

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ПО РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО МАССООБМЕННОГО АППАРАТА

А.А. Кухленко, С.Е. Орлов, М.С. Василишин

Интенсификация химико-технологических процессов для систем «газ–жидкость» и «жидкость–жидкость» может достигаться путем контактирования фаз в пленочном режиме. Организовать такой режим возможно с помощью центробежных массообменных аппаратов с восходящим потоком пленки. Для исследования закономерностей и характеристик течения пленки вязкой ньютоновской жидкости по внутренней поверхности вращающегося ротора центробежного массообменного аппарата реализована физико-математическая модель, отражающая основные параметры ее течения. При выполнении численного моделирования рассматривалось стационарное течение пленки при допущении, что вязкие силы преобладают над инерционными. В качестве второго допущения в рассмотренном случае считалось, что влияние сил тяжести незначительно. На основе данных математического моделирования установлено, что с увеличением расхода жидкости и уменьшением угловой скорости вращения ротора растет толщина генерируемой пленки жидкости. Определены поля скоростей в пленке жидкости при изменении внешних воздействий. Найдено распределение давления по толщине и протяженности пленки.

Ключевые слова: центробежный массообменный аппарат, расчёт параметров течения пленки, толщина пленки жидкости, распределение скоростей и давления в пленке.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация целого ряда химико-технологических процессов, протекающих в системах «газ–жидкость» и «жидкость–жидкость» может быть достигнута за счет организации контактирования фаз в пленочном режиме. При этом жидкая фаза генерируется в виде тонкого слоя, движущегося вверх или вниз по рабочей поверхности аппарата. Как правило, термическое и диффузионное сопротивление такого слоя незначительно, а взаимодействующие потоки интенсивно перемешиваются вследствие их турбулизации и волнообразования, что способствует значительному повышению коэффициентов межфазного переноса.

Практическая реализация восходящего режима течения жидкостной пленки осуществляется в аппаратуре роторного типа [1–8]. Такое оборудование выполняет роль транспортного устройства, отличается высокой удельной производительностью и малыми габаритами, что делает его перспективным для проведения массообменных процессов, осложненных химическими превращениями и значительным тепловыделением.

Расчет центробежной аппаратуры с восходящей пленкой жидкости предполагает наличие исходных данных о параметрах ее

течения. Вместе с тем получение такой информации экспериментальными методами затруднительно, вследствие малых толщин пленки и возмущений, которые вносят в поток измерительные зонды. В таком случае использование методов математического моделирования оказывается наиболее точным и достаточным способом получения необходимой информации [9, 10].

В этой связи целью настоящей работы являлась оценка параметров восходящего течения пленки ньютоновской жидкости по рабочей поверхности центробежного массообменного аппарата.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим течение ньютоновской жидкости по рабочей поверхности вращающегося с угловой скоростью ω_0 ротора центробежного массообменного аппарата.

Подача жидкости на поверхность ротора осуществляется через центральный патрубок радиусом $R_{\min} = 10^{-2}$ м, установленный соосно ротору аппарата. Обозначим расход жидкости как Q' . Жидкость, поступающая из входного патрубка, растекается по поверхности ротора и вовлекается во вращательное движение за счет сил вязкости. Образующаяся пленка смачивает всю внутреннюю поверх-

ность ротора. Пленка ограничивается входным сечением патрубка $r=R_{\min}$, твердой поверхностью и свободной поверхностью, на которой действует поверхностное натяжение σ .

Для математического описания гидродинамических закономерностей течения пленки жидкости по внутренней поверхности вращающегося ротора воспользуемся математической моделью [11].

Для оценки параметров течения пленки необходимо знать геометрические размеры внутренней поверхности ротора. В цилиндрической системе координат (r, φ, z) ее можно представить в виде поверхности, образующейся вращением кривой $Z=f(R)$.

Внутреннюю поверхность ротора представим в виде кусочно-непрерывной функции (рисунок 1).

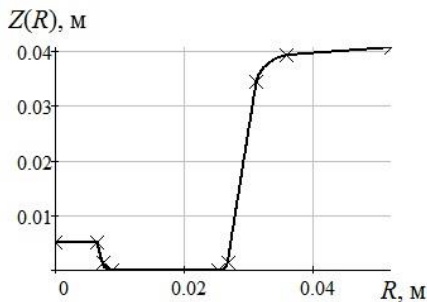


Рисунок 1 – Вид внутренней поверхности ротора пленочного аппарата

В ключевых точках «x» (рис. 1) на внутренней поверхности ротора происходит «стыкование» кусочков функции $Z(R)$.

