекающей по вертикальной стенке пленки продукта путем прямого контакта этого продукта с острым паром.

Аппараты,реализующие указанный тип теплообмена постепенно получают широкое распространение в мясной промышленности.В частности,указанный принцип реализуется в аппаратах для производства мясных продуктов детского питания.

В докладе предлагается приближенное аналитическое решение задачи теплообмена в тонкой пленке.

В полном объеме задача состоит из гидродинамической задачи и задачи теплообмена,точное решение которых представляет существенные трудности.

Рассмотрение гидродинамической задачи позволяет оценить поле скоростей в стекающей пленке, а затем найти решение конвективной задачи теплообмена.

К РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ТОНКОСЛОЙНОГО КОАГУЛЯТОРА МЯСНОГО СЫРЬЯ

А.М.БРАЖНИКОВ, В.А.КАРПЫЧЕВ, Б.П.ФИЛИПЕНКО, Н.С.НИКОЛАЕВ

Московский технологический институт мясной и молочной промышленности, Москва, СССР

Для производства фаршевых продуктов из мяса (в частности фаршевых продуктов детского питания) оказывается целесообразным его нагрев в виде стекающей по вертикальной стенке пленки путем прямого контакта с острым паром.

Такой теплообмен обладает рядом технологических достоинств, а именно: а) осуществляется быстрый прогрев массы продукта; б) отсутствуют места с повышенной температурой, что позволяет избежать пригорания продукта; в) высокий коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара делает аппараты, сконструированные по принципу теплообмена в тонкой пленке компактными и энергетически выгодными.

Ниже предлагается приближенное аналитическое решение задачи теплообмена.

В полном объеме проблема состоит из гидродинамической задачи и задачи теплообмена, точное решение которых представляет значительные трудности.

I. Гидродинамическая задача.

Пусть μ и ρ -коэффициент вязкости и плотность жидкости, h -толщина пленки. Уравнения гидродинамики:

а) уравнения движения

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} &= g - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \end{aligned}\right\} \qquad (I.1)$$

б) уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad (I.2)$$

Здесь $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ -кинематический (стоксов) коэффициент вязкости, u, v -компоненты скорости жидкости по осям x и y соответственно, p -давление, t -время, x, y -текущие координаты жидкой частицы.

В качестве упрощающих предположений берем следующие: 1) во всей области течения $p = const$; 2) $v = 0$. Тогда из системы (I.1)-(I.2) получим

$$\frac{\partial u}{\partial t} = g + \nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \qquad (I.3)$$

-уравнение типа "уравнения теплопроводности с источниками тепла".

Граничными условиями для уравнения (I.3) будут следующие физические очевидные условия:

$$u(0,t) = 0 \qquad (I.4)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=h} = 0 \qquad (I.5)$$

Будем считать также, что движение пленки начинается из состояния покоя, т.е. положим, что

$$u(y,0) = 0 \qquad (I.6)$$

При решении задачи (I.3)-(I.6) воспользуемся интегральным методом /2/, для чего проинтегрируем уравнение (I.3) по y в пределах от 0 до h ; найдем

$$\frac{d}{dt}\int_0^h u(y,t)\,dy = gh - \nu\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0} \qquad (I.7)$$

-интегральное соотношение гидродинамической задачи. Тогда решение этой задачи будем искать в виде:

$$u(y,t) = F(t)y^2 + K(t)y + G(t) \qquad (I.8)$$

где F , K и G -функции времени, подлежащие определению из начальных и граничных условий и условия осреднения (I.7).

После очевидных преобразований получим:

$$u(y,t)=\frac{g}{2\nu}\left(1-e^{-\frac{3\nu}{h^2}t}\right)(2hy-y^2)$$ (I.9)

Отметим попутно, что $0 < u(y,t) < \frac{gh^2}{2\nu}$

Функция $u(y,t)$ меняется в зависимости от времени монотонно. Мы рассматриваем ползущее движение пленки, когда число Рейнольдса $Re<25$ и, следовательно, никакого волнообразования не происходит /3/.

С целью упрощения дальнейших расчетов мы введем в рассмотрение среднее по толщине пленки значение скорости

$$f(t)=\frac{1}{h}\int_0^h u(y,t)\,dy=\frac{2gh^2}{3\nu}\left(1-e^{-\frac{3\nu}{h^2}t}\right)$$ (I.I0)

2. Рассмотрим теперь задачу теплообмена.

Выведем уравнение передачи тепла для нашего случая, аналогично тому, как это сделано в монографии /4/.

Выделим из кольцевого слоя элемент длины dx и ширины ℓ и рассмотрим тепловой баланс с учетом конвекции. Тогда уравнение теплопередачи может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}+f(t)\frac{\partial\theta}{\partial x}=\frac{K}{c\rho}\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}-\frac{H_1}{hc\rho}(\theta-\theta_1)-\frac{H_2}{hc\rho}(\theta-\theta_2)$$ (2.I)

где: θ – температура пленки; θ_1 – температура острого пара; θ_2 – температура стенки; H_1 и H_2 – коэффициенты внешней теплопроводности от пара к пленке и от пленки к стенке соответственно; H_1 – принят постоянным вследствие того, что теплоотдача происходит за счет конденсации; h – толщина пленки; c, ρ – удельная теплоемкость и плотность жидкости;

$$H_1=\frac{\alpha_1}{K}; \qquad H_2=\frac{\alpha_2}{K}$$

α_1 и α_2 – коэффициент теплоотдачи; K – коэффициент теплопроводности жидкости.

