

УДК 621.184.64

ББК 31.31

П-27

*Схалияхов 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.*

## ПЕРЕНОС ТЕПЛА В ТЕПЛООБМЕННИКЕ С НЕПРОНИЦАЕМЫМИ ПОЛОВОЛОКОННЫМИ МЕМБРАНАМИ

(рецензирована)

*В работе был рассмотрен процесс теплообмена в полимерных полволоконных теплообменниках, в качестве элементов теплообменной аппаратуры были использованы непроницаемые полволоконные мембраны, изготовленные из полипропилена, найдены обобщения, позволяющие прогнозировать процесс теплообмена в модуле полволоконных мембран.*

*Ключевые слова: непроницаемые полволоконные мембраны, теплообменник, теплообмен, теплопередача, мембранный модуль.*

*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 Eugeniyy 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.*

## TRANSITION OF SOLID IN HEAT EXCHANGER WITH IMPERMEABLE EMPTY-FIBER MEMBRANES

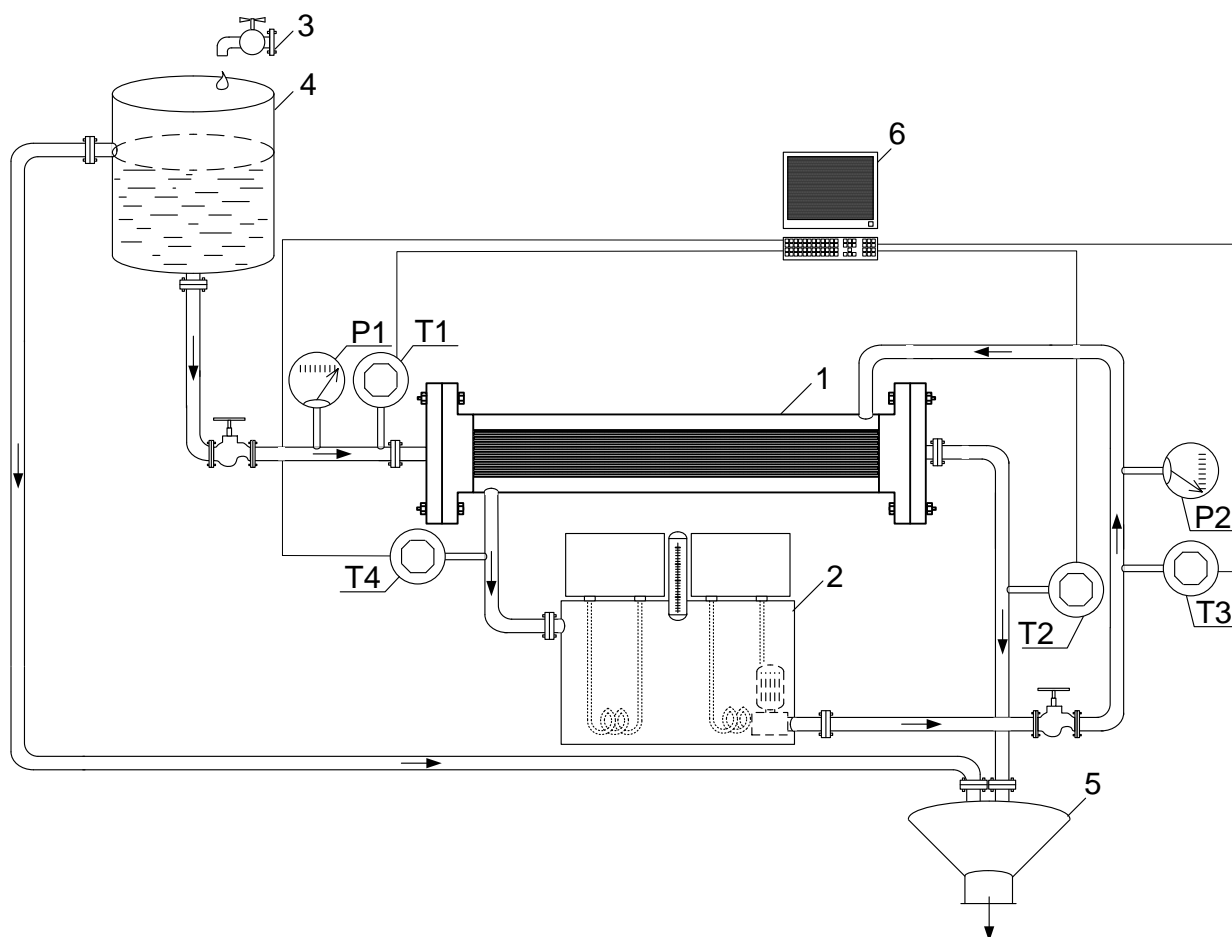
*The authors of the article consider the process of heat-exchange in polymeric empty-fiber heat-membranes as element of heat-exchange equipment impermeable empty-fiber membranes made of polypropylene was used. The authors found generalizations allowing forecasting the process of heat-exchange in module of empty-fiber membranes.*

