

УДК 621.184.64

ББК 31.31

О-92

*Схаляхов Анзаур Адамович*, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры технологий, машин и оборудования пищевых производств, декан технологического факультета Майкопского государственного технологического университета, 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191, т.: (8772) 570412;

*Блягоз Хазрет Рамазанович*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий, машин и оборудования пищевых производств, ректор Майкопского государственного технологического университета, 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191, т.: (8772) 570011;

*Кошевой Евгений Пантелеевич*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, т.: (861) 2752279;

*Косачев Вячеслав Степанович*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, т.: (861) 2752279.

## ОПИСАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПОЛОВОЛОКОННЫХ МЕМБРАНАХ ДЛЯ ВНУТРЕННЕЙ СОПРЯЖЕННОЙ ЗАДАЧИ (рецензирована)

Получение в результате численного моделирования обобщенной кинетической зависимости теплообмена позволяет обобщить результаты численного решения сопряженной задачи теплообмена от внутреннего потока в полволоконных мембранах и может быть применена в практических расчетах.

Ключевые слова: полволоконные мембраны, сопряженная задача, теплообмен, моделирование, кинетическая зависимость.

*Skhalyakhov Anzaur Adamovich*, Cand. of Technology, associate professor, professor of the chair of technologies, machines and equipment of food products, dean of technological faculty of Maikop State Technological University, 191, Pervomayskaya St. Maikop, Adigh Republic, zip: 385000, tel.: (8772)570412;

*Blyagoz Khazret Ramazanovich*, Doctor of Technology, professor, professor of the chair of technologies, machines and equipment of food products, dean of technological faculty of Maikop State Technological University, 191, Pervomayskaya St. Maikop, Adigh Republic, zip: 385000, tel.: (8772) 570011;

*Koshevoy Eugeniya Panteleevich*, Doctor of Technology, professor, professor, head of the chair of technologies, machines and equipment of food products, of Kuban State Technological University, 2, Moscovskaya St., Krasnodar, zip: 350072, tel.: (861) 2752279;

*Kosachev Vyacheslav Stepanovich*, Doctor of Technology, professor, professor of the chair of technologies, machines and equipment of food products, of Kuban State Technological University, 2, Moscovskaya St., Krasnodar, zip: 350072, tel.: (861) 2752279.

## DESCRIPTION OF HEAT EXCHANGE IN EMPTY-FIBER MEMBRANES FOR INTERNAL ADJOINT PROBLEM

As a result of computational modeling integrated kinetic dependency of heat-exchange was received. It allows generalizing the results of computation solution of adjoint problem of heat-exchange from internal stream in empty-fiber membranes and can be applied practically.

Keywords: empty-fiber membranes, adjoint problem, heat-exchane, modeling, kinetic dependency.

Получение обобщенной кинетической зависимости теплообмена на основе расчетной схемы [1] выполнялось методом численного моделирования путем варьирования параметров, входящих в конечно-разностные уравнения: конструктивные –  $R_{тр}$ ,  $R_{ст}$ ,  $L_{тр}$ ,  $\lambda_{тр}$ ,  $C_{тр}$ ,  $\rho_{тр}$  (соответственно, радиусы трубы и стенки, длина трубы, теплофизические свойства трубы – теплопроводность, теплоемкость, плотность) и эксплуатационные –  $P_{нач}$ ,  $P_{кон}$ ,  $\lambda_{ж}$ ,  $C_{ж}$ ,  $\rho_{ж}$ ,  $\mu_{ж}$  (соответственно, давления в начале и конце

трубы, теплофизические свойства жидкости - теплопроводность, теплоемкость, плотность и вязкость). Эти параметры полностью определяют поле температур в рассматриваемом численном решении. При этом ряд этих параметров может быть сгруппирован в виде комплексов, характеризующих температуропроводность потока жидкости  $a_{жс} = \lambda_{жс} / (C_{жс} \cdot \rho_{жс})$ , температуропроводность стенки  $a_{мп} = \lambda_{мп} / (C_{мп} \cdot \rho_{мп})$ , а также число Прандтля  $Pr = C_{жс} \cdot \mu_{жс} / \lambda_{жс}$ , учитывающего влияние теплофизических свойств теплоносителя на теплоотдачу потока жидкости к стенке трубы.

