

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# ИЗВЕСТИЯ

ВОЛГОГРАДСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

Серия

РЕОЛОГИЯ, ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ  
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Выпуск 5

---

---

№ 1 (88)

Межвузовский сборник научных статей  
Издается с января 2004 г.

2012

---

---



Волгоград  
2012

Учредитель: ГОУ высшего профессионального образования  
«Волгоградский государственный технический университет»

Сборник зарегистрирован в Управлении регистрации и лицензионной работы в сфере массовых коммуникаций Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия ПИ № ФС77–25660 от 13 сентября 2006 г.

Главный редактор сборника «Известия ВолгГТУ»  
академик РАН *И. А. Новаков*

Редакционная коллегия серии: д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ *А. Б. Голованчиков* (научный редактор) – т. 24-84-40, e-mail: [pahr@vstu.ru](mailto:pahr@vstu.ru);  
д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ *А. П. Дарманян*;  
д-р. техн. наук, проф. ВПИ *О. А. Тишин*;  
д-р. техн. наук, проф. ВПИ *В. М. Шаповалов*;  
канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ *Л. В. Кетат*;  
канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ *В. А. Балашиов*;  
канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ *В. М. Яцук*;  
канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ *А. А. Шагарова* (ответственный секретарь) – т. 24-84-31, e-mail: [pahr@vstu.ru](mailto:pahr@vstu.ru)

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

**Известия** Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 1 (88) / ВолгГТУ. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2012. – 120 с. – (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 5).  
ISBN 978–5–9948–0904–4

В сборнике помещены статьи, являющиеся результатом научно-исследовательских работ ряда вузов и НИИ Российской Федерации в области гидромеханики и теплообмена реологически сложных сред в различных процессах химической технологии.

Ил. 84. Табл. 17. Библиогр.: 237 назв.

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

<i>Шаповалов В. М.</i> Нестационарный режим работы теплообменника.....	5
<i>Шаповалов В. М.</i> О валковом течении при отрицательной фрикции.....	8
<i>Голованчиков А. Б., Ильин А. В., Ильина Л. А.</i> Модель двухслойного кольцевого течения вязкой жидкости с произвольной реологической кривой с маловязким пристенным слоем в трубе...	12
<i>Павлов А. В., Яцук В. М.</i> Расчет массообмена в жидкостно-газовом эжекторе с прямолинейной камерой смешения.....	14
<i>Шишлянников В. В.</i> Применение метода суперпозиции для исследования теплообмена при произвольном изменении температуры стенки.....	16
<i>Шишлянников В. В., Дорохина Т. Б., Дуденков Е. В.</i> Теоретическое исследование течения и теплообмена в коническом подшипнике.....	19
<i>Шибитова Н. В., Шибитов Н. С., Коленчук С. В.</i> Реконструкция вентиляторной насадочной градирни.....	22
<i>Воротнева С. Б., Голованчиков А. Б., Дулькина Н. А.</i> Перспективные конструкции тепломассообменных аппаратов типа «труба в трубе».....	25
<i>Галуцак В. С., Копейкина Т. В.</i> Экологические аспекты применения светодиодных осветительных приборов.....	29
<i>Альбов Я. А., Голованчиков А. Б., Новиков М. Г., Васильева Е. В.</i> Исследование и оптимизация способа определения объема жидкости в закрытом резервуаре.....	33
<i>Вершинина И. П., Щукина А. Г.</i> Экспериментальное определение гидродинамических параметров процесса течения неньютоновской жидкости по поверхности центробежных насадок....	37
<i>Вершинина И. П., Щукина А. Г.</i> Технологический расчет процессов разделения неоднородных систем.....	39
<i>Рева С. Л., Васильев П. С., Рева Л. С., Голованчиков А. Б.</i> Методика обработки экспериментальных исследований капельного кипения.....	42
<i>Думский Ю. В., Чередникова Г. Ф., Думский С. Ю., Кузнецова Н. А., Кострубина Е. В.</i> Мягчители для регенерации резины: современные требования и фактическое качество.....	46
<i>Шагарова А. А., Голованчиков А. Б., Комкин П. А., Антонов В. В.</i> Экспериментальные исследования влияния электрического поля на активность катализатора.....	48
<i>Шишлянников В. В., Голованчиков А. Б., Дорохина Т. Б., Осетрова Т. А.</i> Экспериментальное исследование влияния формы, размеров и материала насадки на гидравлическое сопротивление.....	53
<i>Кац С. В., Павлов А. В.</i> Перспективные конструкции струйных насосов для неньютоновских жидкостей.....	55
<i>Ефимов М. В., Балашов В. А., Циплюк Д. С.</i> Исследование истечения жидкости через решетку в свободное пространство.....	58

<i>Меренцов Н. А., Балашов В. А., Голованчиков А. Б., Орлянкина Я. А.</i> Испарительное охлаждение капель жидкости в воздушном потоке.....	62
<i>Залипаева О. А., Трусов А. С.</i> Растекание жидкости по горизонтальной поверхности.....	65
<i>Яблонский В. О.</i> Выбор конструкции и режимов работы гидроциклона для очистки сточных вод производства ПВХ напорной флотацией.....	68
<i>Новиков А. Е., Аристова Ю. В., Пындак В. И.</i> Реологические свойства почв как высококонцентрированных дисперсных систем.....	71
<i>Кузнецов Н. А., Балашов В. А., Федянина Д. А.</i> Математическая модель гидродинамики радиального каталитического реактора.....	75
<i>Меренцов Н. А., Балашов В. А., Голованчиков А. Б., Орлянкина Я. А.</i> Экспериментальная установка для исследования тепломассообменных процессов в насадочных устройствах градирен.....	78
<i>Тишин О. А., Харитонов В. Н.</i> Анализ работы смесителя в «flowvision».....	80
<i>Лапина С. В.</i> Исследование работы роторного выпарного аппарата с использованием программной системы ARM Win Machine.....	84
<i>Островская Т. В., Девкин А. В., Тишин О. А.</i> Экспериментальное исследование процесса перемешивания в аппарате с мешалкой.....	88
<i>Голованчиков А. Б., Аристова Ю. В., Воротнева С. Б., Новиков А. Е.</i> Электролизер для очистки сточных вод от примесей.....	91
<i>Голованчиков А. Б., Дородникова И. М., Трусов А. С.</i> Моделирование удара автомобиля о вязкоупругое ограждение.....	93
<i>Голованчиков А. Б., Кузнецов А. В., Ефремов М. Ю., Трусов А. С.</i> Влияние давления на процесс осушки воздуха в неподвижном слое силикагеля.....	96
<i>Решетов В. Ф., Бадьин Ю. А.</i> Оценка степени износа высокотемпературных змеевиков печей с учетом фактических условий эксплуатации.....	100
<i>Бадьин Ю. А., Решетов В. Ф., Яцук В. М.</i> Метод совершенствования систем теплообмена на установках первичной переработки нефти.....	105
<i>Залипаева О. А., Трусов А. С., Аристова Ю. В.</i> Применение метода обобщенных координат к задаче о растекании вязкой жидкости.....	109
<i>Тишин О. А., Тимошин М. Ю.</i> Оценка эффективности энергопотребления в процессе синтеза метилмеркаптана.....	111
<i>Польская Н. Н., Самойленко А. Ю., Голованчиков А. Б., Делия С. В.</i> Влияние термической и депрессорной обработок на реологические свойства нефти.....	114

*В. М. Шаповалов*

**НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКА**

**Волжский политехнический институт (филиал)  
Волгоградского государственного технического университета**

Поставлена задача о работе теплообменника в нестационарных режимах. Теплообменник, как двухъемкостной объект, рассматривается в качестве системы, составленной из двух последовательно соединенных аperiодических звеньев. Записаны уравнения сохранения энергии. Представлены результаты численного анализа математической модели.

*Ключевые слова:* температура, время, расход, теплоемкость.

*V. M. Shapovalov*

**NONSTATIONARY REGIMES OF HEAT EXCHANGER**

**Volzhscky Polytechnical Institute (Branch)  
Volgograd State Technical University**

The task of the heat exchanger in non-stationary. A heat exchanger as dvuhemkostnoy object considered as a system composed of two series-connected aperiодic links. Write the equation of energy conservation. The results of numerical analysis of the mathematical model.

*Keywords:* temperature, time, flow rate, heat.

Теплообменники являются одним из самых распространенных аппаратов химической промышленности. Большинство из них работают в непрерывном режиме. Между тем в условиях эксплуатации имеют место регулярные отклонения параметров, таких как температура горячего и холодного теплоносителя, их расходы, состав теплоносителей и т. п. Для устойчивой работы теплообменников используется система автоматизации, которая снижает влияние внешних возмущений на выходные характеристики теплообменника.

Представляет интерес анализ влияния различного рода возмущений на выходные параметры аппарата. Изучение динамических характеристик теплообменника необходимо для обоснованного подбора приборов автоматического регулирования и их настройки [1].

Составим математическую модель работы теплообменника в неустановившихся режимах. Схема теплообменника типа «труба в трубе» представлена на рис. 1. Условно принято, что в центральную трубу направлен горячий теплоноситель. Расчетные выражения остаются в силе, если теплоносители поменять местами. Результаты можно распространить на кожухотрубчатый теплообменник, если под центральной трубой понимать трубный пучок. На рисунке показан случай противотока, но расчетные выражения применимы также и для прямотока.

Начальная температура горячего теплоносителя  $T_{2н}$ , конечная –  $T_{2к}$ . Соответственно начальная температура холодного теплоносителя  $T_{1н}$ , конечная –  $T_{1к}$ . Расход горячего теплоносителя  $G_2$ , холодного –  $G_1$ . Теплофизические свойства и коэффициенты теплоотдачи теплоносителей постоянны. Потери тепла не учитываем.

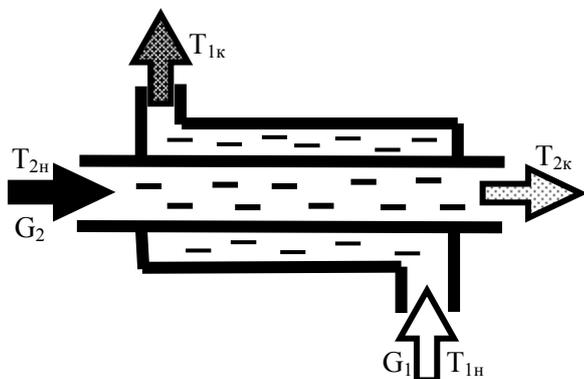


Рис. 1. Схема теплообменника

Уравнение теплопередачи:

$$\Phi = KF\Delta t_{cp}, \quad (1)$$

где  $\Phi$  – тепловой поток;  $K$  – коэффициент теплопередачи;  $F$  – площадь теплопередающей поверхности;  $\Delta t_{cp}$  – средняя разность температур.

При составлении теплового баланса в первом приближении будем считать, что температура в средней части горячего теплоносителя

$$\begin{bmatrix} \text{Скорость} \\ \text{изменения} \\ \text{энтальпии} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Приход тепла} \\ \text{с потоком} \\ \text{жидкости} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Отвод тепла} \\ \text{с потоком} \\ \text{жидкости} \end{bmatrix} \pm \begin{bmatrix} \text{Теплопередача} \\ \text{через стенку} \\ \text{трубы} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Знак плюс в уравнении (2) относится к холодному, а минус – к горячему теплоносителю. Потери в окружающую среду не учитываем.

Запишем уравнение (2) в развернутой форме.

Для внутренней трубы (горячий теплоноситель)

$$\frac{d}{dt} \left( \rho_2 C_2 V_2 \frac{T_{2н} + T_{2к}}{2} + C_m m_m \frac{T_{2с} + T_{1с}}{2} \right) = G_2 C_2 (T_{2н} - T_{2к}) - \Phi. \quad (3)$$

Для межтрубного пространства (холодный теплоноситель)

$$\frac{d}{dt} \left[ (\rho_1 C_1 V_1 + C_k m_k) \frac{T_{1к} + T_{1н}}{2} \right] = G_1 C_1 (T_{1н} - T_{1к}) + \Phi, \quad (4)$$

$$\text{где } T_{2с} = \frac{T_2^* (A_2 - 1) + T_1^*}{A_2}, \quad T_{1с} = \frac{T_1^* (A_1 - 1) + T_2^*}{A_1},$$

$$T_2^* = \frac{T_{2н} + T_{2к}}{2}, \quad T_1^* = \frac{T_{1н} + T_{1к}}{2}, \quad A_2 = 1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2 \delta}{\lambda},$$

$$A_1 = 1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \frac{\alpha_1 \delta}{\lambda}; \quad \rho_2, \rho_1, C_2, C_1 - \text{плотности и}$$

теплоемкости горячего и холодного теплоносителей;  $V_2, V_1$  – объемы жидкостей в трубном и межтрубном пространствах теплообменника;  $t$  – время;  $C_k, C_m$  – удельные теплоемкости материала корпуса и труб;  $m_k, m_m$  – масса корпуса и труб;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи со стороны холодного и горячего теплоносителей;  $\delta, \lambda$  – толщина стенки и коэффициент теплопроводности трубы. Здесь и ниже индексом 1 помечены величины, связанные с холодным теплоносителем, 2 – с горячим.

В уравнении (3) для низкого темпа изменения температуры внутри стенки трубы принято линейное распределение температур. Кривизной стенки трубы пренебрегаем [2]. В уравне-

равна среднему арифметическому значений температур  $T_{2н}$  и  $T_{2к}$ , то есть может быть представлена как  $0,5(T_{2н} + T_{2к})$  и аналогично – температура подогреваемой жидкости будет равна  $0,5(T_{1н} + T_{1к})$ . Уравнение теплового баланса для жидкостей в трубном и межтрубном пространстве может быть записано следующим образом:

нии (4) температура корпуса принята равной температуре теплоносителя в межтрубном пространстве. Численные оценки показывают, что теплоемкость корпуса и труб составляет порядка 10 % от теплоемкости жидкостей, заполняющих теплообменник. Поэтому далее для уменьшения громоздкости уравнений термическое влияние корпуса и труб не учитываем ( $m_k = m_m = 0$ ).

Возмущающими в уравнениях (3), (4) могут быть параметры  $T_{1н}(t), T_{2н}(t), G_1(t), G_2(t)$ . Соответственно, выходными параметрами являются  $T_{1к}(t), T_{2к}(t)$ . Далее рассмотрим случай постоянных расходов теплоносителей. Начальные температуры теплоносителей изменяются во времени.

В начальный момент времени температуры теплоносителей имели постоянные значения, и для стационарного состояния должны выполняться соотношения

$$G_2 C_2 (T_{2н}^0 - T_{2к}^0) = G_1 C_1 (T_{1к}^0 - T_{1н}^0),$$

$$G_2 C_2 (T_{2н}^0 - T_{2к}^0) = KF\Delta t_{cp}^0, \quad (5)$$

где  $T_{2н}^0, T_{2к}^0, T_{1к}^0, T_{1н}^0, \Delta t_{cp}^0$  – начальные (для  $t = 0$ ) стационарные значения и соответствующая средняя разность температур теплоносителей.

Введем безразмерные переменные и параметры

$$\{\theta_{2н}, \theta_{2к}, \theta_{1н}, \theta_{1к}, \theta_{2к}^0, \theta_{1к}^0\} = \frac{\{T_{2н}, T_{2к}, T_{1н}, T_{2к}^0, T_{1к}^0\}}{T_{2н}^0},$$

$$\tau = \frac{G_2 t}{\rho_2 V_2}, \quad (6)$$

$$L = \frac{KF}{G_2 C_2}, \quad D = \frac{G_1 \rho_2 V_2}{G_2 \rho_1 V_1}, \quad M = \frac{G_2 C_2}{G_1 C_1}, \quad \Phi_1 = \frac{\Phi}{T_{2н}^0}.$$

С учетом соотношений (6), уравнения (3), (4) примет вид

$$\frac{d\theta_{2к}}{d\tau} = -\frac{d\theta_{2н}}{d\tau} + 2\theta_{2н} - 2\theta_{2к} - 2L\Phi_1, \quad (7)$$

$$\frac{d\theta_{1к}}{d\tau} = -\frac{d\theta_{1н}}{d\tau} + 2D(\theta_{1н} - \theta_{1к}) + 2LMD\Phi_1,$$

где  $\Phi_1 = 0,5[(\theta_{2н} - \theta_{1н}) + (\theta_{2к} - \theta_{1н})]$  – при противотоке;  $\Phi_1 = 0,5[(\theta_{2н} - \theta_{1н}) - (\theta_{2к} - \theta_{1к})]$  – при прямотоке теплоносителей. Если отношение большей разности температур к меньшей превышает 2, то необходимо для  $\Phi_1$  использовать среднелогарифмический температурный напор.

Начальное условие для системы (7)

$$\tau = 0: \quad \theta_{2к} = \theta_{2к}^0, \quad \theta_{1к} = \theta_{1к}^0. \quad (8)$$

Уравнения (7), (8) применимы для анализа как противотока, так и прямотока, но при этом необходимо использовать соответствующую форму функции  $\Phi_1$ .

В безразмерной форме балансные уравнения (5) имеют вид

$$M(\theta_{2н}^0 - \theta_{2к}^0) = \theta_{1к}^0 - \theta_{1н}^0, \quad \theta_{2н}^0 - \theta_{2к}^0 = L\Phi_1^0, \quad (9)$$

где  $\Phi_1^0$  – начальная безразмерная средняя разность температур.

Для противотока

$$\Phi_1^0 = 0,5(\theta_{2н}^0 - \theta_{1н}^0 + \theta_{2к}^0 - \theta_{1к}^0).$$

Для малых температурных напоров при противотоке систему уравнений (7) можно записать в форме уравнения вынужденных колебаний для температуры  $\theta_{2к}$

$$\theta_{2к}'' + a\theta_{2к}' + b\theta_{2к} = f(\tau), \quad (10)$$

где  $a = L+2+2D+DML$ ,  $b = 2D(2+L+LM)$ ,  $f(\tau) = -(L-2+2D+DML)\theta_{2н}' - 2D(L-2-ML)\theta_{2н} - \theta_{2н}''$ .

Здесь и ниже штрих означает производную по  $\tau$ .

Начальное условие для уравнения (10)

$$\tau = 0: \quad \theta_{2к} = \theta_{2к}^0, \quad \theta_{2к}' = \theta_{2к}'^0. \quad (11)$$

Решение задачи (10), (11) имеет вид

$$\theta_{2к} = \left( \frac{\lambda + a}{2\lambda} \theta_{2к}^0 + \frac{\theta_{2к}'^0}{\lambda} \right) e^{\frac{\lambda - a}{2}\tau} + \theta + \left( \frac{\lambda - a}{2\lambda} \theta_{2к}^0 - \frac{\theta_{2к}'^0}{\lambda} \right) e^{\frac{-\lambda - a}{2}\tau} + \frac{2}{\lambda} \int_0^\tau f(\xi) sh \left[ \frac{\lambda}{2}(\tau - \xi) \right] e^{\frac{a}{2}(\xi - \tau)} d\xi,$$

где  $\lambda = \sqrt{a^2 - 4b}$ ;  $\theta_{2к}'^0$  – находится из первого уравнения (7).

Всегда выполняется условие  $\lambda > 0$ , поэтому в системе невозможно возникновение колебаний.

Температуру на выходе холодного теплоносителя можно найти по формуле:

$$\theta_{1к} = \frac{1}{L}(\theta_{2н}' + \theta_{2к}') - \frac{2}{L}(\theta_{2н} - \theta_{2к}) + \theta_{2н} + \theta_{2к} - \theta_{1н}.$$

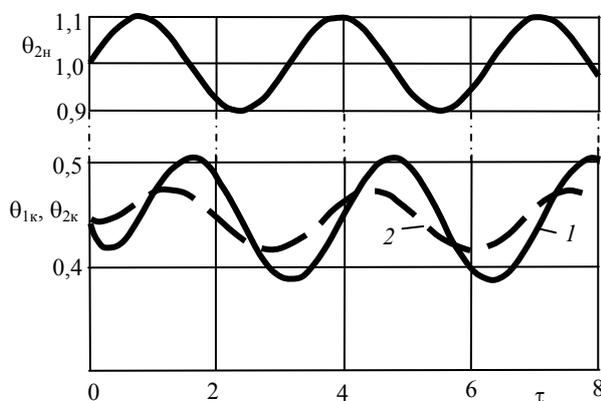


Рис. 2. Синусоидальное возмущение начальной температуры горячего теплоносителя:  
1 –  $\theta_{1к}$ , 2 –  $\theta_{2к}$

Согласно теории автоматического регулирования, объекты, описываемые дифференциальным уравнением второго порядка, называются двухъёмкостными. Теплообменник, как двухъёмкостной объект, можно рассматривать в качестве системы, составленной из двух последовательно соединённых апериодических звеньев. Так как апериодические звенья относятся к устойчивым, то и двухъёмкостные объекты также устойчивы, то есть обладают самовывравниванием [1].

Проанализируем с помощью уравнений (7), (8) динамические свойства теплообменника для следующих условий. Метилловый спирт (100 %) нагревается в трубном пространстве одноходового противоточного кожухотрубчатого теплообменника от 15 до 40 °С. Теплообменник состоит из труб диаметром 25×2 мм. Значения параметров стационарной работы теплообменника [3]:

$$F = 94,93 \text{ м}^2; \quad T_{2к}^0 = 40 \text{ °С}; \quad T_{2н}^0 = 90 \text{ °С};$$

$$T_{1н}^0 = 15 \text{ °С}, \quad T_{1к}^0 = 40 \text{ °С}; \quad G_1 = 22,6 \text{ кг/с};$$

$$G_2 = 6,796 \text{ кг/с}; \quad K = 400 \text{ Вт/м}^2\text{К};$$

$$\rho_1 = 785 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$V_2 = 36,735 \text{ м}^3; \quad V_1 = 45,03 \text{ м}^3;$$

$$C_1 = 2520 \text{ Дж/кгК}; \quad C_2 = 4190 \text{ Дж/кгК}.$$

Используя соотношения (5), (6), найдем безразмерные параметры процесса:  $\theta_{2н}^0 = 1$ ;  $\theta_{2к}^0 = 0,4444$ ;  $\theta_{1к}^0 = 0,4444$ ;  $\theta_{1н}^0 = 0,1666$ ;  $L = 1,334$ ;  $D = 106,38$ ;  $M = 0,5$ . Отметим, что выполнение соотношений (9) обязательно.

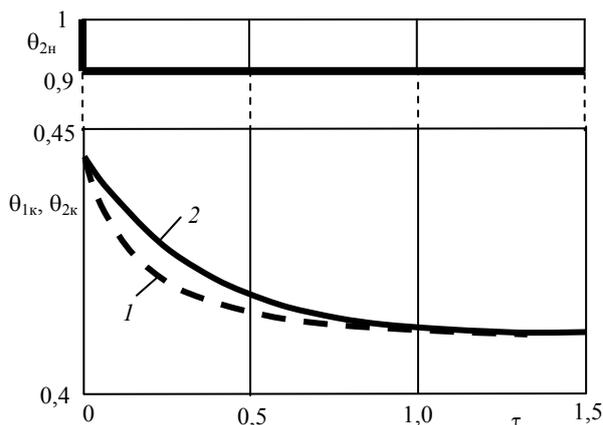


Рис. 3. Ступенчатое возмущение начальной температуры горячего теплоносителя:  
1 –  $\theta_{1к}$ , 2 –  $\theta_{2к}$

Рассмотрен случай синусоидального изменения температуры на входе горячего теплоносителя по закону  $\theta_{2н} = 1 + 0,1 \sin(2\tau)$ . На рис. 2 представлены результаты расчета уравнений (7), (8). В верхней части рисунка показан сигнал возмущения, т. е. функция  $\theta_{2н}(\tau)$ . Из рисунка видно, что стабилизация формы выходного сигнала наступает при  $\tau \geq 2$ . Выходной сигнал как по линии горячего теплоносителя, так и холодного имеет синусоидальную форму, но с фазовым смещением относительно входного сигнала, что обусловлено тепловой инерцией объекта.

На рис. 3 представлены результаты анализа математической модели при ступенчатом изме-

нении (понижении) начальной температуры горячего теплоносителя:  $\tau = 0, \theta_{2н}(\tau) = 1$ ;  $\tau > 0, \theta_{2н}(\tau) = 0,9$ . Вид сигнала возмущения представлен в верхней части графика. Продолжительность переходного процесса составляет порядка  $\tau = 1$ . Как и на рис. 2 температура холодного теплоносителя (линия 1) изменяется быстрее, чем горячего (линия 2).

Качественный характер переходных процессов в системе существенно зависит от численных значений и соотношения безразмерных параметров  $L, D, M$ . Быстрое начальное изменение температуры теплоносителей (рис. 2) вероятно связано с исходными допущениями при постановке задачи, согласно которым области, занимаемые теплоносителями рассматривались как зоны идеального перемешивания.

Продолжительность переходного процесса в объекте составляет  $\tau_n \approx 1$ . То есть соизмеримо с временем пребывания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пантаев, Н. Ф. Основы теории автоматического регулирования и авторегуляторы / Н. Ф. Пантаев, В. Г. Дианов. – М.: Недра, 1965. – 344 с.
2. Исаченко, В. П. Теплопередача: учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, В. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
3. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – М.: ООО ИД «Альянс», 2007. – 576 с.

УДК 535.135:542.47

*В. М. Шаповалов*

### О ВАЛКОВОМ ТЕЧЕНИИ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ФРИКЦИИ

Волжский политехнический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета

Представлен теоретический анализ валкового течения вязкой жидкости в условиях отрицательной фрикции. Получены выражения для компонент скорости и энергосиловых характеристик.

*Ключевые слова:* валки, вязкость, давление, фрикция.

*V. M. Shapovalov*

### ON ROLLER FLOW AT NEGATIVE FRICTIONS

Volzhsky Polytechnical Institute (Branch)

Volgograd State Technical University

The theoretical analyses are shaky currents of a viscous liquid in conditions negative sliding is submitted. Expressions for a component of speed and энергосиловых characteristics are received.

*Keywords:* are shaky, viscosity, pressure, sliding.

В традиционных валковых машинах используется разнонаправленное вращение валков и фрикция либо отсутствует, либо положи-

тельна. При однонаправленном вращении валков следует вести речь об отрицательной фрикции. Насколько известно автору, работа вал-

ковых машин при отрицательной фрикции в литературе не рассматривалась. Между тем такое течение может найти применение в вискозиметрии или перемешивании гетерогенных наполненных систем.

На рис. 1 представлены кинематические схемы традиционной валковой машины с положительной фрикцией (а) и вариант машины с отрицательной фрикцией (б). Валки имеют одинаковые диаметры, но отличаются окружной скоростью.

Крутящий момент от привода в обеих схемах поступает на левый валок. На рис. 1, а позицией  $z_1$  указана делительная окружность зубчатого колеса приводного валка, а позицией  $z_2$  – делительная окружность зубчатой шестерни второго валка. Различный диаметр (число зубьев) зубчатых колес обеспечивает различную окружную скорость валков  $I$ .

На рис. 1, б позициями  $z_1, z_2$  указаны делительные окружности зубчатых колес валков, а позицией  $z_3$  – зубчатая шестерня, изменяющая направление вращения второго валка. Окружные скорости  $V_1$  и  $V_2$  в минимальном зазоре имеют встречное направление. В случае равенства числа зубьев (диаметров) шестерен  $z_1$  и  $z_2$  фрикция будет равна минус единице ( $V_2 = -V_1$ ). Соответственно, в случае различия шестерен  $z_1$  и  $z_2$  фрикция, оставаясь отрицательной, будет отличаться от минус единицы.

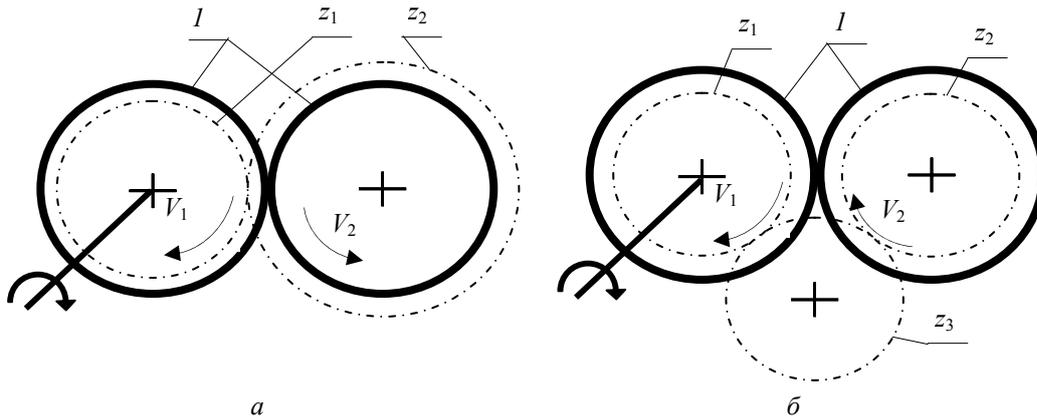


Рис. 1. Кинематические схемы валковых машин с положительной (а) и отрицательной (б) фрикцией:  
 $I$  – валки,  $z_1, z_2, z_3$  – зубчатые колеса и шестерни

Схема рассматриваемого течения представлена на рис. 2. Валки имеют одинаковый радиус. Учитываем силы тяжести и вязкого трения. Давление однородно по ширине зазора. Валки имеют близкие, но незначительно различающиеся окружные скорости ( $V_1 \neq V_2$ ). Объем жидкости, заключенной между валками, постоянен. Для выяснения основных гидродинамических закономерностей рассматривается течение ньютоновской жидкости в рейнولدсовом приближении.

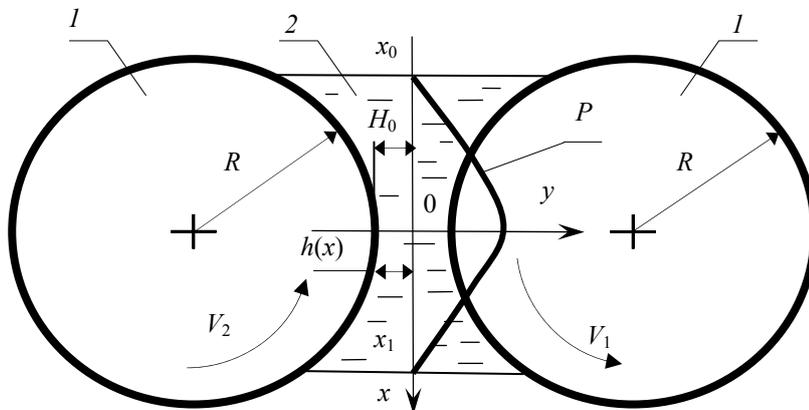


Рис. 2. Схема течения и система координат:  
 $1$  – валки,  $2$  – жидкость

Течение описывается системой уравнений

$$\frac{dp}{dx} = \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \rho g, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$Q = \int_{-h}^h v_x dy, \quad (2)$$

$$y = h, \quad v_x = V_1, \quad (3)$$

$$y = -h, \quad v_x = -V_2, \quad (4)$$

$$x = x_0, \quad p = 0, \quad (5)$$

$$x = x_1, \quad p = 0, \quad (6)$$

где  $Q$  – постоянная (объемный расход жидкости, приходящийся на один метр длины валка);  $\rho$ ,  $\eta$  – плотность и вязкость жидкости;  $x$ ,  $y$  – координаты;  $v_x$  – компонента скорости;  $p$  – давление;  $x_0$ ,  $x_1$  – координаты начала и конца зоны течения.

Кинематические условия для поверхностей валков записаны в предположении следующих соотношений для компонент скорости:

$$y = h(x), \quad v_x = V \cdot \cos \alpha \approx V_1; \quad y = -h(x), \\ v_x = -V_2 \cdot \cos \alpha \approx -V_2.$$

Учитывались асимптотические свойства:

$$\sin \alpha = x/R, \quad \cos \alpha \approx 1 \text{ при } |x/R| \ll 1.$$

Согласно первому уравнению в (1) постоянная составляющая давления не оказывает влияния на течение, поэтому в условиях (5), (6) полагаем  $p = 0$ . Вертикальные координаты ( $x = x_0$ ) и ( $x = x_1$ ) характеризуют положение свободных поверхностей жидкости. Они зависят от организации загрузки валков и объема жидкости. В первом приближении будем считать их горизонтальными.

Проинтегрировав уравнение движения (1), с учетом условий прилипания (3), (4), получим выражение для осевой скорости

$$v_x = \left( \frac{dp}{dx} - \rho g \right) \frac{h^2 - y^2}{2\eta} + \frac{(V_1 + V_2)}{2h} y + \frac{(V_1 - V_2)}{2}. \quad (7)$$

Выполнив интегрирование в (2) с учетом (7) имеем

$$Q = (V_1 - V_2)h - \frac{2h^3}{3\eta} \left( \frac{dp}{dx} - \rho g \right). \quad (8)$$

Поскольку  $Q = \text{const}$ , из (8) запишем уравнение для давления

$$\frac{dp}{dx} = \rho g + \frac{3\eta(V_1 - V_2)}{2h^2} - \frac{3Q\eta}{2h^3}.$$

Проинтегрировав это уравнение, с учетом условия (5), найдем выражение для давления

$$p = \rho g(x - x_0) + \frac{3\eta(V_1 - V_2)}{2} \int_{x_0}^x \frac{dx}{h^2} - \frac{3Q\eta}{2} \int_{x_0}^x \frac{dx}{h^3}. \quad (9)$$

Рассматривая совместно условие (6) и выражение (9), получим уравнение для расхода

$$Q = \frac{2\rho g(x_1 - x_0)}{3\eta} \left( \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{h^3} \right)^{-1} + \\ + (V_1 - V_2) \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{h^2} \left( \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{h^3} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Расход жидкости характеризует направление и скорость вертикального перемещения заключенного между валками объема жидкости. Возможны три варианта поведения материала.

1. Расход жидкости равен нулю ( $Q = 0$ ) – вертикальное положение жидкости сохраняется.

2. Преобладают силы тяжести над силами вязкого трения, кроме того  $V_1 > V_2$ , так что ( $Q > 0$ ) и жидкость перемещается вниз.

3. Преобладает кинематическая «подъемная сила  $V_1 < V_2$ », так что  $Q < 0$  и жидкость перемещается вверх.

Согласно полученному выражению (10) расход жидкости складывается из гравитационной составляющей (первое слагаемое правой части выражения (10)) и кинематической – второе слагаемое. Численной характеристикой соотношения указанных составляющих служит критерий Стокса ( $St = \rho g H_0^2 / (\eta V_1)$ ). Так, если материал резина ( $\eta = 10^5$  Па·с,  $\rho = 1600$  кг/м<sup>3</sup>,  $H_0 = 2 \cdot 10^{-3}$  м,  $V_1 = 0,1$  м/с) то  $St = 6,4 \cdot 10^{-6}$ . Следовательно, проявление сил тяжести, исчезающее мало, и их в случае высоковязких жидкостей можно не учитывать.

Для высоковязких жидкостей формулы (9), (10) примут вид

$$p = (V_1 - V_2) \frac{3\eta}{2} \left[ \int_{x_0}^x \frac{dx}{h^2} - \int_{x_0}^x \frac{dx}{h^3} \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{h^2} \left( \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{h^3} \right)^{-1} \right], \\ Q = (V_1 - V_2) \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{h^2} \left( \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{h^3} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Если окружные скорости валков равны ( $V_1 = V_2$ ), то согласно выражению (11) расход будет равен нулю, и жидкость остается на постоянном уровне. Кроме того, согласно выражению (11) давление в зазоре, а следовательно, и распорное усилие, будут равны нулю. Указанное свойство рассматриваемого течения принципиально отличает его от традиционного валкового течения с положительной фрикцией.

В рассматриваемом течении жидкость подвергается более интенсивному механическому воздействию, чем в обычных валках. Так, например, в случае  $V_1 = V_2$  время пребывания жидкости в зазоре бесконечно. При выполнении условия  $V_1 > V_2$ , жидкость перемещается вниз (рис. 2). Представляет интерес найти время пребывания жидкости в зазоре.

Пусть в начальный момент времени ( $t = 0$ , где  $t$  – время) координата свободной верхней поверхности жидкости составляет  $x_0 = x_{00}$ , соответственно в начальный момент координата нижней поверхности  $x_1 = x_{10}$ . За время  $dt$  верхний уровень понизится на величину  $dx_0$ . Элементарный объем жидкости составит  $2hdx_0$ . Запишем условие сохранения объема жидкости:

$$2hdx_0 = Qdt. \quad (12)$$

Начальное условие для уравнения (12)

$$t = 0, \quad x_0 = x_{00}. \quad (13)$$

Разделив переменные в уравнении (12) и проинтегрировав с учетом соотношения (11) и условия (13), найдем время перемещения верхнего уровня жидкости от  $x_{00}$  до  $x_0$  ( $|x_{00}| > |x_0|$ )

$$t = 2 \int_{x_0}^{x_{00}} \frac{h(x_0) dx_0}{Q} = 2 \int_{x_0}^{x_{00}} \left[ (V_1 - V_2) \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{h^2} \right]^{-1} \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{h^3} h(x_0) dx_0. \quad (14)$$

В процессе перемещения изменяется и нижний уровень жидкости, то есть  $x_1(t)$ . Связь нижнего и верхнего уровней получим из условия сохранения объема жидкости

$$V_+ = 2 \int_{x_0}^{x_1} h(x) dx = const. \quad (15)$$

Согласно выражению (15)  $x_1 = x_1(x_0, V_+)$ .