*Keywords: polymeric empty-fiber membranes, heat-exchanger, heat-exchange, heat-transmission, membrane module.*

Непроницаемые полволоконные мембраны [1], изготовленные из полипропилена, могут быть использованы в качестве элементов теплообменной аппаратуры. Конструкция полимерных полволоконных теплообменников (ППТ) идентична мембранным контакторам, но имеет основное преимущество в чрезвычайно высоком отношении поверхностной площади теплообмена к объему [2;

3]. Это отношение при применении вышеуказанных мембран, как показано в работе [2], более чем на порядок выше этого показателя для кожухотрубных или пластинчатых теплообменников. Вследствие чего можно сделать вывод, что полимерные полволоконные теплообменники превосходят металлические кожухотрубные или пластинчатые теплообменники, особенно при низких температурах и невысоких давлениях.

Однако, в связи с низкой теплопроводностью полимерных стенок мембраны, малым внутренним диаметром и в связи с ламинарным режимом течения жидкости, необходимо провести исследование процесса теплообмена в полимерных полволоконных теплообменниках на экспериментальной установке (рисунок 1), где в качестве теплоносителя использовалась сетевая водопроводная вода.



*Рисунок 1. Экспериментальная установка*

Обозначения: 1 – полимерный полволоконный теплообменник; 2 – термостат; 3 – водопроводный кран; 4 – приемный бак для воды; 5 – сливная воронка; 6 – записывающее устройство; T1, T2, T3, T4 – прибор для измерения температуры; P1, P2 – прибор для измерения расхода жидкости.

Представленная установка состоит из полимерного полволоконного теплообменника, состоящего из мембранного модуля с непроницаемыми полволоконными мембранами, представляющими собой мембранный пучок, состоящий из 1400 полипропиленовых полволоконных мембранных волокон с наружным диаметром 0,275 мм, внутренним диаметром 0,225 мм и длиной 0,75 м, закрепленного в стеклянном кожухе, термостата, снабженного насосом, термометром и греющими элементами, водопроводного крана, приемного бака с поддерживаемым постоянным уровнем, сливной воронки, записывающего устройства, приборов для измерения температуры и расхода жидкости.

Мембранные модули были предоставлены фирмой Eidos (Чехия).

Установка работала следующим образом: вода из приемного бака при открытии вентиля подается в полипропиленовый полволоконный мембранный пучок, а после его прохождения отводится через сливную воронку в канализацию. Одновременно подогретая с помощью греющих элементов в термостате вода насосом подается в межмембранное пространство мембранного модуля в стеклянном кожухе, откуда отводится назад в термостат. Температура воды контролируется с помощью встроенного термометра. После выхода установки на установившийся режим работы определяется расход жидкости и температуры по обоим теплоносителям с помощью приборов для измерения температуры и расхода жидкости, установленных на входе и выходе мембранного модуля и передающих информацию на записывающее устройство.

Основные характеристики экспериментального мембранного модуля представлены в таблице 1.

Таблица 1. - Основные характеристики мембранного модуля, используемого в эксперименте.