Существенно сократить число исследуемых параметров возможно, используя безразмерные критерии подобия, принятые при описании процессов переноса тепла [2] и учитывающие специфику рассматриваемого процесса. В частности использовали безразмерную температуру  $T = \frac{T_{\alpha} - T_{\delta\delta}}{T_{i\alpha\alpha} - T_{\delta\delta}}$ ,

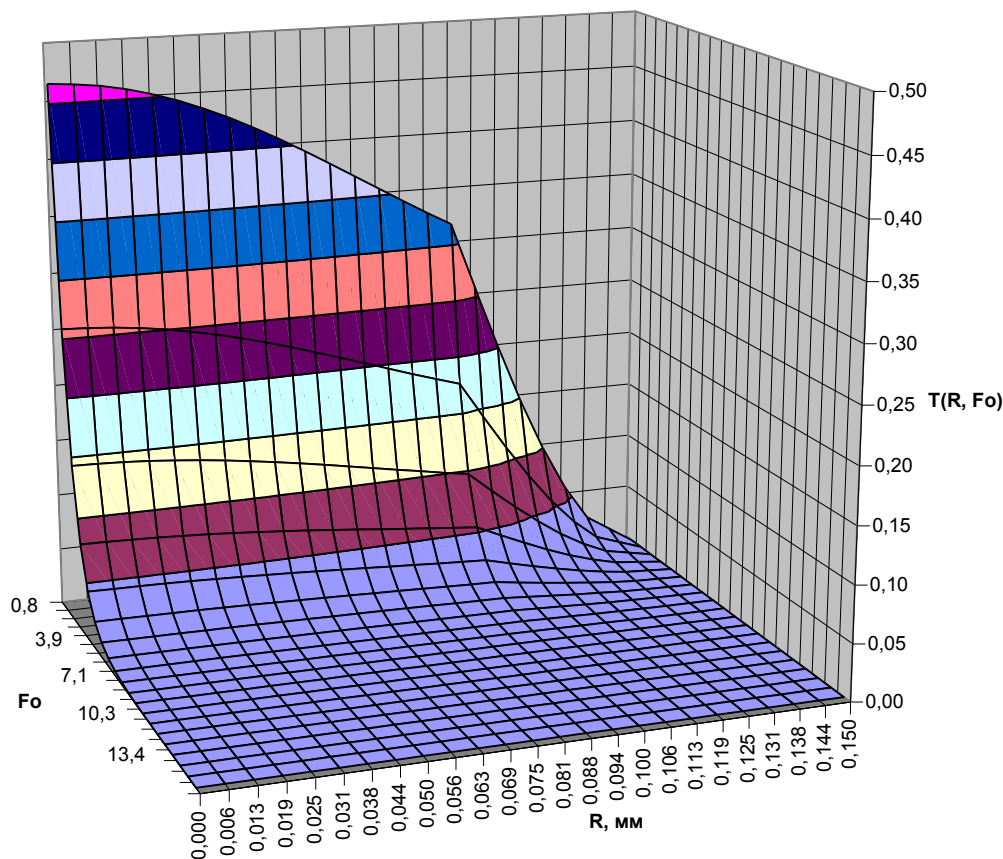
осевое число Рейнольдса потока жидкости  $Re_{\max} = \frac{\left( \frac{P_{нач} - P_{кон}}{4 \cdot \mu_{жс} \cdot L_{мп}} \cdot R_{мп}^2 \right) \cdot 2 \cdot R_{мп}}{\mu_{жс} / \rho_{жс}}$ , число Пекле

$Pe = Pr \cdot Re_{\max} / 2$ , число Фурье  $Fo_{жс} = \frac{8 \cdot a_{жс} \cdot \Delta x \cdot i \cdot \mu_{жс} \cdot L_{мп}}{R_{мп}^4 \cdot (P_{нач} - P_{кон})}$ , где  $\Delta x$  – шаг интегрирования по оси