Введем безразмерные параметры и переменные:

$$\{\xi, \xi_0, \xi_1, \xi_{00}\} = \frac{\{x, x_0, x_1, x_{00}\}}{\sqrt{2RH_0}}, \quad V_- = \frac{V_+}{H_0 \sqrt{2RH_0}},$$

$$\{\tau, \tau^*\} = \frac{\{t, t^*\} (V_1 - V_2)}{\sqrt{2RH_0}}. \quad (16)$$

Используем параболическую аппроксимацию поверхностей валков

$$h = H_0 (1 + \xi^2). \quad (17)$$

Проинтегрировав (15) с учетом (16), (17), получим

$$V_- = 2(\xi_1 - \xi_0) + \frac{2}{3}(\xi_1^3 - \xi_0^3). \quad (18)$$

Решение кубического уравнения (18) имеет вид

$$\xi_1(\xi_0) = 2sh \left\{ \frac{1}{3} \operatorname{arcsch} \left[ \frac{1}{2} \left( 3\xi_0 + \xi_0^3 + \frac{3}{2}V_- \right) \right] \right\}. \quad (19)$$

Расчетная формула (14) с учетом соотношений (16), (17) имеет вид

$$\tau = 2 \int_{\xi_0}^{\xi_1} \int_{\xi_0}^{\xi_1} \frac{d\xi}{(1 + \xi^2)^3} \left[ \int_{\xi_0}^{\xi_1} \frac{d\xi}{(1 + \xi^2)^2} \right]^{-1} (1 + \xi_0^2) d\xi_0. \quad (20)$$

Рассмотрим вариант перемещения жидкости представленный на рис. 3. Жидкость – заштрихованная область. Для начального положения жидкости (рис. 3, а) имеем условие

$$t = 0, \quad x_0 = x_{00}, \quad x_1 = x_{10} = 0.$$

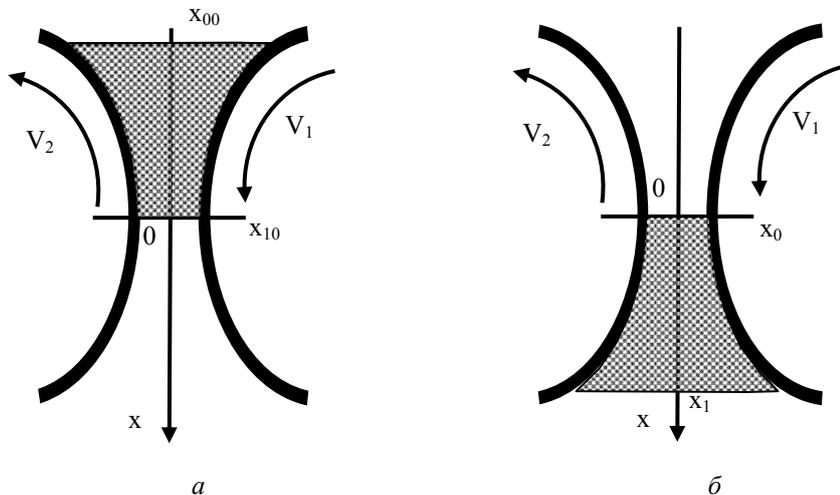


Рис. 3. Варианты вертикального положения жидкости:  
а – начальное, б – конечное

Конечное положение жидкости показано на рис. 3, б. При этом будем условно считать, что жидкость под действием сил тяжести выпадает из зазора. Этому моменту времени  $t^*$  отвечает условие

$$t = t^*, \quad x_0 = 0, \quad x_1 = -x_{00}.$$

Последнее равенство следует из геометрической симметрии. Задача состоит в определении продолжительности технологического процесса перемешивания, то есть времени  $t^*$ .

В безразмерной форме указанные условия имеют вид

$$\begin{aligned} \tau = 0, \quad \xi_0 = \xi_{00}, \quad \xi_1 = \xi_{10} = 0, \\ \tau = \tau^*, \quad \xi_0 = 0, \quad \xi_1 = -\xi_{00}. \end{aligned} \quad (21)$$

При этом безразмерный объем жидкости, вычисленный для начального момента времени, составит

$$V_- = -2\xi_{00} - \frac{2}{3}\xi_{00}^3.$$

На рис. 4 представлены результаты расчета зависимости продолжительности процесса ( $\tau^*$ ) от начального уровня жидкости ( $\xi_{00}$ ), выполненные по формулам (20), (21). Из графика видно, что с повышением начального уровня время пребывания жидкости в зазоре увеличивается.

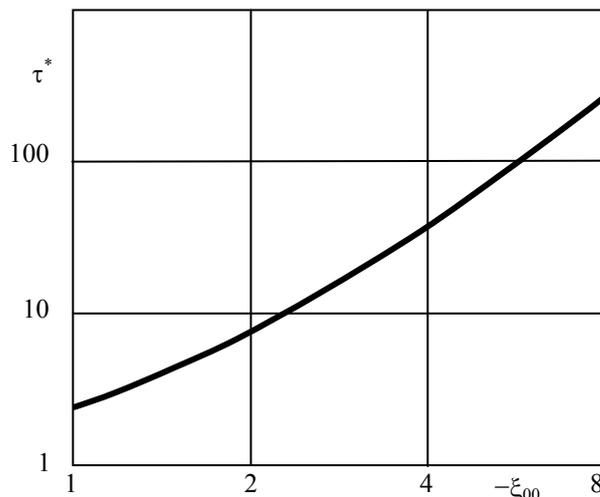


Рис. 4

Найдем потребляемую мощность для случая  $V_1 = V_2$ ,  $Q = 0$ ,  $p = 0$

$$N = \eta \int_{x_0}^{x_1} \int_{-h}^h \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 dy dx = 2\eta V_1^2 \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{h}.$$

Далее необходимо задать уравнение поверхности валка  $h(x)$ .

УДК 532.135

*А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Л. А. Ильина*

### МОДЕЛЬ ДВУХСЛОЙНОГО КОЛЬЦЕВОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ КРИВОЙ С МАЛОВЯЗКИМ ПРИСТЕННЫМ СЛОЕМ В ТРУБЕ

Волгоградский государственный технический университет

Проведены моделирование двухслойного кольцевого течения вязкой жидкости с маловязким пристенным слоем.

*Ключевые слова:* маловязкий пристенный слой, пограничный слой, градиент давления.

*A. B. Golovanchicov, A. V. Ilin, L. A. Iliina*

### THE MODEL FORWARD MOVEMENT OF THE TWO IMMISCIBLE PIPE LIQUIDS

Volgograd State Technical University

The modeling and calculation of the circular axled fluid flow of the two immiscible pipe liquids.

*Keywords:* low-viscosity wall layer, boundary layer, gradient of pressure.

Рассмотрим кольцевое течение двух несмешивающихся жидкостей в трубопроводе радиусом  $R$ , когда в ядре потока движется основная жидкость с произвольной реологической кривой течения  $\tau = \tau(\dot{\gamma})$  (рис. 1), а в пристенном слое маловязкая ньютоновская жидкость.

Известно решение задачи, когда жидкость с произвольной реологической кривой течения

движется в трубопроводе одна под действием заданного градиента давления  $\Delta p/l$ , то есть занимает все сечение трубопровода радиуса  $R$  [1].

Используя алгоритм расчета зависимости расхода от давления, приведенный авторами в работе [1], дополним его с учетом кольцевого течения маловязкой жидкости в пристенном слое (рис. 2) [2].

По заданному градиенту давления  $\Delta p/l$  и радиусу трубопровода  $R$  определяем касательное напряжение на стенке трубопровода, которое как и вся эпюра касательных напряжений не зависит от реологических свойств перекачиваемых жидкостей (одной или нескольких) (рис. 1 и 2) [3–6]

$$\tau_{\omega} = \frac{\Delta p}{2l} R. \quad (1)$$

Для случая, когда маловязкая жидкость одна течет во всем сечении трубопровода

$$q_{2\max} = \frac{\pi}{8} \left( \frac{\Delta p}{l} \right) \frac{R^4}{\mu_2}. \quad (2)$$

Задаемся кольцевой границей радиуса обеих жидкостей  $R_2 < R_w$ .

Тогда расход вязкой жидкости в пристенном слое определяется формулой

$$Q_2 = \left( \frac{\pi}{8} \right) \left( \frac{\Delta p}{l} \right) (R_w^2 - R_r^2)^2 / \mu^2. \quad (3)$$

Скорость на границе раздела фаз

$$V_r = 0,25 \left( \frac{\Delta p}{l} \right) (R_w^2 - R_r^2) / \mu^2, \quad (4)$$

а касательное напряжение

$$\tau_r = 0,5 \left( \frac{\Delta p}{l} \right) R_r. \quad (5)$$

Расход основной высоковязкой жидкости, которая течет в ядре потока в границах от оси,  $r = 0$  до  $r = R_r$  определяется по формуле

$$Q_1 = 2\pi \int_0^{R_r} V_1 r dr.$$

Во избежание расчета профиля скорости  $V_1 = V_1(r)$  воспользуемся формулой интегрирования по частям

$$\int_0^{R_r} V_1 r dr = V_1 \frac{r^2}{2} \Big|_0^{R_r} - \int_0^{V_2(R_r)} \frac{r^2}{2} dv_1,$$

где  $V_1 = V$ ,  $r dr = du$  и  $u = r^2/2$ , а  $dv = dv_1$ ;

при  $r = 0$ ,  $V_1 = V_{1\max}$ , но  $V_1 r^2/2 = 0$ ;

при  $r = R_r$   $V_1 = V_2(R_r) = V_r$ , то есть

$$Q_1 = -\pi \int_0^{V_r} r^2 dv_1 + \pi V_r R_r^2.$$

Знак «минус» учитывает, что при изменении  $r$  от 0 до  $R_r$  скорость уменьшается и  $dv_1$  — отрицательно.

Так как  $dv_1 = -\dot{\gamma}_1 dr$ ,  $r = \frac{2\tau}{\Delta p/l}$ ,  $dr = \frac{2d\tau}{(\Delta p/l)}$

получаем формулу для расчета расхода основной жидкости [7]

$$Q_1 = \frac{8\pi}{(\Delta p/l)^3} \int_0^{\tau_r} \tau^2 \dot{\gamma} d\tau + \pi V_r R_r^2. \quad (6)$$

Если слой маловязкой жидкости отсутствует, то расход основной жидкости, занимающей все сечение трубопровода при заданных градиенте давления и реологической кривой

$$q = \frac{8\pi}{(\Delta p/l)^3} \int_0^{\tau_{\omega}} \tau^2 \dot{\gamma} d\tau, \quad (7)$$

где  $\tau_{\omega}$  определяется по формуле (1).

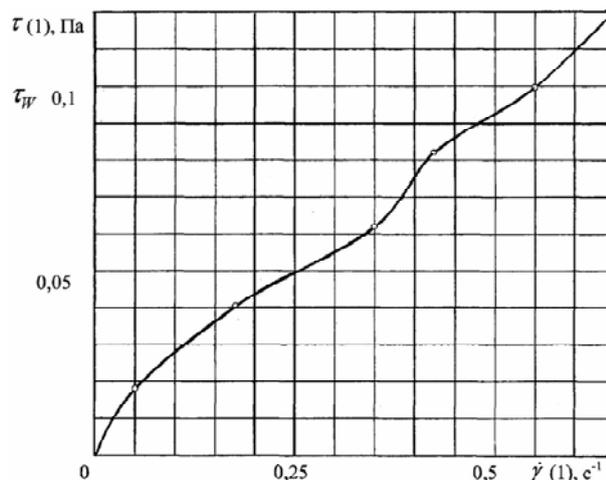


Рис. 1. Реологическая кривая течения перекачиваемой жидкости

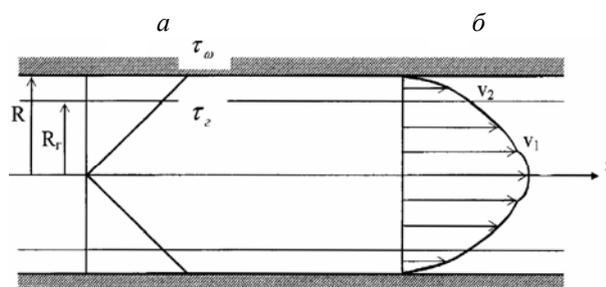


Рис. 2. Кольцевое течение двух несмешивающихся жидкостей в трубопроводе: а — эпюра касательных напряжений; б — профиль скоростей

Меняя величину радиуса  $R_r$  получаем для каждого его значения величины  $Q_2, V_r, \tau_r, Q_1$  [8–11].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. Моделирование гидромеханических процессов / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симонов. — Волгоград: ИПК «Царицын», 1995. — С. 121.
2. Голованчиков, А. Б. Математическое моделирование изобретений в химической технологии: учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, Н. В. Тябин. — Волгоград: Волгоградская правда, 1987. — С. 110.

3. Голованчиков, А. Б. Моделирование течения высоковязкой жидкости с вязкопластичным пограничным слоем в трубе / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, А. В. Ильин, Н. А. Дулькина // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – Вып. 1. – № 11. – С. 46–48.

4. Голованчиков, А. Б. Моделирование и расчет трубчатого реактора с неьютоновской реакционной массой и маловязким пристенным слоем / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, А. В. Ильин, Л. А. Ильина // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 12. – С. 49–55.

5. Голованчиков, А. Б. Моделирование работы шнековых реакторов с маловязким пристенным слоем / А. Б. Голованчиков, А. А. Шагарова, Н. А. Дулькина, А. В. Кузнецов // Изв. ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – Т. 86. – № 1. – С. 37–44. (Сер. Актуальные проблемы управления вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 6).

6. Голованчиков, А. Б. Вращательно-поступательное кольцевое движение двух несмешивающихся жидкостей в трубе / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, Н. А. Дулькина // Изв. ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – № 2. – С. 5–8. (Сер. Актуальные проблемы

управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 2).

7. Голованчиков, А. Б. Теоретические основы течения жидкостей в трубопроводе с маловязким пограничным слоем: монография / А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Л. А. Ильина; ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – С. 92.

8. Пат. 2262035 РФ МПК 7 F 17 D 1/14, F 15 D 1/02. Способ перемещения вязких нефтей и нефтепродуктов / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, А. В. Ильин, Н. А. Дулькина, А. Б. Дулькин, Е. Н. Конопальцева; ВолгГТУ. – 2005.

9. Пат. № 2285198 РФ МПК F 17 D 1/20, F 15 D 1/06. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, А. В. Ильин; ВолгГТУ. – 2006.

10. Пат. № 2307975 РФ, МПК F 17 D 1/16. Способ транспорта жидкостей по трубопроводу / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, А. В. Ильин, Н. А. Дулькина, А. Б. Дулькин, Т. С. Зудина; ВолгГТУ. – 2007.

11. Пат. № 2334161 РФ, МПК F 17 D 1/14, F 15 D 1/02. Способ перемещения высоковязких жидкостей по трубопроводу / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, А. В. Ильин, Н. А. Дулькина, Т. В. Разумная; ВолгГТУ. – 2008.

УДК 621.527.4

*А. В. Павлов, В. М. Ящук*

## РАСЧЕТ МАССООБМЕНА В ЖИДКОСТНО-ГАЗОВОМ ЭЖЕКТОРЕ С ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

Предложена методика расчета массообмена в жидкостно-газовом эжекторе, используемого в качестве абсорбционного аппарата.

*Ключевые слова:* массообмен, абсорбция, эжектор, концентрация, поглощаемый компонент, коэффициент массопередачи, поверхность контакта фаз.

*A. V. Pavlov, V. M. Yashchuk*

## THE DESIGN PROCEDURE OF MASS TRANSFER IN LIQUID-GAS EJECTOR WITH THE RECTILINEAR MIXING CHAMBER

Volgograd State Technical University

The design procedure of mass transfer in liquid-gas ejector used as absorption device is offered.

*Keywords:* Mass transfer, absorption, ejector, concentration, an absorbed component, overall coefficient of mass transfer, interfacial surface.

В работе [1] была предложена математическая модель жидкостно-газового эжектора с прямолинейной камерой смешения, позволяющие рассчитать гидродинамические параметры его работы. Предлагается использовать данный аппарат для проведения абсорбционных процессов.

Для оценки производительности и возможности обеспечения максимальной эффективности массообмена необходимо иметь математическую модель процесса, описывающую основные его закономерности и связывающую параметры переноса массы с гидродинамическими характеристиками.

Рассмотрим массообмен между газовым по-

током и жидкостью после их взаимодействия в камере смешения эжектора без продольного перемешивания (режим идеального вытеснения) для малых массовых потоков, когда изменением скоростей потоков, физических свойств фаз, коэффициентов массоотдачи и поверхности контакта фаз по длине камеры смешения можно пренебречь.

В смешанном потоке происходит поглощение распределенного компонента жидкостью, то есть осуществляется процесс абсорбции.

Будем считать, что основной массообмен происходит в смешанном газо-жидкостном потоке, то есть в пределах  $L_T < l < L$ .

Здесь  $L_T$  – координата начала зоны массообмена, определяемая из гидродинамического расчета эжектора [1],  $L$  – длина камеры смешения эжектора.

Дифференциальные уравнения массообмена для элемента длины зоны массообмена  $dl$ , отнесенные к сплошной фазе имеют вид [2]

$$dM = \beta_y S_{inf} (y - y^*) dl \quad dM = \beta_x S_{inf} (x^* - x) dl, \quad (1)$$

где  $M$  – массовый расход поглощаемого компонента,  $y$ ,  $x$  – текущая концентрация поглощаемого компонента в газовой и жидкой фазе смешанного потока, соответственно,  $y^*$ ,  $x^*$  – равновесная концентрация поглощаемого компонента в газовой и жидкой фазе смешанного потока, соответственно,  $\beta_y$ ,  $\beta_x$  – коэффициенты массоотдачи со стороны газовой и жидкой фаз, соответственно,  $S_{inf}$  – поверхность контакта фаз.

Концентрации  $y$  и  $x$  связаны уравнением материального баланса

$$dM = Q_g dy = -Q_l dx, \quad (2)$$

где  $Q_g$  и  $Q_l$  – объемные расходы газовой и жидкой фаз, соответственно.

Исключив из уравнений (2.1) и (2.2)  $dM$  получим

$$\frac{dx}{x - x^*} = \frac{\beta_x S_{inf}}{Q_l} dl, \quad \frac{dy}{y^* - y} = \frac{\beta_y S_{inf}}{Q_g} dl \quad (3)$$

Интегрируя данные уравнения в пределах зоны массообмена  $L_T < l < L$ , получим уравне-

$$S_{inf} = A_2 F_3 \left( \frac{X_g}{1 - X_g} \right)^{b_1} \left( \frac{(L - L_T) \Delta P}{w_g \mu_g} \right)^{b_2} \left( \frac{\sigma}{\rho_l g (L - L_T)} \right)^{b_3} \left( \frac{d_0}{D} \right)^{b_4} \left( \frac{D}{L} \right)^{b_5}, \quad (8)$$

Коэффициенты  $A_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  рассчитываются путем обработки опытных данных по определению поверхности контакта фаз.

В уравнении (8)  $F_3 = \frac{\pi D^2}{2}$  – площадь поперечного сечения камеры смешения,  $D$  – диаметр камеры смешения,  $d_0$  – диаметр сопла,  $X_g$  – расходное массовое газосодержание,  $\Delta P$  – перепад давления для двухфазного потока [1],  $w_g$  – скорость,  $\mu_g$  – вязкость газовой фазы, соответственно,  $\rho_l$  – плотность газового потока,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $g$  – ускорение силы тяжести.

Если известна зависимость  $x^* = f(y)$  или  $y^* = f(x)$  в виде формулы, то интегралы в (4) и (5) могут быть взяты аналитически, либо рассчитываются в общем случае численным или графическим методом. В результате расчета

ния описывающие распределение концентрации поглощаемого вещества по ее длине

$$\int_{x_1}^x \frac{dx}{x - x^*} = \frac{\beta_x S_{inf}}{Q_l} (L - L_T) \quad (4)$$

$$\int_{y_1}^y \frac{dy}{y^* - y} = \frac{\beta_y S_{inf}}{Q_g} (L - L_T) \quad (5)$$

где  $y_l$ ,  $x_l$  – начальные концентрация поглощаемого компонента в газовой и жидкой фазе смешанного потока, соответственно.

Коэффициенты массоотдачи  $\beta_y$  и  $\beta_x$  зависят от режима движения газожидкостного потока в камере смешения и могут быть найдены из критериальных уравнений

$$Sh_y = A Re_y^b Sc_y^c, \quad (6)$$

$$Sh_x = A_1 Re_x^{b_1} Sc_x^{c_1}. \quad (7)$$

Здесь  $A$ ,  $A_1$ ,  $b$ ,  $b_1$ ,  $c$ ,  $c_1$  – коэффициенты, определяемые путем обработки экспериментальных данных по массообмену.

Числа подобия:  $Sh$  – число Шервуда,  $Re$  – число Рейнольдса,  $Sc$  – число Шмидта, рассчитываемые по физическим свойствам и определяющим геометрическим параметрам и скоростям газовой и жидкой фаз [2].

Поверхность контакта фаз  $S_{inf}$  также зависит от условий взаимодействия потоков, физических свойств фаз и режима движения смешанного потока и может быть найдена по эмпирическому уравнению.

определяются конечные концентрации поглощаемого вещества в жидкой  $x_2$  и газовой фазе  $y_2$  на выходе камеры смешения эжектора.

Движущая сила процесса рассчитывается по уравнениям

$$\Delta x = \frac{x_2 - x_1}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x^* - x}} \quad (9)$$

$$\Delta y = \frac{y_1 - y_2}{\int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y - y^*}} \quad (10)$$

Коэффициент массопередачи рассчитывается по уравнениям

$$K_x = \frac{1}{\frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x}} \quad (11)$$

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{m\beta_y} + \frac{1}{\beta_x}} \quad (12)$$

в которых  $m$  – коэффициент распределения [2].

Общее количество извлекаемого вещества будет

$$M = K_x S_{\text{inf}} \Delta x = K_y S_{\text{inf}} \Delta y \quad (13)$$

Из уравнения (13) видно, что максимальная производительность процесса абсорбции может быть достигнута как за счет увеличения коэффициента массопередачи, так и за счет получения максимальной поверхности контакта фаз и движущей силы процесса. Данные параметры для заданных геометрических размеров эжектора полностью определяются гидродинамическим режимом его работы.

Изменяя гидродинамический режим эжектора, например, за счет изменения расхода жидкой фазы, можно изменять положение координаты начала зоны массообмена  $L_T$ . Выпол-

нив расчет, можно найти основные параметры процесса массообмена для различных значений  $L_T$ . При этом важно обеспечить максимальные значения всех параметров, входящих в (13). Процедуру оптимизации целесообразно проводить на ЭВМ.

Полученные в данной работе формулы позволяют оценить основные параметры массообмена, при котором обеспечивается максимальная производительность процесса абсорбции для аппарата заданных размеров и гидродинамическим режимом работы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов, Д. А. Математическая модель жидкостно-газового эжектора с прямолинейной камерой смешения / Д. А. Козлов. // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 1(61). – С. 8–11. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3).
2. Шервуд, Т. Массопередача / Т. Шервуд. Пер. с англ. – М.: Химия, 1982. – 695 с.

УДК 536.242:532.132

*В. В. Шишлянников*

#### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СУПЕРПОЗИЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ

Волгоградский государственный технический университет

Рассматривается задача теплообмена при переменной температуре стенки круглой трубы. Используется метод суперпозиции для решения задачи с переменной температурой стенки при известном решении для постоянной температуры.

*Ключевые слова:* теплообмен, стенка, температура, постоянная, переменная, труба, круглая.

*V. V. Shishljannikov*

#### APPLICATION OF THE METHOD OF SUPERPOSITION FOR HEAT EXCHANGE RESEARCH AT ANY CHANGE WALL TEMPERATURES

Volgograd State Technical University

The heat exchange problem is considered at variable temperature of a wall of a round pipe. The method of superposition for the decision of a problem with variable temperature of a wall is used at the known decision for constant temperature.

*Keywords:* heat exchange, a wall, temperature, constant, variable, a pipe, round.

В работе [1] решена задача теплообмена в круглой трубе при течении волокнистой суспензии с учетом анизотропии теплопроводности. При рассмотрении этой задачи предполагалось, что температура стенки трубы постоянная.

Однако представляет интерес получить решение этой задачи при произвольном изменении температуры стенки, так как процессы пе-

реработки полимеров осуществляются в большинстве случаев при переменной температуре стенки [2] от загрузочной воронки до выходного отверстия, поэтому постановка задачи несомненно актуальна.

В работе [1] получено выражение для температуры в потоке суспензии, описываемой «степенным» законом течения в виде

$$\theta = (1 - R^2) \cdot \frac{3(7n+1)(7n^2+8n+1)}{2(57n^3+71n^2+15n+1)} \cdot \exp \left[ -A \cdot z \cdot \Phi \left( 1 + \frac{4n}{P+4n} \cdot \Pi \right) \right], \quad (1)$$

где  $\theta = \frac{T - T_{cm}}{T_0 - T_{cm}}$ ,  $R = \frac{r}{r_0}$ ,  $\Phi = \frac{n+1}{3n+1} \cdot \frac{4}{Pe} \cdot \frac{1}{d}$  – без-

размерные параметры;  $Pe = \frac{\bar{V} \cdot d}{\alpha}$  – критерий

Пекле;  $\alpha$  – температуропроводность;  $T$ ,  $T_0$ ,  $T_{cm}$  – температура, температура на входе и стенке;  $r$  – радиус;  $r_0$  – радиус трубы;  $n$  – индекс течения;  $P$  – показатель степени в уравнении зависимости теплопроводности от скорости сдвига;

$\Pi = \frac{k_1}{\lambda_0} \left( \frac{\bar{V} \cdot 3n+1}{n} \right)^P$  – параметр;  $k_1$  – коэффициент;

$\lambda_0$  – начальная теплопроводность в уравнении  $\lambda = \lambda_0 + k_1 \left( \frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^{\frac{P}{2}}$ ;  $\bar{V}$  – средняя скорость те-

$$T - T_0 = (T_{cm} - T_0) \left\{ 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{3}{2} \frac{(7n+1)(7n^2+8n+1)}{(57n^3+71n^2+15n+1)} \times \exp \left[ -A \cdot z \cdot \Phi \left( 1 + \frac{4n}{P+4n} \cdot \Pi \right) \right] \right\} \quad (2)$$

Разность температур  $T - T_0$  можно рассматривать как изменение температуры жидкости, обусловленное «источником теплового возмущения» в виде скачкообразного изменения температуры стенки от  $T_0$  до  $T_{cm}$ . Этот «источник» расположен в начале координат, то есть при  $z = 0$ .

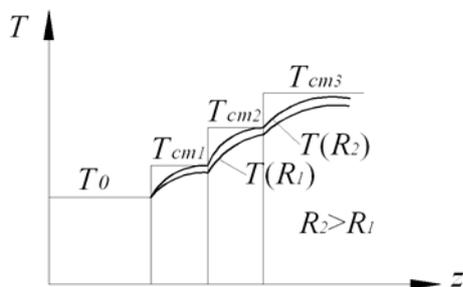


Рис. 1. К постановке задачи

Если источник находится в точке с координатой  $z = \xi$ , как показано на рис. 1, то вместо предыдущего уравнения мы должны написать:

$$T - T_0 = (T_{cm} - T_0) \left\{ 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{3}{2} \frac{(49n^2 + 14n + 1)}{(57n^2 + 14n + 1)} \times \exp \left[ -A \cdot (Z - \xi) \left( 1 + \frac{4n}{P+4n} \cdot \Pi \right) \right] \right\} \quad (3)$$

где  $Z = \frac{n+1}{3n+1} \frac{4}{Pe} \frac{z}{d}$  – приведенная длина.

При наличии нескольких «источников возмущения», то есть при ступенчатом изменении температуры стенки (рис. 1):  $T_{cm1}$ ,  $T_{cm2}$ , ...,  $T_{cm i}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ), полное изменение температуры

жидкости можно представить как сумму изменений, обусловленных действием каждого из «источников»:

жидкости можно представить как сумму изменений, обусловленных действием каждого из «источников»:

жидкости можно представить как сумму изменений, обусловленных действием каждого из «источников»:

жидкости можно представить как сумму изменений, обусловленных действием каждого из «источников»:

$$T - T_0 = \sum_{i=1}^m \Delta T_{cmi} \left\{ 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{3}{2} \frac{(49n^2 + 14n + 1)}{(57n^2 + 14n + 1)} \times \exp \left[ -A \cdot (Z - \xi) \left( 1 + \frac{4n}{P+4n} \cdot \Pi \right) \right] \right\} \quad (4)$$

где  $\Delta T_{cmi} = T_{cmi} - T_{cm(i-1)}$  – изменение температуры стенки в точке с координатой  $\xi_i$ .

При непрерывном изменении температуры стенки, перейдя от суммы к интегралу, получим:

$$T - T_0 = \int_0^z \left\{ 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{3}{2} \frac{(49n^2 + 14n + 1)}{(57n^2 + 14n + 1)} \times \exp \left[ -A \cdot (Z - \xi) \left( 1 + \frac{4n}{P+4n} \cdot \Pi \right) \right] \right\} \frac{dT_{cm}}{d\xi} d\xi \quad (5)$$

Рассмотрим случай линейного изменения температуры стенки:

$$T_{cm} = T_0 + kz \text{ или } T_{cm} = T_0 + KZ,$$

где  $k$  и  $K = \frac{k}{2} \cdot Pe \cdot d$  – постоянные.

Тогда  $T'_{cm} = K$ , и в соответствии с (5)

$$T - T_0 = K \int_0^z \left\{ 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{3}{2} \frac{(49n^2 + 14n + 1)}{(57n^2 + 14n + 1)} \times \exp \left[ -A \cdot (Z - \xi) \left( 1 + \frac{4n}{P+4n} \cdot \Pi \right) \right] \right\} \frac{dT_{cm}}{d\xi} d\xi \quad (6)$$

Произведя интегрирование, получим выражение для температурного поля

$$T - T_0 = KZ -$$

$$-K \left\{ (1 - R^2) \cdot \mathcal{K} \cdot [1 - \exp(-ADZ)] \right\}, \quad (7)$$

$$\text{где } \mathcal{K} = \frac{3(49n^2 + 14n + 1)}{2(57n^2 + 14n + 1)} \cdot \frac{1}{A(1 + D)},$$

$$D = 1 + \frac{4n}{P + 4n} \Pi$$

Средняя массовая температура жидкости

$$\begin{aligned} \bar{T} - T_0 &= 2 \frac{3n+1}{n+1} \int_0^1 (T - T_0) \left(1 - R^{\frac{n+1}{n}}\right) R dR = \\ &= KZ - \frac{7n+1}{2(5n+1)} \cdot K \cdot \mathcal{K} \cdot [1 - \exp(-ADZ)] \quad (8) \end{aligned}$$

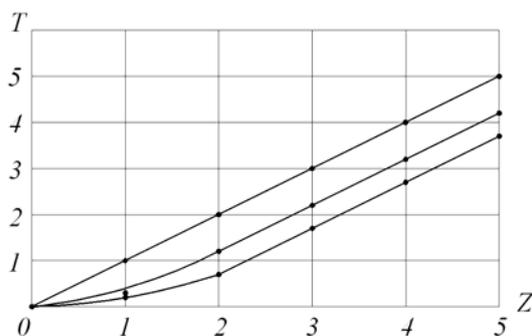


Рис. 2. Изменение  $\frac{T_c - T_0}{K}$ ,  $\frac{\bar{T} - T_0}{K}$  и  $\frac{T_{оси} - T_0}{K}$  в зависимости от  $Z = \frac{4z}{Pe d} \frac{n+1}{3n+1}$

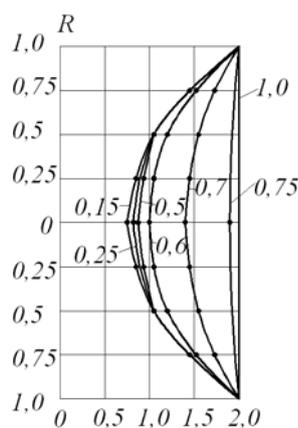


Рис. 3. Графики изменения температуры расплава полиэтилена ВД в круглой трубе при  $Z = 2$ . Цифры на кривых – значения  $\Pi$

На рис. 2 показано изменение температуры стенки и среднemasсовой температуры в зависимости от приведенной длины  $Z$ . С некоторого значения  $Z$  температура жидкости в любой точке, а также  $\bar{T}$  изменяются линейно по длине.

Таким образом наблюдается как и при  $T_{cm} = const$  стабилизация процесса теплообмена. На рис. 3 показано изменение температуры жидкости в зависимости от параметра  $\Pi$  (анизотропия теплопроводности) при значении приведенной длины  $Z = 2$ . Как видно из рис. 3, с увеличением параметра  $\Pi$ , температура жидкости (расплава полимера) изменяется значительно.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шишлянников, В. В. Теплообмен неньютоновских жидкостей при течении в круглой трубе / В. В. Шишлянников // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2010. – № 1(61). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии).
2. Петухов, Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах / Б. С. Петухов. – М.: Энергия, 1967.
3. Sellers, J. R. Tribus M., Klein J.S. Heat transfer to linear flow in a round tube or flat conduit / J. R. Sellers, M. Tribus, J. S. Klein // The grates problems extended, Trans ASME, V.78, № 2, 1966. – P. 441–448.
4. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова. – М.: Энергия, 1969. – С. 440.
5. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – изд. 10-е, стереотип., дораб. – М.: Альянс, 2004. – С. 573.
6. Шишлянников, В. В. Исследование конвективного теплообмена в кольцевом канале / В. В. Шишлянников // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1(74). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).
7. Голованчиков, А. Б. Интенсификация теплообмена в кожухотрубном реакторе / А. Б. Голованчиков // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1(74). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).
8. Шаповалов, В. М. Саморазогрев в камере резиномесителя / В. М. Шаповалов // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1(74). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).
9. Кондакова, Л. А. Исследование неизотермического процесса конвективной теплоотдачи ньютоновских жидкостей в горизонтальной трубе при переходном и турбулентном режимах течения / Л. А. Кондакова, В. В. Шишлянников // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2010. – № 1(61). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3).
10. Тепло- и массообмен в ньютоновских жидкостях / Под общей ред. академика АН БССР А. В. Лыкова и чл.-корр. АН БССР В. М. Смольского. – М.: Энергия, 1968.

УДК 536.242:532.135

*В. В. Шишлянников, Т. Б. Дорохина, Е. В. Дуденков*

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА  
В КОНИЧЕСКОМ ПОДШИПНИКЕ**

**Волгоградский государственный технический университет**

Исследуется разогрев вязкой смазки в коническом подшипнике. Получены выражения для расчета температуры в жидкости и стенке, среднemasсовой температуры и критерия Нуссельта. При решении задачи используются граничные условия четвертого рода.

*Ключевые слова:* исследование, течение, теплообмен, подшипник, смазка.

*V. V. Shishliannikov, T. B. Dorokhin, E. V. Dudenkov*

**THEORETICAL INVESTIGATION OF THE FLOW AND HEAT  
TRANSFER IN TAPERED BEARINGS**

**Volgograd State Technical University**

We investigate the heating of a viscous lubricant in the tapered roller bearings. Expressions are obtained for calculating the temperature of the liquid and wall-average temperature and Nusselt number. In solving the problem using the boundary conditions of the fourth kind.

*Keywords:* research, current, heat, bearing lubrication.

Подшипник – опора вала или оси насоса, компрессора, фиксирующая положение вращающейся или качающейся части механизма по отношению к другим его частям. Подшипники разделяют на радиальные, упорные и радиально-упорные. По виду трения различают подшипники качения и подшипники скольжения.

Конический подшипник с коническими роликами относится к радиально-упорным, служащим для восприятия комбинированных, т. е. радиальных и осевых нагрузок. Подшипники скольжения применяют в различных машинах и приборах, в которых они работают в широком диапазоне частот вращения до 200000 об/мин при температурах до 1000 °С. Для смазки подшипников скольжения применяют различные смазочные материалы: жидкие масла, пластичные смазки. Наиболее благоприятные условия для работы подшипников скольжения обеспечивают жидкие масла, для которых характерны такие признаки, как стабильность при работе, сравнительно небольшое сопротивление вращению, способность хорошо отводить тепло, очищать подшипники от продуктов износа.

Трущиеся поверхности деталей и механизмов во многих случаях разделены тонким слоем смазки (вязкой жидкости), в котором развивается давление, предотвращающее соприкосновения поверхностей. Закономерности движения такого тонкого вязкого слоя составляет содержание гидродинамической теории смазки. Система уравнений Рейнольдса для смазочного слоя примет вид [1]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \cdot \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \cdot \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} \quad (1)$$

Ее можно использовать для решения разнообразных задач, связанных с движением смазочного слоя. Из системы (1) можно легко получить закон распределения скоростей по толщине слоя.

В данной работе исследуется плоский клиновидный смазочный слой. Имеем плоское движение жидкости между двумя непараллельными пластинами, нижняя из которых движется с постоянной скоростью  $U_0$  в направлении отрицательной оси  $x$  (рис. 1), а верхняя неподвижна.