Введем криволинейную ортогональную систему координат (ξ, θ, η) , в которой геометрические параметры функции $z=f(r)$ задаются в параметрическом виде $r=R(\xi)$, $z=Z(\xi)$, $\varphi=\text{const}$, где ξ – натуральный параметр. Эта система координат (ξ, θ, η) связана с исходной цилиндрической системой координат соотношениями:

$$r(\xi, \eta) = R(\xi) - Z_\xi(\xi)\eta, \quad \varphi = \theta, \quad z(\xi, \eta) = Z(\xi) + R_\xi(\xi)\eta. \quad (1)$$

Нижние индексы в выражении (1) и далее по тексту обозначают дифференцирование по соответствующей переменной. Координатные линии ξ и η взаимно перпендикулярны, причем координата ξ проходит по касательной к поверхности вращения, а η – по нормали. Линии θ дополняют ортогональную систему координат (ξ, θ, η) до правой тройки.

Вектор скорости жидкости V может быть разложен на составляющие V^ξ, V^θ, V^η по осям ортогональной системы координат.

Введем безразмерные переменные (x, y, t) , безразмерные компоненты скорости u, v, w и давления p . Тогда

$$V^\xi = \omega R(\xi) \cdot E^{-1} u; \\ V^\theta = \omega R(\xi) \cdot (F + E^{-1} v);$$

$$V^\eta = \omega H_* E^{-1} w$$

$$p' - p_e' = \rho \omega^2 H_* R(\xi) \rho;$$

$$x = \ln \left(\frac{R(\xi)}{R_{\min}} \right);$$

$$y = \frac{\eta}{H_*}; \quad t = \omega E^{-1} \theta; \quad (2)$$

$$E = \frac{\mu}{\rho H_*^2 \omega}; \quad \omega = \frac{\omega_0}{F};$$

$$H_* = \left(\frac{v Q'}{2\pi R_{\min}^2 \omega^2} \right)^{1/3}; \quad \varepsilon = \frac{H_*}{R}.$$

Здесь E – число Экмана; F – нормированный коэффициент; H_* – характерная толщина пленки; $p' - p_e'$ – разность между общим давлением на поверхности пленки и внешним давлением; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; ε – безразмерная толщина пленки.

Ориентированную кривизну поверхности вращения определим как

$$k = -Z_\xi R_{\xi\xi} + R_\xi Z_{\xi\xi}.$$

Рассмотрим случай стационарного течения жидкости, когда влиянием силы тяжести можно пренебречь с учетом преобладания вязких сил над инерционными. Зададим, что при $x=x_{\min}$ толщина пленки будет $H=1$ и расход жидкости $Q=1$.

Для определения безразмерных компонент скорости $u=U, v=E^{-1}V, w=W$, формы свободной поверхности $h=H$ и давления $p=P$ при стационарном течении уравнения неразрывности потока и Навье-Стокса в проекциях на оси криволинейной системы координат будут иметь вид:

$$U_{yy} + F^2 R_\xi = 0, \quad V_{yy} = 2FUR_\xi, \quad (3)$$

$$W_y = -(U_x + 2U)R_\xi, \quad P_y = -F^2 Z_\xi.$$

Граничными условиями при решении данной системы уравнений (3) будут:

$$y=0: \quad U=0, \quad V=0, \quad W=0;$$

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ПО РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО МАССООБМЕННОГО АППАРАТА

$$y=H(x): UH_x R_\xi = W, \quad U_y = 0, \quad V_y = 0, \quad P = -\gamma(\chi + Z_\xi);$$

$$x=x_{\min}: H=1, \quad Q = \int_0^H u dy = 1.$$

Здесь $\gamma = \sigma / (\rho \omega^2 H R^2)$, $\chi = kR$.