потока жидкости;  $i$  – номер узла сетки по оси потока жидкости, а также связанное с ним число Грца  $Gz = 4 / Fo_{жс}$ , симплекс температуропроводности  $K_A = a_{жс} / a_{мп}$ , симплекс геометрии

$K_L = \frac{R_{мп}}{\sqrt{(R_{ст}^2 - R_{мп}^2)}}$ , водяной эквивалент потока жидкости  $W_x = \frac{\left( \frac{P_{нач} - P_{кон}}{4 \cdot \mu_{жс} \cdot L_{мп}} \cdot R_{мп}^2 \right) \cdot \pi \cdot R_{мп}^2}{2} \cdot \rho_{жс} \cdot C_{жс}$ .

Фрагмент температурного поля, полученный при моделировании теплообмена для полипропиленовых мембран, представлен на рисунке 1.

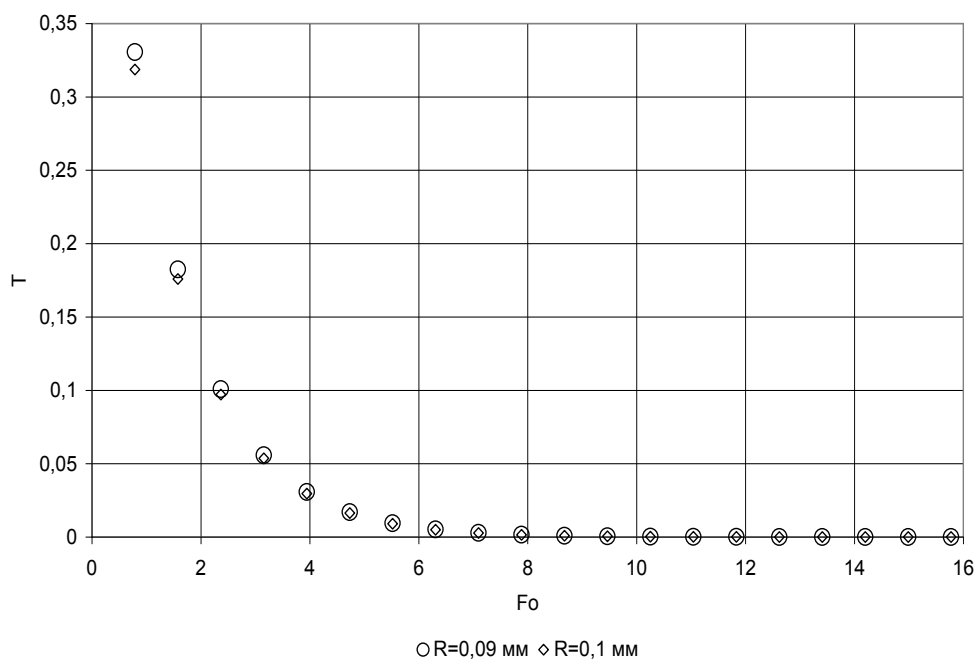


*Рисунок 1. Двумерное температурное поле сопряженной задачи теплообмена в  
половолоконной мембране*

Проведенное численное моделирование процесса теплообмена в половолоконной мембране показало, что интенсивность теплообмена быстро снижается, температурное поле быстро выравнивается по оси потока и разность температур стремится к нулю. Установлено, что интенсивный теплообмен в половолоконных мембранах наблюдается на активном начальном участке ( $L_{var}$ ). Изменение температуры носит нелинейный характер и это показывает, что допущение [3] линейной зависимости изменения температуры на внутренней стенке трубы в условиях конвективного теплообмена является неточным.

Из представленных данных видно, что температурное поле на внутренней стенке имеет излом, характерный для задач сопряженного типа [4], следовательно, расчетная схема достаточно подробно моделирует этот тип процесса теплообмена.

Для оценки этой динамики температурного поля было построено изменение температуры жидкости в пограничном слое ( $R=0.09$  мм) и на внутренней стенке трубы ( $R=0.1$  мм) (рисунок 2).