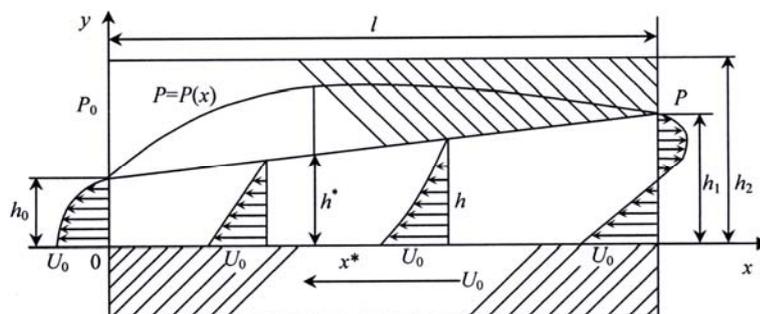


Рис. 1. Расчетная схема плоского клиновидного смазочного слоя

В данной работе исследуется плоский клиновидный смазочный слой. Имеем плоское движение жидкости между двумя непараллельными пластинами, нижняя из которых движется с постоянной скоростью  $U_0$  в направлении отрицательной оси  $x$  (рисунок 1), а верхняя неподвижна. Пространство слева и справа от неподвижной пластины будем считать заполненным вязкой жидкостью, находящейся под одинаковым давлением  $P_0$ . Тогда движение жидкости в клиновидном зазоре будет обусловлено вовлекающим действием движущейся пластины. Эта схема в простейшем виде воспроизводит движение смазочного слоя опорного подшипника скольжения. [1].

Распределение скоростей в смазочном слое описывается первой из формул (1), поскольку движение предполагается плоским и  $U_z = 0$ .

$$U_x = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot y^2 + C_1 y + C_2 \quad (2)$$

Согласно рис. 1 имеем

$$h = h_0 + \frac{h_1 - h_0}{l} x = h_0 \left( 1 + k \frac{x}{l} \right), \quad (3)$$

где  $k = (h_1 - h_0)/h_0$  – гидродинамический параметр клиновидности слоя.

Определяя постоянные  $C_1$  и  $C_2$  в работе [1] получен профиль скоростей

$$U_x = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot y(y-h) - u_0 \left( 1 - \frac{y}{h} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dp}{dx} = -6\mu u_0 \frac{h-h^*}{h^3}, \quad (5)$$

где  $h^*$  – толщина в сечении слоя с координатой  $x^*$

С учетом (5) профиля скоростей занимается в виде

$$v_x = -3v_0 \frac{h-h^*}{h^3} y(y-h) - v_0 \left( 1 - \frac{y}{h} \right), \quad (6)$$

или в безразмерном виде

$$V_x = \frac{v_x}{v_0} = 3(1-H)Y(1-Y) - (1-Y), \quad (7)$$

где  $\frac{h^*}{h} = H$ ,  $\frac{y}{h} = Y$ .

Тепловая задача для смазки и стенки подшипника выглядит следующим образом. Ввиду диссипативного разогрева уравнение энергии с учетом общеизвестных допущениях выглядит следующим образом [2]:

$$\lambda_1 \frac{d^2 T_1}{dy^2} + \Phi(y) = 0, \quad (8)$$

где  $\Phi(y) = \mu \left( \frac{dv_x}{dy} \right)^2$  – диссипативная функция

Граничные условия:

$$\text{при } y = h, T_1 = T_2; \quad y = 0, \frac{dT_1}{dy} = 0. \quad (9)$$

Уравнение теплопроводности в стенке

$$\frac{d^2 T_2}{dy_2^2} = 0 \quad (10)$$

Граничные условия:

$$y = h, \frac{dT_1}{dy} = K_\lambda \frac{dT_2}{dy}; \quad y = h_2, T_2 = T^* = \text{const};$$

$$K_\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (11)$$

Введем новые переменные

$$Y = \frac{y}{h}; \quad \delta = \frac{h_2}{h}; \quad H = \frac{h^*}{h};$$

$$\theta_1 = \frac{T_1 - T^*}{T^*}; \quad \theta_2 = \frac{T_2 - T^*}{T^*}.$$

Тогда уравнения (8-11) примут вид

$$\frac{d^2 \theta_1}{dY^2} + B \left( \frac{dV_x}{dY} \right)^2 = 0, \quad (12)$$

где  $B$  – диссипативный критерий,  $B = \frac{\mu v_0^2}{\lambda_1 T^*}$ .

$$\text{при } Y = 1, \theta_1 = \theta_2; \quad Y = 0, \frac{d\theta_1}{dY} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{d^2 \theta_2}{dY^2} = 0. \quad (14)$$

$$\text{при } Y = \delta, \theta_2 = 0; \quad Y = 1 \frac{d\theta_1}{dY} = K_\lambda \frac{d\theta_2}{dY^2} \quad (15)$$

Опуская промежуточные вычисления, получим решение уравнений (12, 14) при граничных условиях (13,15) в виде

$$\begin{aligned} \theta_1 = & \frac{\delta-1}{K_\lambda} B (3H^2 - 6H + 4) + \\ & + B(1,5H^2 - 4H + 3) - B[(4-3H)^2 \cdot \frac{Y^2}{2} + \\ & + 2Y^3(4-3H) \cdot (H-1) + 3Y^4(H-1)^2] \quad (16) \end{aligned}$$

$$\theta_2 = B \frac{1}{K_\lambda} (3H^2 - 6H + 4)(\delta - Y). \quad (17)$$

Зная выражения для температур в потоке смазки, можно найти формулы для среднemasсовой температуры  $\bar{\theta}$  и критерия Нуссельта  $Nu_{\text{нз}}$ :

$$\bar{\theta} = \frac{\int_0^1 \theta_1 \cdot V_x dY}{\int_0^1 V_x dY} \quad (18)$$

$$Nu_{из} = -\frac{1}{\bar{\theta}} \cdot \left. \frac{d\theta_1}{dY} \right|_{y=1} \quad (19)$$

По формулам (16–17) и (18–19) были сделаны расчеты изменения температуры, средне-массовой температуры и критерия Нуссельта в зависимости от  $\delta, H, V, K_\lambda$ . На рис. 2, 3 проведены графики изменения  $\bar{\theta}$  и  $Nu_{из}$

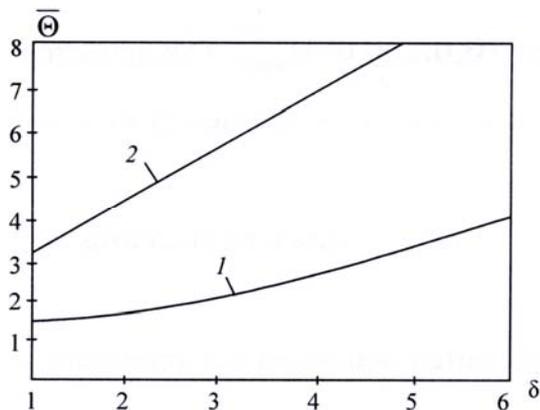


Рис. 2. Изменения средне-массовой температуры в плоском коническом подшипнике в зависимости от  $K_\lambda$  и Br: 1 – Br = 2,  $K_\lambda = 5$ ; 2 – Br = 5,  $K_\lambda = 5$

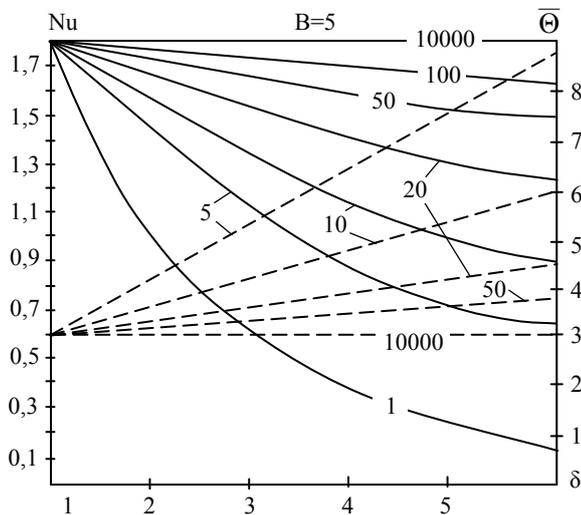


Рис. 3. Изменение критерия Нуссельта и средне-массовой температуры в плоском коническом подшипнике при течении смазки Br = 5:

Цифры на кривых значениях –  $K_\lambda$ ; ——— Nu; - - - - -  $\bar{\theta}$

Таким образом, из вышеизложенного следует, что при вращении подшипника скольжения происходит значительный разогрев смазки и самого металлического подшипника за счет диссипации энергии, то есть с увеличением критерия В, который, в свою очередь, прямо пропорционально зависит от скорости. В работах [3–10] показано влияние диссипации энергии на теплообмен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Емцев, Б. Т. Техническая гидромеханика / Б. Т. Емцев. – М.: Машиностроение, 1987.
2. Шишлянников, В. В. Конвективный теплообмен при течении вязкой жидкости в прямом канале винта экструдера / В. В. Шишлянников // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – № 11(37). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1).
3. Торнер, Р. В. Теоретические основы переработки полимеров / Р. В. Торнер. – М.: «Химия», 1977.
4. Фридман, М. Л. Технология переработки кристаллических полиолефинов / М. Л. Фридман. – М.: Химия, 1977.
5. Зубович, С. О. Особенности течения тяжелых ньютоновских и нелинейно-вязких сред в зазоре вращающихся валков / С. О. Зубович, В. М. Шаповалов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – № 11(37). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1).
6. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – Изд. 10-е, стереотип, дораб. – М.: Альянс, 2004. – 573 с.
7. Шишлянников, В. В. Исследование конвективного теплообмена в кольцевом канале / В. В. Шишлянников // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1(74). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1).
8. Шаповалов, В. М. Саморазогрев в камере резинмесителя / В. М. Шаповалов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 11(74). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).
9. Тепло- и массообмен в ньютоновских жидкостях. Под общей редакцией академика АН БССР А. В. Лыкова и чл.-корр. АН БССР В. М. Смольского. – М.: Энергия, 1968.
10. Шишлянников, В. В. Точные решения в реодинамике и теплообмене растворов и расплавов полимеров / В. В. Шишлянников, Т. В. Шиликова // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 1(61). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3).

УДК 66.045.54

*Н. В. Шибитова\**, *Н. С. Шибитов\**, *С. В. Коленчук\*\****РЕКОНСТРУКЦИЯ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ НАСАДОЧНОЙ ГРАДИРНИ****Волгоградский государственный технический университет\***  
**ООО «Омсктехуглерод» Волгоградский филиал\*\***

В работе приведен краткий обзор по способам реконструкции градирен в системах охлаждения воды. Выполнен сравнительный расчет по поверхности орошения насадочных и эжекционных градирен.

*Ключевые слова:* реконструкция, эжекция, поверхность контакта, градирня.

*N.V. Shibitova\**, *N.S. Shibitov\**, *S.V. Kolenchuk\*\****RECONSTRUCTION OF VENTILATOR NOZZLE COOLER****Volgograd State Technical University\***  
**Volgograd branch of LLC «Omsktehuglerod Ltd»\*\***

In work the brief review on ways of reconstruction cooling towers in systems of cooling of water is given. Comparative calculation on a surface of an irrigation nozzle and ejection cooling towers is executed.

*Keywords:* reconstruction, ejection, a surface of contact, cooling tower.

Годовой расход свежей воды промышленностью Российской Федерации примерно  $40 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ , что составляет примерно половину общего количества воды, забираемого для нужд народного хозяйства из источников водоснабжения. В то же время это всего лишь около одной пятой части потребности в воде промышленных предприятий. Остальное количество обеспечивается за счет повторного использования воды после охлаждения и очистки в системах охлаждения.

В большинстве случаев нагретую воду охлаждают и повторно используют, то есть создают водооборотную систему – этот вариант является преимущественным в общемировой практике, а усилия специалистов направлены на совершенствование техники и технологии таких систем [1–3].

Известно, что при испарении 1 % охлаждаемой воды ее температура снижается на  $5,48 \text{ }^\circ\text{C}$ . Принцип испарения 1,5–2 % воды, в сочетании с теплопередачей от нагретой воды к более холодному воздуху, положен в основу работы всех устройств испарительного охлаждения воды. Природные источники воды содержат растворенные в ней соли, поэтому необходим дренажный сброс из системы, так как концентрация солей будет неуклонно возрастать в пределе до кристаллизации. Поэтому, если механический унос влаги в сочетании с потерями в системе укладываются в заданный дренажный сброс, то их можно считать приемлемыми. Пример такой системы приведен на рис. 1.

«Движущей силой» процесса испарения воды в градирне является разность парциальных давлений пара у поверхности воды и в ядре воз-

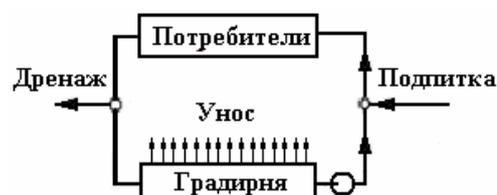


Рис. 1. Система с градирней испарительного охлаждения

душного потока. При теплоотдаче соприкосновением такой движущей силой является разность температур воды и воздуха [4].

По типу образования поверхности контакта фаз и способу подачи воздуха градирни подразделяются:

- 1) по типу оросителя – на пленочные, капельные, брызгальные и сухие;
- 2) по способу подачи воздуха – на вентиляторные, башенные и открытые.

Актуальной проблемой является выбор способа реконструкции градирен с целью повышения эффективности охлаждения оборотной воды на промышленных предприятиях.

Основными критериями, которыми необходимо руководствоваться при выборе пути реконструкции градирни являются:

- 1) Рациональный выбор типа градирни.
- 2) Соответствие градирни технологическим требованиям производства.
- 3) Энергосбережение.

Как правило, при реконструкции делается выбор между насадочной и безнасадочной (эжекционной) градирней [5].

Эжекционные градирни более дешевые и позволяют экономить электроэнергию. Но глубина охлаждения в них несколько ниже, чем в вентиляторных пленочных градирнях. Объяс-

няется это тем, что интенсивное охлаждение происходит в зоне длиной около 1,5 м от форсунки. Далее начинает работать так называемый эффект запаривания капли. Происходит выравнивание парциальных давлений воды на поверхности капли и в окружающем воздухе.

В вентиляторных градирнях достигается более глубокое охлаждение воды, но они значительно дороже, так как большая часть затрат относится к стоимости оросителя и более мощной вентиляторной установки.

Эжекционная градирня позволяет за счет эффективного удаления водяных паров из зоны теплообмена обеспечить охлаждение воды до температур на 3–6 °С выше температуры мокрого термометра. Практика показала, что при этом происходит понижение температуры на 2–6 °С во всей циркулирующей воде водоборотного цикла. Этот способ позволяет увеличить производительность эжекционной градирни на 20–40 % за счет изменения плотности орошения в градирне.

На основании литературного и патентного обзоров по способам реконструкции вентиляторных градирен, а также проведенного технико-экономического обоснования на ООО «Омсктехуглерод» Волгоградский филиал был рекомендован способ модернизации вентиляторной насадочной градирни в безнасадочную эжекционную. Градирня снабжена менее мощной вентиляторной установкой, предназначенной для интенсификации процесса массообмена между влажным воздухом и охлаждаемой водой за счет удаления паров воды из зоны контакта воздуха и капелек жидкости, образующихся в результате распыла воды эжекционными форсунками. На рис. 2 приведена схема реконструкции насадочной градирни в эжекционную.

Важнейшим параметром, определяющим эффективность охлаждения воды в градирне, является поверхность контакта воздуха и воды.

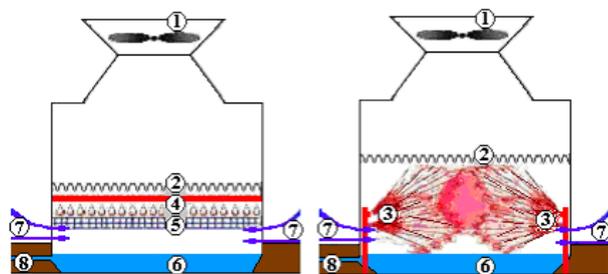


Рис. 2. Реконструкция градирни вентиляторной насадочной в вентиляторную безнасадочную:

1 – вентилятор; 2 – каплеотбойник; 3 – форсунки; 4 – система орошения; 5 – насадка; 6 – бассейн; 7 – воздушный поток; 8 – охлажденная вода

В технической литературе и проспектных материалах утверждается, что поверхность контакта фаз, создаваемая в эжекционных градирнях, несравнимо больше, чем в насадочных градирнях [6–7].

Ниже приводится сравнение эффективности насадочной и эжекционной вентиляторных градирен.

В насадочной градирне, заполненной современной пластмассовой насадкой, имеющей удельную поверхность 66 м<sup>2</sup>/на единицу объема, поверхность контакта будет определена по уравнению (1) [8–9].

$$F_{\text{оп}} = A_{\text{уд}} \cdot F_{\text{сек}} \cdot h_{\text{ор}}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{сек}}$  – площадь 1 секции градирни, м<sup>2</sup>;  $A_{\text{уд}}$  – удельная поверхность, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $h_{\text{ор}}$  – высота двух слоев оросителя, м.

$$F_{\text{оп}} = 66 \cdot 144 \cdot 1,2 = 11405 \text{ м}^2,$$

Тогда с учетом коэффициента смачиваемости площадь контакта составит

$$F_{\text{оп}} = 11405 \cdot 0,8 = 9124 \text{ м}^2.$$

В рекомендуемой эжекционной вентиляторной градирне поверхность контакта фаз образуется поверхностью всех капель, находящихся в зоне контакта.

Расход воды на одну секцию –  $g_v = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Примем диаметр капель при распыле форсунками – 1 мм.

По уравнению (2) объем одной капли равен

$$V_{\text{к}} = \frac{\pi d_{\text{к}}^3}{6}, \quad (2)$$

$$V_{\text{к}} = \frac{\pi \cdot 0,001^3}{6} = 5,233 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3.$$

Число капель диаметром 1мм, образующихся за один час находится по уравнению (3)

$$n_{\text{шт}} = \frac{q_v}{V_{\text{к}}}, \quad (3)$$

$$n_{\text{шт}} = \frac{800}{5,233 \cdot 10^{-10}} = 1,53 \cdot 10^{12} \text{ шт.}$$

Поверхность одной капли составляет

$$F_{\text{к}} = \pi d_{\text{к}}^2, \quad (4)$$

$$F_{\text{к}} = 3,14 \cdot 0,001^2 = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Общая поверхность капель, образующихся за один час

$$F_{\text{общ}} = F_{\text{к}} \cdot n_{\text{шт}}, \quad (5)$$

$$F_{\text{общ}} = 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot 1,53 \cdot 10^{12} = 4,8 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{ч}.$$

Скорость осаждения капли рассчитывается по известному выражению (6)

$$v_{oc} = \left( \frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot d_k \cdot (\rho_k - \rho_v)}{\xi \cdot \rho_v} \right)^{0,5}, \quad (6)$$

где  $\rho_k$  – плотность капли (вода), кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_v$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi$  – коэффициент трения. Принимаем  $\xi = 0,44$ .

$$v_{oc} = \left( \frac{4}{3} \cdot \frac{9,81 \cdot 0,001 \cdot (998 - 1,2)}{0,44 \cdot 1,2} \right)^{0,5} = 4,97 \text{ м/с.}$$

Скорость стесненного осаждения равна

$$v_{oc,ст} = \frac{4,97}{2} = 2,48 \text{ м/с.}$$

Скорость воздуха в градирне определяется по уравнению (7)

$$v_v = \frac{g_{возд}}{3600 \cdot F_{секц}}, \quad (7)$$

где  $g_{возд}$  – объемный расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч; (исходные данные);  $F_{секц}$  – площадь одной секции, м<sup>2</sup>.

$$v_v = \frac{700000}{3600 \cdot 144} = 1,35 \text{ м/с.}$$

Тогда реальная скорость осаждения капли в воздушном потоке станет равной

$$V_p = 2,48 - 1,35 = 1,13 \text{ м/с.}$$

Скорость вылета капли воды из форсунки при расходе 3 м<sup>3</sup>/ч составляет

$$V_{выл} = \frac{g_f}{0,785 \cdot 3600 \cdot d_{отв}^2}, \quad (8)$$

где  $g_f$  – производительность форсунки, м<sup>3</sup>/ч;  $d_{отв}$  – диаметр отверстия в форсунке, м.  $d_{отв} = 0,008$  м.

$$V_{выл} = \frac{3}{0,785 \cdot 3600 \cdot 0,008^2} = 16,6 \text{ м/с.}$$

Скорость капли меняется от 16,6 до 0 м/с в точке подвисяния, тогда средняя скорость полета капли равна

$$V_{выл,ср} = \frac{16,6}{2} = 8,3 \text{ м/с.}$$

Зона контакта составляет  $l = 6$  м, тогда время полета будет по уравнению (9)

$$\tau = \frac{l}{V_{выл,ср}}, \quad (9)$$

$$\tau = \frac{6}{8,3} = 0,73 \text{ с.}$$

Время осаждения капли

$$\tau_{oc} = \frac{l}{V_p}, \quad (10)$$

$$\tau_{oc} = \frac{6}{1,13} = 5,3 \text{ с.}$$

Суммарное время пребывания капли в зоне контакта

$$\tau_{общ} = 5,3 + 0,73 = 6,03 \text{ с.}$$

Рассчитаем поверхность всех капель, находящихся в зоне контакта

$$F_{общ,контакта} = \tau_{общ} \cdot F_{общ},$$

$$F_{общ,контакта} = \frac{4,8 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 6,03}{3600} = 16080 \text{ м}^2.$$

Таким образом, поверхность контакта охлаждаемой воды и воздуха в предлагаемой эжекционной вентиляционной градирне, будет значительно больше, чем в градирне, оснащенной оросителем.

В настоящее время проведена реконструкция вентиляционной градирни, реализована в чистом виде эжекционная градирня без установки вентилятора ВГ-50. Эжекционная градирня успешно выдержала испытания, даже в условиях жаркого лета без вентилятора температура охлажденной воды не превышала заданных значений. В градирне установлено 330 штук низконапорных морозостойких форсунок из наполненного полимера [10].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Галустов, В. С.* Рациональное использование и очистка воды на машиностроительных предприятиях / В. С. Галустов [и др.]. – М., «Машиностроение», 1988.
2. *Меренцов, Н. А.* Автономные системы оборотного водоснабжения для малотоннажных химических производств / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов // Известия ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1. – С. 102–104. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии: Вып. 4).
3. *Галустов, В. С.* Оптимизация систем охлаждения оборотной воды / В. С. Галустов // Журнал «Аква-Терм», № 1/2004.
4. *Рева, С. Л.* Экспериментальная установка для исследования процесса капельного испарения / С. Л. Рева, Л. Рева, А. Б. Голованчиков // Известия ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. – Волгоград. – 2011. – № 1. – С. 40–43. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).
5. Типовая инструкция по приемке и эксплуатации башенных градирен. РД 34.22.402-94.
6. *Пономаренко, В. С.* Градирни промышленных и энергетических предприятий / В. С. Пономаренко, Ю. И. Арефьев. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
7. *Пушнов, А. С.* Возможности совершенствования аэродинамики градирен / А. С. Пушнов, М. Г. Беренгартен // Химическая промышленность. – 2007. – № 8. – С. 382–400.
8. *Рябчук, Г. В.* Гидродинамика пленочных абсорбторов с регулярной насадкой / Г. В. Рябчук, С. А. Трусов, Е. А. Селезнева // Известия ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. – Волгоград, 2009. – № 1. – С. 54–56. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2).
9. *Каган, А. М.* Сравнение эффективности промышленных насадок для испарительного охлаждения / А. М. Каган, А. С. Пушнов // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – № 4. – С. 44–48.
10. *Новаков, И. А.* Поликапроамидные системы с полифторированными фрагментами / И. А. Новаков, Н. А. Рахимова // Известия ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. – Волгоград, 2009. – № 1. – С. 5–30. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1).

УДК 66.045

*С. Б. Воротнева, А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова***ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ  
ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»****Волгоградский государственный технический университет**

Рассмотрены современные методы очистки внутренней и наружной поверхностей труб теплообменных аппаратов. Разработаны новые конструкции аппаратов типа «труба в трубе» с механическим устройством для очистки поверхностей труб, с тангенциальным подводом теплоносителя в межтрубное пространство и с устанавливаемыми в патрубки входа и выхода жидкой рабочей среды трубчатыми элементами.

*Ключевые слова:* теплообмен, аппарат, реактор, «труба в трубе», устройство, очистка, зернистый материал, абразив, трубчатый элемент.

*S. B. Vorotneva, A. B. Golovanchikov, N. A. Dulkina, J. V. Aristova***PERSPECTIVE DESIGNS HEAT-MASSTRANSFER APPARATUS TYPE OF «PIPE-IN-PIPE»****Volgograd State Technical University**

The paper analyzes modern methods of cleaning the internal and external surfaces of pipes of heat-masstransfer apparatus. New designs of devices «pipe in pipe» with the mechanical device for clearing surfaces of pipes, with a tangential admission of heat-carrier in the shell side and with tubular elements installed in pipes of entrance and exit the liquid operating environment were developed.

*Keywords:* heat-masstransfer, apparatus, reactor, «pipe in pipe», device, clearing, discrete material, abrasive, tubular element.

В настоящее время в химической и нефте-химической промышленности, в экологических процессах утилизации тепла газов и жидкостей актуальным является вопрос очистки внутренних и наружных поверхностей труб в тепло-массообменных аппаратах и реакторах типа «труба в трубе» [1, 2].

Под очисткой теплообменных аппаратов типа «труба в трубе» подразумевается удаление с внутренних и наружных поверхностей накали и налета, а также устранение скопившихся отложений и загрязнений. В процессе эксплуатации теплообменного оборудования через систему проходит огромное количество теплоносителя, который может содержать различного рода загрязнители вроде ила, различных микроорганизмов, оксидов металла и продуктов коррозии [3, 4].

Налет, оседающий на внутренних стенках теплообменного оборудования, может стать причиной ухудшения теплопроводности системы, что приведет к существенному снижению эффективности и увеличению расходов на поддержание заданных температурных параметров. Кроме этого, скапливающиеся на поверхностях труб отложения затрудняют циркуляцию теплоносителя и увеличивают гидравлическое сопротивление, что опять же приводит к снижению эффективности и возможному выходу из строя системы. Регулярная очистка теплообменного оборудования является единст-

венной достаточной мерой, способной исключить дополнительные расходы, капитальный ремонт или замену теплообменного аппарата [3].

На сегодняшний день выделяют два основных метода очистки поверхностей труб теплообменных аппаратов, различных как по принципу действия, так и по степени эффективности: разборная механическая очистка и безразборная гидрохимическая очистка. Обычно разборную очистку теплообменного оборудования относят к крайним мерам, необходимость в которых возникает только в самых запущенных случаях, в то время как безразборная гидрохимическая очистка считается мерой, подходящей для регулярного сервисного обслуживания любых теплообменных аппаратов [5].

Для повышения качества безразборной очистки и эффективности работы теплообменного оборудования разработаны новые конструкции аппаратов типа «труба в трубе»:

- с механическим устройством для очистки поверхностей труб;
- с тангенциальным подводом теплоносителя с зернистым материалом в межтрубное пространство;
- с устанавливаемыми в патрубки входа и выхода жидкой рабочей среды трубчатыми элементами.

Особенностью этих конструкций является использование абразивных элементов с положительной плавучестью.

Конструкция теплообменного аппарата типа «труба в трубе» с механическим устрой-

ством для очистки поверхностей труб представлена на рис. 1 [6].

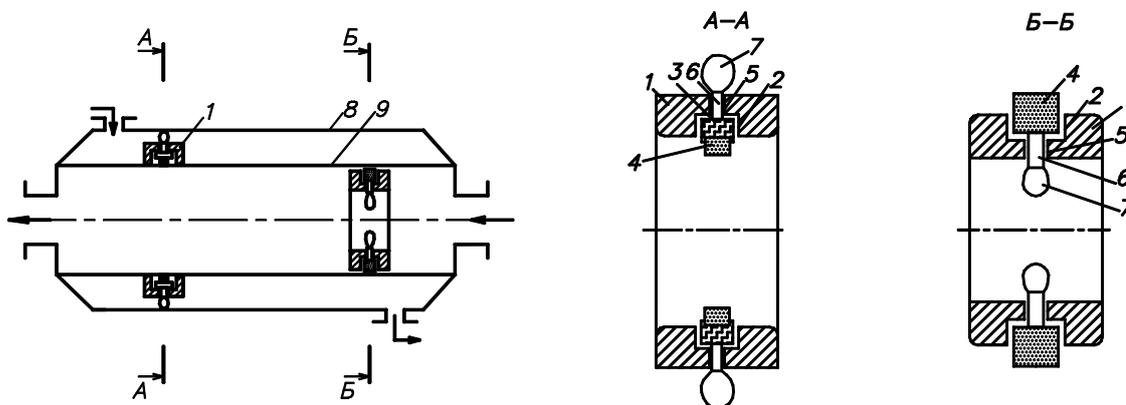


Рис. 1. Теплообменный аппарат с механическим устройством для очистки наружной поверхности труб: 1 – корпус; 2 – радиальные пазы; 3 – плавающие втулки; 4 – очистные элементы; 5 – отверстия; 6 – валики; 7 – рабочие лопасти; 8 – наружная труба; 9 – внутренняя труба

В данной конструкции теплообменного аппарата для интенсификации процесса удаления отложений с поверхности труб в полом корпусе 1, установленном с зазором на трубе, выполнены радиальные пазы 2. В пазах установлены очистные элементы 4 на плавающих втулках 3. Чтобы очистные элементы при вращении втулки под действием центробежной силы прижимались к внешней поверхности очищаемой трубы, они имеют положительную плавучесть. Для вращения втулок 3 с очистными элементами 4 вокруг своей оси на наружной поверхности втулки закреплены лопасти 7, которые под действием потока жидкости вращают втулки с очистными элементами вокруг своей оси.

Одновременное осевое перемещение полого корпуса вдоль трубы и вращение вокруг трубы полого корпуса за счет набегающего на лопасти потока рабочей жидкости заставляет под действием центробежной силы прижиматься плавающие втулки с очистными элементами к очищаемой поверхности, а дополнительное вращение валиков с лопастями, плавающими втулками и очистными элементами вокруг оси валиков увеличивает абразивное воздействие очистных элементов на очищаемую поверхность трубы и интенсифицирует процесс удаления отложений с этой поверхности [6].

Таким образом, предлагаемая конструкция тепло-массообменного аппарата типа «труба в трубе» с механическим устройством для очистки поверхностей труб позволяет интенсифицировать процесс удаления отложений на поверхности труб за счет дополнительного вращения очистных элементов 4 вместе с валиками 6 вокруг оси последних. Это ускоряет процесс очи-

стки, повышает ее качество, уменьшает число проходов, требуемых для очистки поверхностей труб и связанных с изменением направления потока рабочего агента, что, в конечном счете, уменьшает время очистки, расход рабочего агента, идущего на эту очистку, приводит к экономии энергозатрат и стоимости очистки. Но данная конструкция имеет и недостаток – сложность конструкции и эксплуатации полого корпуса и очистных элементов с устройством их прижима к очищаемой поверхности.

Для устранения этого недостатка разработана другая конструкция теплообменного аппарата типа «труба в трубе» с тангенциальным подводом теплоносителя с зернистым материалом в межтрубное пространство, которая представлена на рис. 2 [7].

Предлагаемое устройство для очистки наружной поверхности труб работает следующим образом. В межтрубное пространство труб 1 и 2 подают жидкую рабочую среду по патрубку 3. Жидкая рабочая среда содержит зернистый материал 7 с положительной плавучестью, например, плотность которого меньше плотности этой рабочей среды, и являющегося очистными элементами. Так как патрубки 3 и 4 установлены к боковой поверхности наружной трубы 1 тангенциально, то рабочая среда движется в межтрубном пространстве вдоль оси труб с вращением. Под действием центробежной силы зернистый материал 7 с положительной плавучестью прижимается к внешней поверхности внутренней трубы 2 и удаляет с нее частицы ржавчины, накипи, солевого камня, продуктов деструкции и других отложений, которые потоком рабочей среды выносятся в патрубок 4.

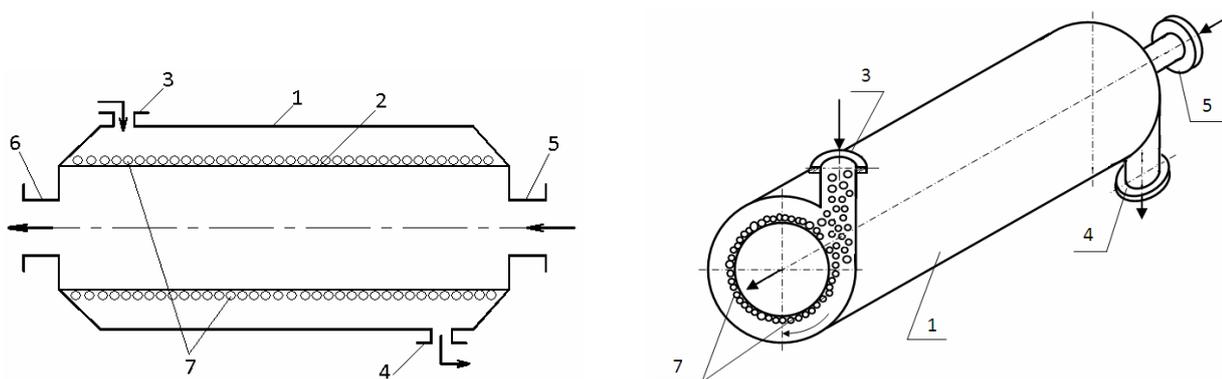


Рис. 2. Тепломассообменный аппарат типа «труба в трубе» с тангенциальным подводом теплоносителя в межтрубное пространство:

1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба; 3, 4, 5, 6 – патрубки; 7 – зернистый материал

Скорость очистки можно регулировать путем изменения расхода среды в межтрубном пространстве [8]. Устройство несложно по конструкции, так как вместо обычной установки патрубков входа и выхода среды требует их тангенциальной установки (как в гидроциклонах), а очистные элементы с положительной плавучестью, плотность которых меньше плотности рабочей среды, также не дефицитны.

Кроме того, устройство может работать в режиме рецикла, то есть в прямом и обратном направлении, когда патрубки 3 и 4 периодически становятся то подводными, то отводящими среду. Одним и тем же небольшим объемом среды с зернистым материалом 7 с положительной плавучестью можно за несколько циклов удалить даже значительные загрязнения с наружной поверхности трубы 2. После остановки теплообменного аппарата на ремонт или техобслуживание при накоплении на наружной поверхности трубы 2 большого слоя загрязнений и отложений по парубку 3 вместо основной технологической среды подают, например, обычную воду с очистными элементами в виде зернистого материала с положительной плавучестью – частицами керамзита. Центробежная сила прижимает частицы керамзита к наружной поверхности трубы 2, которые удаляют загрязнения и отложения, находящиеся на поверхности, а поток воды выносит их в патрубок 4.

Таким образом, предлагаемая конструкция тепломассообменного аппарата типа «труба в трубе» с тангенциальным подводом теплоносителя в межтрубное пространство позволяет значительно сократить время очистки наружной поверхности труб теплообменного оборудования и повысить ее качество [7]. К недостаткам данной конструкции можно отнести невозможность использования предлагаемого

устройства в типовых конструкциях теплообменных аппаратах типа «труба в трубе», в которых патрубки входа и выхода жидкой рабочей среды в наружной трубе установлены нормально к ее боковой поверхности, что не позволяет приводить поток очищающей жидкости во вращение и прижимать зернистый материал с положительной плавучестью к наружной поверхности внутренней трубы и очищать ее от отложений и загрязнений.

Для устранения данного недостатка разработана новая конструкция тепломассообменного аппарата типа «труба в трубе» с устанавливаемыми в патрубки входа и выхода жидкой рабочей среды трубчатыми элементами (рис. 3) [9].

Предлагаемая конструкция тепломассообменного аппарата типа «труба в трубе» включает в себя наружную и внутреннюю трубы с патрубками входа и выхода жидкой рабочей среды и очистные элементы в виде зернистого материала с положительной плавучестью, при этом в патрубки входа и выхода наружной трубы дополнительно установлены трубчатые элементы, диаметр которых меньше диаметра патрубков ввода и вывода жидкой рабочей среды, причем стенки трубчатых элементов на одном торце имеют криволинейный профиль и отогнуты в сторону наружной трубы, а на другом их торце герметично закреплен диск.

Установка диска на одном торце трубчатого элемента с диаметром меньшим диаметра входного и выходного патрубков позволяет его легко монтировать внутрь этих патрубков и затем герметично подсоединять к трубе подачи жидкой рабочей среды с «плавающим» зернистым материалом для последующей очистки наружной поверхности внутренней трубы. Установка трубчатых элементов в патрубки входа и выхода жидкой рабочей среды в наружной

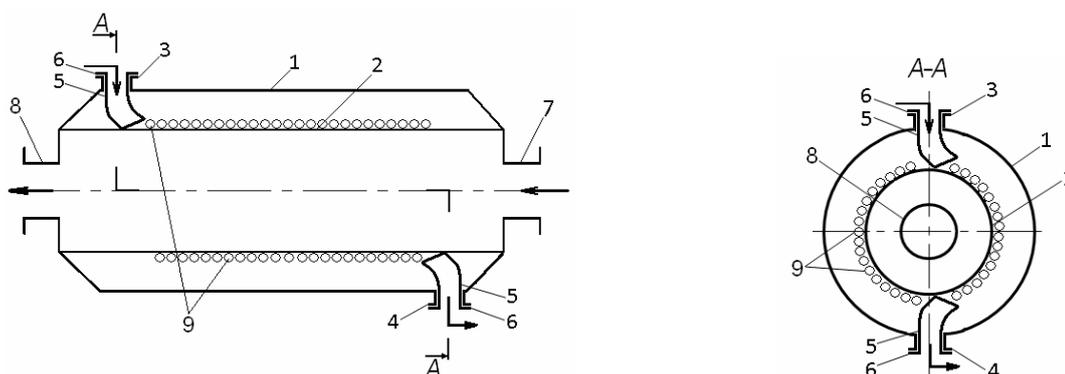


Рис. 3. Тепломассообменный аппарат с устанавливаемыми в патрубки входа и выхода жидкой рабочей среды трубчатыми элементами:

1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба; 3, 4, 7, 8 – патрубки; 5 – трубчатый элемент; 6 – диск; 9 – зернистый материал

трубе позволяет закрутить рабочую среду в межтрубном пространстве наружной и внутренней труб по всей их длине.