Параметр	Единицы измерения	Значение
Число мембран в модуле	штук	1400
геометрия мембраны		
Внутренний радиус трубы (потока жидкости)	мм	0,113
Внешний радиус трубы (стенки)	мм	0,138
Длина трубы (потока жидкости)	мм	750
Поверхность всех мембран в модуле	м <sup>2</sup>	0,907
геометрия модуля		
Внутренний радиус модуля	мм	25
Площадь свободного сечения модуля	см <sup>2</sup>	18,8
Смоченный периметр модуля	м	1,367
Гидравлический диаметр модуля	мм	5,5

Результаты проведенных исследований на экспериментальной установке приведены в таблице 2.

Таблица 2. - Результаты исследований на экспериментальной установке

Расход воды в мембранах	Расход воды в кожухе	Начальная температура в мембранах	Конечная температура в мембранах	Начальная температура в кожухе	Конечная температура в кожухе
кг/сек	кг/сек	°С	°С	°С	°С
0,288	0,266	20,4	26,5	37,1	30,5
0,284	0,367	21,4	27,7	36,7	31,8
0,174	0,605	21,1	28,1	31,7	29,7
0,244	0,694	21,2	28,4	33,8	31,3
0,297	0,835	20,6	27,9	35,8	33,3
0,255	0,874	20,6	28,1	34,8	32,6
0,304	1,338	21,1	29,0	36,6	34,8
0,292	1,423	20,8	28,9	35,9	34,3

Для сравнения полученных данных и проведения совместной их обработки, для условий, представленных в таблице 3, были использованы данные исследований из работы [2].

Таблица 3. - Характеристика условий проведения экспериментов в работе [2] по теплопередаче в мембранных модулях

Модуль	N	L, см	$\varphi$	$\sigma$	$A_0, \text{см}^2$	$\alpha, \text{м}^2/\text{м}^3$	D, м
3	9	20,3	0,051	0,027	33	358	0,0076
4	35	20,3	0,200	0,107	128	1394	0,0076

В таблице использованы следующие обозначения:

N - число волокон; L - активная длина волокон;  $\varphi$  - отношение свободной площади потока к полной фронтальной площади;  $\sigma$  - упаковочная доля;  $A_0$ ,- площадь теплопередачи;  $\alpha$  - отношение площади поверхности волокон к полному объему модуля; D – внутренний диаметр кожуха модуля.

В работе использовали сплошные полипропиленовые волокна с внутренним диаметром 0,42 мм и внешним диаметром 0,575 мм.

Экспериментальные данные, полученные в работе [2], представлены в таблице 4.

Таблица 4. - Результаты исследований по теплопередаче в мембранных модулях, полученные в работе [2]

$\dot{m}_t, \text{г/с}$	$T_{t,in}, ^\circ\text{C}$	$T_{t,out}, ^\circ\text{C}$	$\dot{m}_s, \text{г/с}$	$T_{s,in}, ^\circ\text{C}$	$T_{s,out}, ^\circ\text{C}$	Q, Вт	K, Вт/ $\text{м}^2\text{гр}$
Модуль 3: вода (волокна) – вода (кожух модуля)							
1,3	44,9	31,7	59,6	15,3	15,6	69	945
2,2	46,0	38,6	25,5	16,4	17,1	69	826
4,0	47,2	41,2	59,9	16,5	16,9	100	1108
4,0	47,1	41,9	26,0	16,6	17,3	86	954
Модуль 4: вода (волокна) – вода (кожух модуля)							
1,6	44,8	29,1	27,5	23,2	24,1	103	686
3,9	45,5	32,9	42,2	23,0	24,1	205	1069
0,9	66,3	24,0	69,9	22,9	23,5	150	1029
5,1	74,2	44,2	71,0	18,1	20,3	647	1314

В таблице использованы следующие обозначения:

$\dot{m}_t, \dot{m}_s$  - соответственно массовые расходы в волокнах и свободном сечении модуля, г/сек;  $T_{t,in}, T_{t,out}, T_{s,in}, T_{s,out}$  – соответственно температуры на входе и выходе волокон и свободного сечения модуля,  $^\circ\text{C}$ ; Q – поток переданного тепла, Вт; K - полный коэффициент теплопередачи, Вт/ $(\text{м}^2 \text{гр})$ .