*Рисунок 2. Изменение относительной температуры жидкости в пограничном слое и на внутренней стенке трубы*

Отмечаем, что температуры жидкости в пограничном слое и на внутренней стенке трубы практически совпадают и эффект сопряженности проявляется на коротких расстояниях. Для определения влияния на эти расстояния интенсивного теплообмена и исходных параметров процесса были проведены расчеты при изменении исходных параметров, связанных с гидродинамикой процесса. Для оценки интенсивности теплообмена использовали кинетические параметры процесса, определяемые уравнением [5], связывающего среднюю избыточную температуру с длиной участка трубы с активным теплообменом:

$$\phi_x = \frac{e^{(N_y - N_x)\xi} - 1}{1 - \frac{N_y}{N_x} e^{(N_y - N_x)\xi}} \tag{1}$$

где  $\xi=L/L_{var}$  - относительная длина активного участка теплообмена, определяемая как отношение текущей длины к общей длине активного участка.

Учитывая, что в представленном выше уравнении два определяемых параметра  $N_y$  и  $N_x$ , а также собственно длина активного участка  $L_{var}$ , что значительно меньше числа узлов сетки по оси потока, можно с достаточной точностью определить эти величины по кривой изменения избыточной температуры по длине трубы.

В этом случае для определения указанных выше параметров минимизировали следующий функционал:

$$Z = \sum_j \left[ (\Theta_j - 1) - \phi_x \left[ N_x, N_y, \left( \frac{\Delta x}{L_{var}} \right) j \right] \right]^2, \quad (2)$$

где  $\Theta$  - средняя избыточная температура.

Типичный вид кривой изменения средней избыточной температуры по длине канала после минимизации функционала представлен на графике (рисунок 3).

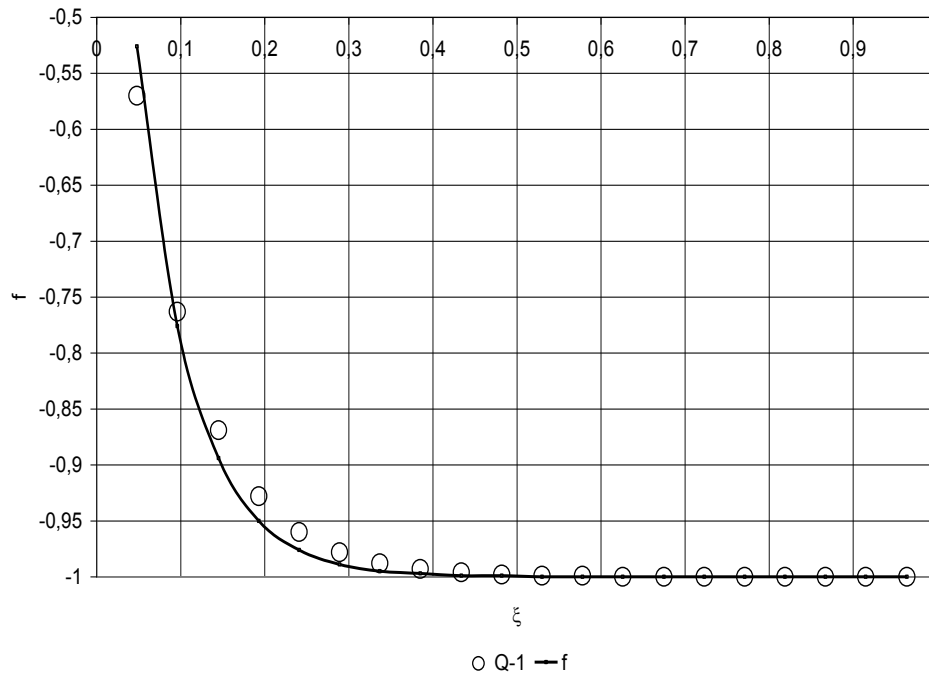


Рисунок 3. Изменение средней избыточной температуры по длине канала после минимизации функционала (2)