Предлагаемое устройство для очистки наружной поверхности труб позволяет интенсифицировать процесс очистки наружной поверхности внутренней трубы в тепломассообменном аппарате типа «труба в трубе», в котором патрубки входа и выхода жидкой рабочей среды в наружной трубе установлены нормально к ее боковой поверхности, на всей ее длине [10]. Конструкция данного устройства довольно проста, так как вместо тангенциальной установки патрубков входа и выхода рабочей среды позволяет установить в нормально расположенные патрубки входа и выхода рабочей среды (как в типовых теплообменниках типа «труба в трубе») трубчатые элементы с герметично закрепленным диском на одном торце и отогнутых в сторону наружной трубы на другом торце [9].

Таким образом, каждая из предлагаемых конструкций тепломассообменных аппаратов типа «труба в трубе» с различными устройствами для очистки поверхностей труб позволяет повысить качество очистки и эффективность работы тепломассообменного оборудования за счет интенсификации процесса удаления отложений, загрязнений, накипи, солевых камней и других продуктов деструкции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованчиков, А. Б. Вращательно-поступательное кольцевое движение двух несмешивающихся жидкостей в трубе / А. Б. Голованчиков, Л. А. Ильина, Н. А. Дулькина // Изв. ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – № 2. – С. 5–8. (Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 2).
2. Голованчиков, А. Б. Моделирование структуры потока в неизотермических реакторах вытеснения / А. Б. Голо-

ванчиков, Н. А. Дулькина, Н. Г. Кокорина // Изв. ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 1. – С. 82–86. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3).

3. Очистка труб теплообменного оборудования // Очистное оборудование [Электронный ресурс]. – [2011]. – Режим доступа: [http://www.a-filter.ru/ochistka\\_teploobmennikov](http://www.a-filter.ru/ochistka_teploobmennikov).

4. Расчет трубчатого реактора с неньютоновской реакционной массой и маловязким пристенным слоем / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, А. В. Ильин, Л. А. Ильина // Изв. ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 1. – С. 16–20. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3).

5. Голованчиков, А. Б. Интенсификация теплообмена в кожухотрубном реакторе / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова // Изв. ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1. – С. 76–77. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).

6. П. м. 97947 Российская Федерация, МПК В 08 В 9/00. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А. Б. Голованчиков, В. В. Шишляников, Т. В. Шиликова, Н. А. Дулькина, С. Б. Воротнева; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2010116255/05; заявл. 23.04.10; опубл. 27.09.10.

7. П. м. 104099 Российская Федерация, МПК В 08 В 9/023. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А. Б. Голованчиков, Л. С. Рева, Н. А. Дулькина, С. Б. Воротнева, С. Л. Рева, П. С. Васильев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2010144723/05; заявл. 01.11.10; опубл. 10.05.11.

8. Оптимизация структуры потоков в химических реакторах / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, А. В. Ильин, Л. А. Ильина // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 1. – С. 5–8. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2).

9. П. м. 109675 Российская Федерация, МПК В 08 В 9/00. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Дулькина, В. А. Панов, Л. С. Рева, С. Л. Рева; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2011124488/05; заявл. 16.06.11; опубл. 27.10.11.

10. Воротнева, С. Б. Моделирование процесса депарфинизации масляных фракций / С. Б. Воротнева, А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина // Изв. ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1. – С. 5–9. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).

УДК 623.44

*В. С. Галушчак, Т. В. Копейкина***ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ  
СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ****Камышинский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО ВолгГТУ**

Массовое применение светодиодов во всем мире требует проведения экологических оценок воздействия этого процесса на окружающую среду. Применение светодиодов приведет к снижению электропотребления осветительными устройствами, а значит, приведет к снижению выбросов вредных веществ и парниковых газов. В статье приведены численные оценки такого снижения, а также оценено возможное снижение оборота ртути в связи с прекращением выпуска ртутьсодержащих источников света. В тоже время появляются новые выбросы ядовитых веществ, как например мышьяк.

*Ключевые слова:* светодиодные осветительные приборы, выбросы вредных веществ, выбросы парниковых газов, ртуть, снижение выбросов, производство светодиодов.

*V. S. Galushchak, T. V. Kopejkina***ECOLOGICAL ASPECTS OF APPLICATION OF LIGHT-EMITTING DIODE LIGHTING DEVICES****Kamyshinsky institute of technology (branch)  
Volgograd state technical university**

Mass application of light-emitting diodes all over the world demands carrying out of ecological estimations of influence of this process on environment. Application of light-emitting diodes will lead to power consumption decrease by lighting devices so, will lead to decrease in emissions of harmful substances and hotbed gases. In article numerical estimations of such decrease are resulted, and also possible decrease in a turn of mercury in connection with the release termination containing mercury light sources is estimated. During too time there are new emissions of poisonous substances, as for example arsenic.

*Keywords:* light-emitting diode lighting devices, emissions of harmful substances, emissions of hotbed gases, mercury, decrease in emissions, manufacture of light-emitting diodes.

Перспективные направления развития осветительных приборов связаны, прежде всего, с применением сверхярких светодиодов излучающих белый свет. Учитывая исключительные потребительские свойства светодиодов, этот процесс идет во всем мире стремительно и лавинообразно [1]. Все большее значение в этих устройствах находит организация их электроснабжения путем использования энергии возобновляемых источников.

Оценка экологических ожиданий воздействия на окружающую среду в случае массового применения новых осветительных приборов является, на наш взгляд, важной и своевременной.

Экологическое воздействие технологии применения светодиодных осветительных приборов распадается на два самостоятельных направления:

а) Позитивное воздействие:

– снижения выбросов вредных веществ при производстве электроэнергии в связи с уменьшением ее потребления;

– уменьшение выбросов опасных и ядовитых веществ при производстве и эксплуатации традиционных источников света в связи с прекращением их выпуска;

– снижение затрат на утилизацию источни-

ков света и элементов систем освещения, содержащих ядовитые вещества.

б) Негативное воздействие:

– появление в окружающей среде новых вредных и ядовитых веществ, связанных с производством светодиодов;

– появление промышленных отходов в связи с утилизацией светодиодных осветительных приборов, выработавших свой ресурс.

Рассмотрим более подробно позитивные воздействия. Снижение выбросов вредных веществ при производстве электроэнергии связано с уменьшением ее потребления.

В табл. 1 приведены виды электрогенерирующих источников, используемые для производства электроэнергии централизованных промышленных сетей электроснабжения в России [2].

Таблица 1

**Виды электрогенерирующих источников**

Вид энергоисточника	Доля выработки, %
Теплоэлектростанции	81
Атомные электростанции	14
ГЭС	4,6
Прочие	0,4

Каждый из этих энергоисточников имеет свои особенности воздействия на окружающую среду. Но, как видно из приведенной таблицы, более 81 % электроэнергии производится электростанциями, сжигающими органическое топливо с выбросом следующих вредных веществ: диоксид азота; оксид азота; диоксид серы; оксид углерода; зола; бенз(о)пирен; ванадий, диоксид углерода [3].

Суммарный объем вредных веществ, выбрасываемых ТЭС без учета  $\text{CO}_2$  составляет 0,0168 кг/кВт×ч. Выбросы  $\text{CO}_2$  даже в современных наиболее совершенных ПГУ цикла составляют 342 г/кВт×ч выработанной электроэнергии [3]. В России выработка электроэнергии в 2010 году составила 1037 млрд кВт×ч. До 20 % выработанной электроэнергии используется в системах освещения [4].

Оценим объемы выбросов вредных веществ, связанных с освещением для России:

$$Q_1 = 1037 \cdot 10^9 \cdot 0,81 \cdot 0,2 \cdot 0,0168 \cdot 10^{-3} = 2,82 \text{ млн тонн.}$$

Применение светодиодов уменьшает энергопотребление систем освещения в 10 раз. Тогда выбросы, связанные с функционированием светодиодных осветительных систем составляет:

$$Q_2 = 2,82 \cdot 0,1 = 0,282 \text{ млн тонн.}$$

Снижение выбросов за счет применения светодиодов составит:

$$\Delta Q = 2,82 - 0,282 = 2,538 \text{ млн тонн.}$$

Выбросы парниковых газов в основном формируются из выбросов  $\text{CO}_2$ .

Общий объем выбросов углекислого газа связанный с работой систем освещения за год составит:

$$Q_3 = 1037 \cdot 10^9 \cdot 0,81 \cdot 0,2 \cdot 0,342 \cdot 10^{-3} = 57,45 \text{ млн тонн.}$$

При переходе на светодиоды потребность в электроэнергии снижается в 10 раз. Тогда выбросы  $\text{CO}_2$  составят [5, 6]:

$$Q_4 = 57,45 \cdot 0,1 = 5,745 \text{ млн тонн.}$$

Снижение выбросов  $\text{CO}_2$  за счет применения светодиодов составит:

$$\Delta Q = 57,45 - 5,745 = 51,705 \text{ млн тонн.}$$

В настоящее время часто встречается применение опасных веществ при производстве источника света. Широко распространенные (около 2 млрд шт.) люминесцентные лампы ртутного разряда низкого и высокого давлений, включая энергосберегающие компактные лю-

минесцентные лампы, содержат металлическую ртуть в среднем 50 мг Hg в каждом изделии. Это привело к введению в оборот с последующим выбросом в окружающую среду ртути объемом

$$M = 2 \cdot 10^9 \cdot 50 \cdot 10^{-9} = 100 \text{ тонн.}$$

В тоже время среди актуальных проблем экологии важное место занимают вопросы, связанные с загрязнением среды обитания ртутью и ее соединениями, как яда первого класса опасности. Это обусловлено, с одной стороны, широким использованием и периодическим выходом из строя разнообразных ртутьсодержащих изделий (люминесцентных и ртутных ламп, термометров, гальванических элементов и других приборов) на предприятиях, в быту, здравоохранении, транспорте, в дошкольных, учебных и научных учреждениях, а с другой стороны очень высокой токсичностью ртути.

Отслужившую ртутную лампу необходимо отправить на утилизацию в специализированное региональное предприятие, что требует дополнительных денежных затрат, сравнимых по стоимости с новой энергосберегающей лампой. Утечка ртути или других газов из лампы при ее повреждении приведет к возникновению экологических проблем (негативное влияние на здоровье людей, загрязнение окружающей среды и т. п.). Предельно допустимая концентрация паров ртути в населенном пункте равняется 0,0003 мг/м<sup>2</sup>, отметим, что эта опасная проблема остается, если возникает бой ламп при транспортировке и эксплуатации. Напомним, ртуть один из самых ядовитых тяжелых металлов, она токсична в любой форме. При вдыхании ртутные пары адсорбируются в мозге и почках, а также вызывают разрушение легких и желудочно-кишечного тракта. Даже давние ртутные загрязнения опасны, поскольку ртуть может испаряться годами, нанося непоправимый вред здоровью человека [7, 8].

Светодиодные лампы являются экологически чистыми и не требуют специальных условий по обслуживанию и утилизации. Полная экологическая безопасность светодиодов позволяет сохранять окружающую среду, не требуя специальных условия по утилизации (не содержит ртути, ее производных и других ядовитых, вредных или опасных составляющих материалов и веществ).

Стоит также отметить, что развитие систем наружного освещения на возобновляемых ис-

точниках энергии не требует органического топлива и находится в русле требований Киотского протокола от 1999 года и нового соглашения о снижении выбросов парниковых газов.

Применение возобновляемых источников энергии также позволяет снизить вредные выбросы. Из всей электроэнергии, затрачиваемой на освещение, 2,5 % расходуется на наружное освещение, которое может быть организовано от возобновляемых источников энергии.

Как известно после энергетики второй отраслью по количеству выбросов загрязняющих веществ является металлургия. Внедрение систем наружного освещения на ВИЭ делает ненужными питающие линии электропередачи, а также строительство подстанций и прочее, а значит, нет необходимости выплавлять медь, алюминий, железо для сетей электропитания осветительных приборов.

Общее число световых точек наружной установки около 10 млн единиц. Для подведения питания к одной световой точке необходим четырехжильный кабель длиной 50 м, в котором содержится 12 кг меди и провода воздушных линий освещения, в которых содержится 7,8 кг алюминия. Для металлоконструкций сетей используется железо в расчете 3 кг на одну опору. В табл. 2 представлены количественные показатели выбросов при выплавке 1тн металла в атмосферу.

Таблица 2

Количество выбросов при выплавке 1 т металла

Выбросы	Cu	Al	Fe
Углекислый газ, т	3,5	0,5	4
Окись углерода, т	0,1	0,1	0,3

Количество выбросов в атмосферу для выплавки металла подводящих электрических сетей уличного освещения приведено в табл. 3.

Таким образом, будет предотвращен суммарный выброс парниковых газов от металлургических предприятий: углекислый газ 579 тыс. тонн; окись углерода 16500 тонн. Следует отметить, что переход на светодиоды снижает нагрузку на осветительные электрические сети,

Таблица 3

Количество выбросов сопровождающих выплавку металла подводящих электрических сетей уличного освещения

Выбросы	Cu	Al	Fe
Углекислый газ, млн т	0,42	0,039	0,12
Двуокись углерода, млн т	0,012	0,0078	0,002

что приведет к уменьшению сечения проводов, а значит и к снижению потребности в металле. Но для оценки таких изменений требуется проведение самостоятельных исследований не входящих в объем настоящей работы.

В производстве светодиодов используются следующие основные вещества: кремний (Si), мышьяк (As), галлий (Ga), алюминий (Al), фосфор (P), цинк (Zn), азот (N), магний (Mg), индий (In), германий (Ge) и другие. Часть этих веществ (мышьяк) являются опасными ядами. Путем соответствующего выбора полупроводникового материала и присадки можно целенаправленно воздействовать на характеристики светового излучения светодиодного кристалла. В зависимости от спектрального состава излучения светодиода используются следующие вещества:

- GaAlAs – арсенид галлия алюминия; на его базе – красные и инфракрасные светодиоды.
- GaAsP – фосфид арсенида галлия; AlInGaP – фосфид алюминий-индий-галлий; красные, оранжевые и желтые светодиоды.
- GaP – фосфид галлия; зеленые светодиоды.
- SiC – карбид кремния; первый, коммерчески доступный голубой светодиод с низкой световой эффективностью.
- InGaN – нитрид индия-галлия; GaN – нитрид галлия; УФ, голубые и зеленые светодиоды.

В связи с тем, что работы над конструкциями светодиодов продолжаются, нельзя пока окончательно назвать состав и массу элементов используемых в производстве. Ниже приведем расчетные ожидания экологического воздействия на окружающую среду новых осветительных приборов (табл. 4).

**Прогноз изменений воздействия на экологию окружающей среды  
с применением новых осветительных приборов**

Вещество	Традиционные системы освещения	Переход на светодиодные источники света	- снижение + увеличение выбросов	Применение ВИЭ в системах освещения	Остаточные выбросы	% снижение + увеличение
<i>Производство электроэнергии</i>						
Выбросы ВВ, т	2 820 000	282 000	-2 791 800	-7050	274950	-91 %
Выбросы парниковых газов, т	57 450 000	5 745 000	-51 705000	-143 625	5 601375	-91 %
<i>Металлургия</i>						
Выбросы парниковых газов, т	595 500	-	-	-595 500	0	-100 %
<i>Производство источников света</i>						
Ртуть Hg, т	100	0	-100	0	0	-100 %

#### Выводы:

1. Применение светодиодных источников света в ОП различного назначения снижают потребление электроэнергии и связанные с ним выбросы вредных веществ парниковых газов более чем на 90 %.

2. При выполнении систем наружного освещения ОП с питанием от устройств преобразовании энергии возобновляемых источников полностью исключается потребность в электроэнергии и снижается потребность в цветных и черных металлах для систем освещения.

3. Применение новых ОП снижает нагрузку на окружающую среду за счет уменьшения выбросов вредных веществ электростанциями и металлургическими предприятиями.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айзенберг, Ю. Б. Светодиодные цунами / Ю. Б. Айзенберг // Светотехника. – 2010. – № 6.
2. Атаев, А. Е. Экономия электроэнергии при внутреннем освещении административных объектов, учебных заведений детских садов, учебных заведений / А. Е. Атаев, Н. П. Елисеев. – МЭИ, 2010 г.
3. hppt: [www.simens.com](http://www.simens.com).

4. Галуцак, В. С. БЭЖ «Эльтон – перспективный источник электроэнергии Волгоградской области / В. С. Галуцак, Ю. В. Лебедева, А. Б. Голованчиков // Энергоэффективность Волгоградской области. – 2008. – № 4. – С. 36–39.

5. Черемухина, И. В. Ультрафиолетовое излучение в технологии армированных реактопластов / И. В. Черемухина. Известия ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. – Волгоград, 2009. – № 1 (49). – С. 78–81. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2).

6. Шилин, А. Н. Моделирование нелинейных фотоэлектрических цепей / А. Н. Шилин, М. И. Гонжал / Известия ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ – Волгоград, 2008, № 1. – С. 117–119. (Сер. Актуальные проблемы управления вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 1).

7. Потехина, Л. Н. Реологические, оптические и структурные свойства растворов диацетатов целлюлозы для формирования полупроницаемых мембран / Л. Н. Потехина, В. М. Сиделкин, А. Н. Суркова, О. В. Пачина // Известия ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ – Волгоград, 2011. – № 4. – С. 170–174. (Сер. Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов. Вып. 3).

8. Куницина, И. А. Эффективность инженерно-экологических изысканий на объектах нефтедобывающей отрасли / И. А. Куницина, А. А. Околелова // Известия ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ – Волгоград, 2011, № 1 (74). – С. 30–33. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).

УДК 66.067:533.135

Я. А. Альбов, А. Б. Голованчиков, М. Г. Новиков, Е. В. Васильева

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА ЖИДКОСТИ В ЗАКРЫТОМ РЕЗЕРВУАРЕ**

Волгоградский государственный технический университет

Разработан новый способ определения объема жидкости закрытом резервуаре, основанный на фиксированном увеличении объема газа над свободной поверхностью жидкости в резервуаре. Проведены теоретические исследования данного способа, оценены зависимости объемов поршня, создаваемых разностей давлений от объемов резервуара. Оценены погрешности присутствующие при измерении данным способом.

*Ключевые слова:* измерение объема, резервуар, жидкость, давление, цилиндр, поршень.

Y. A. Albov, A. B. Golovanchikov, M. G. Novikov, E. V. Vasileva

**RESEARCH AND OPTIMIZATION OF METHOD TO DETERMINE LIQUID VOLUME IN A CLOSED TANK**

Volgograd State Technical University

A new method to determine liquid volume in a closed tank was developed; this method is based on fixed increase of gas volume above free liquid surface in the tank. Basic research was conducted for this method, relationship of piston volumes, differential pressure versus tank volume was evaluated. Accuracy occurring at measurement with this method was estimated.

*Keywords:* determine liquid volume, tank, liquid, pressure, cylinder, piston.

За аналог был взят переносной прибор для определения уровня и объема жидкости и устройство для определения объемов жидкости в закрытом резервуаре [1]. К причинам, препятствующим достижению заданного технического результата, относится сложность конструкции и эксплуатации известного прибора, сложность измерений и промежуточных расчетов.

В результате анализа и доработок был изобретен способ измерения объема жидкости в закрытом резервуаре [2], и устройство для данного измерения [3].

Схема устройства представлена на рис. 1.

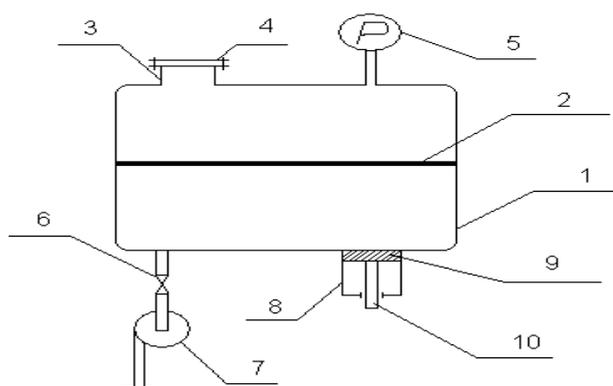


Рис. 1. Схема устройства для измерения объема жидкости

Она состоит из закрытого резервуара 1, общим объемом  $V$ , в котором находится какое-то количество жидкости  $V_0$ , образующей уровень жидкости 2. Резервуар 1 сверху имеет патрубок 3 для периодического налива жидкости. Патру-

бок 3 герметично закрыт крышкой 4. Сверху резервуара 1 также установлен манометр 5 для измерения давления в газе (воздухе) над уровнем жидкости 2. В нижней части резервуара установлен патрубок с вентилем 6, к которому присоединен насос 7 для слива жидкости потребителям. Также в нижней части резервуара 1 герметично присоединен цилиндр 8 объемом  $\Delta V$  с поршнем 9 на штоке 10. Объем жидкости  $V_0$  определяется по формуле (1).

$$V_0 = V - \frac{P}{p_0 - p} \cdot \Delta V, \quad (1)$$

где  $V_0$  – объем жидкости в закрытом резервуаре,  $m^3$ ;  $V$  – общий объем резервуара,  $m^3$ ;  $\Delta V$  – объем жидкости, откаченный из резервуара для увеличения объема газа над поверхностью жидкости,  $m^3$ ;  $p_0, p$  – соответственно давление газа над поверхностью жидкости до и после откачивания жидкости объемом  $\Delta V$ , Па (ат).

Методика измерения заключается в следующем: измеряют давление газа  $p_0$  в резервуаре 1 над уровнем жидкости 2, опускают поршень 9 вниз до упора. С помощью штока 10. Жидкость из резервуара заполняет цилиндр 8, объемом  $\Delta V$ , уровень жидкости 2 уменьшается, а объем газа над уровнем жидкости увеличивается на фиксированную величину  $\Delta V$ , а затем определяют давление газа над жидкостью манометра 5 и рассчитывают объем жидкости  $V_0$ .

После проведения измерений поршень 9 поднимают с помощью штока 10 до упора, вытесняя жидкость объема  $\Delta V$  из цилиндра 8 сно-

ва в резервуар 1. Устройство готово для проведения следующих измерений [4].

Данный метод позволяет также косвенно оценивать объем жидкости в резервуаре при наличии в процессе, в котором участвует данный закрытый резервуар, регистрации давления (изменения) в резервуаре, а также объемного расхода жидкости или газа подаваемого в резервуар.

Необходимо оценить точность измерений по предлагаемому способу и рассмотреть пути ее увеличения.

Для начала нужно определиться с соотношением объема резервуара к объему поршня. При большом соотношении возрастают как габариты поршня (становясь соизмеримыми с объемом резервуара), так и величина разряжения газа над

поверхностью жидкости. При малом – возникает необходимость повышения чувствительности датчика давления (что ведет к увеличению стоимости). Нужно иметь в виду, что при увеличении объема резервуара объем поршня наращивается посредством увеличения его диаметра, так как, исходя из физиологических особенностей человека длина штока (его выдвигной части) не должна превышать одного метра.

Проведем анализ данного способа для резервуара объемом  $10 \text{ м}^3$ . Объем поршня – 50 л. При длине штока 0,5 м, его диаметр приблизительно равен 0,3569 м.

С помощью пакета MS Office построим график зависимости объема жидкости, находящейся в резервуаре, от разности давления до и после измерения (рис. 2).

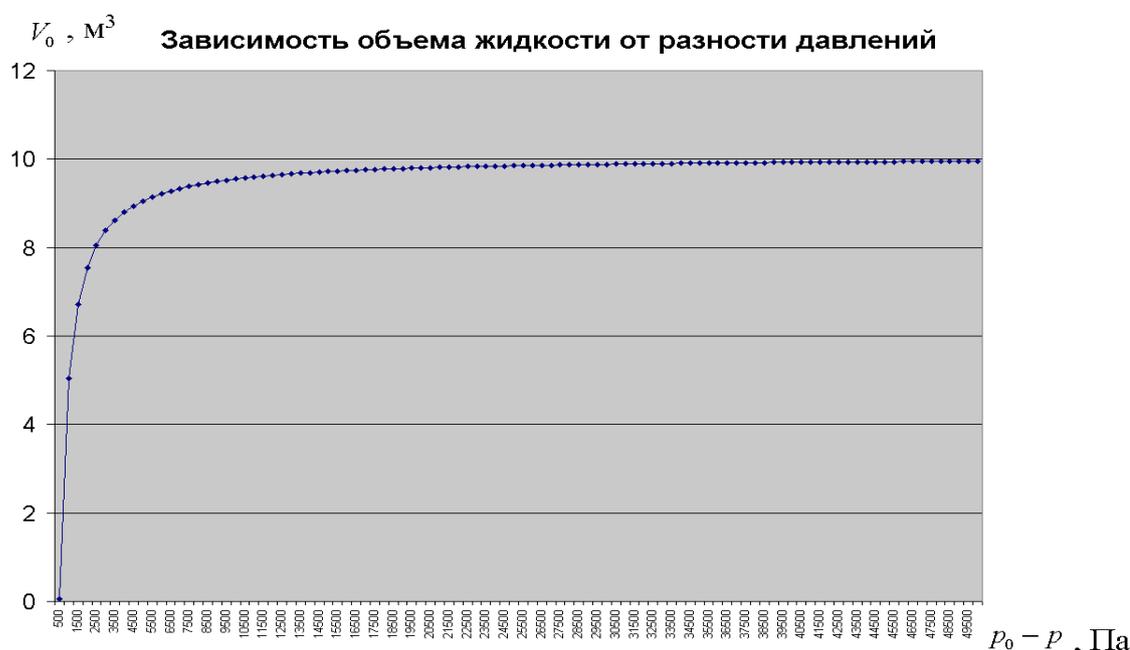


Рис. 2. График зависимости объема жидкости находящейся в резервуаре от разности давления до и после измерения

Проанализировав график зависимости, можно сделать следующие выводы.

Так как имеет место большой разброс разряжений в емкости при разных объемах жидкости, то возникают сложности в подборе вакуумметра: при малых объемах жидкости внутри резервуара нужна большая чувствительность вакуумметра, следовательно, ограничивается диапазон измерений объема, или возрастает цена данного вакуумметра. При больших объемах, близких к полному резервуару, вакуумметр должен работать при больших разряжениях в емкости.

Эта проблема может быть решена следующим образом: для данного резервуара подобран вакуумметр с максимальным разряжением по

шкале 2,5 КПа. При этом, судя из графика зависимости, ограничиваемся диапазоном сверху –  $8,05 \text{ м}^3$  жидкости, то есть при большем объеме показания вакуумметра «зашкаливают». Если шток поршня проградуировать в единицах объема так, чтобы при выдвигании его на некоторую величину  $\Delta L$ , и показаниях стрелки вакуумметра на отметке 2,5 КПа (при объеме жидкости внутри резервуара более  $8,05 \text{ м}^3$ ) он показывает действительное значение объема жидкости.

Здесь также необходимо отметить что сила, прикладываемая к поршню равна 250 Н или 25 КГС (при разряжении 2,5 КПа), что накладывает необходимость приведения штока в движение с использованием рычага.

В силу вышесказанного может быть предложен следующий алгоритм действий оператора (рабочего), измеряющего объем.

Оператор начинает выдвигать шток поршня и одновременно следит за показаниями вакуумметра. Если при полном выдвигении стрелка показаний еще не дошла до границы (2,5 КПа), то для определения объема пользуемся соотношением, приведенным выше (рис. 1 или формула (1)). В противном случае смотрим на градуировку штока поршня (выраженной в единицах объема) при показаниях стрелки вакуумметра находящейся на отметке 2,5 КПа. Для нахождения градуировки был использован пакет MS Office.

При составлении и анализе градуировки поршня, работающего при больших объемах, близких к полному резервуару, был найден оригинальный способ определения объема жидкости, применимый для любого объема жидкости находящейся в резервуаре.

Способ основан на создании фиксированного (заранее заданного) значения разности давлений до и после измерения. При этом фиксированное разряжение давления создается выдвигением части поршня соответствующего объема  $\Delta V$ . Тот, в свою очередь, определяется из  $\Delta L$  штока, на которую выдвинут поршень, тогда формула (1), с учетом вышесказанного, будет иметь вид:

$$V_0 = V - \frac{p}{p_0 - p} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \Delta L, \quad (2)$$

где  $V_0$  – объем жидкости в закрытом резервуаре,  $m^3$ ;  $V$  – общий объем резервуара,  $m^3$ ;  $\Delta V$  – объ-

ем жидкости, откаченный из резервуара для увеличения объема газа над поверхностью жидкости,  $m^3$ ;  $p_0, p$  – соответственно давление газа над поверхностью жидкости до и после откачивания жидкости объемом  $\Delta V$ , Па (ат).  $d$  – поршня;  $\Delta L$  – выдвинутая часть штока.

Так как значения  $\frac{\pi d^2}{4}$ ,  $\frac{p}{p_0 - p}$  и  $V$  являются для данного резервуара постоянными, то зависимость  $V_0 = f(\Delta L)$  носит линейный характер, что в свою очередь говорит о линейности градуировки штока поршня (в единицах объема жидкости) применительно для любого объема жидкости внутри резервуара.

Проанализировав последний способ можно заметить, что для уменьшения габаритов присоединяемого поршня разность давлений до и после измерения должна стремиться к минимуму. Но при этом необходимо помнить о сохранении точности измерения. Для данной емкости (объемом  $10 m^3$ , объем поршня – 50 л) подходящая разность давления – 500 Па. Такие манометры широко представлены на российском рынке, например «РОСМА», «Манотомь» и т. п. Стоит отметить также возможность использования датчиков давления таких как: «Метран», «Элемер» и др.

Оценим погрешности измерения при данных методах и при первом классе точности манометра. Примем условие, что увеличение объема на конкретную величину, посредством выдвигения штока поршня производится с максимальной точностью. То есть погрешность будет определяться исключительно классом точ-

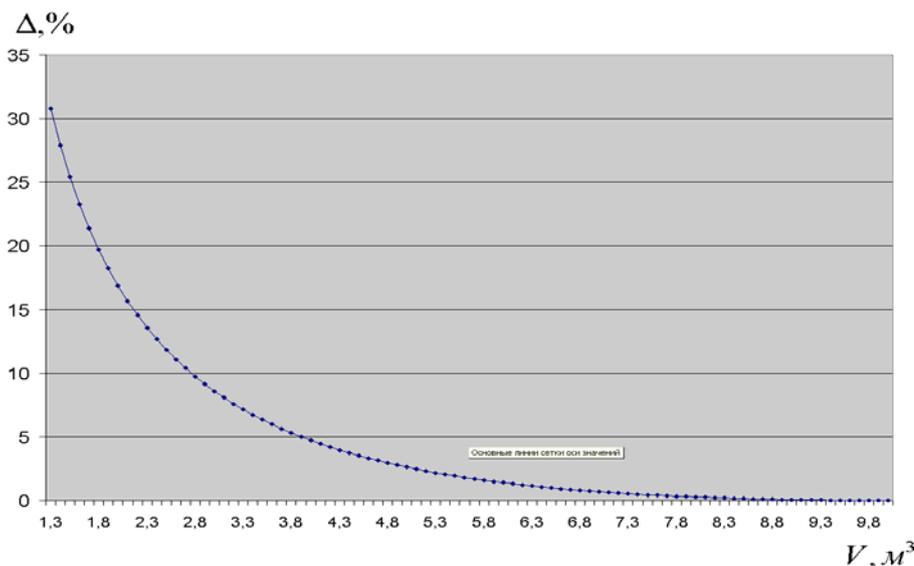


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения от объема жидкости внутри резервуара

ности манометра, используемого при измерении. Значения объемов емкостей, поршней и создаваемых разностей давлений взяты выше. Класс точности манометра – первый.

Для оценки погрешности был использован пакет MS Office. График зависимостей погрешностей, выраженных в процентах, от реального объема жидкости внутри резервуара для первого способа представлен на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что пятипроцентная точность измерения достигается для объема жид-

кости свыше  $3,8 \text{ м}^3$ , что также накладывает ограничения для использования данного способа. Для увеличения точности, а, следовательно, для расширения диапазона измерения надо или подбирать манометр с более высоким классом точности, либо брать поршень с большим объемом.

График зависимостей погрешностей, выраженных в процентах, от реального объема жидкости внутри резервуара для второго способа представлен на рис. 4.

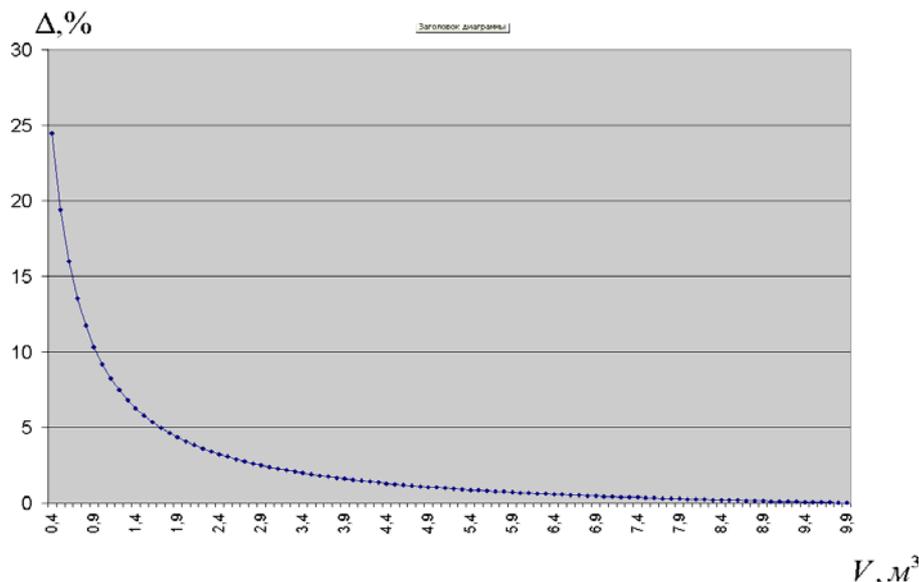


Рис. 4. Зависимость погрешности измерения от объема жидкости внутри резервуара

Из данной зависимости следует, что пятипроцентная точность достигается при объеме жидкости внутри резервуара более  $1,6 \text{ м}^3$ , что уже существенно расширяет диапазон измерения. Здесь можно отметить, что для увеличения точности измерения и расширения диапазона измерения необходимо подбирать манометр с более высоким классом точности или уменьшать создаваемую разность давлений, что, в свою очередь, накладывает условия на выбор манометра либо датчика давления.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы: данный метод прост, не требует нагромождения электрическими схемами, легко реализуем. При выборе оптимальности применения необходимо найти компромисс между следующими критериями: с одной стороны это точность измерения, определяющая нижний предел измерения объема, и возникающие при этом погрешности, с другой – экономические затраты, характеризующиеся в выборе манометров, габаритных размеров поршней, их качества изготовления и классов точности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авт. св. 00920389 СССР, Ст 01 Р 23/16, Ст 01 Р 17/00. Переносной прибор для определения уровня и объема жидкости / В. И. Веретенников, В. И. Лазарев, А. И. Лобачев, Л. П. Фунтов; опублик. 15.04.1982.
2. Пат. 2397453 Российская федерация, МПК С 01 G01F23/00. Способ измерения объема жидкости в закрытом резервуаре / А. Б. Голованчиков, В. В. Шишлянников, Д. О. Лихобабин, Н. А. Меренцов, А. А. Чарочкин, А. В. Кузнецов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2009128835/28; заявл. 27.07.2009; опублик. 20.08.2010.
3. Пат. 97520 Российская федерация, МПК G01F23/00. Устройство для измерения объема жидкости в закрытом резервуаре / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, А. В. Кузнецов, А. А. Решетников, И. С. Бацочкин, Я. А. Альбов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2010118384/28; заявл. 06.05.2010; опублик. 10.09.2010.
4. Альбов, Я. А. Устройство для измерения объема жидкости закрытом резервуаре / Я. А. Альбов // ГОРОДУ КАМЫШИНУ – ТВОРЧЕСКУЮ МОЛОДЕЖЬ: материалы IV региональной научно-практической студенческой конференции / ВолгГТУ; под ред. М. В. Назаровой. – Волгоград, 2010. – Том 6. – С. 18–20.

УДК 532.135

*И. П. Вершинина, А. Г. Щукина***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСАДОК****Волгоградский государственный технический университет**

Рассмотрены экспериментальные методы определения толщины пленки. Приведена проверка адекватности разработанной математической модели процесса течения.

*Ключевые слова:* толщина пленки, течение.