Решение системы уравнений будет записано в виде

$$U = F^2 R_\xi \left(yH - \frac{y^2}{2} \right),$$

$$V = F^3 R_\xi^2 \left(-\frac{2}{3} h^3 y + \frac{1}{3} y^3 h - \frac{1}{12} y^4 \right),$$

$$W = -F^2 R_\xi \left\{ \begin{array}{l} \frac{y^2}{2} \left[R_\xi H_x + 2R_\xi H + RR_{\xi\xi} H \right] - \\ - \frac{y^3}{3} (RR_{\xi\xi} + 2R_\xi) \end{array} \right\},$$

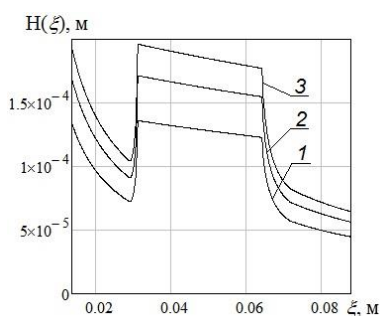
$$P = -F^2 Z_\xi (H - y) - \gamma(\chi + Z_\xi),$$

$$H = \left(\frac{R_\xi(x_{\min})}{R_\xi} \right)^{\frac{1}{3}} \exp \left(-\frac{2}{3} (x - x_{\min}) \right).$$

Для того чтобы условия при $x=x_{\min}$ были удовлетворены коэффициент F должен быть определен как:

$$F = \frac{\sqrt{3}}{R_\xi(x_{\min})}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

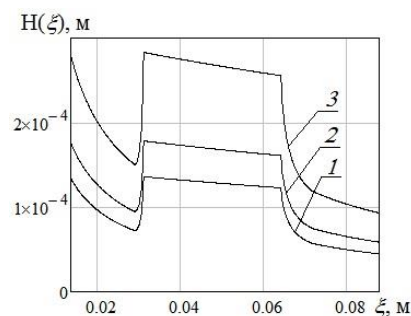


1 – $Q=0.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $Q=1.0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$;
3 – $Q=1.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$

Рисунок 2 – Изменение толщины пленки жидкости в зависимости от расхода (при $\omega_0=314,16 \text{ рад/с}$)

Реализация математической модели, описывающей параметры течения пленки
ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №4 2017

жидкости по внутренней поверхности ротора, позволила оценить значения толщины пленки жидкости на различных участках поверхности вращения в зависимости от расхода (рисунок 2) и угловой скорости вращения ротора (рисунок 3).

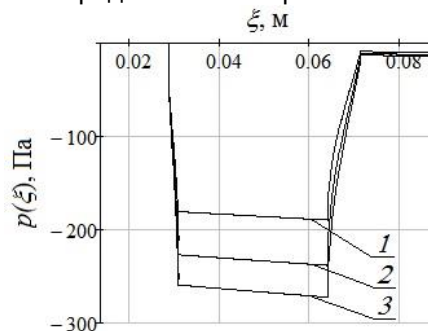


1 – $\omega_0=104,72 \text{ рад/с}$; 2 – $\omega_0=209,44 \text{ рад/с}$;
3 – $\omega_0=314,16 \text{ рад/с}$

Рисунок 3 – Изменения толщины пленки жидкости в зависимости от угловой скорости вращения ротора (при $Q=0.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$)

Из рисунков 2 и 3 видно, что увеличение толщины пленки жидкости наблюдается при увеличении расхода и уменьшении частоты вращения ротора, что согласуется с общими представлениями об исследуемом процессе и результатами работ [2-4].

Влияние расхода на давление в пленке жидкости представлено на рис. 4.



1 – $Q = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $Q = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$;
3 – $Q = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$

Рисунок 4 – Зависимость давления в середине слоя пленки от расхода жидкости при $\omega_0 = 314,16 \text{ рад/с}$

Из рисунка 4 видно, что с увеличением расхода снижается величина разности давлений $p' - p_e'$. Аналогичное снижение разности давлений наблюдается и при увеличении угловой скорости вращения ротора.

Влияние расхода и угловой скорости вращения ротора на проекции скоростей течения пленки жидкости в ортогональной системе координат показано на рисунках 5-7.