Представленный график (рисунок 3) показывает высокую степень согласия результатов численных расчетов и аппроксимации зависимостью (1). Отметим, что полученное значение  $N_y$  близко к нулю. Это соответствует принятым граничным условиям сопряженной задачи [1]. Установленный параметр  $L_{var}$  позволяет рассчитать площадь активного участка теплообмена:

$$F_{var} = 2 \cdot \pi \cdot R_{cm} \cdot L_{var} \quad (3)$$

Установленный в результате минимизации функционала (1) параметр ( $N_x$ ) с учетом водяного эквивалента ( $W_x$ ) позволяет определить кажущийся коэффициент теплоотдачи:

$$K_{mo} = \frac{N_x \cdot W_x}{F_{var}} \quad (4)$$

Коэффициент теплоотдачи использовали в дальнейшем для расчета критерия Нуссельта по соотношению:

$$Nu = \frac{K_{mo} \cdot (2 \cdot R_{cm})}{\lambda_{cp}}$$

5)

где

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{тр} \cdot \left[ \left( \pi \cdot R_{ст}^2 \cdot L_{тр} - \pi \cdot R_{тр}^2 \cdot L_{тр} \right) \cdot \rho_{тр} \right] + \lambda_{ж} \cdot \left[ \left( \pi \cdot R_{тр}^2 \cdot L_{тр} \right) \cdot \rho_{ж} \right]}{\left( \pi \cdot R_{ст}^2 \cdot L_{тр} - \pi \cdot R_{тр}^2 \cdot L_{тр} \right) \cdot \rho_{тр} + \left( \pi \cdot R_{тр}^2 \cdot L_{тр} \right) \cdot \rho_{ж}}$$

Учитывая значительные вычислительные трудности при реализации численных расчетов сопряженной задачи, дальнейшее моделирование было направлено на установление критериальных зависимостей между рассмотренными выше параметрами. Интервалы варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. - Интервалы варьирования критериев сопряженной задачи теплообмена

Параметр	Минимум	Максимум
$P_{нач}$ , кПа	172	222
$K_L$	0,436	0,894
$K_A$	0,679	5,659
$Re_{max}$	17,909	103,615
$Fo_{ж}$	9,559	17,602
$Nu$	1,164	2,078
$L_{var}$ , м	0,046	0,298
$N_x$	12,398	20,497
$R_{тр}$ , мм	0,1	0,15
$R_{ст}$ , мм	0,15	0,25
$\lambda_{тр}$ , Вт/(м·град)	0,03	0,25
$Pe$	69	400
$Gz$	0,9090	1,6738

На первом этапе моделирования исследовали влияние начального давления и соответственно расхода потока на теплообмен. Обобщая полученные данные, получили зависимости активного участка теплообмена  $L_{var}$  в зависимости от критерия Пекле при изменении параметров  $K_L$  и  $K_A$  (рисунок 4).