*I. P. Vershinina, A. G. Shchukina***EXPERIMENTAL DEFINITION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF PROCESS OF THE CURRENT OF THE NENJUTONOVSKY LIQUID ON THE SURFACE OF CENTRIFUGAL NOZZLES****Volgograd State Technical University**

Experimental methods of definition of a thickness of a film are considered. Check of adequacy of the developed mathematical model of process of a current is resulted.

*Keywords:* a thickness of a film, a current.

Экспериментальное исследование при тонкопленочном течении жидкости по поверхности вращающихся насадок проводят с целью определения следующих параметров: толщины пленки, скоростей движения и мощности, затрачиваемой на распыление.

Экспериментальное определение толщины пленки позволяет косвенно определить справедливость других теоретически полученных гидродинамических параметров работы центробежной насадки, таких как распределение компонент скорости течения по толщине пленки, или их средние значения, мощность, затрачиваемую на течение жидкости по поверхности вращающейся насадки.

В настоящее время существуют весьма разнообразные методы измерения толщины пленок, используемые для случаев тонкопленочного течения жидкостей в поле центробежных сил. Использование методов усредненных измерений дает возможность определения средней величины пленки при значительном изменении радиуса насадки. Эта группа методов включает в себя методы отсечки питания и проводимость.

Метод отсечки питания основан на мгновенном прекращении подачи жидкости с последующим изменением объема. В том случае определяется среднее значение толщины пленки по всей поверхности вращающегося диска радиуса  $R$ . Одной из значительных трудностей осуществления того метода замера толщины пленки, является сложность мгновенной отсечки питания.

Метод проводимости позволяет определить толщину пленки на отрезке через электропровод-

ность данного участка пленки жидкости. Диэлектрическая связь на этом участке осуществляется с помощью электродов, заделываемых в электроизоляционный диск на его поверхности. При данном методе измерения жидкость должна обладать высокой электропроводностью, для чего необходимы добавки электролита в нее. Сравнение результатов измерения этими методами показало, что расхождение показаний достигает 3 %. Использование же этих методов при измерении толщины пленки на вращающихся насадках не дает реальной картины измерения ее по радиусу.

К локальным методам измерения толщины пленок относятся методы радиоактивной эмиссии и абсорбции, метод измерения емкостного сопротивления, метод зондов проводимости.

Методы радиоактивной эмиссии и абсорбции основаны на применение радиоактивных веществ с использованием детекторов, определяющих интенсивность радиации, являющейся функцией объема жидкости, и, как следствие, толщины пленки.

Использование методов зондов проводимости аналогично методу проводимости с той лишь разницей, что в этом методе электроды устанавливаются друг от друга на незначительное расстояние (приблизительно 7–15 ожидаемых толщин пленки). Зонды могут иметь различную конструкцию в зависимости от условий проводимого эксперимента.

Этим методом можно получить локализованные измерения толщин пленок, иногда даже мгновенное изменение толщины во времени, но нельзя определить мгновенную точечную толщину пленки.

Следующий класс методов измерения толщины пленок – точечные измерения – включают в себя методы световой абсорбции, флюоресценции, интерференции, фотографический и контактного шума.

Принцип метода световой абсорбции заключается в прохождении пучка света сквозь толщину пленки жидкости с последующим определении интенсивности его на другом конце. В этом случае необходимо изготовление диска из прозрачного материала [1] и для увеличения абсорбции в движущуюся жидкость добавляют краситель. Применение того метода измерения толщины пленок является сомнительным с точки зрения точности результатов в связи с тем, что свет при наличии шероховатой поверхности пленки рассеивается и преломляется тем больше, чем больше угол поверхности.

Оптический метод и метод интерференции основаны либо на измерении интерференционных полос, либо угла поляризации, применимы для измерения тонких пленок до 1 мкр и пленок молекулярных размеров до 100 А.

Оригинальный метод фотографирования – теневой метод был разработан академиком П. Л. Капицей. Он основан на фотографировании пленок жидкости с увеличением толщины пленки.

Наиболее часто для измерений толщин пленок используются методом контактного шума, позволяющим получить непрерывную или статическую информацию об изменениях толщины движущейся жидкости в определенной точке поверхности [2]. Этот метод в отличие от выше рассмотренных позволяет проводить прямые измерения толщины пленки. Он основан на замыкании электрической цепи при касании щупом поверхности пленки, и может быть с успехом применен в тех случаях, когда имеется возможность свободного доступа к поверхности пленки и, в свою очередь, является простым по конструктивному оформлению, а так же надежным в работе.

Существуют два способа экспериментальной проверки результатов анализа математической модели процесса течения неньютоновской жидкости – проверка дифференциальных характеристик процесса течения и интегральных характеристик процесса движения.

Под дифференциальной характеристикой подразумевается поле скоростей и давления. Однако, учитывая тонкопленочный характер течения, который к тому же реализуется на быстро вращающейся насадке, использование известных методов для определения дифферен-

циальных характеристик потока сопряжено с техническими трудностями.

Что же касается экспериментального определения интегральных параметров, имеется достаточное количество исследований в этой области. Поэтому для проверки адекватности разработанной математической модели процесса тонкопленочного течения неньютоновской жидкости по поверхности вращающейся центробежной насадки был выбран способ сравнения полученных теоретических зависимостей и экспериментальных исследований ряда авторов по определению интегральных параметров процесса течения, в качестве которых были выбраны толщина пленки жидкости, текущей по поверхности центробежной насадки, и мощность, затрачиваемая на течение пленки неньютоновской жидкости.

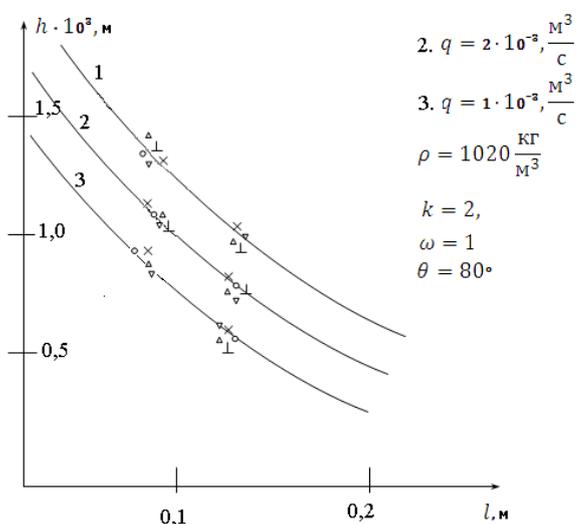


Рис. 1. Зависимость толщины пленки от продольной координаты для различных значений расхода

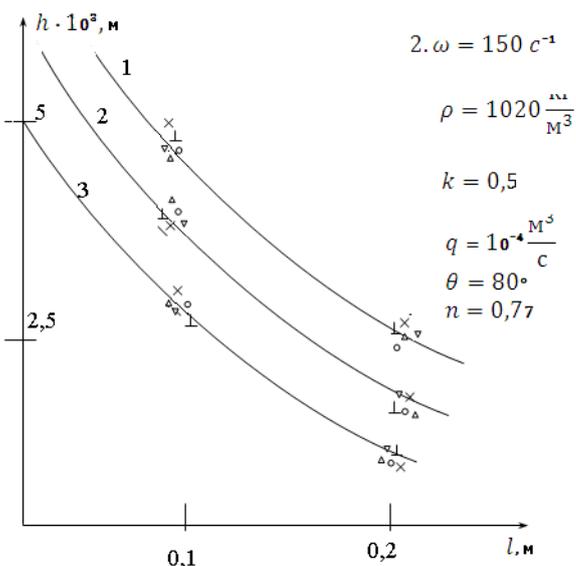


Рис. 2. Зависимость толщины пленки от продольной координаты для различных значений угловой скорости

На рис. 1, 2 показаны зависимости толщины пленки от продольной координаты при различных параметрах работы центробежной насадки. Здесь же нанесены данные ряда авторов. Как видно из рисунков, корреляция теоретических и экспериментальных значений хороша (максимальная ошибка не превышает 7 %). Причем не только для области тонких пленок, что наблю-

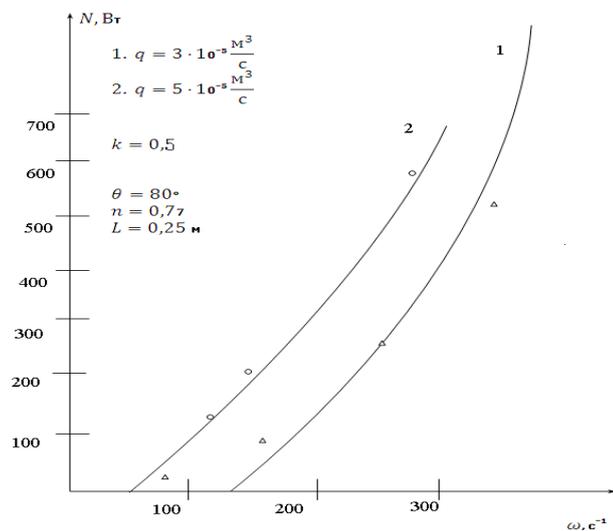


Рис. 32. Зависимость мощности от угловой скорости

дается у других авторов, но и во всем диапазоне изменения параметров работы центробежных насадок. Это ожидаемый результат, поскольку в качестве материальной модели процесса течения [3] были выбраны полные уравнения реодинамики и разработан метод их точных решений.

На рис. 3 показана теоретическая зависимость мощности, затрачиваемой на течение пленки неньютоновской жидкости, от угловой скорости вращения насадки при вариации других параметров работы. Здесь же нанесены экспериментальные данные других авторов. Как видно из рисунка, корреляция экспериментальных и теоретических данных хорошая в широком диапазоне работы центробежной насадки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Cocran, W. G.* The flow due rotating disc / W. G. Cocran. – Proc. Gamdr. Phll. Sos., 1934 v. – P. 365–375.
2. *Ластовцев, А. М.* Гидродинамический расчет вращающихся распылителей / А. М. Ластовцев. – М.: Из-во МИХМ, 1957, т. 2. – С. 41–70.
3. *Шукина, А. Г.* Течение нелинейно-вязкой жидкости по поверхности конической насадки / Г. В. Рябчук, А. Г. Шукина. – РПК «Политехник» Волгоград 1996. – 25–28 с.

УДК 66.066.4

*И. П. Вершинина, А. Г. Шукина*

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ**

**Волгоградский государственный технический университет**

На основе физической модели процесса дегазации и сепарации представлена методика инженерного расчета роторно-пленочной центрифуги, что позволило определить координату выхода твердой частицы в зависимости от размера фракции и выхода газового пузырька в зависимости от его диаметра.

*Ключевые слова:* дегазация, сепарация, координата выхода.

*I. P. Verшинina, A. G. Shchukina*

**TECHNOLOGY OF PROCESSES OF DIVISION OF NON-UNIFORM SYSTEMS**

**Volgograd State Technical University**

On the basis of physical model of process of decontamination and separation the technique of engineering calculation of a rotor-film centrifuge that has allowed to define coordinate of an exit of a firm particle depending on the size of fraction and an exit of a gas vial depending on its diameter is presented.

*Keywords:* decontamination, separation, exit coordinate.

Общей особенностью вращающихся центробежных насадок является процесс течения перерабатываемых сред по их поверхности. Подводка перерабатываемых сред осуществляется в области, расположенной вблизи центра насадки.

Процесс дегазации реализуется при внутреннем течении среды по поверхности вращающейся конической насадки. Процесс разде-

ления суспензии и классификации твердых частиц реализуется при внешнем течении жидкости по поверхности вращающейся конической насадки.

Аэрированная жидкость поступает в область с малыми радиусами вращения, то есть вблизи центра насадки. Вследствие прилипания жидкости, к горизонтальной поверхности насадки она вовлекается во вращательное движе-

ние. Под действием центробежной силы перерабатываемая жидкость перемещается к периферии насадки, и покидают ее: объемный расход перерабатываемой среды постоянный, поэтому при перемещении слоя жидкости к краю насадки, он утончается и на некотором расстоянии от места подвода реализуется трехмерное тонкопленочное течение неньютоновской жидкости с компонентами скорости  $V_r$ ,  $V_\phi$ ,  $V_z$  [1]. Размер горизонтальной части усеченной конической насадки выбирается таким образом, чтобы на периферии горизонтальной части вся подводимая жидкость была вовлечена во вращательное движение, то есть, чтобы исключить эффект «захлебывания» насадки. При течении аэрированной жидкости по внутренней поверхности конического ротора газовые пузырьки под действием архимедовой центробежной силы будут перемещаться к поверхности пленки, образуя пену. Для определения размеров центробежных дегазаторов рассматриваются самый неблагоприятный случай: в начальный момент времени газовый пузырек наименьшего диаметра находится на поверхности центробежной насадки [2].

Для безусловного удаления газового пузырька из жидкости достаточно, чтобы он подошел к поверхности пленки, поскольку при дальнейшем движении пленки аэрированной жидкости пена уплотняется под действием центробежного давления, и газ покидает пленку жидкости.

Различие физической модели процессов дегазации аэрированной жидкости и разделения суспензий состоит в следующем. Для процесса дегазации при внутреннем течении аэрированной жидкости по поверхности вращающейся конической насадки разность плотностей  $\Delta\rho$  заменяется плотностью дисперсионной среды  $\rho_{ж}$ , а продольная координата подхода газового пузырька к поверхности пленки является координатой выхода из пленки жидкости. Для разделения суспензии при ее внешнем течении по поверхности вращающегося конического ротора необходимо рассмотреть два этапа – этап подхода твердой частицы (газового пузырька) к поверхности пленки и этап прохождения частицей (пузырьком) поверхности раздела фаз.

При соприкосновении с ротором суспензия вовлекается во вращательное движение и растекается тонким слоем по наружной поверхности ротора. Обычно концентрация суспензий невелика, поэтому твердые частицы не взаимо-

действуют между собой и не искажают потока жидкости, текущего по поверхности вращающегося конического ротора. Поэтому распределение меридиональной, тангенциальной и осевой составляющих скорости по толщине пленки при течении суспензии по поверхности вращающейся конической насадки такие же, как и при течении одной неньютоновской жидкости.

Суспензия в роторно-пленочный аппарат поступает после перемешивания, поэтому концентрация твердых частиц в зоне подвода суспензии равномерно распределена по всему объему. При поступлении суспензии на вращающийся ротор твердые частицы в начальный момент  $t_0$  имеют скорость среды в рассматриваемой точке. В процессе растекания суспензии по поверхности вращающегося конического ротора полагается, что до подхода частицы к поверхности пленки ее скорость не отличается от скорости жидкости в данной точке в меридиональном и тангенциальном направлении [3].

Для безусловного выхода твердой частицы из пленки жидкости необходимо, чтобы время пребывания частицы на роторе было не меньше суммы времени всплытия частицы к поверхности пленки (первая зона) и времени прохождения ею поверхности раздела фаз (вторая зона). В момент поступления суспензии на вращающийся ротор твердые частицы могут оказаться как на поверхности ротора, так и в любой точке пленки неньютоновской жидкости включая ее поверхность. Поскольку наибольшее время всплытия потребуется частицам, которые в начальный момент времени находятся на поверхности ротора, целесообразно рассмотреть движение и условия выхода именно этих частиц. Для выявления закономерностей тонкопленочной сепарации суспензий, учитывая незначительные начальные концентрации твердой фазы, можно рассматривать движение одной частицы. Влияние соседних частиц на скорость центробежного осаждения, то есть скорость «степенного» осаждения можно учесть коэффициентом, предложенным профессором В. И. Соколовым [4]:

$$\Phi(B) = 10^{-1,82(1-B)}, \quad (1)$$

где  $B$  – часть единичного объема суспензии, занятая дисперсионной средой;  $(1-B)$  – объем дисперсионной фазы, содержащейся в единице объема суспензии.

При подходе частицы к поверхности пленки жидкости, то есть в начальный момент выхода,

частица будет обладать некоторой скоростью. Под действием сил поверхностного натяжения частицы могут замедляться вплоть до остановки, если они не будут обладать дополнительной энергией для преодоления этих сил. При этом во второй зоне силой вязкого сопротивления жидкости и обобщенной силой Архимеда можно пренебречь, так как они много меньше сил поверхностного натяжения жидкости. Выделенные из суспензии твердые частицы собираются в сборнике осадка, а осветленная суспензия сбрасывается в приемник фугата. Частички большего диаметра покидают пленку раньше, чем частицы меньшего диаметра при одинаковой плотности, то есть произойдет их классификация по размерам.

При инженерных расчетах дегазации жидкости обычно решаются две задачи:

1. Известен объемный расход азрированной жидкости, физико-механические свойства дисперсионной среды и степень дегазации, то есть минимальный размер газового пузырька, который должен быть выделен из жидкости. Необходимо определить основные константы и технологические параметры дегазатора.

2. Имеется привод центробежного дегазатора с заданной угловой скоростью вращения. Не-

обходимо определить линейные размеры дегазатора при заданном объеме азрированной жидкости и степени дегазации.

Вторая задача встречается крайне редко, поскольку дегазация в центробежном поле не нашла широкого применения. Поэтому рассматривается только первая задача. Выбирается привод центробежной насадки, то есть задается угловая скорость вращения конического ротора. Для обеспечения устойчивого тонкопленочного течения жидкости по внутренней поверхности конической насадки, задается минимальная толщина пленки на периферии конического ротора (0,2–0,5 мм).

Линейный размер конического ротора, обеспечивающий принятый режим работы  $L_0$ , определяем из формулы для толщины пленки:

$$h_0 = \left( \frac{3n+2}{2n+1} \right) (\sin \theta)^{-6n/(9n-2)} \frac{q_0^{2n/(4n+1)} \text{Re}^{*2/(4n+1)}}{l^{*2n(3n+1)/(n+1)(4n+1)}}, \quad (2)$$

где  $n$  – индекс течения;  $\theta$  – величина полуугла при вершине конического ротора, град;  $q_0$  – безразмерный расход жидкости;  $\text{Re}^*$  – модифицированное число Рейнольдса;  $l^*$  – безразмерная меридиональная координата.

Продольную координату выхода газового пузырька заданного диаметра  $l_{\text{вых}}$  определяем по формуле:

$$\frac{\Psi_3 l_{\text{вых}}^{(\Psi_4+1)} \left[ \frac{\rho \omega^{(2-n)}}{k} \right]^{\Psi_3} \left[ \frac{1}{9} \left( \frac{d_n}{2} \right)^{(n+1)} \rho_{\text{ж}} \omega^2 \sin(2\theta) \Psi_4 \right]^{1/n} \left[ 1 - \frac{l_0}{l} \right]^{(\Psi_4+1)}}{k^{1/n} \omega \text{Re}^{*\Psi_3} q_0^{(2n+1)/(4n+1)} (\sin \theta)^{6n/(9n-2)}} = (h - d_n) + \left( \frac{n}{2n+1} \right) h \left[ \left( 1 - \frac{2h - d_n}{2h} \right)^{2n+1/n} \right], \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность дисперсной среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – угловая скорость, рад/с;  $d_n$  – диаметр газового пузырька, м;  $l_0$  – начальная координата центра

газового пузырька, м;  $l$  – координата центра газового пузырька, м;  $h$  – толщина пленки, м;  $\Psi_3$  и  $\Psi_4$  – функции индекса течения:

$$\Psi_3 = \frac{4-2n}{2-n} - \frac{2n(3n+1)}{(n+1)(4n+1)},$$

$$\Psi_4 = \frac{n(4n+1)(n+2)^2}{(4n+1)(n+2)^2 + n(4n+1)(n+1) - 2n^2(3n-1)(1-2n) + n(4n+1)}.$$

Если обеспечивается условие:

$$l_{\text{вых}} \leq L_0, \quad (4)$$

то расчет считается законченным, и выбранные конструктивные и технологические параметры работы обеспечивают дегазацию жидкости с заданной степенью разделения. Если  $l_{\text{вых}} > L_0$ , то необходимо определить новые режимы работы дегазатора, обеспечивающие заданные требования. В этом случае меняется угловая скорость

вращения ротора, и расчет продолжается по выше приведенной схеме при следующем ограничении: минимальная толщина пленки на периферии конического ротора должна удовлетворять условию:

$$h_{\text{min}} > 0,05 \text{ мм}. \quad (5)$$

Если при новом значении  $\omega$  условие (4) не выполняется, то оставляя  $\omega = \text{const}$ , увеличиваем линейный размер насадки и объемный рас-

ход аэрированной жидкости таким образом, чтобы обеспечить условие (5). Операция продолжается до тех пор, пока не будут удовлетворены технологические требования для процесса дегазации.

Алгоритм расчета разделения тонкодисперсной суспензии на роторно-пленочных центрифугах аналогичен алгоритму расчета процесса дегазации аэрированной жидкости на коническом роторе.

При любых вариациях конструктивных раз-

меров конического ротора неизменными должно оставаться условие: величина полуугла при вершине конического ротора должна удовлетворять требованию  $\theta > 83^\circ$  [4].

Первоначально из выражения (3) определяется толщина пленки и выполняется условие (5). Далее по зависимости для определения разделяющей и классифицирующей способности роторно-пленочных центрифуг определяем координату выхода твердой частицы минимального диаметра  $l_{\text{вых}}$ :

$$l = B_2 \left[ \left( \frac{3n+1}{n+1} \right) \left( \frac{2n+1}{4n+1} \right) \frac{\sigma_{12} q_0^{(2n+1)/(4n+1)}}{\omega^2 B_1 d_{\text{част}}^2 \sin(2\theta)} + 1 \right]^{\frac{(n+1)(4n+1)}{(2n+1)(3n+1)}}, \quad (6)$$

где

$$B_2 = l_0 \left[ \frac{\left( \frac{h-d}{l_0} \right)^{(2n+1)/(n+1)} q_0^{(2n+1)/(4n+1)} (\sin \theta)^{(4+n)/(n+1)}}{\Psi_4 B_1} + 1 \right]^{\frac{1}{\Psi_4}};$$

$$\Psi_4 = \frac{n(4n+1)(n+2)^2}{(4n+1)(n+2)^2 + n(4n+1)(n+1) - 2n^2(3n-1)(1-2n) + n(4n+1)}.$$

Затем требуем выполнения условия:

$$l_{\text{вых}} < L_0. \quad (7)$$

Если условие (7) выполняется, то по заданному распределению твердых частиц по диаметру определяются целевые фракции и  $l_{\text{вых}}$  для предельного размера каждой фракции [5]. По найденным значениям  $l_{\text{вых}}$  определяется место установки приемных лотков для каждой фракции, то есть реализуется разделение суспензии и классификация твердых частиц.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разделение тонкодисперсных суспензий с неньютоновской дисперсионной средой на роторно-пленочных цент-

рифугах // Реология, процессы и аппараты химической технологии. – Волгоград: РПК Политехник, 2010. – 105 с.

2. Математическая модель движения круглой частицы на вращающейся насадке в пленке неньютоновской жидкости // Реология, процессы и аппараты химической технологии. – Волгоград: РПК Политехник, 1997. – 115 с.

3. Математическая модель течения неньютоновской жидкости по поверхности вращающегося перфорированного конического ротора. – Волгоград: РПК Политехник, 1997. – 111 с.

4. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса / Под ред. акад. В. С. Авдеевского. – М.: Наука, 1987. – 272 с.

5. Математическая модель пребывания частиц круглой формы в пленке жидкости на конической центробежной насадке // Реология, процессы и аппараты химической технологии. – Волгоград: РПК Политехник, 1997. – 120 с.

УДК 536.422.1

*С. Л. Рева, П. С. Васильев, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков*

### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАПЕЛЬНОГО КИПЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

Приведена методика обработки экспериментальных исследований капельного кипения жидкости на поверхности нагрева, имеющую температуру выше температуры кипения жидкости.

*Ключевые слова:* испарение, кипение, капля, поверхность нагрева.

*S. L. Reva, P. S. Vasiliev, L. S. Reva, A. B. Golovanchikov*

### METHOD OF TREATMENT OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF DROP BOILING

Volgograd State Technical University

There is method for treatment of experimental research of drop boiling of liquid on the heating surface having a temperature above the boiling point of liquid.

*Keywords:* evaporation, boiling, a drop a heated surface.

Изучению процесса испарения посвящено множество исследований [1–2]. В том числе и поведение испаряющейся капли на поверхности нагрева, было предметом многолетних наблюдений, например [3–12 и др.]. Необходимо отметить, что испарение капли, имеющей размеры максимум до нескольких миллиметров, протекает весьма скоротечно, для больших температур поверхности нагрева, составляя доли секунды, и визуальное наблюдение и замер различных характеристик процесса представляет достаточно большую сложность. Однако большинство выполненных ранее исследований проводилось в условиях старого технического оснащения, что не позволяло с достаточной достоверностью оценить полученный результат.

В большинстве технологических процессов испарение осуществляется при кипении жидкости, поэтому в дальнейшем мы будем придерживаться термина «капельное кипение».

Для исследования испарения капли жидкости в режиме кипения (капельного кипения) была разработана и создана экспериментальная установка [13] с использованием современного технического оборудования [14]. Экспериментальная установка для исследования капельного кипения включает в себя аппарат с обогреваемой поверхностью, который представляет из себя плоскую пластину из углеродистой стали. Температура поверхности измерялась хромель-копелевыми термопарами, ЭДС которых фиксировалась с точностью до десятых долей милливольты высокоточными измеритель-регуляторами технологическими ИРТ 1730D. Также температура поверхности нагрева дублировалась инфракрасным термометром – пирометром АК ИП-9302, позволяющего проводить измерение бесконтактным способом. Картина поведения капли и время испарения определялись с помощью высокоскоростной видеокамеры VS-FAST/G6 с максимальной частотой съемки до 5000 кадров в секунду. Видеокамера выведена на монитор компьютера, на экране которого с необходимой детализацией и точностью наблюдалась вся картина процесса испарения, с которой можно было производить различные манипуляции: останавливать кадр, осуществлять покадровый просмотр, возвращаться к любому интересующему моменту, увеличивать и переворачивать изображение, записывать на компьютере видео и фотоизображение процесса. Эти возможности позволяли с высокой точностью измерять время протекания процесса и необходимые линейные размеры.

Проведенные опыты позволили выявить физическую картину кипения капли жидкости на поверхности нагрева, геометрические и временные факторы, характеризующие этот процесс [15]. Использование скоростной видеосъемки позволило визуально наблюдать, как меняется поведение капли, попадающей на поверхность нагрева с температурой выше температуры кипения жидкости. При падении капли в начальный момент контакта с поверхностью, капля как бы «расплющивается» и приобретает форму близкую к тороиду со сплошной пленкой жидкости внутри тороида. Далее она под действием силы поверхностного натяжения стягивается и приобретает вид приплюснутой полусферы. В зависимости от температуры поверхности нагрева, некоторое время, очевидно соответствующее времени прогрева объема капли до температуры, близкой к температуре кипения, картина процесса внешне не изменяется. Далее происходит визуально наблюдаемый сам процесс кипения. При этом кипящая капля сохраняет примерно постоянную площадь пятна контакта с поверхностью нагрева. После испарения основного объема жидкости на поверхности остается влажное пятно. Последний период испарения характеризуется постепенным полным высыханием влажного пятна.

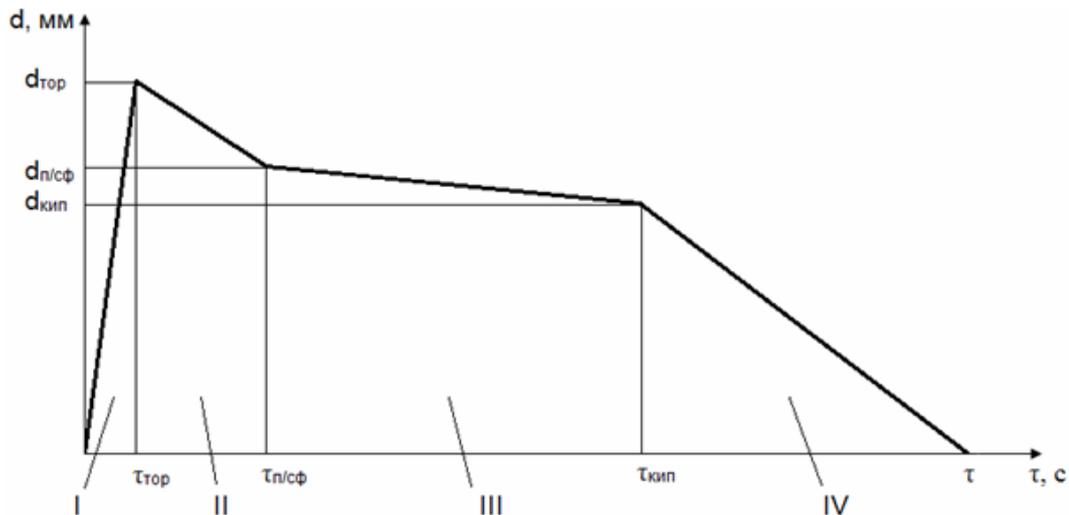
При воспроизводстве ускоренной видеосъемки на экране монитора на всех этапах процесса кипения капли проводились измерения геометрических размеров площади контакта кипящей капли с поверхностью нагрева и времени испарения жидкости, как в целом, так и каждого периода.

Время испарения, а при необходимости его отдельные периоды, измерялось следующим образом. При включении скоростной съемки видеокамеры на мониторе идет отсчет числа кадров, снятых камерой за реальный промежуток времени, начиная с первого кадра и до конечного. Используя стоп-кадры, в необходимые моменты фиксируется общее число кадров, снятых камерой до соответствующего стоп-кадра. Разность значения общего числа кадров между первым и вторым моментами соответствует длительности процесса в этом интервале в кадрах. Разделив это значение на заданную при съемке частоту кадров, получается время, соответствующее выбранному интервалу. Компьютерная обработка позволяет измерять время в секундах с точностью до третьего знака после запятой. В опытных данных время испарения фиксировалось до сотых долей секунды, то есть до второго знака после запятой.

Линейные размеры измерялись следующим образом. На выбранном стоп-кадре изображение объекта увеличивалось до достаточного для измерения, и на экране курсором измерялся его размер в пикселях, количество которых укладывалось в измеряемый интервал. Далее в этом же масштабе измерялось количество пикселей, соответствующее размеру известного заранее из-

меренного объекта. Из пропорционального соотношения рассчитывался линейный размер измеряемого объекта. В проведенных опытах линейные размеры определялись в миллиметрах с точностью до второго знака после запятой.

Картину поведения капли при ее кипении можно проиллюстрировать следующим качественным графиком.



Изменение диаметра пятна контакта кипящей капли с поверхностью нагрева:

$\tau$  – время испарения капли;  $d$  – диаметр пятна контакта;  $\tau_{\text{тор}}$  – время образования тороида;  $\tau_{\text{п/сф}}$  – время образования приплюснутой полусферы (начало кипения);  $\tau_{\text{кип}}$  – время окончания кипения (влажное пятно);  $\tau$  – полное испарение капли с поверхности нагрева;  $d_{\text{тор}}$  – диаметр тороида;  $d_{\text{п/сф}}$  – диаметр приплюснутой полусферы;  $d_{\text{кип}}$  – диаметр в конце кипения (влажного пятна); периоды процесса: I – тороид; II – приплюснутая полусфера; III – кипение капли; IV – высыхание влажного пятна

В каждом периоде можно выделить как средний диаметр и соответственно площадь контакта кипящей капли с поверхностью нагрева, так и определить усредненный диаметр (площадь) за весь период процесса кипения. С учетом этих рассуждений дальнейшая математическая обработка экспериментальных данных сводится к следующему.

В общем случае необходимое количество тепла для испарения капли определяется:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

или

$$Q = m_k \cdot c_p \cdot (t_{\text{кип}} - t_n) + m_k \cdot r, \quad (1)$$

где  $Q$  – общее количество тепла, Дж;  $Q_1$  – количество тепла, необходимое для нагрева жидкости до температуры кипения, Дж;  $Q_2$  – количество тепла, необходимое для осуществления фазового перехода из жидкого состояния в парообразное, Дж;  $m_k$  – масса капли жидкости, кг;  $c_p$  – теплоемкость жидкости, Дж/(кг·°C);  $t_{\text{кип}}$  – температура кипения жидкости, °C;  $t_n$  – начальная температура жидкости в капле, °C;

$r$  – теплота фазового перехода (скрытая теплота парообразования), Дж/кг.

Площадь теплообмена  $F_n$  кипящей капли с поверхностью нагрева (площадь пятна контакта) рассчитывалась по усредненному диаметру пятна контакта  $d_n$ , измеренному во время видеосъемки:

$$F_n = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4}, \text{ м}^2. \quad (2)$$

Тепловая нагрузка определялась как:

$$N = \frac{Q}{\tau}, \text{ Вт}. \quad (3)$$

где  $\tau$  – время испарения, [с].

Удельный тепловой поток:

$$q = \frac{N}{F_n}, \text{ Вт/м}^2. \quad (4)$$

Тепловой напор (движущая сила процесса теплоотдачи):

$$\Delta t = t_{\text{см}} - t_{\text{кип}}, \text{ }^\circ\text{C}, \quad (5)$$

где  $t_{\text{см}}$  – температура поверхности нагрева, [°C].

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta t \cdot F_n \cdot \tau}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}. \quad (6)$$

Массовая скорость испарения:

$$w = \frac{m_k}{\tau}, \text{ кг/с.} \quad (7)$$

Удельная производительность по испаряемой влаге:

$$W = \frac{m_k}{\tau \cdot F_n}, \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч).} \quad (8)$$

Аналогично можно рассчитать все параметры и для каждого периода, показанного на рисунке. Количество тепла для каждого из периодов рассчитывается пропорционально времени испарения соответствующего периода.

Обработка экспериментальных данных, полученных при капельном кипении воды, для различных размеров капель показала, что средний коэффициент теплоотдачи, соответствующий всему периоду испарения лежит в районе примерно 30 000 Вт/(м<sup>2</sup>·°С), а максимальные коэффициенты теплоотдачи, соответствующие непосредственно кипению (период III), достигают значений 60 000 Вт/(м<sup>2</sup>·°С) и выше.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рафекова, А. Р. Математическая модель процесса теплообмена в пористом проникаемом ребре / А. Р. Рафекова, Г. В. Рябчук, В. А. Балашов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – № 11. – С. 51–53. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1).
2. Аристов, В. Л. Экспериментальное исследование параметров работы тонкопленочных аппаратов бесконтактным методом / В. Л. Аристов, Г. В. Рябчук, Г. И. Лепехин, П. В. Мишта, Р. А. Евдокимов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 1. – С. 11–14. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2).
3. Кутателадзе, С. С. Тепломассообмен и волны в газодинамических системах / С. С. Кутателадзе, В. Е. Накоряков. – Новосибирск: Наука, 1984. – 301 с.
4. Гезехус, Н. А. Применение электрического тока к исследованию сфероидального состояния жидкости / Н. А. Гезехус // Журн. рус. физ.-хим. об-ва / УПИ. – Л., 1887. – Вып. 8. – С. 51–53.
5. Боришанский, В. М. Теплопередача к жидкости, свободно растекающейся по поверхности, нагретой выше температуры кипения / В. М. Боришанский. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 350 с.
6. Скрипов, В. П. / В. П. Скрипов // Тр. УПИ. Физика. – Свердловск, 1962. – Вып. 123. – С. 50–57.
7. Скрипов, В. П. Капля на горячей плите: появление 1/f-шума при переходе к сфероидальной форме / В. П. Скрипов, А. В. Виноградов, В. Н. Скоков и др. // ЖЭТФ. – 2003. – Т. 73. – Вып. 6. – С. 21–23.
8. Анохина, Е. В. Влияние материала поверхности нагрева на кривую кипения жидкости / Е. В. Анохина // ЖТФ. – 2009. – Т. 79. – Вып. 9. – С. 20–25.
9. Анохина, Е. В. Исследование процессов испарения и кипения жидкостей / Е. В. Анохина // ЖТФ. – 2010. – Т. 80. – Вып. 8. – С. 32–37.
10. Яламов, Ю. И. Скорость нестационарного испарения сферической капли с учетом скачков концентрации и температуры вблизи ее поверхности / Ю. И. Яламов, М. К. Кузьмин // ЖТФ. – 2005. – Т. 75. – Вып. 3. – С. 30–35.
11. Влияние режима испарения на пространственное перераспределение компонентов в испаряющейся капле жидкости на твердой горизонтальной подложке / Ю. Ю. Тарасевич, О. П. Исакова, В. В. Кондухов, А. В. Савицкая // ЖТФ. – 2010. – Т. 80. – Вып. 5. – С. 45–53.
12. Тепло- и массоперенос в дисперсных и пористых средах / В. И. Терехов, В. В. Терехов, Н. Е. Шишкин, К. Ч. Би // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 5. – С. 829–836.
13. Рева, С. Л. Экспериментальная установка для исследования процесса капельного испарения / С. Л. Рева, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1. – С. 40–43. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).
14. Волков, И. В. Автоматическое измерение и стабилизация температуры в лабораториях и на участках производственных цехов / И. В. Волков, В. П. Заярный // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1. – С. 86–89. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).
15. Экспериментальное исследование испарения капли с поверхности нагрева / С. Л. Рева, П. С. Васильев, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков // Инновационные наукоемкие технологии: теория, эксперимент и практические результаты: доклады междунар. науч.-практич. конференции / Под общ. ред. чл.-кор. РАН В. П. Мешалкина. – М.: Тула: ТулГУ, 2010. – 103 с.