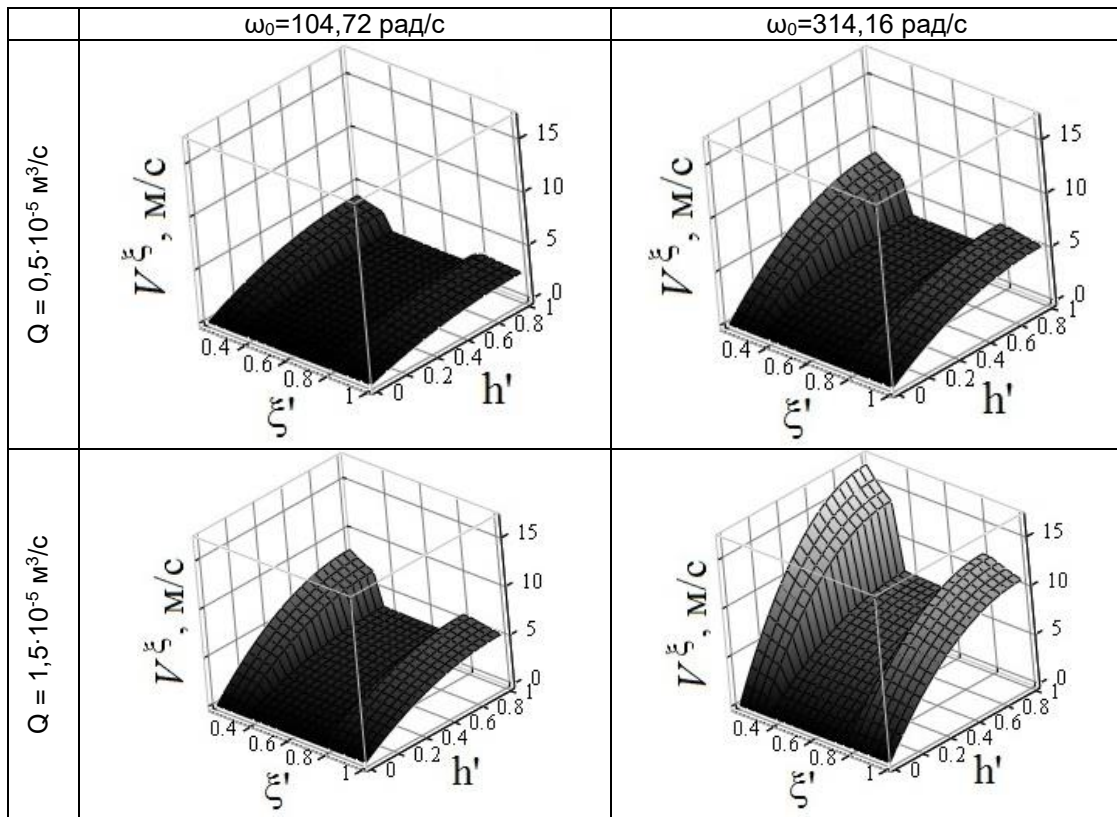


Рисунок 5 – Распределение скоростей V^ξ при изменении расхода и угловой скорости вращения ротора