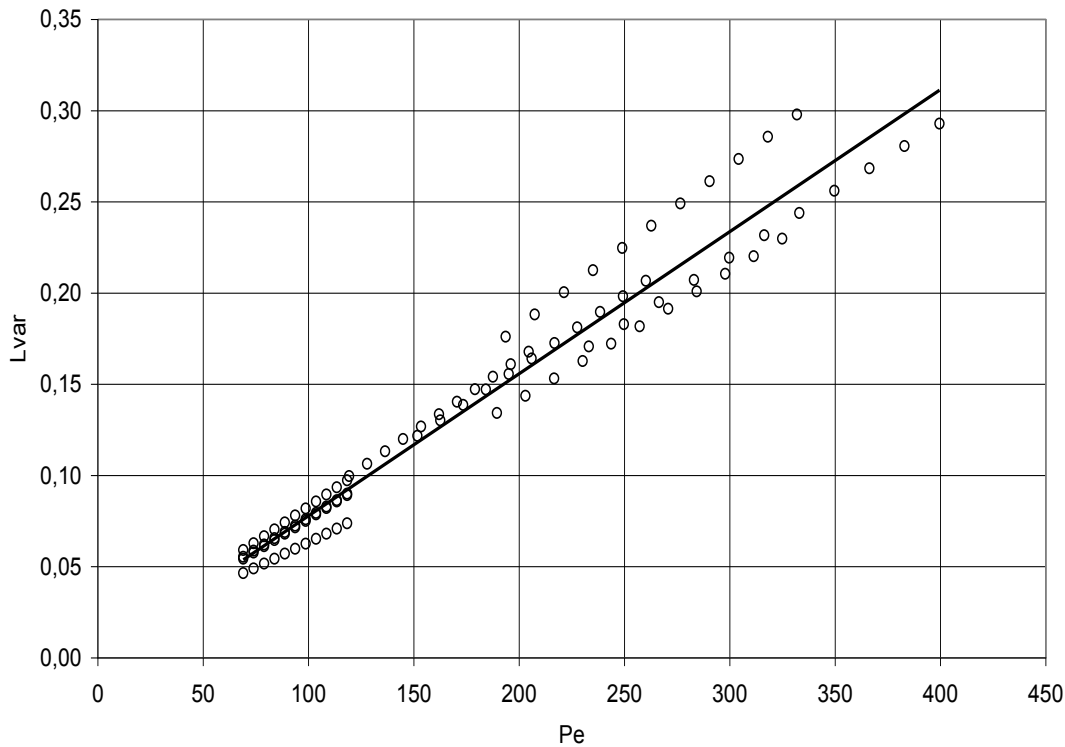


Рисунок 4. Влияние критерия Пекле на длину активного участка теплообмена при изменении параметров  $K_L$  и  $K_A$

Анализ данных (рисунок 4) показал, что для различных параметров  $K_L$  и  $K_A$  зависимости активной длины  $L_{var}$  представляют собой расходящийся пучок прямых из начала координат, наклон которых  $m_L$  обусловлен параметрами  $K_L$  и  $K_A$ .

Данные численного моделирования могут быть обобщены в виде следующей зависимости:

$$m_L(K_L, K_A) = (b_0 + b_1 \cdot K_L + b_2 \cdot K_A + b_{12} \cdot K_L \cdot K_A + b_{11} \cdot K_L^2 + b_{22} \cdot K_A^2) \quad (6)$$

где  $b_0 = 0,000129$ ;  $b_1 = 0,0011433$ ;  $b_2 = 0,00013191$ ;  $b_{12} = -0,000011$ ;

$b_{11} = -0,00064587$ ;  $b_{22} = -0,00001412$ .

Реальная длина полволоконной мембраны должна быть не больше определяемой длине активного участка теплообмена.

С учетом обработки данных моделирования получена зависимость критерия Нуссельта от критериев Пекле, Гретца и симплексов, учитывающих геометрию и теплофизические свойства стенки мембраны:

$$Nu = 3.66 - 8.08 \cdot Pe^{-0.2334} \cdot Gz^{0.1474} \cdot K_L^{0.1787} \cdot K_A^{-0.1330} \quad 7)$$

Пределы изменения переменных в представленной зависимости:  $Pe = 69 \dots 10105$ ;  $Gz = 0,828 \dots 3,443$ ;  $K_L = 0,436 \dots 1,066$ ;  $K_A = 0,679 \dots 5,659$ .

Особенностью уравнения (7) является то, что оно в пределе при  $K_A \rightarrow 0$  в случае высокой проводимости тепла стенкой принимает значение  $Nu = 3,66$ , соответствующее известному решению задачи Нуссельта – Гретца [2]. Уравнение (7) адекватно с отклонением 10% описывает различные варианты теплообмена от внутреннего потока в полволоконных мембранах.

В результате проведенной работы можно сделать вывод: полученная в результате моделирования зависимость (7) обобщает результаты численного решения сопряженной задачи

теплообмена от внутреннего потока в полволоконных мембранах и может быть применена в практических расчетах.

#### **Литература:**

1. Схалихов А.А. Постановка сопряженной задачи переноса тепла через трубчатую мембрану от протекающего в ней потока // Новые технологии. 2009. Вып. 4.
2. Справочник по теплообменникам. В 2 т. Т.1: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
4. Протодьяконов И.О., Марцулевич Н.А., Марков А.В. Явления переноса в процессах химической технологии. Л.: Химия, 1981. 264 с.
5. Схалихов А.А. Мембранная экстракция двуокисью углерода в пищевой технологии. Краснодар, 2007. 159 с. Деп. в ВИНТИ 12.02.07, № 128-В2007.