В процессе экспериментов варьировались температурные режимы и расходы потоков модуля (внешний) и мембран (внутренний). Контроль этих параметров позволил определить общий коэффициент теплопередачи в модуле по двум альтернативным формулам:

используя внутренний поток:

$$K = \frac{\dot{m}_{t,in} \cdot C_w \cdot (T_{t,out} - T_{t,in})}{A_0 \cdot \Delta T_{ln}} \quad (1)$$

где  $C_w$  – удельная теплоемкость воды при средней температуре внутреннего потока в мембранах

$$T_{t,av} = \frac{T_{t,in} + T_{t,out}}{2}; \Delta T_{ln} = \frac{(T_{t,out} - T_{s,in}) - (T_{t,in} - T_{s,out})}{\ln \left[ \frac{(T_{t,in} - T_{s,out})}{(T_{t,out} - T_{s,in})} \right]}$$

- средняя логарифмическая разность температур.

или внешний поток:

$$K = \frac{\dot{m}_{s,in} \cdot C_w \cdot (T_{s,in} - T_{s,out})}{A_0 \cdot \Delta T_{ln}}, \quad (2)$$

где  $C_w$  – удельная теплоемкость воды при средней температуре внешнего потока в свободном сечении модуля  $T_{s,av} = \frac{T_{s,in} + T_{s,out}}{2}$ .

Использование формул (1) и (2) позволило контролировать точность проводимых замеров в процессе эксперимента, т.к. общий коэффициент теплопередачи, вычисленный по этим формулам должен совпадать. Определив общий коэффициент теплопередачи модуля, проводили оценку интенсивности внутренней теплопередачи на основе расчета внутреннего критерия Нуссельта ( $Nu_{mem}$ ) по ранее [4] определенной формуле:

$$Nu_{i\hat{a}i} = 3.66 - 8.08Pe^{-0.2334}Gz^{0.1474}K_L^{0.1787}K_A^{-0.1330} \quad (3)$$

Определив экспериментальные значения параметров, входящих в уравнение (3), производили расчет критерия Нуссельта, значение которого использовали для определения внутреннего коэффициента теплопередачи ( $K_{TOL}$ ):

$$K_{TOL} = \frac{\lambda_{CD} \cdot Nu_{i\hat{a}i}}{2 \cdot R_{\hat{O}B}}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{cp}$  – средняя теплопроводность теплового потока, определяемая формулой:

$$\lambda_{\hat{n}\hat{o}} = \frac{\lambda_{\hat{O}B}\pi \cdot (R_{\hat{N}O}^2 - R_{\hat{O}B}^2) \cdot L_{\hat{O}B}\rho_{\hat{O}B} + \lambda_w\pi \cdot R_{\hat{O}B}^2 \cdot L_{\hat{O}B} \cdot \rho_w}{\pi \cdot (R_{\hat{N}O}^2 - R_{\hat{O}B}^2) \cdot L_{\hat{O}B} \cdot \rho_{\hat{O}B} + \pi \cdot R_{\hat{O}B}^2 \cdot L_{\hat{O}B} \cdot \rho_w} \quad (5)$$

Зная общий коэффициент теплопередачи ( $K$ ) и внутренний коэффициент теплопередачи ( $K_{TOL}$ ) определяли внешний коэффициент теплопередачи по формуле:

$$K_{mod} = \frac{1}{\frac{1}{K} - \frac{1}{K_{TOL}}} \quad (6)$$

Внешний коэффициент теплопередачи позволяет определить внешний критерий Нуссельта ( $Nu_{mod}$ ) по формуле:

$$Nu_{i\hat{a}i} = \frac{K_{i\hat{a}i} \cdot d_{\hat{A}}}{\lambda_w}, \quad (7)$$

где  $d_r$  – гидравлический диаметр модуля;  $\lambda_w$  определяется при средней температуре в модуле.