УДК 665.7

*Ю. В. Думский\*\**, *Г. Ф. Чередникова\**, *С. Ю. Думский\*\**, *Н. А. Кузнецова\**, *Е. В. Кострубина\**

**МЯГЧИТЕЛИ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ РЕЗИНЫ:  
СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И ФАКТИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО**

\* ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование»,

\*\* Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

Рассматриваются требования, а также состав, качество смоляных агентов-мягчителей в целом и нефтеполимерной смолы Пиропласт, обеспечивающей высокое качество регенерата, получаемого с ее использованием.

*Ключевые слова:* мягчители регенерации резины, нефтеполимерные смолы, смола Пиропласт, регенерат.

*Y. V. Dumsky\*\**, *G. F. Cherednikova\**, *S. Y. Dumsky\*\**, *N. A. Kuznetsova\**, *E. V. Kostrubina\**

**PETROLEUM POLYMER REZINS ARE THE INGREDIENTS FOR DIFFERENT METHODS  
OF REGENERATION OF RUBBER**

\*The public corporation «VNIKTInephtehimoborudovanie»,

\*\*Volgograd State Technicai University

It was presented the potential possibilities of using petroleum polymer rezins as emulgators and softeners for different methods of regeneration rubber.

*Keywords:* softeners for regeneration of rubber, petroleum rezins, piropplast, regenerat.

Современное состояние отечественного автомобилестроения, наращивание объемов поставок по импорту шин требует от шинной и резиновой промышленности в целом, и в том числе регенерации резин снижения затрат на товарную продукцию за счет использования новых высокоэффективных и вместе с тем дешевых ингредиентов. ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование» – головной научно-исследовательский институт России по маслам-мягчителям и пластификаторам, церезино-восковым продуктам и смоляным агентам предлагает свои разработки в этой области, выполненные в содружестве с НИИ шинной промышленности, о чем нами было доложено на очередной Международной научно-практической конференции (Москва, май 2010).

Ниже акцент делается на смоляные агенты и конкретно – нефтеполимерные смолы как мягчители для регенерации резины.

Известно, что регенерации подвергаются отработанные резины и вулканизированные отходы именно с целью снижения себестоимости выпускаемой продукции и рационального использования сырья и материалов. При регенерации резины в процессе девулканизации в качестве мягчителей применяются нелетучие и малолетучие агенты набухания каучука. Качество регенерата в значительной мере определяется типом используемых мягчителей, роль которых при девулканизации весьма разнообразна. Адсорбируясь на молекулах каучука, мягчители проникают между ними, ослабляют межмолекулярные силы. При этом происходит разрыв как водородных, так и отдельных химических связей и образование дополнительных

очагов разрушения. Подвижность отдельных элементов структуры увеличивается, возрастает скорость окисления вулканизата. Мягчители не только участвуют в процессе регенерации, но и образуют один из компонентов регенерата, повышая его пластичность. Для наиболее эффективного и равномерного протекания процесса регенерации резины рекомендуется применять комбинации твердых и жидких мягчителей. При этом в составе мягчителей должны присутствовать как вещества, которые вызывают набухание вулканизатов, так и вещества, способствующие их деструкции; комплекс этих веществ обуславливает хорошее слипание частиц деструктированной резины и получение регенерата высокого качества.

Как показано в наших совместных с НИИ шинной промышленности работах, мягчитель регенерации резины должен содержать: непредельные углеводороды, способствующие протеканию процесса регенерации; циклические структуры, увеличивающие адгезионные свойства деструктированных частиц; функциональные группы и гетероатомы, вызывающие равномерное набухание каучука и увеличивающие прочность регенерата. Наиболее полным комплексом таких свойств обладает древесно-пирогенная смола хвойных пород, однако, в настоящее время она практически не выпускается.

В настоящее время для регенерации резины используются самые разнообразные продукты лесохимического производства (сосновая смола, талловое масло, смола вахтан, канифоль и др.), инден-кумароновые смолы, а также малоактивный остаток дистилляции сланцевых смол и даже мазут. Продукты лесохимического про-

изводства имеют высокую стоимость, непостоянный состав, крайне ограниченные ресурсы. Поэтому в качестве ненасыщенного мягчителя для регенератного производства нами была предложена нефтеполимерная смола Пиропласт, сырьем для получения которой, служит тяжелая смола пиролиза углеводородов.

Ниже приведены свойства смолы Пиропласт – мягчителя для регенератного производства.

Внешний вид	Гранулы темно-коричневого цвета
Температура, °С:	
размягчения	93
вспышки в открытом тигле	189
Йодное число, г йода /100 г	23
Кислотность или щелочность	Нейтральная
Массовая доля, %:	
серы	0,14
воды	Отсутствие
зола	0,04
нерастворимых в бензине веществ	43
механических примесей	0,15

Испытания смолы Пиропласт проводились при регенерации резины водонейтральным и термомеханическим методами. Контрольными служили традиционно используемые мягчители. Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что регенерат, полученный водонейтральным методом и содержащий 30 % Пиропласта от массы резины, имеет более высокие прочностные показатели, а содержащий 35 % – практически такие же, как контрольный образец. Регенераты, полученные с Пиропластом и контрольным мягчителем термомеханическим методом, по физико-механическим и пласто-эластическим свойствам практически равноценны. Результаты промышленных испытаний, проведенных на регенератных заводах, позволили рекомендовать Пиропласт в качестве мягчителя для водонейтрального и термомеханического методов регенерации резины.

Для перспективного нового метода регенерации резины – диспергированием в качестве эмульгатора этого процесса вместо канифоли рекомендована новая карбоксилсодержащая нефтеполимерная смола Глютималь.

Таблица 1

Характеристика регенерата, полученного с применением Пиропласта

Содержание Пиропласта, %	Характеристика регенерата				
	мягкость, мм	пластичность, усл. ед.	Эластическое восстановление, мм	Сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
<i>Водонейтральный метод</i>					
– *	2,43	0,52	1,11	5,9	490
35	2,27	0,59	0,68	6,0	557
30	2,68	0,47	1,40	7,5	487
<i>Термомеханический метод</i>					
– **	3,15	0,44	1,15	9,2	440
10	3,06	0,45	1,08	8,5	432

\* Контрольный образец, содержащий 17 % древесно-пирогенной смолы и 17 % нефтяного мазута.

\*\* Контрольный образец, содержащий 7,5 % древесно-пирогенной смолы, 5 % нефтяного мазута и 0,15 % ренацита IV.

Таблица 2

Результаты испытаний нефтеполимерной смолы Глютималь в качестве эмульгатора при регенерации резины

Эмульгатор	Средний радиус дисперсных частиц, мкм	Свойства регенерата					
		Мягкость, мм	Эластическое восстановление, мм	Пластичность, усл. ед.	Сопротивление разрыву, МПа	удлинение	
						Относительное	Остаточное
<i>Протекторная резина</i>							
Канифоль	0,6	3,5	1,8	0,3	9,0	300	12
Глютималь	0,5	3,0	1,6	0,38	11,2	320	10
<i>Каркасная резина</i>							
Канифоль	0,5	2,8	1,5	0,4	8,5	350	20
Глютималь	0,4	2,2	1,0	0,45	10,5	360	17

Как видно из табл. 2 дисперсии и регенерат, полученные с использованием Глютимала, по качественным показателям превосходят регенераты, полученные с использованием канифоли.

Что весьма важно в период финансовой стабилизации, предлагаемые нефтеполимерные смолы на 30–40 % дешевле применяемых аналогов, а по качеству не уступают последним.

Относящиеся к IV классу опасности – малоопасным веществам, по своему составу и качеству они отвечают требованиям Евро, Reach.

Особый практический интерес представляет разработанный институтом процесс получения указанных нефтеполимерных смол в нано-форме с размером частиц порядка 50 нанометров.

Как показывают исследования, такие нано-

дификаторы обуславливают при их применении существенное улучшение технологических и эксплуатационных свойств товарных продуктов. Институт готов предоставить для испытаний заинтересованным предприятиям образцы таких смол.

Для предприятий, которые считают более предпочтительным использование не смоляных агентов как таковых, а жидких нефтепродуктов типа мазута, Институтом могут быть предложены образцы нафтино-ароматических масел по качеству не уступающих указанному жидкому агенту, однако полностью отвечающих требованиям Евро, Reach.

Институт приглашает заинтересованные предприятия к взаимовыгодному деловому сотрудничеству.

УДК 678.057.31

*А. А. Шагарова, А. Б. Голованчиков, П. А. Комкин, В. В. Антонов*

#### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА АКТИВНОСТЬ КАТАЛИЗАТОРА**

**Волгоградский государственный технический университет**

В статье представлены результаты экспериментальных исследований электрокаталитических процессов. Рассматривается влияние электрического поля на характер протекания каталитической реакции. Получены графические зависимости, иллюстрирующие кинетику каталитических процессов, протекающих в электрическом поле.

*Ключевые слова:* электрическое поле, катализатор, электрод, каталитическая реакция, выход химической реакции.

*A. A. Shagarova, A. B. Golovanchikov, P. A. Komkin, V. V. Antonov*

#### **THE EXPERIMENTAL INTENSIFICATIONS OF AN ELECTRIC FIELD'S INFLUENCE ON THE CATALYST ACTIVITY**

**Volgograd State Technical University**

The article deals with the experimental investigations of electro catalysis processes. The electric field influence on a catalytic reaction operating character is observed. The graphic dependences which illustrated the kinetics of catalytic process occurs in an electric field are obtained.

*Keywords:* electric field, catalyst, electrode, catalytic reaction, chemical efficiency.

Явление ускорения электрохимических реакций при помощи катализаторов, входящих в состав электродов, получило название электрокатализа. Вещества, ускоряющие электрохимические реакции, называются электрокатализаторами. Теория электрокатализа, позволяющая предсказывать оптимальные катализаторы для определенных электрохимических реакций, пока не разработана, однако накоплен богатый экспериментальный материал и установлены некоторые закономерности [1–3].

Как и катализаторы химических реакций, электрокатализаторы не изменяют термодинамику процесса, то есть не влияют на равновес-

ный потенциал электродных реакций. Электрокатализаторы увеличивают константу скоростей прямых и обратных реакций. Электрокатализатор изменяет не только скорость, но и механизм реакции и может влиять на состав продуктов реакции. Составной частью электрокаталитической реакции является стадия адсорбции. Могут адсорбироваться исходные вещества, промежуточные частицы и продукты реакции. Кроме того, на реакцию оказывает влияние адсорбция молекул растворителя, ионов электролита, а также адсорбция примесей [4–6].

Так как электроды должны быть проводниками первого рода, то такое же требование

предъявляется к электрокатализаторам (кроме очень тонких слоев) или их носителям (подложкам). Электрокатализаторы должны быть устойчивыми к воздействию окислителей и восстановителей, используемых или выделяющихся в элементах или ячейках, ионных проводников элементов и ячеек, каталитических ядов, сохранять во времени развитую поверхность. Кроме того, они должны быть не дефицитными и недорогими. Все это ограничивает круг веществ, пригодных для изготовления катализаторов. В качестве носителей (подложек) обычно используют химически стойкие металлы или углеродистые материалы. Все электрокатализаторы можно условно разделить на металлические и неметаллические [2, 3].

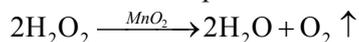
В настоящее время недостаточно полно разработана теория электрокатализа, позволяющая предсказывать оптимальные катализаторы для той или иной реакции. Электрокатализаторы подбираются в основном экспериментальным методом с учетом достижений кинетики электрохимических реакций и электрокатализа [7].

Вопросам проектирования конструкций электрических модулей различного типа посвящены работы [8, 9].

Цель работы определилась как экспериментальные исследования активности катализатора в электрическом поле.

Для исследования влияния электрического поля на характер протекания каталитической реакции была разработана конструкция экспериментальной установки, схема которой представлена на рис. 1.

В основу проведения эксперимента положена модельная каталитическая реакция разложения перекиси водорода в присутствии катализатора – диоксида марганца:



Исходный раствор 3 %-ой перекиси водорода, с постоянной скоростью, поступает в реактор 1. Он представляет собой цилиндрический сосуд с металлической решеткой 3. Сверху на решетку насыпается катализатор 2. Образующийся в ходе реакции кислород по соединительной трубке 9 попадает в сосуд с водой 7, где улавливается мерным цилиндром 6. Вспомогательный сосуд 5 служит для создания гидрозатвора. Образующаяся в ходе реакции вода отправляется в слив. На металлическую решетку 3 также может подаваться напряжение с помощью выпрямителя 8. Один из его электродов (катод либо анод) подсоединяется к металлической решетке 3, второй заземляется. Для обеспечения постоянной скорости подачи перекиси водорода в реактор используется медицинская капельница.

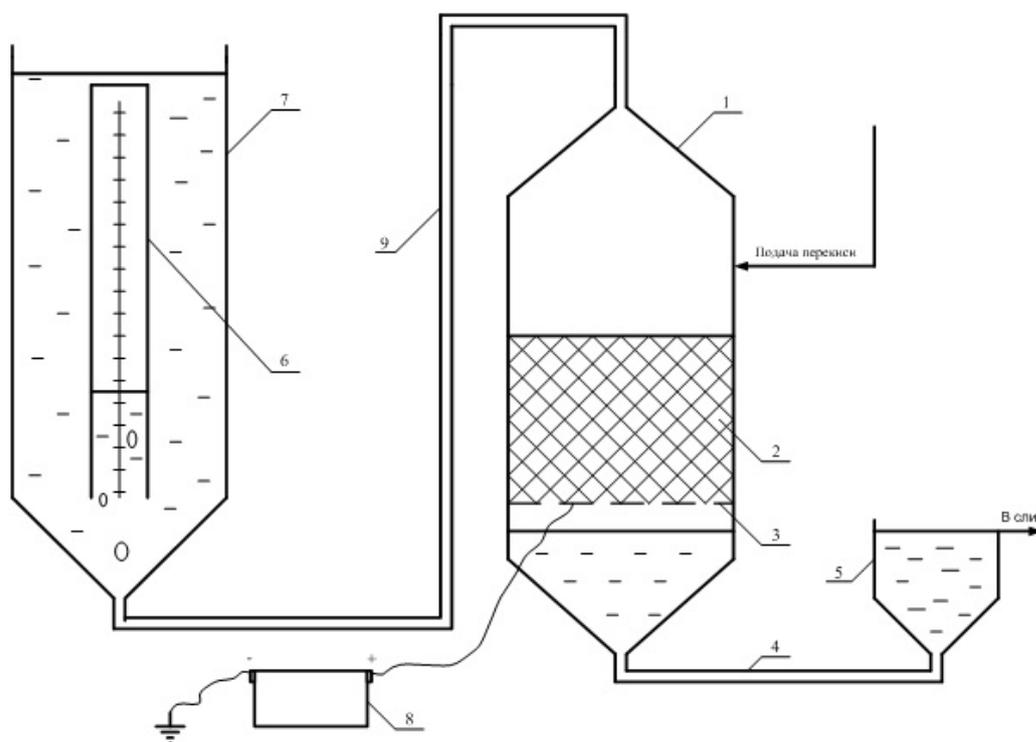


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – реактор; 2 – катализатор; 3 – металлическая решетка; 4, 9 – соединительные трубопроводы; 5 – вспомогательная емкость; 6 – мерный сосуд; 7 – сосуд с водой; 8 – источник постоянного тока

Таблица 1

Результаты эксперимента

Время, с	Объем выделившегося кислорода, мл при скоростях подачи		
	1 мл/мин	2 мл/мин	3 мл/мин
10	1,5	3,5	5,25
20	2,5	8	11
30	5,25	12	16,75
40	7	15,5	23,5
50	9	19,5	29,5
60	11	24	35,25
70	13	28	40,5
80	14,5	32	46,5
90	16,5	35,5	
100	18,25	39	
110	20	43	
120	22	46	
130	23,5	50	
140	25,25		
150	27		
160	29		
170	30,75		
180	32,25		
190	34		
200	35,75		
210	37,5		
220	39,25		
230	40,75		
240	42,75		
250	44,25		
260	45,75		
270	47,75		

Для увеличения напряженности электрического поля в работе использовался кольцевой электрод, который представляет собой металлическое кольцо, располагающееся внутри реакторного узла и играющее роль одного из электродов. В качестве второго выступает металлический стержень, установленный по геометрической оси реактора. Между электродами засыпан катализатор. На электроды подавался постоянный ток.

Для обеспечения различных скоростей подачи реагента в реактор было проведено предварительное тарирование капельницы.

Методика проведения эксперимента была составлена по аналогии с материалами, приводимыми в источниках [10, 11]. Для каждой скорости подачи реагента проводились замеры выделяющегося кислорода за определенный промежуток времени. Для одной из скоростей подачи (1 мл/мин) производился замер выделившегося кислорода с подачей на решетку различного напряжения (3,3 В и 5 В) различной полярности. Измерение напряжения производилось с помощью цифрового мультиметра.

В ходе эксперимента фиксировались время и объем выделившегося кислорода, а также напряжение, подаваемое на решетку. Полученные данные усреднялись по результатам трех замеров. Все опыты проводились при одной и той же установившейся скорости подачи пероксида водорода.

Результаты экспериментальных исследований зависимости объема выделившегося кислорода от времени при различных скоростях подачи реагента представлены в табл. 1.

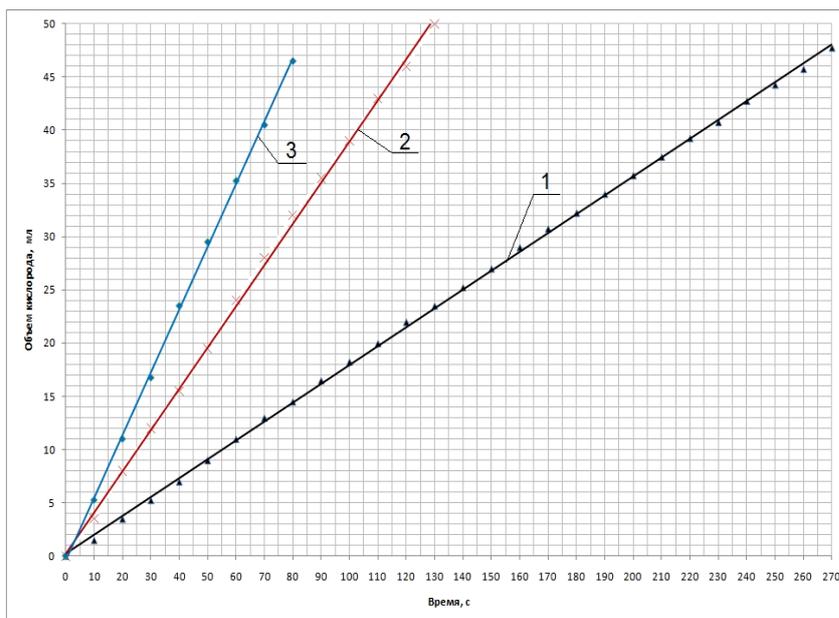


Рис. 2. Зависимость объема выделившегося кислорода от времени при различных скоростях подачи пероксида водорода: 1 – 1 мл/мин; 2 – 2 мл/мин; 3 – 3 мл/мин

Таблица 2

Результаты эксперимента с плоским электродом

Время, с	Объем кислорода в зависимости от полярности и величины напряжения, мл		
	«+» 3,3 В	«+» 5 В	«-» 5 В
10	2	2	1,5
20	4	3,75	3
30	6	6	4,5
40	8,25	8,25	6
50	10	10,25	8
60	12,25	12,25	9,5
70	14,25	14,25	11
80	16	16,5	13
90	18	18,5	14,5
100	20	20,5	16
110	22	22,5	18
120	24	24,5	19,5
130	26	26,25	21,5
140	28	28	23
150	30	29,75	24,5
160	32	31,75	26,5
170	34,25	33,25	28
180	36	35,25	29,5
190	38	37,25	30,5
200	39,75	39	32,5
210	41,75	40,75	34,5
220	43,75	42,5	36
230	45,75	44,5	38
240	47,5	46,5	39,5
250	49	48,25	40,5
260			42,5
270			44
280			46
290			47,5
300			49

Экспериментальные данные обработаны в виде графических зависимостей и представлены на рис. 2.

В ходе экспериментальных исследований изучался процесс влияния напряженности электрического поля и полярности электродов на выход кислорода при протекании каталитической реакции, при этом изменялась геометрия электродов. В табл. 2 представлены результаты экспериментальных исследований.

По полученным экспериментальным данным также были построены графические зависимости (рис. 3), иллюстрирующие кинетику каталитического процесса в случае, когда катализатор находится в электрическом поле.

Анализ полученных результатов позволил установить, что наиболее благоприятное влияние на ход процесса оказывает подключение к решетке реактора анода с напряжением не более 5 В, позволяющее увеличить выход целевого продукта на 14 %. Увеличение подаваемого напряжения нецелесообразно ввиду начинающегося электролиза воды и замедления процесса. Подключение решетки к катоду также не приводит к желаемому результату, а даже напротив, тормозит процесс.

Для увеличения напряженности электрического поля при такой же скорости подачи реагента была изменена геометрия электрода и проведена серия опытов для электрода кольцевой формы. Результаты этого опыта показаны на рис. 4. Сравнительный анализ графических зависимостей, характеризующих влияние электрического поля на активность катализатора, представленных на рис. 4, показывает, что наилучшая форма электродов – кольцевая по всей

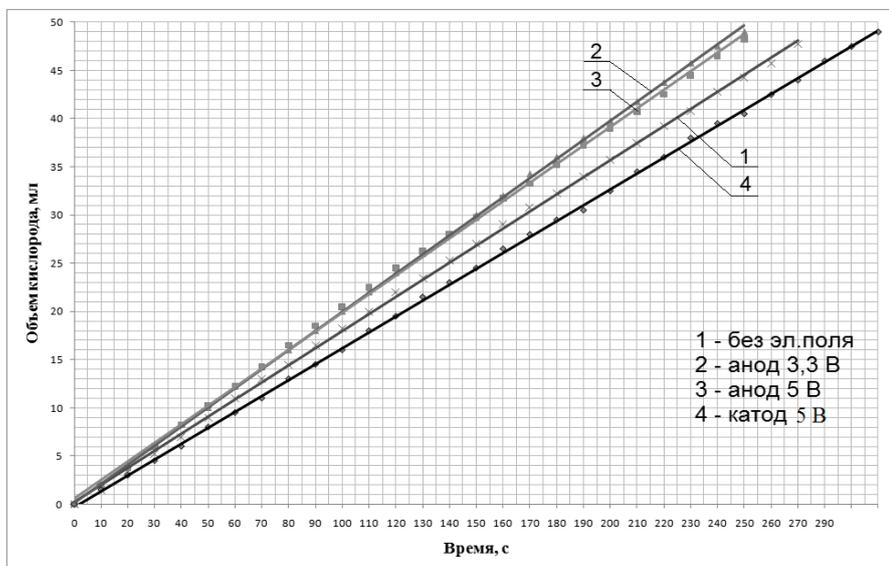


Рис. 3. Результаты эксперимента с плоским электродом

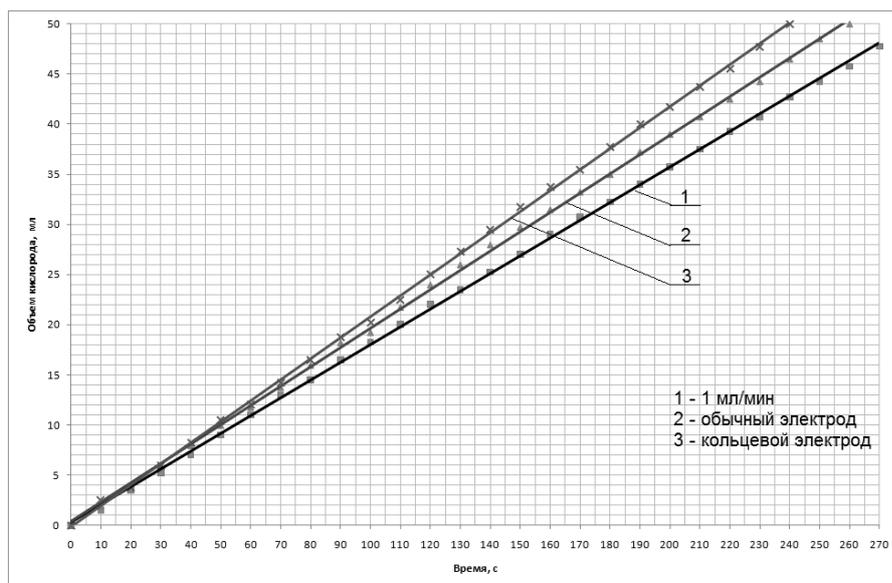


Рис. 4. Результаты эксперимента с кольцевым электродом

высоте слоя катализатора. Использование кольцевого электрода позволяет увеличить напряженность электрического поля и благоприятно сказывается на протекании модельной каталитической реакции, увеличивая выход кислорода на 16 % по сравнению с протеканием реакции без электрического поля.

Таким образом, экспериментальные исследования позволили определить перспективное направление интенсификации каталитических процессов в электрическом поле и послужить базой для дальнейшей разработки этого вопроса.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Багоцкий, В. С. Основы электрохимии / В. С. Багоцкий. – М.: Химия, 1988. – 400 с.
2. Байрамов, В. М. Основы химической кинетики и катализа / В. М. Байрамов. – М.: Академия, 2003. – 256 с.
3. Проблемы электрокатализа / Под ред. В. С. Багоцкого. – М.: Химия, 1980. – 224 с.
4. Голованчиков, А. Б. Моделирование адсорбционных процессов в электрическом поле / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, М. А. Рязанов // Известия ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. – 2003. – Т. 46. — С. 135–137. (Сер. Химия и химическая технология. Вып. 3).
5. Голованчиков, А. Б. Влияние электрического поля на степень очистки воздуха в процессе адсорбции / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, В. И. Лапицкий // Изв. ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. – 2007. – № 11. – С. 27–28. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1).
6. Ефремов, М. Ю. Использование электрического поля для подготовки воды в пароэнергетических установках / М. Ю. Ефремов, А. Б. Голованчиков, А. В. Добряков // Изв. ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. – 2011. – № 1. – С. 114–118. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).
7. Попов, Ю. В. Исследование процессов органического синтеза на гетерогенных катализаторах / Ю. В. Попов и др. // Изв. ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. – 2009. – № 2. – С. 53–55. (Сер. Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов. Вып. 6).
8. Голованчиков, А. Б. Проектирование модулей для обеззараживания воды в электрическом поле / А. Б. Голованчиков, Н. О. Сиволобова // Изв. ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. – 2007. – № 1. – С. 41–44. (Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 1).
9. Сиволобова, Н. О. Влияние структуры потоков на степень обеззараживания воды в электрическом поле / Н. О. Сиволобова, А. Б. Голованчиков, М. Г. Новиков // Изв. ВолГГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. – 2007. – № 11. – С. 23–26. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1).
10. Тарасевич, М. Р. Катализ и электрокатализ металлопорфинами / М. Р. Тарасевич, К. А. Радюшкина. – М.: Наука, 2002. – 168 с.
11. Логинова, О. Н. Влияние электромагнитного поля высокой частоты на кинетику разложения пероксида водорода / О. Н. Логинова, Б. П. Шипуров, О. Г. Сичкарева // Химия и технология топлив и масел. – 2006. – № 3. – С. 163–166.

УДК 66.015.23

*В. В. Шишлянников, А. Б. Голованчиков, Т. Б. Дорохина, Т. А. Осетрова*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ, РАЗМЕРОВ И МАТЕРИАЛА НАСАДКИ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ**

**Волгоградский государственный технический университет**

В данной работе исследуется гидравлическое сопротивление в насадочной колонне с различными насадками Рашига: стальные кольца 10×10×0,5, керамические 15×15×2, пластиковые 15×15×2 со специальными элементами и неправильной формы. Получены опытные графики изменения перепада давления от фиктивной скорости.

*Ключевые слова:* гидравлическое сопротивление, насадка, колонна, кольца, опытные.

*V. V. Shishliannikov, A. B. Golovanchikov, T. B. Dorokhina, T. A. Osetrova*

**EXPERIMENTAL STUDY OF SHAPE, SIZE AND MATERIAL TIPS FOR HYDRAULIC RESISTANCE**

**Volgograd State Technical University**

In this paper the pressure drop in packed column with various attachments Raschig: steel ring 10×10×0,5, ceramic 15×15×2, 15×15×2 plastic two special elements, and an irregular shape. Obtained experimental graphs of the pressure drop of a fictitious rate.

*Keywords:* hydraulic resistance, attachment, column, ring, experienced.

Наибольшей простотой устройства отличаются насадочные колонны, представляющие собой трубу с опорной решеткой под насадку, которая засыпается в аппарат навалом. В качестве насадки используются кольца, наружный диаметр которых равен их высоте. В этих аппаратах газ движется снизу вверх навстречу стекающей жидкости. Насадка характеризуется линейными размерами, удельной поверхностью и свободным объемом. В таблице приведены эти размеры для исследуемых в работе насадок.

В насадочной колонне мы имеем двухфазные потоки, представляющие собой неоднородные системы с поверхностью раздела фаз, именуемой для систем газ – жидкость свободной поверхностью. Характеристики двухфазных по-

**Сравнительная характеристика исследуемых насадок**

Материал	Размеры, мм	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	Свободный объем
Сталь	10×10×0,5	500	0,88
Керамика	15×15×2	310	0,71
Пластмассовая специальная «ПАХП ВГТУ» [3]	15×15×2	319,5	0,76

токов достаточно подробно описаны в литературе [1–10].

Основной характеристикой двухфазных потоков является перепад давления на единицу высоты аппарата, который рассчитывается (ниже точки инверсии) по следующей формуле

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta l}\right)_{г-ж} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta l}\right)_г \cdot \left[1 + c \left(\frac{L}{G}\right)^{0,405} \cdot \left(\frac{\rho_г}{\rho_ж}\right)^{0,225} \cdot \left(\frac{\mu_ж}{\mu_г}\right)^{0,045}\right] \cdot \left[\frac{H}{M^2}\right], \quad (1)$$

где *c* – поправочный коэффициент, определяемый по графику [1];  $\left(\frac{\Delta P}{\Delta l}\right)_{г-ж}$  – перепад давления в двухфазном потоке;  $\left(\frac{\Delta P}{\Delta l}\right)_г$  – перепад давления в однофазном потоке; *L* – расход жидкости, подаваемой на орошение; *G* – расход газа через колонну;  $\rho_г, \rho_ж$  – плотность газа и жидкости;  $\mu_г, \mu_ж$  – вязкость газа и жидкости.

При движении газа через сухую насадку гидравлическое сопротивление рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{сyx} = \lambda_3 \frac{H \cdot a \cdot V_{\phi}^2 \cdot \rho_г}{4 \cdot \epsilon^3 \cdot 2} \quad (2)$$

где *H* – высота слоя насадки; *V<sub>φ</sub>* – фиктивная скорость, м/с; *a* – удельная поверхность насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>; *ε* – свободный объем, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\lambda_3$  – коэффициент сопротивления слоя насадки,  $\lambda_3 = f(Re_г)$ ;  $Re_г = \frac{4V_{\phi} \cdot \rho_г}{\alpha \cdot \mu_г}$  – критерий Рейнольдса для газа, движущегося в слое насадки. При  $Re_г < 40, \lambda_3 = 140/Re_г$ , а при  $Re_г > 40, \lambda_3 = 16/Re_г^{0,2}$ .

В данной работе эксперименты проводились на установке, состоящей из колонного ап-

парата, выполненного из оргстекла диаметром 0,054 м и высотой 0,6 м, со сменными насадками (см. таблицу). Интерес представляла новая насадка из пластика со специальными перегородками, которые придавали ей новую форму [3]. Общий вид аппарата и различные насадки представлены на рис. 1.

Установка оснащена ротаметрами для газа и жидкости, которые транспортировались по трубам из соответствующих емкостей насосом и воздуходувкой.

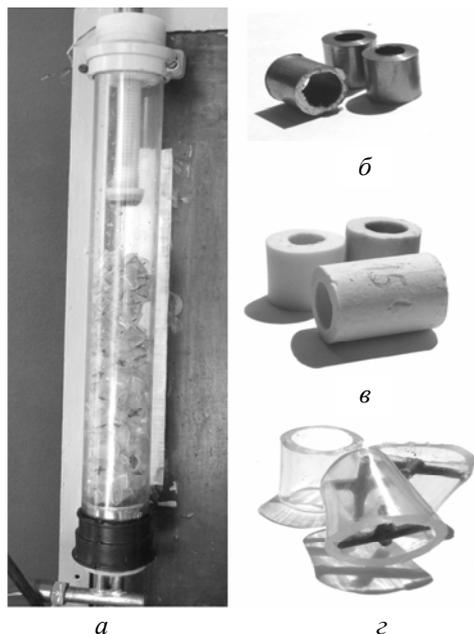


Рис. 1. Общий вид аппарата и насадки:  
а – общий вид аппарата; б – стальные кольца Рашига,  $10 \times 10 \times 0,5$ ;  
в – керамические кольца Рашига  $15 \times 15 \times 2$ ; г – пластиковые кольца ПАХП ВГТУ

При разных расходах газа и жидкости на сменных насадках были проведены эксперименты. На рис. 2 представлены графики изменения перепада давления от фиктивной скорости газа.

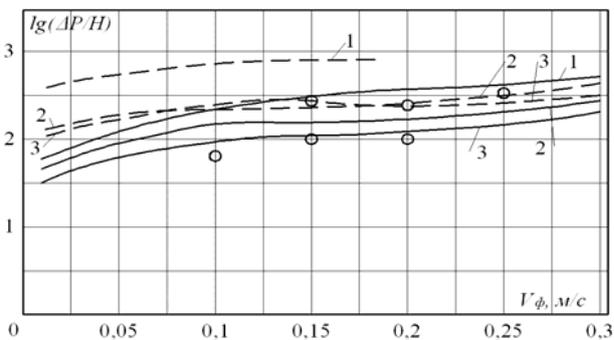


Рис. 2. Изменение перепада давления  $\lg(\Delta P/H)$  от фиктивной скорости  $V_\phi$  для различных насадок:  
1 – стальные кольца Рашига,  $10 \times 10 \times 0,5$ ; 2 – керамические кольца Рашига  $15 \times 15 \times 2$ ; 3 – пластиковые кольца ПАХП ВГТУ;  
— — расход жидкости  $L = 0$ , кг/с; - - - — расход жидкости  $L = 1 \cdot 10^{-2}$ , кг/с; ° – по формулам (1) и (2) для ПАХП ВГТУ [3]

Как видно из рис. 2, наблюдаются значительные перепады давления для исследуемых насадок при различных орошениях и фиктивной скорости. Для насадки из стальных колец Рашига как сухой, так и орошаемой насадки, выше, чем для керамических и пластиковых колец, так как она меньше по размеру и свободный объем и удельная поверхность выше. Для пластиковой насадки ПАХП ВГТУ [3] гидравлическое сопротивление для сухой насадки (линия 3) ниже, чем для керамических колец Рашига, хотя их размеры примерно одинаковы. Для этой же, но орошаемой насадки, гидравлическое сопротивление также меньше. Это можно объяснить тем, что поверхность пластика более гладкая и обладает некоторой гидрофобностью, жидкость быстро стекает, не задерживаясь на поверхности. Кроме того, форма пластиковой насадки более искривленная, что также способствует быстрому стеканию жидкости.

По формулам (1) и (2) были рассчитаны теоретические перепады давления для орошаемой и сухой насадки (то есть  $L = 0$  и  $L = 1 \cdot 10^{-2}$ , кг/с).

При  $V_\phi = 0,1; 0,15; 0,2$  м/с для исследуемых насадок представлены значения перепадов давления на рис. 2. Получено удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных данных.

Таким образом, проведены исследования гидравлики различных насадок. Представлена новая пластиковая насадка ПАХП ВГТУ, которая обладает эффективностью по сравнению с аналогичной керамической насадкой. Пластиковая насадка может быть рекомендована для применения в промышленности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Кафаров, В. В. Основы массопередачи / В. В. Кафаров. – М.: Выс. шк., 1979. – 439 с.
- Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – Изд. 10-е, стереотип, дораб. – М.: Альянс, 2004. – 573 с.
- Скруббер с подвижной насадкой. П. м. Российская Федерация: МПК В 10 Д 53/18 / А. Б. Голованчиков, В. В. Шишлянников, Т. Б. Дорохина и др.; заявитель и патентообладатель ВолГТУ. – Положительное решение № 2011 10191/05 от 25.05.11.
- Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. Л. Брюнов, Ю. И. Дытнерский. Под ред. Ю. И. Дытнерского. – М.: Химия, 1997. – 496 с.
- Панкратов, И. И. Машины и аппараты химических производств: учебник для вузов по специальности «Машины и аппараты химических производств и предприятий строительных материалов» / И. И. Панкратов, О. А. Перелыгин, В. М. Доронин, М. Г. Гайнуллин. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

6. Рамм, В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. – М.: Химия, 1986. – 655 с.

7. Трачук, А. В. Влияние плотности орошения жидкости на гидродинамику центробежно-барботажного аппарата / А. В. Трачук. – Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – 2007. – № 11(37). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1).

8. Рябчук, Г. В. Гидродинамика пленочных абсорбиров с регулярной насадкой / Г. В. Рябчук, С. А. Трусов, Э. И. Уютова, Е. А. Селезнева // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – 2009. – № 1(49). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2).

9. Шишляников В. В. Критериальные уравнения при течении расплавов полимеров в трубах и каналах / В. В. Шишляников, М. Ю. Ефремов, Ю. В. Аристова // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – 2011. – № 1(74). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2).