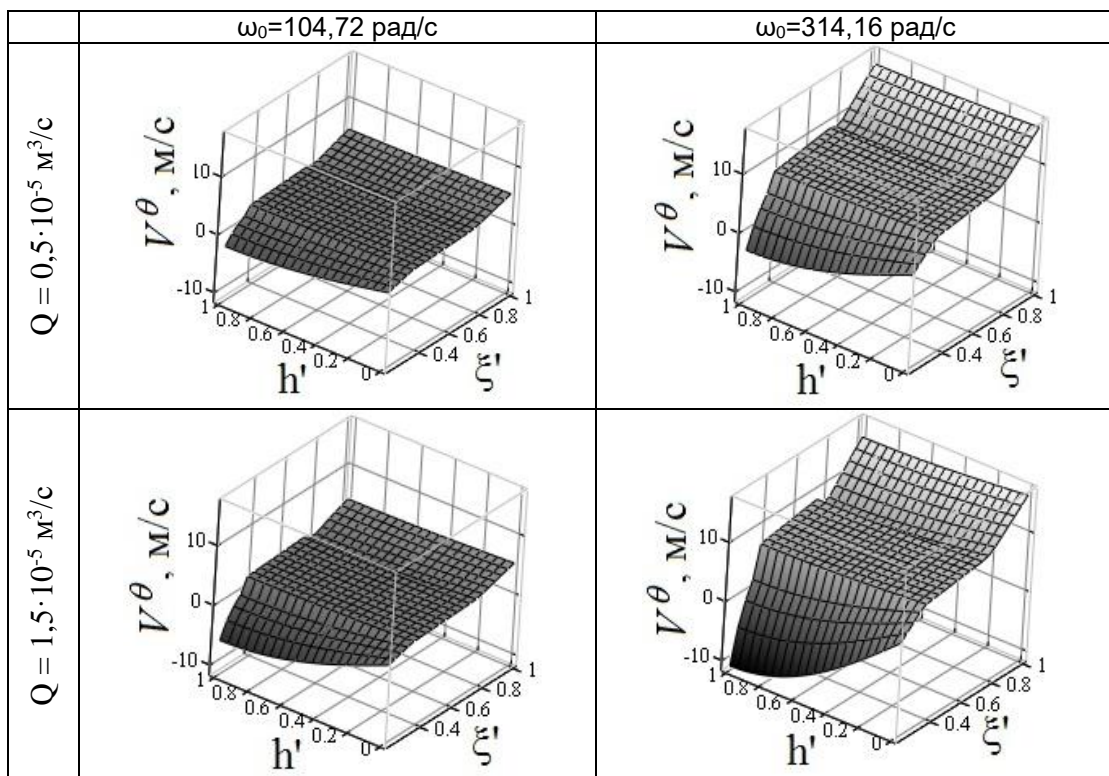


Рисунок 6 – Распределение скоростей V^θ при изменении расхода и угловой скорости вращения ротора

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ПО РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО МАССООБМЕННОГО АППАРАТА

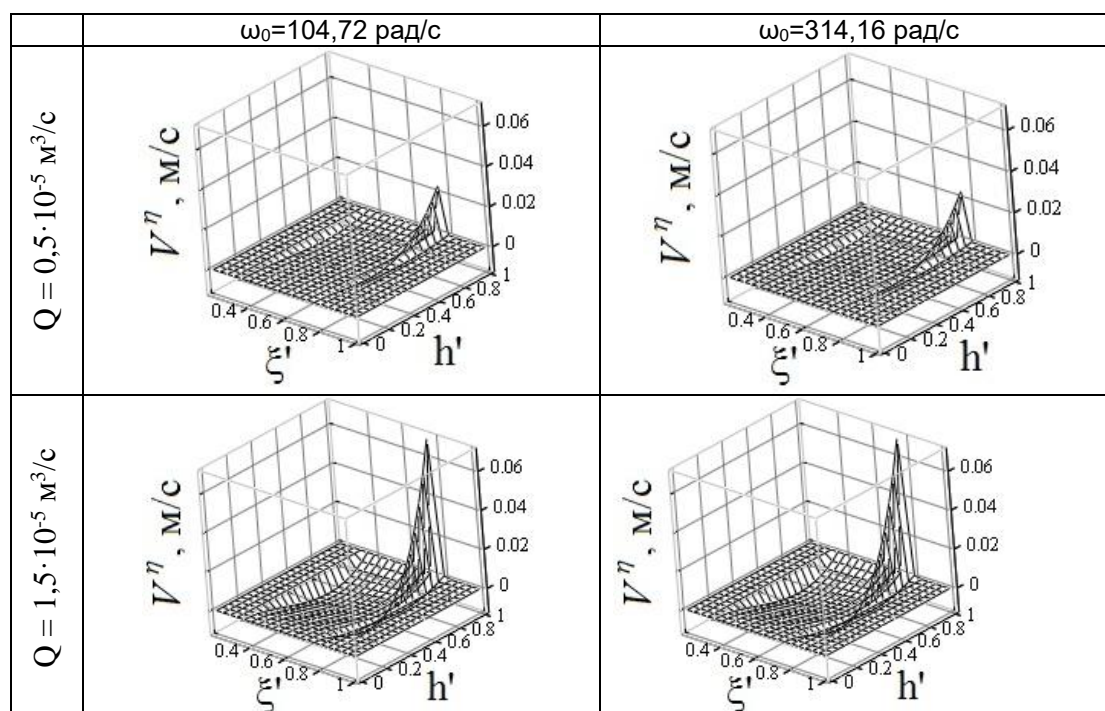


Рисунок 7 – Распределение скоростей V^n при изменении расхода и угловой скорости вращения ротора

Для наглядного представления результатов распределения скоростей в рисунках 5-7 координаты ξ и h были нормированы на величины $\xi_{max}=8,76 \cdot 10^{-2}$ м и $h_{max}=f(\xi)$ соответственно.