Полученное значение сопоставляем с критерием Рейнольдса для внешнего потока ( $Re_{mod}$ ), которое определяется по формуле:

$$Re_{i\hat{a}i} = \frac{Q_{\hat{o}y} \cdot d_{\hat{A}}}{S_{i\hat{a}i} \cdot \mu_w}, \quad (8)$$

где  $S_{mod}$  - площадь свободного сечения модуля.

Степень упаковки полволоконных мембран в кожухе модуля:

$$\phi = \frac{N_{i\hat{a}i} \cdot R_{\hat{n}\hat{o}}^2}{R_{i\hat{a}i}^2} \quad (9)$$

Зависимость внешнего числа Нуссельта определяли от полученных выше параметров.

На рисунке 2 приведены экспериментальные данные, которые сгруппированы по трем группам кривых, характеризующихся различной степенью упаковки модуля мембранами. Для выявления этой зависимости были определены линии тренда по каждой группе кривых.

Определяя влияние параметра упаковки на коэффициенты регрессионных уравнений рисунка 2, было установлено, что это влияние носит линейный характер от функции упаковки, определяемой уравнением:

$$\Theta(\phi) = \frac{1 - \phi}{\phi} \quad (10)$$

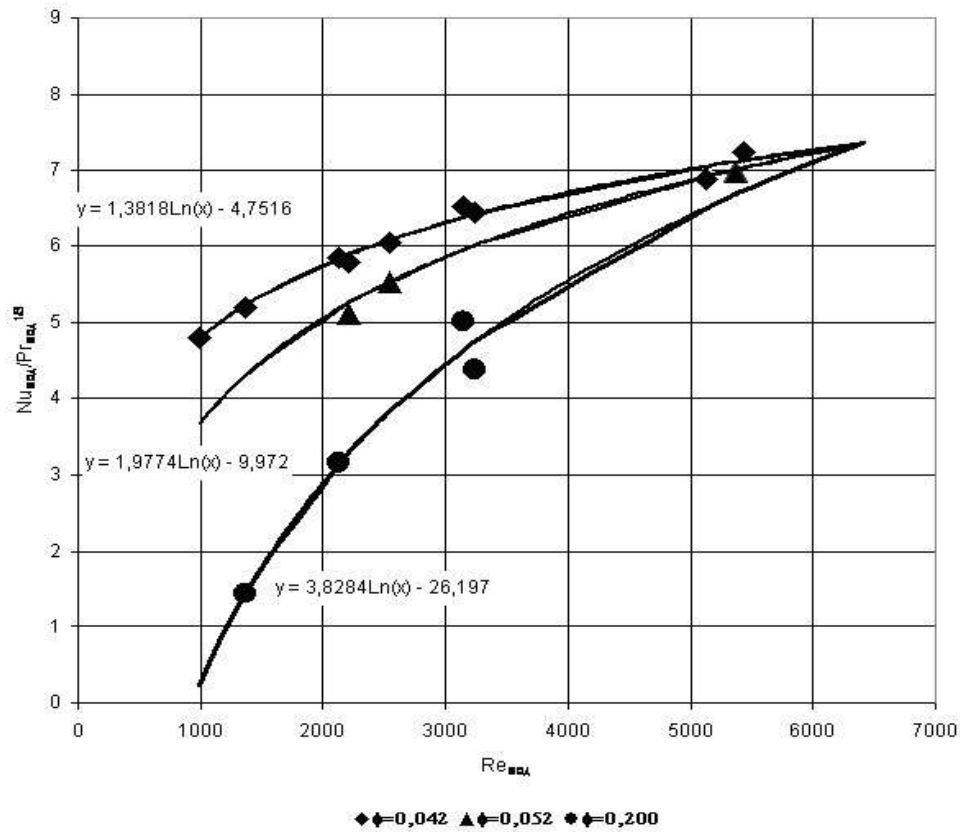


Рисунок 2. Определение вида функциональной зависимости в группах экспериментальных данных с различной степенью упаковки волокон в модуле