10. Шишляников, В. В. Исследование влияния формы и размеров насадки на процесс абсорбции / В. В. Шишляников, Т. Б. Дорохина // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – 2011. – № 1(74). (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2).

УДК 621.694.31

*С. В. Кац, А. В. Павлов*

### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ СТРУЙНЫХ НАСОСОВ ДЛЯ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

Рассмотрены современные конструкции струйных аппаратов, предназначенных для перекачивания и смешения неньютоновских жидкостей за счет энергии струи активной среды (жидкости или газа), истекающей под давлением из сопла. Разработаны новые конструкции струйных аппаратов, в которых активное сопло, установлено с возможностью свободного вращения, винтовую спираль, установленную на внутренней поверхности активного сопла, внутри активного сопла осесимметрично закреплен съемный сердечник, а на внешней поверхности активного сопла в начале приемной камеры установлены лопасти пропеллерной мешалки.

*Ключевые слова:* струйный насос, эжектор, неньютоновская жидкость, активное сопло.

*S. V. Katz, A. V. Pavlov*

### ADVANCED DESIGN JET PUMP FOR NON-NEWTONIAN LIQUIDS

Volgograd State Technical University

The modern design of jet devices, designed for pumping and mixing non-Newtonian fluids due to the energy of the jet active medium (liquid or gas) flowing under pressure from the nozzle. Developed new design of jet devices in which the active nozzle is installed with the possibility of free rotation, a helical coil mounted on the inner surface of the active nozzle, inside the active nozzle axially mounted removable core and the outer surface of the active nozzle at the beginning of the receiving chamber installed blade propeller stirrer.

*Keywords:* jet pump, ejector, non-Newtonian fluid, active nozzle.

Струйные насосы, действующие по принципу передачи кинетической энергии от потока рабочей жидкости к потоку перекачиваемой жидкости, получили широкое распространение практически во всех отраслях промышленности. Известно применение струйных аппаратов для регенерации исходных веществ из загрязненных устойчивых водомазутных эмульсий (неньютоновская жидкость). Оптимальное давление при разделении загрязненных смесей составило 50 МПа, что вызвано их высокой вязкостью [1].

Для снижения эффективной вязкости неньютоновских жидкостей и, следовательно, рабочего давления процесса были разработаны следующие конструкции струйных насосов, позволяющие перекачивать и смешивать неньютоновские жидкости с активной средой.

Известна конструкция струйного насоса, содержащего приемную камеру, камеру смешения, активное сопло, установленное с возможностью свободного вращения в подшипнике, присоединенное к приводу и получающее вращение от электродвигателя [2].

К недостаткам этой конструкции, относится сложность конструкции связанная с установкой редуктора с приводом и электродвигателем, а также утечки всасываемой жидкости через подшипник, что требует установки дополнительного уплотнения.

Для устранения имеющихся недостатков разработан струйный насос, у которого активное сопло, установлено с возможностью свободного вращения, на внутренней поверхности которого установлена винтовая спираль, представленный на рис. 1 [3].

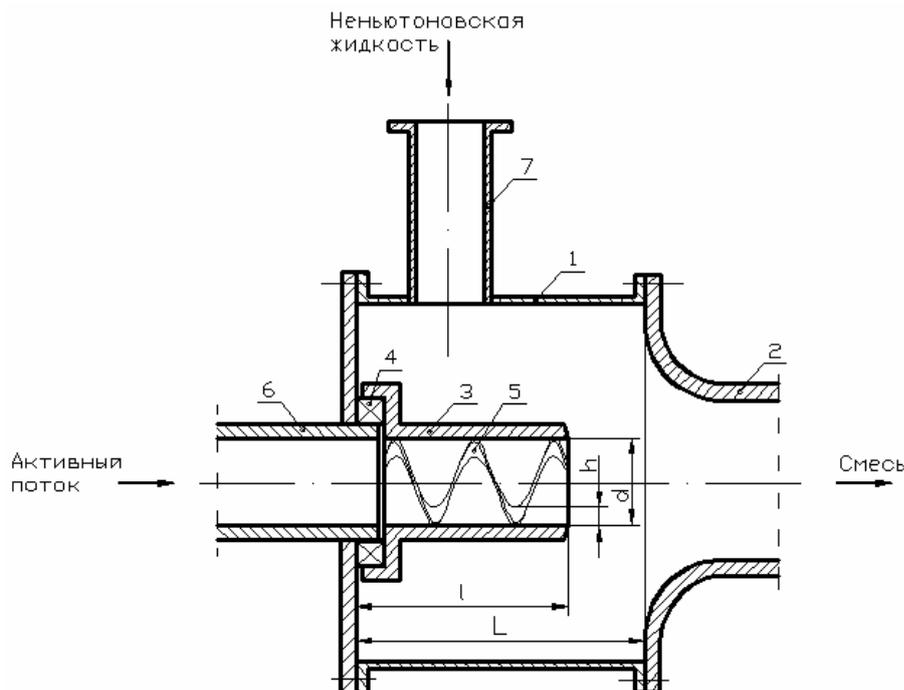


Рис. 1. Струйный насос с винтовой спиралью на внутренней поверхности активного сопла

Струйный насос содержит приемную камеру 1, камеру смешения 2, активное сопло 3, установленное с возможностью вращения в подшипнике 4, закрепленном внутри приемной камеры 1. На внутренней поверхности активного сопла установлена винтовая спираль 5. Для подачи активной среды в активное сопло 3 осесимметрично с ним установлен патрубок 6, а для подачи перекачиваемой неньютоновской жидкости повышенной вязкости в приемную камеру 1 установлен патрубок 7.

Подбор оптимального соотношения высоты витка винтовой спирали 5 и внутреннего диаметра активного сопла 3, позволяет найти необходимое число оборотов активного сопла, при котором перекачиваемая неньютоновская жидкость повышенной вязкости будет успевать снижать свою эффективную вязкость и увлекаться потоком активной среды (жидкости или газа), то есть обеспечивать наибольшую производительность [9].

Но данная конструкция имеет и недостаток – невозможность регулирования скорости вращения активного сопла при постоянном расходе активной среды, что уменьшает интенсивность перемешивания неньютоновской жидкости с активной средой.

Известна конструкция струйного аппарата, включающего рабочее сопло с регулирующей иглой, приемную камеру, камеру смешения и диффузор [4].

К недостаткам, относится небольшая производительность при перекачке и смешении неньютоновских жидкостей повышенной вязкости.

Также известен эжектор, содержащий приемную камеру, камеру смешения, диффузор и расположенное в приемной камере активное сопло с регулирующей иглой, причем последняя установлена с возможностью осевого перемещения и соединена с приводом при помощи гибкого штока [5].

Недостатком этой конструкции является сложность конструкции и малая производительность при перекачке и смешении неньютоновской жидкости с активной средой (неньютоновская жидкость или газ).

Для устранения перечисленных недостатков разработана конструкция струйного насоса, у которого внутри активного сопла осесимметрично закреплен съемный сердечник, а на внешней поверхности активного сопла в начале приемной камеры установлены лопасти пропеллерной мешалки.

Осесимметричное закрепление внутри активного сопла съемного сердечника позволяет при изменении его диаметра изменять скорость активной среды, а значит силу динамического воздействия на винтовую спираль и скорость вращения активного сопла при постоянном расходе активной среды, что приводит к увеличению интенсивности перемешивания неньютоновской жидкости с активной средой [8].

Установка на внешней поверхности активного сопла в начале приемной камеры лопастей пропеллерной мешалки позволяет направить поток неньютоновской жидкости вдоль активного сопла, резко снизить объем застойной зо-

ны в приемной камере, что также интенсифицирует процесс перемешивания неньютоновской жидкости с активной средой.

На рис. 2 представлен струйный насос в продольном разрезе [6].

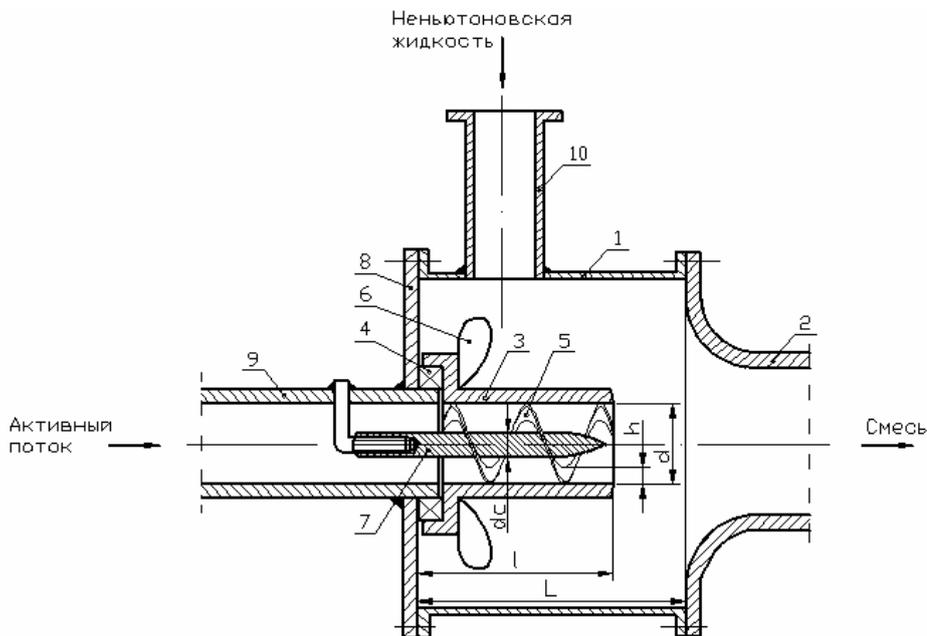


Рис. 2. Струйный насос со съемным сердечником и лопастями пропеллерной мешалки: 1 – приемная камера; 2 – камера смешения; 3 – активное сопло; 4 – подшипник; 5 – винтовая спираль; 6 – лопасти пропеллерной мешалки; 7 – съемный сердечник; 8 – быстросъемная крышка; 9 – патрубок подачи активной среды; 10 – патрубок для подачи перекачиваемой неньютоновской жидкости

Особенностью этой конструкции струйного насоса является то, что на внешней поверхности активного сопла 3, установлены лопасти пропеллерной мешалки 6. В центре активного сопла 3 осесимметрично закреплен съемный сердечник 7, для быстрой замены которого предусмотрена быстросъемная крышка 8.

Лопастями пропеллерной мешалки, создают окружной и осевой поток. Окружной поток усиливает эффект снижения эффективной вязкости, а осевой поток интенсифицирует подачу неньютоновской жидкости вдоль активного сопла [7]. Активное сопло получает вращение, за счет взаимодействия активной среды с винтовой спиралью.

Скорость вращения активного сопла зависит от диаметра  $d_c$  съемного сердечника, внутреннего диаметра  $d$  активного сопла и высоты  $h$  витка винтовой спирали, величины которых подбираются для конкретной неньютоновской жидкости, что позволяет добиться максимального снижения ее эффективной вязкости [10].

Таким образом, предложенная конструкция струйного насоса позволяет перекачивать и смешивать неньютоновские жидкости различ-

ной вязкости с активной средой (ньютоновская жидкость или газ) при ее постоянном расходе, за счет регулирования скорости вращения активного сопла, варьируя диаметр съемного сердечника  $d_c$ , что делает данный аппарат универсальным с точки зрения интенсивного смешения неньютоновских жидкостей с активной средой.

В результате разработаны конструкции и получены патенты на полезные модели двух струйных насосов для неньютоновских жидкостей, позволяющие существенно повысить производительность, при перекачивании и смешении неньютоновских жидкостей различной вязкости с активной средой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сажин, Б. С. Разделение устойчивых эмульсий в струйных аппаратах / Б. С. Сажин, М. П. Тюрин, Л. М. Кочетов, Р. А. Сафонов // Теоретические основы химической технологии. – 2009. – № 1. – С. 14–21.
2. П. м. 97779 Российская Федерация, МПК F 04 F 5/00. Струйный насос / А. Б. Голованчиков, Л. И. Греков, Л. В. Кетат, В. М. Ящук, А. В. Павлов, Д. А. Фурсов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2010118383/06; заявл. 06.05.2010; опубл. 20.09.2010.

3. П. м. 103870 Российская Федерация, МПК F 04 F 5/00. Струйный насос / А. Б. Голованчиков, В. М. Ящук, А. В. Павлов, С. В. Кац, А. А. Жуков; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2010145098/28; заявл. 03.11.2010; опубл. 27.04.2011.

4. Соколов, Е. Я. Струйные аппараты : учебник / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

5. А. с. СССР № 1513237, МПК F 04 F 5/48. Эжектор / А. В. Бельчуг, А. Т. Громько, А. П. Бельчуг, С. А. Цуркан; заявитель и патентообладатель А. В. Бельчуг, А. Т. Громько, А. П. Бельчуг, С. А. Цуркан. – №4366364; заявл. 19.01.1988; опубл. 07.10.1989.

6. П. м. 109810 Российская Федерация, МПК F 04 F 5/00. Струйный насос / А. В. Павлов, А. Б. Голованчиков, В. В. Шишлянников, С. В. Кац; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2011128860/06; заявл. 12.07.2011; опубл. 27.10.2011.

7. Ефремов, М. Ю. Использование энергетического поля для подготовки воды в пароэнергетических установ-

ках / М. Ю. Ефремов, А. Б. Голованчиков, А. В. Добряков // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград. – 2011. – № 1. – С. 114–118. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).

8. Трусов, А. С. Получение устойчивых газо-жидкостных систем / А. С. Трусов, О. А. Залипаева, Ю. В. Аристова // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1. – С. 93–96. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).

9. Мишта, П. В. Применение регуляторов в АСУТП. Выбор методики настройки и перспективы развития / П. В. Мишта, П. Г. Бызов, Е. В. Васильева // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград. – 2010. – № 1. – С. 118–123. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3).

10. Козлов, Д. А. Математическое моделирование жидкостно-газового эжектора с прямолинейной камерой смешения / Д. А. Козлов, А. В. Павлов, В. М. Ящук // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград. – 2010. – № 1. – С. 8–11. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3).

УДК 532.522

*М. В. Ефимов, В. А. Балашов, Д. С. Циплюк*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ РЕШЕТКУ В СВОБОДНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Волгоградский государственный технический университет

Рассматривается истечение жидкости в свободное пространство через решетку, выполненную из перфорированного отверстиями металлического листа. Предложено уравнение для определения расхода протекающей через решетку жидкости. Показано, что коэффициент расхода для отверстий решетки может зависеть от расстояния между ними, уменьшаясь по мере его сокращения. Экспериментально определены граничные значения этих расстояний, ниже которых наблюдается этот эффект и получена зависимость коэффициента расхода для отверстий решетки в зависимости от соотношения диаметра отверстий расстояния между ними.

*Ключевые слова:* коэффициент расхода, затопленное пространство, истечение жидкости, расход жидкости, перфорированная решетка, одиночное отверстие

*M. V. Efimov, V. A. Balashov, D. S. Tsiplyuk*

## RESEARCH OF THE EXPIRATION OF THE LIQUID THROUGH THE LATTICE IN FREE SPACE

Volgograd State Technical University

It is considered the liquid expiration in free space through the lattice made from metal sheet punched by apertures. It is offered the equation for definition of the expense of a liquid proceeding through a lattice. It is shown that the factor of the expense for lattice apertures can depend on distance between them, decreasing in process of its reduction. Boundary values of these distances below which this effect is observed are experimentally defined and dependence of factor of the expense for apertures of a lattice depending on a parity of diameter of apertures of distance between them is received.

*Keywords:* The expense factor, the flooded space, the liquid expiration, the liquid expense, the punched lattice, single aperture

В технологическом оборудовании некоторых производств встречаются процессы, сопровождающиеся протеканием жидкости через решетки, выполненные из металлической сетки или перфорированных металлических листов. Достаточно надежных методов расчета таких течений не имеется. Некоторые сведения и ре-

комендации по расчету истечения жидкости через решетки в затопленное пространство можно найти в работах [1, 2]. Сведений же по истечению жидкости через решетки в свободное пространство не имеется. В настоящей работе приводятся и анализируются некоторые результаты экспериментальных исследований

по истечению жидкости в свободное пространство через решетки, выполненные из перфорированных металлических листов.

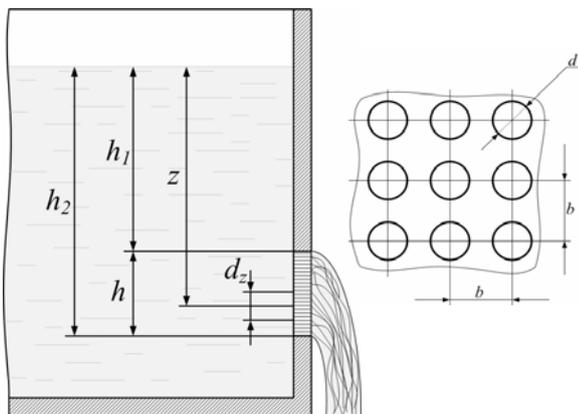


Рис. 1. Схема течения жидкости через решетку

Рассматривается задача об истечении жидкости из открытого резервуара через решетку в его боковой стенке. На рис. 1 изображена расчетная схема для решаемой задачи. Решетка выполнена из перфорированного металлического листа толщиной  $\delta$  с размерами  $h \times l$ , где  $h$  – высота и  $l$  – ширина решетки. Пусть перфорацию образуют отверстия диаметром  $d$ , располагающиеся по вершинам квадрата со стороной  $b$ , и для решетки имеются следующие соотношения размеров  $\delta < d$ ,  $d$  и  $b \ll h$  и  $l$ . Решетка погружена в жидкость на глубину  $h_1$ , и натекание потока жидкости на нее не стеснено стенками резервуара и дном. Истечение жидкости осуществляется при постоянном напоре в свободное воздушное пространство, как это показано на рис. 1.

В работе [2] приводятся результаты исследования структуры затопленного потока протекающей через перфорированную решетку жидкости. Показано, что в вытекающем потоке при взаимодействии соседних струй происходит сложная трансформация поля скоростей, сопровождающаяся перераспределением в потоке энергии и ее дополнительными потерями, что приводит к снижению расхода жидкости определяемого суммированием расходов жидкости протекающей через все одиночные отверстия.

Истечение жидкости через перфорированную решетку в свободное воздушное пространство существенно отличается от ее затопленного истечения. В зависимости от скорости истечения через отверстия, их диаметра и взаимного расположения жидкость может вытекать в воздушное пространство в виде единой ком-

пактной или распадающейся струи, или стекать, как это показано на рис. 1. Возможны и некоторые промежуточные формы истечения жидкости. Гидродинамическая картина истечения жидкости через решетку в свободное пространство, как видно, отличается от таковой для затопленного потока, но является не менее сложной [3, 4].

В работе [2] предлагается все расчеты для затопленного потока проводить как для струи вытекающей из одного отверстия с некоторым условным диаметром, для определения которого необходимо знать коэффициент скорости и пористость решетки. Но определение коэффициента скорости связано с большими трудностями, а пористость решетки не может служить характеристикой, позволяющей достаточно полно учесть проявление эффекта взаимодействия вытекающих из отверстий струек в области непосредственно прилегающей к решетке. Очевидно, что это взаимодействие будет во многом определяться диаметром вытекающих струек и расстоянием между ними, которое может быть разным для сопоставляемых решеток при их одинаковой пористости. Более информативным в этом отношении является величина определяемая отношением расстояния между отверстиями к их диаметру

$$\Gamma = \frac{l}{d},$$

и тогда для определения расхода через перфорированную решетку можно рекомендовать проводить расчет как для струи, вытекающей из одного отверстия с заданным диаметром, но имеющим иной, так называемый эффективный коэффициент расхода, определяемый экспериментально в виде функции:

$$K_p = f(\text{Re}, \Gamma), \quad (1)$$

а общий расход жидкости через перфорированную решетку определять как сумму расходов одиночных струй с эффективным коэффициентом расхода.

Выделим в пределах решетки элементарную линейную площадку

$$dF = dz \cdot l,$$

погруженную в жидкость на глубину  $z$ . Расход жидкости протекающей через одно отверстие элементарной площадки определим как [5]:

$$q_0 = KF_0 \sqrt{2gz}, \quad (2)$$

где  $F_0$  – площадь одного отверстия,  $K$  – коэффициент расхода для отверстия, который следует заменить на его эффективное значение  $K_p$ .

Количество отверстий в пределах элементарной площади будет равно:

$$m = \frac{df \cdot \varepsilon}{F_0}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – пористость решетки, определяющая долю живого сечения протекающего через решетку потока, и тогда расход жидкости через элементарную площадку определится как:

$$dq = mq_0 = K_p \varepsilon l \sqrt{2gz}^{1/2} dz = 4,41 K_p \varepsilon l z^{1/2} dz, \quad (4)$$

Проинтегрировав это дифференциальное уравнение по  $z$  в пределах от  $h_1$  до  $h_2$ , получим уравнение для расхода жидкости через перфорированную решетку в виде зависимости:

$$q = 2,94 K_p \varepsilon l (h_2^{3/2} - h_1^{3/2}), \quad (5)$$

Зависимость  $K_p$  от числа Рейнольдса для истечения из отверстия не вызывает сомнений, но каких либо сведений о его зависимости от симплекса  $\Gamma = \frac{l}{d}$  при истечении жидкости через решетку в свободное пространство не имеется. С целью исследования возможности такой зависимости была проведена серия опытов с тремя группами решеток, отличавшихся размерами отверстий, соответственно  $\varnothing 3$ ,  $\varnothing 4$  и  $\varnothing 5$  мм. В каждой группе было по три решетки имевших по 9 отверстий, расположенных по вершинам квадрата и характеризовавшихся разным значением симплекса  $\Gamma$ , соответственно 1,1; 1,3; 1,5. Толщина решеток равнялась  $\delta = 2$  мм. Опыты проводили при постоянном действующем давлении при погружении центра решетки на глубину 170 мм.

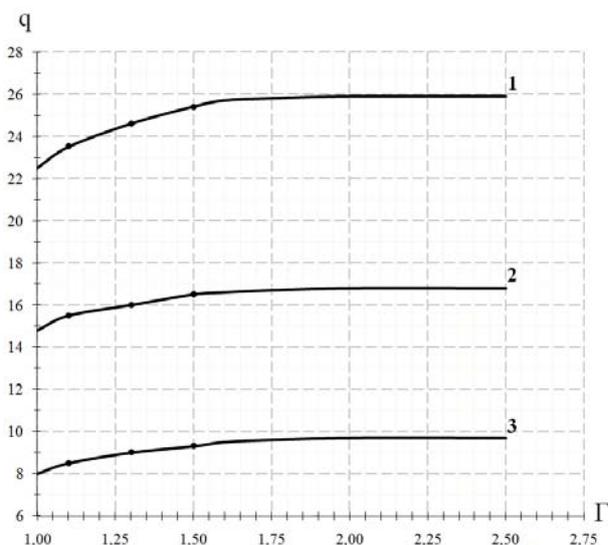


Рис. 2. Зависимости расхода от  $\Gamma$  для разных диаметров отверстий:

1 – 5 мм; 2 – 4 мм; 3 – 3 мм

С целью исключения влияния числа Рейнольдса на результаты экспериментального исследования опыты проводились в узком диапазоне чисел Рейнольдса, изменявшихся в пределах  $Re = (4 \div 7) \times 10^3$ , для которого, на основании графика зависимости  $K = f(Re)$  для истечения жидкости из одиночного самостоятельного отверстия [1, 6, 7], изменение коэффициента расхода не превышает 1,5 %. Предварительно найденное в условиях опыта для указанного диапазона чисел Рейнольдса среднее значение коэффициента расхода для одиночного самостоятельного отверстия принималось равным  $K = 0,73$ . И тогда отклонение от этой величины значений коэффициента расхода для одиночных отверстий, найденных в опытах по истечению жидкости через решетку, может быть объяснено влиянием эффекта, появляющегося при взаимодействии в прирешеточной области вытекающих соседних струй жидкости [8, 9].

На рис. 2 представлены полученные для диапазона чисел Рейнольдса  $Re = (4 \div 7) \times 10^3$ , графики расходов жидкости через одиночные отверстия решеток в зависимости от величины  $\Gamma$  и диаметров отверстий решеток. На графиках можно выделить два участка: горизонтальный и ниспадающий. В пределах горизонтального участка изменение расстояния между отверстиями не влияет на величину расхода жидкости через отдельные отверстия решетки и коэффициент расхода  $K_p$  отверстий решетки остается постоянным и, согласно данным эксперимента, равным таковому для одиночного самостоятельного отверстия  $K \approx 0,73$ , что свидетельствует об отсутствии взаимного влияния истекающих из отверстия решетки струй жидкости [8, 10].

На ниспадающем участке расход жидкости через отверстия решетки снижается по мере уменьшения расстояния между отверстиями и величина коэффициента  $K_p$  снижается относительно его значения для одиночного самостоятельного отверстия, что свидетельствует о наличии взаимного влияния струй жидкости, вытекающих из отверстий решетки. Разделяющие указанные участки графических зависимостей граничные значения расстояний между отверстиями, являющихся разными для разных диаметров отверстий, находятся в пределах значений симплекса

$$\Gamma_{гр} = \left( \frac{1}{d} \right)_{гр} \approx 1,5 \div 1,7.$$

При одинаковых значениях симплекса  $\Gamma$  отклонение значений эффективного коэффициента расхода  $K_p$  для отверстий разного диаметра от его среднего значения для них не превышало

в опытах  $\pm(3 \div 4) \%$ , что и позволяет оценить изменение эффективного коэффициента расхода от величины симплекса  $\Gamma$  в виде представленной на графике зависимости  $K_p = f(\Gamma)$ .

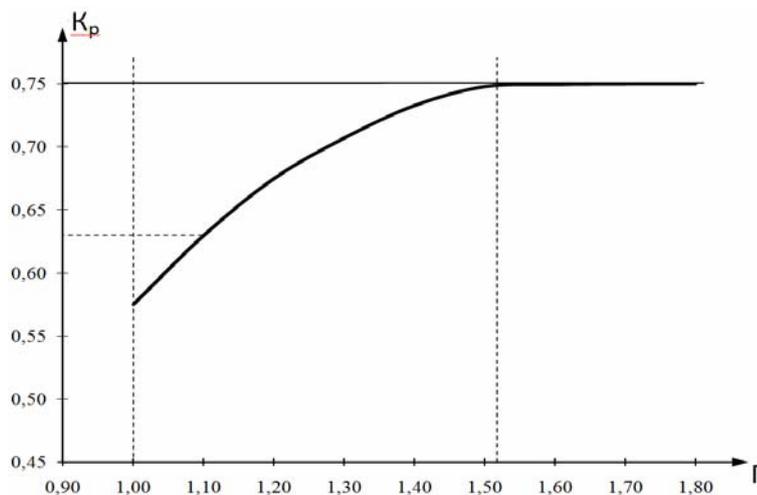


Рис. 3. Зависимость  $K_p = f(\Gamma)$

Из рис. 3 этой зависимости видно, что в диапазоне изменения чисел Рейнольдса  $Re = (4 \div 7) \times 10^3$  при сокращении расстояния между отверстиями уменьшается и коэффициент расхода и когда, например,  $\Gamma = 1,1$ , коэффициент расхода уменьшается примерно на  $(10 \div 12) \%$  относительно его значения для одиночного самостоятельного отверстия.

Если учесть, что струи для крайних по периметру отверстий решеток взаимодействуют с соседними только частично, то для решеток с большим числом отверстий следует ожидать большего снижения значений эффективного коэффициента расхода, чем полученное в опытах для решеток с девятью отверстиями.

Дополнительно проведенные опыты показали возможность применения приведенной на рис. 3 зависимости  $K_p = f(\Gamma)$  и для более широкого диапазона значений числа Рейнольдса  $Re = (2 \div 15) \times 10^3$ .

Таким образом, показано, что при определении с помощью уравнения (5) расхода жидкости, вытекающей через перфорированную решетку в воздушное пространство, значение коэффициента расхода жидкости через одиночное отверстие решетки при  $\Gamma > \Gamma_{кр} = 5 \div 17$  не зависит от расстояния между отверстиями и его величина равняется значению коэффициента расхода для одиночного самостоятельного от-

верстия. В области, когда  $\Gamma < \Gamma_{кр} = 5 \div 17$ , значение коэффициента расхода для отверстия в решетке при прочих равных условиях зависит от расстояния между отверстиями, уменьшаясь по мере их сближения. Полученная экспериментально графическая зависимость  $K_p = f(\Gamma)$  для отверстий малого диаметра (порядка 5 мм) может быть использована для практических расчетов в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = (2 \div 15) \times 10^3$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
2. Идельчик, И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов) / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
3. Приказчикова, Е. А. Определение скорости течения жидкости в плоском канале прямоугольного сечения с проницаемыми стенками / Е. А. Приказчикова, В. А. Балашов, Б. В. Симонов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2010. – № 1. – С. 56–59. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3).
4. Милова, Д. А. Фильтрационное течение жидкости в пристенной области плоского канала / Д. А. Милова, В. А. Балашов, Б. В. Симонов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2010. – № 1. – С. 59–61. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3).
5. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник. В 2 кн. / В. Г. Айнштейн, М. К. За-

харов, Г. А. Носов [и др.]; Под ред. В. А. Айнштейна. – М.: Логос; Высшая школа, 2002. – Кн. 1. – 912 с.

6. *Милова, Д. А.* Определение гидравлического сопротивления при фильтрации жидкости в цилиндрическом пористом слое / Д. А. Милова, В. А. Балашов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2009. – № 1. – С. 14–16. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2).

7. *Приказчикова, Е. А.* Течение в плоском канале с проницаемыми стенками / Е. А. Приказчикова, В. А. Балашов, В. В. Шишлянников // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2009. – № 1. – С. 16–17. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2).

8. Измерение температуры и давления при течении вязких расплавов / В. В. Шишлянников, В. А. Балашов, М. Ю. Ефремов, П. В. Мишта // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2009. – № 1. – С. 76–78. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2).

9. *Милова, Д. А.* Определение расхода жидкости при фильтрационном течении в плоском канале / Д. А. Милова, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2011. – № 1. – С. 12–15. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).

10. *Рабинович, Е. З.* Гидравлика: учеб. пособие для вузов / Е. З. Рабинович. – М.: Недра, 1980 – 278 с.

УДК 66.045.5

*Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков, Я. А. Орлянкина*

## ИСПАРИТЕЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Волгоградский государственный технический университет

Предложена структура физической модели для тепло-массообменного процесса в оросителях градирен. В математической модели предлагается дискретные потоки заменять эквивалентными по эффекту охлаждения потоками, в которых перемещение капель и течение пленки жидкости осуществляется непрерывно. Получены дифференциальное и расчетное уравнения по определению температуры охлаждения жидкости для капельного потока.

*Ключевые слова:* охлаждение, ороситель, градирня, капля, тепло-массообмен.

*N. A. Merentsov, V. A. Balashov, A. B. Golovanchikov, J. A. Orlyankina*

## EVAPORATIVE COOLING OF LIQUID DROPLETS IN THE AIR STREAM

Volgograd State Technical University

The structure of the physical model for heat-mass transfer in sprinklers gradiren is proposed. In the mathematical model it is proposed to replace the discrete streams in accordance with cooling streams effect in which the droplets movement and the current of liquid film is carried out continuously. The differential and calculated equations for cooling temperature liquid determination in the case of drop flow are obtained.

*Keywords:* cooling, sprinkler, gradirnya, drop, heat-mass transfer.

Отсутствие надежных методов расчета тепло-массообменного процесса в оросителях градирен вынуждает использовать при их проектировании расчетные формулы и рекомендации, полученные опытным путем [1]. Влияние на теплообмен в оросителе множества факторов и взаимозависимость некоторых из них затрудняют, а в отдельных случаях и просто не позволяют анализировать работу градирен при изменении условий ее работы. Всесторонний анализ работы градирен возможен только при наличии математической модели процесса теплообмена протекающего в оросителе, однако в настоящее время таких моделей для наиболее распространенного капельно-пленочного течения потока воды сквозь насадку не имеется, а в известных моделях рассматриваются модели только для чисто капельных или пленочных потоков [1]. Для появившихся в последнее время высокоэффективных

насадок [2, 3] каких либо сведений по расчету тепло-массообмена не имеется.

При противоточном движении в слое насадки жидкостного и газового потоков в зависимости от соотношения их расходов возможно существование различных гидродинамических режимов [4], поэтому математическая модель для оросителей градирни должна быть обобщенной, учитывающей охлаждение воды при одновременном ее течении в виде потоков капельного и пленочного течения через ороситель. Множество взаимозависимых факторов усложняет структуру этой модели, при этом следует иметь ввиду, что иногда игнорирование малозаметных факторов, как показано в работах [5–9], может существенно сказываться на точности технологического расчета. Такая обобщенная модель может быть представлена в виде дискретного процесса состоящего из чередующейся последовательности актов появления

капель и коротких участков пленки воды, их непродолжительного самостоятельного существования и последующего слияния соседних капель и пленок в пределах некоторого микрообъема. В результате интенсивного перемешивания в пределах образовавшегося микрообъема происходит выравнивание температуры жидкости, затем микрообъем разрушается с образованием новых капель и пленок жидкости для следующего акта и так далее. При контактировании капель и пленок жидкости с воздухом в пределах времени существования последовательного чередующихся актов и происходит охлаждение воды. Общее количество отобранной от воды теплоты определяется суммированием ее количества отобранного в дискретных капельном и пленочном потоках. При этом предлагается охлаждение капель и пленок воды для их дискретных потоков заменить ее охлаждением в эквивалентных по количеству отобранной теплоты в капельном и пленочном потоках, в которых капли и пленки охлаждаются при непрерывном перемещении в пределах оросителя при изменении параметров процесса в границах, определяемых условиями работы градирни. В таких потоках достигаемая температура охлаждения воды может быть рассчитана как для непрерывно осаждающейся одиночной капли и непрерывно стекающей пленки, обдуваемых воздухом за время, равное времени пребывания воды в оросителе за исключением времени, затрачиваемом на межактные процессы образования и разрушения совместных микрообъемов капельных и пленочных потоков жидкости. Задача об охлаждении воды при пленочном течении через ороситель подробно рассмотрена в работе [1], но решений об охлаждении капельного потока с учетом особенностей изменения параметров теплообменного процесса в пределах оросителя не имеется. В настоящей работе рассматривается такая задача.

Пусть одиночная капля воды обдувается потоком воздуха и температура воды в капле выше температуры воздушного потока. Тепловой поток от капли в некоторый момент ее охлаждения за элементарное время  $dt$  определяется как:

$$dQ = dQ_{\alpha} + dQ_{\beta}, \quad (1)$$

где  $dQ_{\alpha}$  и  $dQ_{\beta}$  – тепловые потоки, соответственно, за счет теплоотдачи и за счет испарения, без учета теплоты, отводимой от капли вместе с массой потока пара, определяется как

$$dQ_{\alpha} = \pi \cdot d^2 \cdot \alpha (T - \theta) \cdot dt, \quad (2)$$

$$dQ_{\beta} = \pi \cdot d^2 \cdot \beta \cdot r (P_{\pi}^* - P_{\pi}) \cdot dt. \quad (3)$$

После подстановки этих значений потоков в уравнение (1), получаем

$$dQ = \pi d^2 [\alpha (T - \theta) + \beta r (P_{\pi}^* - P)] \cdot dt. \quad (4)$$

Этот же тепловой поток можно определить и как

$$dQ = -\frac{\pi d^2}{6} \rho_{ж} C_{ж} dT. \quad (5)$$

Из совместного решения уравнения (4) и (5) получаем

$$\frac{dT}{dt} = -3 \frac{\alpha \cdot (T - \theta) + \beta \cdot r \cdot (P_{\pi}^* - P)}{\rho_{ж} \cdot C_{ж} \cdot R}. \quad (6)$$

Величину  $dQ_{\beta}$  можно определить и как

$$dQ_{\beta} = dm \cdot r = -4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_{ж} \cdot r \cdot dR. \quad (7)$$

где  $dm$  – масса воды, испаренной за время  $dt$ .

Из совместного решения уравнения (3) и (7) следует

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{\beta \cdot (P_{\pi}^* - P)}{\rho_{ж}}. \quad (8)$$

Уравнение (8) в дифференциальной форме отражает взаимосвязь между переменными значениями времени испарения капли и ее радиуса. Интегрируя это уравнения для граничных условий, когда  $\phi = 0$ , то  $R = R_{\pi}$  и когда текущему времени процесса испарения капли  $\phi$  соответствует текущее значение ее радиуса  $R$ , получим уравнение для определения этого радиуса для заданного времени испарения капли

$$R = R_{\pi} - \frac{\beta \cdot (P_{\pi}^* - P)}{\rho_{ж}} \cdot \tau. \quad (9)$$

В градирне, в результате интенсивного перемешивания охлаждаемой воды в оросителе можно пренебречь различием температуры на поверхности капель и в их глубине и в пределах всей капли считать ее равной средней температуре воды по сечению потока воды в оросителе и тогда, в соответствии с условием Стефана, парциальное давление паров воды в диффузионном пограничном слое капли можно принять равным давлению насыщенного пара при этой температуре  $P_{\pi\tau}^*$  [1] и тогда движущая сила массопередачи определится как  $(P_{\pi\tau}^* - P_{\pi})$ .