Введем в рассмотрение следующие обозначения

$$a^2=\frac{K}{c\rho}; \quad b^2=\frac{H_1+H_2}{hc\rho}, \quad m^2=\frac{H_1\theta_1+H_2\theta_2}{hc\rho}$$ (2.2)

Тогда уравнению (2.I) можно будет придать вид:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}+f(t)\frac{\partial\theta}{\partial x}=a^2\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}-b^2\theta+m^2$$ (2.3)

Наряду с неподвижной системой координат ox введем в рассмотрение подвижную систему $\Omega\xi_2$, причем

$$\frac{\xi_*}{L}=\xi=\frac{x-\int_0 f(\tau)\,d\tau}{L} \qquad (L\neq 0)$$ (2.4)

где L – первоначальная длина пленки (при $t=0$). Пока длина пленки меньше L температура ее поверхности существенно отличается от температуры пара.

Отметим физически очевидные условия $\xi(0;0)=0$; $\xi(L;0)=1$ (2.5)

Решение уравнения (2.3) будем искать в виде: $\theta=\theta_1\cdot\varphi(\xi)$ (2.6)

Нетрудно установить, что

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial\theta}{\partial t}=-\theta_1\varphi'(\xi)\cdot\frac{f(t)}{L}\\&\frac{\partial\theta}{\partial x}=\theta_1\varphi'(\xi)\frac{1}{L}; \quad \frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}=\theta_1\varphi''(\xi)\cdot\frac{1}{L^2}\end{aligned}\right\}$$ (2.7)

Тогда для функции $\varphi(\xi)$ мы получим обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\varphi''(\xi)-\frac{b^2L^2}{a^2}\varphi(\xi)=-\frac{m^2L^2}{a^2}\frac{1}{\theta_1}$$ (2.8)

Общее решение уравнения (2.8) имеет простую структуру

$$\varphi(\xi)=Me^{\frac{bL}{a}\xi}+Ne^{-\frac{bL}{a}\xi}+\frac{m^2}{b^2\theta_1}$$ (2.9)

где M и N – произвольные постоянные величины, подлежащие в дальнейшем определению.

Обращаясь к (2.6), устанавливаем:

$$\theta=\theta_1\left(Me^{\frac{bL}{a}\xi}+Ne^{-\frac{bL}{a}\xi}\right)+\frac{m^2}{b^2}$$ (2.I0)

Постоянные M и N мы определим, отправляясь от условий:

$$\theta(0)=\theta_0$$ (2.II)

$$\theta(1)=\theta_1$$ (2.I2)

где θ_0 – температура жидкости до подачи ее на твердую стенку. Тогда получим:

$$M=\frac{\theta_1^{*}-\theta_0 e^{-\frac{bL}{a}}}{e^{\frac{bL}{a}}-e^{-\frac{bL}{a}}}=\frac{\theta_1^{*}-\theta_0^{*}e^{-\frac{bL}{a}}}{2\,sh\frac{b}{a}L}$$ (2.I3)

$$N=\frac{\theta_0'' e^{\frac{bL}{a}}-\theta_1''}{e^{\frac{bL}{a}}-e^{-\frac{bL}{a}}}=\frac{\theta_0'' e^{\frac{bL}{a}}-\theta_1''}{2\,sh\frac{bL}{a}} \qquad (2.14)$$

Таким образом, гемпературное поло пленки может быть рассчитано для любого момента времени $t>0$ по следующей формуле

$$\theta=\frac{\theta_1}{2\,sh\frac{bL}{a}}\left\{\left(\theta_1''-\theta_0'' e^{-\frac{bL}{a}}\right)\cdot e^{\frac{b}{a}\left[x-\int_0^t f(\tau)d\tau\right]}+\left(\theta_0'' e^{\frac{bL}{a}}-\theta_1''\right)\cdot e^{-\frac{b}{a}\left[x-\int_0^t f(\tau)d\tau\right]}\right\}+\frac{m^2}{b^2} \qquad (2.15)$$

Заметим также, что

$$\int_0^t f(\tau)d\tau=\frac{2gh^2}{3\nu}\left[t+\frac{h^2}{3\nu}\left(e^{\frac{-3\nu}{h^2}\cdot t}-1\right)\right] \qquad (2.16)$$

Методом, предложенным ниже задачу о теплообмене можно решить без внесения упрощения по формуле (I.16), что не вносит больших осложнений.

Литература

I. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. ГИТТЛ, Москва, I955 стр. 5I9

2. Бражников А.М., Карпычев В.А., Лыкова А.В. Об одном инженерном методе расчета процессов теплопроводности ИФЖ, № 4. I975.

3. Р.Берд и др. Явления переноса. "Химия" Москва, I974, стр. 687

4. Карслоу Г. Теория теплопроводности. Гостехиздат. М.Л. I947. стр. 228