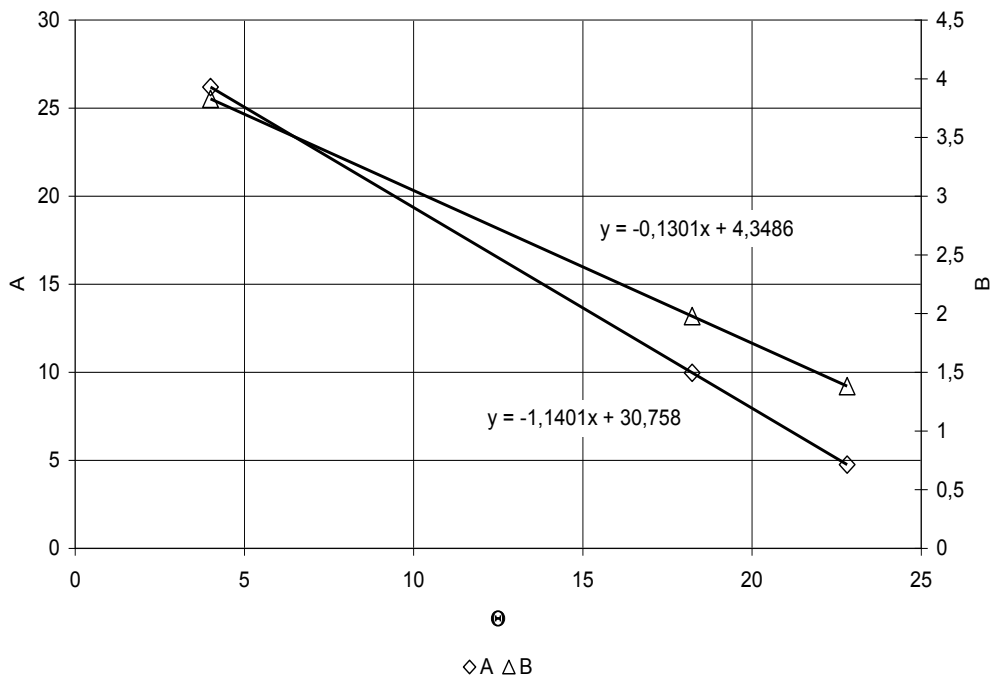


Рисунок 3. Определение влияния функции упаковки на коэффициенты регрессионных уравнений

Обобщая данные графиков на рисунках 2 и 3, получили обобщенную зависимость внешнего Нуссельта от вышеперечисленных параметров:

$$Nu_{iii} = \left[ \left( 4,3486 - 0,1301 \frac{1-\Theta}{\Theta} \right) \ln(Re_{iii}) - \left( 30,758 - 1,1401 \frac{1-\Theta}{\Theta} \right) \right] Pr_{iii}^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

Интересно отметить, что семейство кривых, определяемых уравнением (14) имеет особую точку в области Рейнольдса равного 6395. В этой точке все кривые пересекаются. Вероятно, это

значение числа Рейнольдса показывает границы применимости найденной зависимости с учетом ограничений ламинарного режима потоков в модуле. Таким образом, найденные обобщения позволяют прогнозировать процесс теплообмена в модуле полволоконных мембран в широких пределах чисел с учетом плотности упаковки пучка мембран в модуле. Найденные зависимости носят адекватный эксперименту характер, а средняя ошибка составляет 11%.

#### **Литература:**

1. Dohnal M., Foller B., Millionnyy A. Plastic capillary heat exchangers 18<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering 24-28 August 2008. Prague, Czech Republic;
2. Zarkadas D. M., Sirkar K. K. Polymeric Hollow Fiber Heat Exchangers: An Alternative for Lower Temperature Applications. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2004, 43, 8093-8106;
3. Zaheed L., Jachuck R. J. J., Review of polymer compact heat exchangers, with special emphasis on a polymer film unit. *Applied Thermal Engineering*, Volume 24, Issue 16, November 2004, Pages 2323-2358;
4. Описание теплообмена в полволоконных мембранах для внутренней сопряженной задачи / Схаляхов А.А [и др.] // Новые технологии. 2010. № 1.