ВЫВОДЫ

В результате выполнения работы выполнена оценка основных гидромеханических характеристик течения пленки жидкости по внутренней криволинейной поверхности вращающегося ротора. Установлено влияние расхода жидкости и частоты вращения ротора центробежного пленочного реактора на гидромеханические характеристики течения пленки жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ 2464082 Российская Федерация, МПК В01J 8/10, В01J 14/00, В01F 7/28. Центробежный массообменный аппарат / М.С. Васишин, О.С. Иванов, А.А. Кухленко, А.Г. Карпов, Д.Б. Иванова, С.Е. Орлов; заявитель и патентообладатель ИПХЭТ СО РАН. – № 2011136634; заявл. 02.09.11; опубл. 20.10.12, БИ № 29.
2. Прокопенко, А.С. Растекание пленки вязкой жидкости по поверхности вращающейся насадки произвольной формы / А.С. Прокопенко, Е.А. Смирнов, Г.В. Рябчук // Объединенный научный журнал. – 2002. – № 15(38). – С. 48-50.

3. Зиннатуллина, Г.Н. Расчет основных технологических параметров центробежных пленочных аппаратов / Г.Н. Зиннатуллина, А.В. Давыдов, Н.Х. Зиннатуллин, В.В. Бронская // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т.17, № 3. – С.89-92.
4. Зиннатуллин, Н.Х. Нанесение тонкопленочных покрытий в поле центробежных сил / Н.Х. Зиннатуллин, А.А. Булатов, С.Г. Николаева, Г.Н. Зиннатуллина // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 1. – С. 125-127.
5. Давыдов, А.В. Гидродинамика тонкопленочного центробежного теплообменника / В.В. Бронская, Н.Х. Зиннатуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 3. – С. 145-147.
6. Зиннатуллин, Н.Х. Тепло- и массообмен в центробежной жидкой пленке / Н.Х. Зиннатуллин, А.А. Булатов, Р.Г. Галимуллин, А.И. Хайбуллина // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 3. – С. 66-68.
7. Зиннатуллин, Н.Х. Влияние упругости на гидродинамические параметры центробежной жидкой пленки / Н.Х. Зиннатуллин, И.М. Нафиков, Е.И. Кульментава // Вестник Казанского технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 11. – С. 28-31.
8. Зиннатуллин, Н.Х. Влияние упругости на гидродинамические параметры центробежной жидкой пленки / Н.Х. Зиннатуллин, И.М. Нафиков, Е.И. Кульментава // Вестник Казанского технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 11. – С. 56-57.

9. Никулин, А.И. Определение меридиональной, тангенциальной и осевой скоростей течения степенной жидкости по внутренней поверхности криволинейной насадки и насадки с произвольным профилем / А.И. Никулин, А.Б. Голованчиков, А.В. Кузнецов, П.В. Мишта // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – Т.3, № 1 (61). – С. 96-99.

10. Рябчук, Г.В. Определение основных гидродинамических параметров процесса течения степенной жидкости по проницаемой поверхности криволинейной насадки произвольной формы / Г.В. Рябчук, И.А. Никулин, А.Б. Голованчиков, Г.А. Попович, П.В. Мишта // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – Т.3, № 1 (61). – С. 20-26.

11. Могилевский, Е.И. Течения тонких пленок вязкой жидкости по криволинейным вращающимся поверхностям / Е.И. Могилевский, В.Я. Шкадов // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2009. – № 2. – С.18-32.

Кухленко Алексей Анатольевич - к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории Процессов и аппаратов химических технологий, Федеральное государственное

бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), e-mail: ak79@rambler.ru, тел. (3854) 30-18-69.

Орлов Сергей Евгеньевич - к.т.н., научный сотрудник лаборатории Процессов и аппаратов химических технологий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), e-mail: serpp@mail.ru, тел. (3854) 30-18-69.

Василишин Михаил Степанович - д.т.н., заведующий лабораторией Процессов и аппаратов химических технологий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), e-mail: lab6@ipcet.ru, тел. (3854)30-59-40.