Движущая сила массопередачи  $(P_{\pi\tau}^* - P_{\pi})$  переменна по высоте оросителя и изменяется нелинейно вследствие нелинейной зависимости парциального давления  $P_{\pi\tau}^*$  от температуры. При выполнении инженерных расчетов ее можно усреднить, определяя как среднюю ло-

гарифмическую величину  $\Delta P_{cp}$  между значениями разностей  $(P_{n\tau}^* - P_n)$ , найденных для крайних сечений оросителя. При этом значения парциальных давлений насыщенного пара  $P_{n\tau}^*$  принимаются как для мокрого термометра при начальной и конечных температурах воды. Парциальное давление пара в воздушном потоке через ороситель переменено вдоль оросителя. При оценке работы оросителя его значение на выходе воздуха из градирни можно определить как

$$P_n = k\varphi P_{n,\theta}$$

где  $P_{n,\theta}$  – парциальное давление насыщенного пара при температуре поступающего в градирню воздуха;  $\varphi$  – относительная влажность воздуха;  $k$  – коэффициент, учитывающий увеличение относительной влажности воздуха по высоте оросителя. Его величина в зависимости от режима работы оросителя может изменяться в пределах  $0,1 \div 0,4$ .

После усреднения движущей силы уравнение (9) запишется как

$$R = R_n - \frac{\beta \cdot \Delta P_{cp}}{\rho_{ж}} \cdot d\tau. \quad (10)$$

Постановка значения текущего радиуса определяемого выражением (10) в уравнение (6) приводит к дифференциальному уравнению

$$\frac{dT}{d\tau} = -3 \frac{\alpha \cdot (T - \theta) + \beta \cdot r \cdot \Delta P_{cp}}{\rho_{ж} \cdot C_{ж} \cdot R_n - \beta \cdot C_{ж} \cdot \Delta P_{cp}}. \quad (11)$$

В результате решения этого дифференциального уравнения можно получить расчетное уравнение для определения изменения температуры капли заданного диаметра от времени ее непрерывного испарения в воздушном потоке при рабочих условиях оросителя. Влияние скорости обдува капли воздухом учитывается в этом уравнении неявно через зависимость от скорости воздушного потока коэффициент массоотдачи.

Для решения уравнения (11) представим его в форме зависимости

$$\frac{dT}{d\tau} = - \frac{T - \theta + A}{B - M\tau}, \quad (12)$$

с комплексными параметрами равными:

$$A = \frac{\beta \cdot r \cdot \Delta P_{cp}}{\alpha}, B = \frac{\rho_{ж} \cdot C_{ж} \cdot R_n}{3\alpha}, M = \frac{\beta \cdot C_{ж} \cdot \Delta P_{cp}}{3\alpha}.$$

Зависимость (12) при использовании новых переменных

$$\xi = T - \theta + A \text{ и } \varphi = B - M\tau,$$

Обращается в дифференциальное уравнение,

$$\frac{d\xi}{\xi} = \frac{1}{M} \cdot \frac{d\varphi}{\varphi}, \quad (13)$$

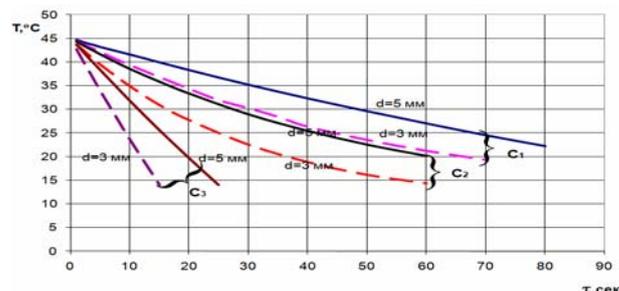
решение, которого для граничных условий

$$\tau = 0 \dots \varphi = B \text{ и } T = T_n \dots \xi = T_n - \theta + A$$

и позволяет получить искомое расчетное уравнение для определения температуры испаряющейся капли от времени испарения в виде зависимости

$$T = a(B - M\tau)^n + b, \quad (14)$$

$$\text{где } a = \frac{T_n - \theta + A}{B^n}, b = (\theta - A), n = \frac{1}{M}.$$



Зависимость температуры в капле от времени испарения

$$C_1 = 2 \cdot 10^{-6}; C_2 = 7 \cdot 10^{-6}; C_3 = 5,5 \cdot 10^{-7}$$

На рисунке представлены полученные с помощью уравнения (14) графики зависимости температуры воды в капле с начальным диаметром 3 и 5 мм от времени ее охлаждения для разных значений предложенного Льюисом коэффициента  $C = \alpha/\beta$ , определяющего постоянство отношений между коэффициентом тепло- и массоотдачи при изменяющихся температуре и влагосодержании воздуха в градирне. При выполнении расчетов значения коэффициентов тепло- и массоотдачи принимались в пределах

$$\alpha = (10 \div 50) \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

и

$$\beta = (10^{-6} \div 10^{-7}) \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}$$

Таким образом, предложена структура обобщенной модели для тепло-массообменного процесса в оросителе градирни при капельно-пленочном потоке воды. Получены входящие в состав обобщенной математической модели дифференциальное и расчетное уравнения, позволяющие определять температуру охлаждения воды для эквивалентного капельного потока, протекающий через ороситель воды.

Обозначения

$d, R, R_n$  – диаметр, текущий и начальный радиус;

$T, \theta$  – температура воды в капле и потоке воздуха;

$\alpha, \beta$  – коэффициенты тепло- и массоотдачи;

$r$  – удельная теплота испарения;

$\rho_{ж}, C_{ж}$  – плотность и теплоемкость воды;

- $P, P_{\text{пр}}$  – общее и парциальное давление пара в потоке воздуха;
- $P_{\text{п}}^*$  – парциальное давление пара в диффузионном пограничном слое;
- $P_{\text{пт}}^*$  – давление насыщенного пара при температуре воды в поперечном сечении оросителя;
- $\Delta P_{\text{ср}}$  – средняя движущая сила массоотдачи в пределах оросителя.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гладков, В. А. Вентиляторные градирни / В. А. Гладков, Ю. И. Арефьев, В. С. Пономаренко. – М. : Стройиздат, 1976. – 216 с.
2. Боев, Е. В. Совершенствование конструкций полимерных оросителей градирен с целью повышения эффективности процесса охлаждения воды / Е. В. Боев, С. П. Иванов, В. Г. Афанасенко // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 12. – С. 30–34.
3. Пушинов, А. С. Керамические регулярные насадки для тепло-массообменных процессов в аппаратах защиты окружающей среды / А. С. Пушинов // Интенсификация технологических процессов : материалы, технологии, оборудование. – 2009. – № 1. – С. 16–19.
4. Кафаров, В. В. Основы массопередачи : учеб. для студентов вузов / В. В. Кафаров. – М. : Высшая школа, 1979. – 439 с.
5. Кондакова, Л. А. Исследование неизотермического процесса конвективной теплоотдачи ньютоновских жидко-

стей в горизонтальной трубе при переходном и турбулентном режиме течения / Л. А. Кондакова, Г. И. Первакова, В. В. Шишлянников, Е. В. Баева // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 1 (61) / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2010. – 148 с. – (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3). – С. 46–49.

6. Милова, Д. А. Определение расхода жидкости при фильтрационном течении в плоском канале / Д. А. Милова, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 1 (74) / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2011. – 120 с. – (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4). – С. 12–15.

7. Голованчиков, А. Б. Аппроксимация табличных зависимостей по равновесию бинарных смесей степенным уравнением / А. Б. Голованчиков, А. А. Решетников, А. С. Остроухова, Е. Г. Фетисова // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 1 (74) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 120 с. – (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4). – С. 37–40.

8. Девкин, А. В. Определение скорости нагрева жидкости в аппарате с мешалкой / А. В. Девкин, О. А. Тишин, П. Л. Самойлов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 1 (74) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 120 с. – (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4). – С. 48–52.

9. Голованчиков, А. Б. Вероятность улавливания частиц в напорном гидроциклоне / А. Б. Голованчиков, Г. И. Первакова, И. С. Бацокин // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 132 с. (Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 4). – С. 5–9.

УДК(532.135.533.17): 532.5

*О. А. Залипаева, А. С. Трусов*

### РАСТЕКАНИЕ ЖИДКОСТИ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

Рассматривается растекание жидкости по горизонтальной поверхности при поступлении жидкости на поверхность и при условии, когда первоначальный объем жидкости изменяет свою форму.

*Ключевые слова:* жидкость, растекание, свободная поверхность, реологические константы.

*О. А. Zalipava, A. S. Trusov*

### SPREADING OF A LIQUID ON A HORIZONTAL SURFACE

Volgograd State Technical University

Spreading of a liquid on a horizontal surface when liquid inflows into the surface on condition that initial liquid's volume changes its shape is under review.

*Keywords:* liquid, inflows, free surface, rheological constants.

Процесс растекания жидкости по поверхности относится к задачам, со сложными динамическими условиями на свободной поверхности [1–5]. Эти условия еще более усложняются для неустановившегося течения, при котором форма свободной поверхности изменяется [6, 7]. Устойчивый алгоритм для решения таких задач в настоящее время не разработан [8].

Если нарушение горизонтальной поверхности отсутствует, то течение можно рассматри-

вать как осесимметричное [9, 10]. Для осесимметричных течений изменение по круговой координате  $\varphi$  отсутствует и так как в граничных условиях нет компоненты скорости по круговой координате, то и во всем течении такая координата будет равна 0, то есть  $v_{\varphi} = 0$ .

При растекании высоковязких жидкостей течение можно рассматривать как квазистационарное, то есть производная по времени в исходных уравнениях отсутствует, и изменение

параметров во времени отражается в граничных условиях; и силы инерции малы по сравнению с силами вязкости. Такие допущения обосновываются тем, что влияние кондуктивных ( $\partial/\partial t$ ) составляющих сил инерции сказывается только в начальный момент времени (который занимает незначительный промежуток). Влиянием конвективных ( $v_x; \frac{\partial v_{xj}}{\partial x_i}$ ) составляющих допустимо пренебречь для медленных течений, приближение Стокса.

Течение в растекающейся массе происходит под влиянием гидравлического уклона свободной поверхности. В предположении, что толщина слоя массы меньше, чем радиус растекающейся массы, и компонента скорости  $v_z \ll v_r$  и силы инерции малы, по сравнению с силами вязкого трения изменение касательных напряжений в среде определяется из уравнения

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r\tau_{rz}) - \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho g \quad (1)$$

При сделанных допущениях следует, что  $\frac{\partial P}{\partial z} = 0$ , решение полученного уравнения  $P(z=h) = P_0$ , приводит к следующему уравнению, описывающему изменение давления по толщине слоя:

$$P = P_0 - g\rho(h-z) \quad (2)$$

С учетом, что среда является нелинейно-вязкой и описывается уравнением Оствальда-де Вилля, получается следующее уравнение:

$$\tau = -g\rho \frac{\partial h}{\partial r} (h-z) = k \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^n, \quad (3)$$

где  $k$  – константа постоянной консистентности и  $n$  – константа индекса течения.

Следует отметить, что при  $n = 1$  нелинейная вязкая среда проявляет ньютоновские свойства. Из уравнения (3) следует, что:

$$\frac{\partial v_r}{\partial z} = - \left( \frac{g\rho}{k} \cdot \frac{\partial h}{\partial r} \right)^{\frac{1}{n}} (h-z) \quad (4)$$

Пусть

$$A = - \left( \frac{g\rho}{k} \cdot \frac{\partial h}{\partial r} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

тогда после интегрирования при условии прилипания к стенке,  $v_r(z=0) = 0$ , получается:

$$v_r = \frac{n}{1+n} A \left( h^{\frac{1+n}{n}} - (h-z)^{\frac{1+n}{n}} \right) \quad (6)$$

Расход среды через кольцевое сечение будет равен:

$$Q = 2\pi \int_0^n r \cdot v_r dz$$

$$Q = 2\pi \frac{n}{2n+1} A \cdot r \cdot h^{\frac{2n+1}{n}} \quad (7)$$

Из уравнения (7) при известном изменении высоты массы  $h = h(r)$  можно определить изменение расхода по координате  $r$ .

Большой интерес представляет обратная задача определения высоты массы по известному расходу. Для квазистационарного течения можно положить, что расход массы постоянен:

$$Q = \text{const.}$$

Тогда из уравнения (7) можно получить дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$-h^{2n+1} \cdot dh = \left( \frac{Q}{2\pi} \frac{2n+1}{n} \right) \frac{k}{g\rho} r^{-n} dr, \quad (8)$$

Решение данного уравнения с граничным условием  $h(r=R_0) = h_0$  имеет вид:

при  $n \neq 1$ :

$$h^{2(n+1)} = 2 \frac{1+n}{1-n} B \left( (R_0^{1-n} - r^{1-n}) + h_0^{2(n+1)} \right), \quad (9)$$

где  $B = \left( \frac{Q}{2\pi} \frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{k}{g\rho}$ .

Для вязкой жидкости при  $n = 1$  решение уравнения (8) запишется в виде:

$$h^4 = h_0^4 - 4B_1 \ln \frac{r}{R_0}, \quad (10)$$

где  $B_1 = \frac{3}{2} \frac{Q}{\pi} \frac{\mu}{g\rho}$ .

Анализ уравнений (9) и (10) показывает, что зона течения массы ограничена.

Пусть  $R$  – максимальное значение радиуса растекания массы.

Из (10) получается  $r = R$  при  $h = 0$ .

$$R = R_0 \left( 1 + (1-n) \frac{h_0^{2n+2}}{C * R_0^{1-n}} \right)^{\frac{1}{1-n}}, \quad (11)$$

где  $C = 2(1+n) \left( \frac{Q}{2\pi} \frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{k}{g\rho}$ ,

Аналогично из уравнения (10) можно определить значение  $R$ :

$$R = R_0 \exp \left( \frac{h_0^4}{G} \right), \quad (12)$$

где  $G = \frac{6}{\pi} \frac{\mu}{g\rho} Q$ .

Используя уравнения (11) и (12) можно выражения (9) и (10) представить в виде:

$$h^{2(n+1)} = \frac{1}{1-n} C(R^{1-n} - r^{1-n}), n \neq 1 \quad (13)$$

$$h^4 = -G \cdot \ln \frac{r}{R}, n = 1 \quad (14)$$

Объем массы, ограниченный свободной поверхностью и стенкой определяется в соответствии с выражениями (13) и (14):

$$V = 2\pi \int_0^R h \cdot r \cdot dr$$

при  $n \neq 1$ ,

$$V = 2\pi \int_0^R r \left( \frac{C}{1-n} (R^{1-n} - r^{1-n}) \right)^{\frac{1}{2(n+1)}} dr,$$

$$V = 2\pi C^{\frac{1}{2(n+1)}} R^{\frac{3n+5}{2(n+1)}} \frac{1}{(1-n)^{\frac{1}{2(1+n)}}} \int_0^1 W(1-W^{1-n})^{\frac{1}{2(1+n)}} dW, \quad (15)$$

при  $n = 1$ ,

$$V = -2\pi G^{\frac{1}{4}} R^2 \int_0^1 W(\ln W)^{\frac{1}{4}} dW, \quad (16)$$

Входящие в уравнения (15) и (16) определенные интегралы являются функцией только индекса течения  $n$ , тогда:

$$V = 2\pi(2(1+n)) \left( \frac{Q}{2\pi} \frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{k}{g\rho} \left( \frac{1}{2(n+1)} \right) R^{\frac{3n+5}{2(n+1)}} N(n),$$

где  $N(n) = \frac{1}{(1-n)^{\frac{1}{2(1+n)}}} \int_0^1 W(1-W^{1-n})^{\frac{1}{2(1+n)}} dW,$

при  $n = 1$ ,

$$N(1) = -\int_0^1 W(\ln W)^{\frac{1}{4}} dW = 0,381$$

Из условия постоянства объема растекающейся массы и понятия осредненного по поверхности растекания расхода массы:

$$Q = 2\pi \int_0^R r \frac{dh}{dt} dr,$$

получается следующее уравнение, определяющее изменение максимального радиуса массы во времени:

$$\frac{dR}{dt} = D \cdot R^{-\frac{5+2n}{n}},$$

где  $D = \frac{n}{2n+1} \left( \frac{1}{2(1+n)} \right) (2N(n))^{-2(1+n)} \left( \frac{V}{\pi} \right)^{n+2} \frac{g\rho}{k} \frac{1}{k}.$

Интегрирование полученного уравнения позволяет определить зависимость радиуса растекающейся массы от времени растекания при известных реологических константах степенной жидкости  $k$  и  $n$ :

$$R^{\frac{5+3n}{n}} = R_0^{\frac{5+3n}{n}} + \frac{5+3n}{2n+1} \left( \frac{1}{2(1+n)} \right) (2N(n))^{-2(1+n)} \left( \frac{V}{\pi} \right)^{n+2} \frac{g\rho}{k} \frac{1}{k} \cdot t.$$

Таким образом, можно построить методику определения реологических констант вязкой и степенной жидкостей. Для этого в соответствии с уравнением (10) при известном начальном объеме и радиусе (диаметре) массы необходимо для вязкой жидкости при одном, для степенной жидкости при двух значениях времени определить реологические константы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Быховский, А. И.* Растекание / А. И. Быховский. – Киев : Наукова Думка, 1983. – 192 с.
2. *Рауд, Э. А.* Растекание ньютоновской жидкости по поверхности твердого тела / Э. А. Рауд, Б. Д. Сумм, Е. Д. Щукин // Докл. АН СССР. 1972. – № 5. – С. 1134–1137.
3. *Сумм, Б. Д.* Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
4. *Холпанов, Л. П.* Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела / Л. П. Холпанов, В. Я. Шкадов. – М.: Наука, 1990. – 271 с.
5. *Шапиро, Г. И.* О растекании вязкой жидкости по горизонтальной поверхности / Г. И. Шапиро // ПМТФ. 1983. – № 3. – С. 45–48.
6. *Трусов, А. С.* Определение деформации дисперсных частиц при движении / А. С. Трусов, О. А. Залипаева, М. Ю. Ефремов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии).
7. *Трусов, С. А.* Обобщенное уравнение связи группового всплывания пузырей / С. А. Трусов, Г. В. Рябчук, О. А. Залипаева, Т. А. Никитенко // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2003. – С. 34–36. (Сер. Химия и химическая технология. Вып. 4).
8. *Трусов, С. А.* Численное моделирование уравнений математической физики, связанных с химическими реакциями и массопереносом / С. А. Трусов, В. М. Волчков, В. Н. Стяжин, Т. А. Никитенко // Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии: сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2002. – Вып. 6. – С. 185–189.
9. *Трусов, А. С.* Растекание осесимметричного объема массы под действием силы тяжести / А. С. Трусов, С. А. Трусов, Г. В. Рябчук // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 1997. – С. 28–33. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии).
10. *Трусов, А. С.* Двухслойное течение высоковязкой жидкости под действием силы тяжести / А. С. Трусов, С. А. Трусов, Г. В. Рябчук, В. И. Лапицкий // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 1997. – С. 145–147. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии).

УДК 66.02(075.8):621.928.37

*В. О. Яблонский***ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОЦИКЛОНА  
ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВА ПВХ НАПОРНОЙ ФЛОТАЦИЕЙ****Волгоградский государственный технический университет**

Приведены результаты моделирования процесса очистки сточных вод производства ПВХ от частиц твердой фазы напорной флотацией в гидроциклонах. Сформулированы рекомендации по выбору наиболее рациональной конструкции гидроциклона для очистки сточных вод и режимных параметров его работы.

*Ключевые слова:* сточные воды, поливинилхлорид, напорная флотация, гидроциклон, степень извлечения частиц твердой фазы.

*V. O. Yablonskii***CHOICE OF CONSTRUCTION AND WORKING REGIMES OF HYDROCYCLONE FOR  
CLEANING PVC MANUFACTURING WASTE WATER BY PRESSURE FLOTATION****Volgograd State Technical University**

Results of modelling of cleaning processes of PVC manufacturing waste water from the particles of hard phase by pressure flotation in hydrocyclones are presented. Recommendations for rational choice of hydrocyclone construction and its regime parameters are formulated.

*Keywords:* waste water, polyvinylchloride, pressure flotation, hydrocyclone, removal index of hard phase particles.

Обеспечение высокой интенсивности протекания процессов разделения неоднородных жидких систем возможно при проведении их в поле центробежных сил в гидроциклонах.

В работе [1] обоснована необходимость применения гидроциклонов в процессе очистки оборотных вод гидрорезки кокса. Приведенные рекомендации позволяют достичь высокой степени очистки оборотных вод при минимальных энергозатратах, а также добиться снижения износа и частоты замены оборудования в результате повышения степени очистки оборотных вод гидрорезки.

В статье [2] описан опыт применения батарейных гидроциклонов для многоступенчатой очистки сточных вод производства суспензионного поливинилхлорида (ПВХ) на Новомосковском ПО «Азот». В результате применения на разных ступенях очистки гидроциклонных модулей с различным диаметром корпуса концентрация продукта в сточной воде снизилась до допустимых значений и суммарная степень очистки возросла до 99 %.

Автором [3] сделан вывод о том, что гидроциклоны можно успешно использовать в технологических схемах центробежного обезвреживания осадков сточных вод для выделения из осадков абразивных примесей перед подачей их на центрифуги и сепараторы, увеличивая долговечность и надежность их работы.

В работе [4] отмечается, что создание новых, более прогрессивных конструкций гидроциклонов позволило решить задачу очистки

сточных вод от мелкодисперсных взвесей и таким образом добиться снижения абразивного износа оборудования.

Сточные воды производства ПВХ представляют собой малоконцентрированную суспензию частиц твердой фазы (ПВХ) диаметром от 10 до 1000 мкм, имеющих объемную плотность 1,4 г/см<sup>3</sup> и концентратию около 70 мг/м<sup>3</sup> [5, 6].

Процесс извлечения взвешенных частиц ПВХ из сточных вод напорной флотацией, реализованный в поле центробежных сил в гидроциклоне, позволяет существенно интенсифицировать процесс и добиться практически полного извлечения частиц твердой фазы за счет выделения из сточных вод частиц ПВХ наиболее мелких фракций.

Гидроциклон (рис. 1) состоит из цилиндрической камеры, в которую тангенциально подаются через входной патрубок 1, установленный в ее верхней части, при повышенном давлении (до 0,8 МПа) сточные воды производства ПВХ, предварительно насыщенные растворенным газом (азотом) и конической части с углом конусности  $\alpha$ . Поступившая в гидроциклон суспензия стекает, образуя вращающуюся пленку, по его стенкам вниз, обладая окружной  $V_\phi$ , осевой  $V_z$  и радиальной  $V_r$  составляющими скорости. При снижении давления до атмосферного создается перенасыщение растворенного газа и суспензия «вскипает». Частицы твердой фазы под действием центробежной силы движутся к стенке корпуса гидроциклона, а пузырьки газа под действием выталкивающей

центростремительной силы Архимеда – навстречу им к поверхности пленки. При столкновении частиц твердой фазы с пузырьками газа происходит образование флотокомплексов, выносящих частицы твердой фазы на поверхность пленки в пенный слой, который удаляется через верхний отводящий патрубок 2. Кроме того, частицы твердой фазы служат непосредственными центрами образования пузырьков газа, выделяющихся при снижении давления, что приводит к существенному повышению кинетического коэффициента напорной флотации. Осветленная суспензия удаляется из аппарата через нижний сливной патрубок 3.

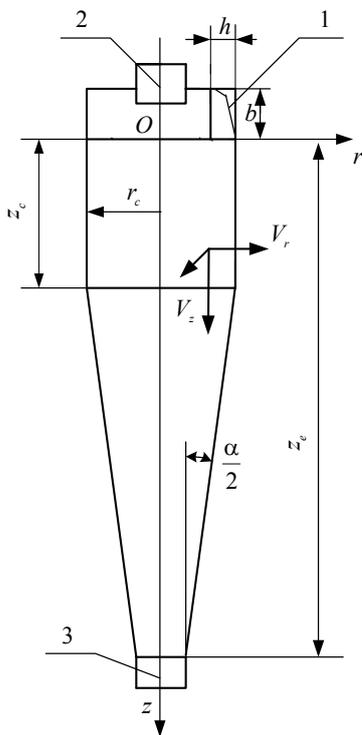


Рис. 1. Схема очистки сточных вод в гидроциклоне напорной флотацией

Для математического моделирования поля концентраций при очистке сточных вод напорной флотацией в гидроциклоне было использовано дифференциальное уравнение конвективной диффузии в цилиндрических координатах, которое с учетом стока частиц твердой фазы за счет флотации пузырьками газа при равенстве нулю коэффициента молекулярной диффузии может быть записано для частиц твердой фазы и пузырьков газа следующим образом

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\bar{V}_h c_h) &= -J_h, \\ \operatorname{div}(\bar{V}_g c_g) &= -J_g, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\bar{V}_h$  – вектор скорости частиц твердой фазы;  $\bar{V}_g$  – вектор скорости пузырьков газа;  $c_h$  – объемная доля частиц твердой фазы,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $c_g$  – объемная доля пузырьков газа,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $J_h, J_g$  – сток частиц твердой фазы и пузырьков газа за счет флотации.

Моделирование процесса очистки сточных вод производства ПВХ в гидроциклоне было выполнено в соответствии с методикой [7, 8] для цилиндрического и цилиндрикоконического гидроциклонов с диаметром корпуса и цилиндрической камеры 150 мм. Моделирование заключалось в расчете распределения степени извлечения [9] взвешенных частиц ПВХ из сточных вод по высоте рабочего пространства гидроциклона при различных значениях расхода очищаемой среды, подаваемой в гидроциклон, что соответствовало одновременному изменению чисел Фруда и Рейнольдса [9], характеризующих режим работы гидроциклона.

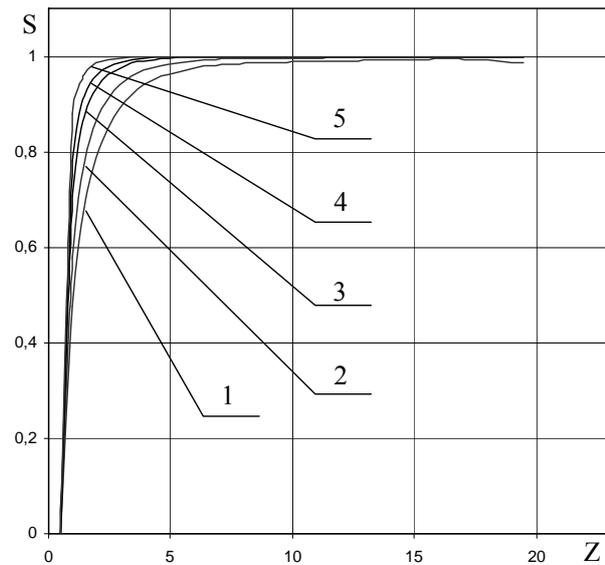


Рис. 2. Распределение степени извлечения взвешенных частиц из сточных вод по высоте рабочего пространства цилиндрического гидроциклона с диаметром корпуса 150 мм: 1 –  $Q = 2,39 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Fr = 15$ ,  $Re = 5169$ ; 3 –  $Q = 3,38 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Fr = 30$ ,  $Re = 7310$ ; 4 –  $Q = 3,91 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Fr = 40$ ,  $Re = 8441$ ; 5 –  $Q = 5,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Fr = 70$ ,  $Re = 11167$

На рис. 2 представлено распределение степени извлечения  $S$  взвешенных частиц ПВХ из сточных вод по высоте рабочего пространства  $Z$  цилиндрического гидроциклона с диаметром корпуса 150 мм при различных значениях расхода  $Q$  очищаемых сточных вод и, соответственно, чисел  $Fr$  и  $Re$ . Из анализа представленных распределений следует, что степень извле-

чения частиц ПВХ из сточных вод увеличивается с возрастанием расхода очищаемой жидкости и соответствующем увеличении чисел  $Fr$  и  $Re$ . С возрастанием чисел  $Fr$  и  $Re$  безразмерная высота корпуса гидроциклона  $Z = z/r_c$ , необходимая для достижения полной очистки сточных вод от взвешенных частиц, уменьшается от 15 до 5 радиусов корпуса.

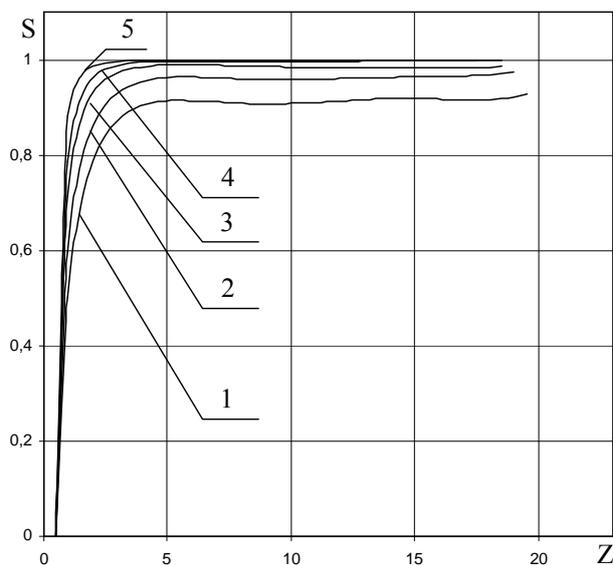


Рис. 3. Распределение степени извлечения взвешенных частиц из сточных вод по высоте рабочего пространства цилиндрического гидроциклона с диаметром цилиндрической камеры 150 мм и углом конусности корпуса  $5^\circ$ : 1 –  $Q = 2,39 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Fr = 15$ ,  $Re = 5169$ ; 2 –  $Q = 3,38 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Fr = 30$ ,  $Re = 7310$ ; 3 –  $Q = 3,91 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Fr = 40$ ,  $Re = 8441$ ; 4 –  $Q = 5,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Fr = 70$ ,  $Re = 11167$ ; 5 –  $Q = 5,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Fr = 70$ ,  $Re = 11167$

На рис. 3 представлено распределение степени извлечения взвешенных частиц из сточных вод по высоте рабочего пространства цилиндрического гидроциклона с диаметром цилиндрической камеры 150 мм и углом конусности корпуса  $5^\circ$  при различных значениях расхода  $Q$  очищаемых сточных вод и чисел  $Fr$  и  $Re$ . Из сравнения распределений, приведенных на рисунке 3 и рисунке 2 следует, что при небольших значениях расхода подаваемых в гидроциклон сточных вод значения степени извлечения взвешенных частиц твердой фазы на выходе из рабочего пространства цилиндрического гидроциклона существенно выше, чем у

цилиндрического, что объясняется меньшей толщиной пленки очищаемых сточных вод в нижней зоне рабочего пространства [6]. С возрастанием чисел  $Fr$  и  $Re$  степень извлечения в нижней зоне конической части корпуса существенно возрастает в связи с ростом окружной составляющей скорости жидкости.

Следовательно, для наиболее эффективной реализации процесса очистки сточных вод от взвешенных частиц ПВХ напорной флотацией целесообразно использование цилиндрического гидроциклона при высоких значениях чисел  $Fr$  и  $Re$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яблонский, В. О. Моделирование очистки оборотных вод гидрорезки кокса в гидроциклонах / В. О. Яблонский // Известия ВолГТУ: межвуз. сб.к научн. ст. – 2011. – № 1. – С. 23–26. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).
2. Пронин, А. И. Опыт применения батарейных гидроциклонных аппаратов для очистки сточных вод химических производств / А. И. Пронин, Н. А. Кудрявцев, Р. Н. Яруллин [и др.] // Химич. промышл. – 1994. – № 1. – С. 17–20.
3. Липманович, В. Ю. Использование гидроциклонов для центробежного обезвоживания осадков сточных вод / В. Ю. Липманович // Химич. и нефт. машиностроение. – 1983. – № 11. – С. 18–19.
4. Вайдуков, В. А. Промышленное использование гидроциклонов / В. А. Вайдуков, Я. Х. Прилуцкий // Химич. и нефт. машиностроение. – 1983. – № 11. – С. 17–18.
5. Уилки, Ч. Поливинилхлорид / Ч. Уилки, Дж. Саммерс, Ч. Даниелс (ред.); пер. с англ.; под ред. Г. Е. Заикова. – СПб: «Профессия», 2007 г. – 728 с.
6. Ульянов, В. М. Поливинилхлорид / В. М. Ульянов, Э. П. Рыбкин, А. Д. Гуткович [и др.]. – М.: «Химия», 1992. – 288 с.
7. Яблонский, В. О. Анализ влияния режимных параметров цилиндрического гидроциклона на протекание процесса напорной флотации частиц твердой фазы суспензии с неньютоновской дисперсионной средой / В. О. Яблонский, Г. В. Рябчук // Химич. промышл. – 2006. – Т. 83. – № 2. – С. 62–72.
8. Яблонский, В. О. Влияние конструктивных параметров гидроциклона на извлечение твердых частиц суспензии напорной флотацией / В. О. Яблонский // Химич. и нефтегазов. машиностроение. – 2006. – № 3. – С. 3–7.
9. Яблонский, В. О. Выбор конструктивных параметров и режимов работы гидроциклонов для разделения суспензий двухстадийной флотацией на основании уравнения регрессии / В. О. Яблонский // Химич. и нефтегазов. машиностроение. – 2007. – № 11. – С. 3–6.

УДК 631.431.7+434.12

*А. Е. Новиков\**, *Ю. В. Аристова\**, *В. И. Пындак\*\****РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ КАК ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ***\*Волгоградский государственный технический университет,**\*\*Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия*

Рассмотрены физико-механические свойства почв Волгоградской области, определен коэффициент пористости по горизонтам для рассматриваемых сред и коэффициент уплотнения для расчетного слоя при определенной нагрузке, характеризующий деформации орошаемых почв. Построены компрессионные кривые уплотнения орошаемых почв.

*Ключевые слова:* плотность, коэффициент пористости, уплотнение почв, деформации.

*A. E. Novikov\*, J. V. Aristova\*, V. I. Pyndak\*\****RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOILS AS DISPERSE SYSTEMS***\*Volgograd state technical university,**\*\*The Volgograd state agricultural academy*

Physicomechanical properties of soils of the Volgograd region are considered, the porosity factor on horizons for considered environments and factor of consolidation for a settlement layer is defined at the certain loading, characterizing deformations of irrigated soils. Are constructed curve consolidations of irrigated soils.

*Keywords:* density, factor of porosity and consolidation of soils, deformations.

Естественно-сложенные почвы представляют собой высококонцентрированные дисперсные системы с различными типами межчастичных контактов (коагуляционный, кристаллизационный и смешанный) твердые частицы, которой, соединенные коллоидами, образуют беспорядочную сетку, а пространство между структурными элементами заполнено воздухом и водой.

В реальных почвах присутствуют все три типа контактов, в зависимости от различных факторов (состав органического вещества, гранулометрический, минералогический состав и др.) одни из них могут доминировать над другими.

Реологическое поведение почв зависит не только от типа контакта, но и формы частиц (шарообразные, ячеистые, игольчатые и др.), которая сказывается на свойствах грунта при деформации, и энергии притяжения самих частиц, характеризующая межчастичную связь [1–4].

Отсутствие современных данных о структурном состоянии и реологическом поведении почв Волгоградской области, на основании которых, с точки зрения рационального природопользования и предупреждения ситуаций техногенного характера, можно научно обоснованно выработать подходы по выбору МГА, характерные к тем или иным почвенным условиям, определили задачи исследования.

Основным реологическим понятием для почвы является деформация, которую подразделяют на упругую и пластическую. Упругая деформация исчезает после снятия нагрузки, а

пластическая нет, изменения остаются и после разгрузки системы. При определении деформации необходимо определить напряжения вызывающие их. Различают две составляющие напряжений – нормальные, вызывают деформации растяжения и сжатия и действует перпендикулярно поверхности, и тангенциальные – вызывает сдвиг. Охарактеризовать ту или иную дисперсную систему (тип почвы) можно количественными параметрами деформации: нормальные напряжения – уплотнение (осадка) и коэффициент пористости, тангенциальные напряжения – тангенс угла сдвига, сдвиг и скорость сдвига.

Приведенные виды деформации и их количественные параметры лежат в основе реологических законов для идеально упругого, вязкого и пластичного тел.

Деформации, возникающие в грунте, характеризуется сжимаемостью или коэффициентом уплотнения ( $\alpha$ , см<sup>2</sup>/кг) – это тангенс угла наклона касательной к компрессионной кривой:

$$\alpha = tg\alpha. \quad (1)$$

В зоне невысоких давлений коэффициент уплотнения пропорционален изменению давления, отличаемых в почвенных горизонтах:

$$de = -\alpha \cdot dp = -tg\alpha \cdot dp, \quad (2)$$

где  $de$  – изменение коэффициент пористости;  $dp$  – изменение давления нагрузки, кг/см<sup>2</sup>; знак «минус» показывает, что с увеличением давления нагрузки  $\alpha$  уменьшается.

Коэффициент пористости – это отношение объема пор ( $V_{\text{пор}}$ ) к объему твердой фазы ( $V_{\text{тв.фазы}}$ ) почвы:

$$e = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{тв.фазы}}} = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} = \frac{\rho_{\text{тв.фазы}} - \rho_{\text{сл.почвы}}}{\rho_{\text{сл.почвы}}}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – пористость;  $\rho_{\text{тв.фазы}}$  – плотность твердой фазы почвы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{сл.почвы}}$  – плотность сложения почвы, кг/м<sup>3</sup>.

Сжимаемость почвы – это не полностью обратимая деформация. При многократных нагрузках компрессионная кривая имеет вид петли, что обусловлено разрушением структурных связей и накоплением остаточной деформации. Наибольшее ее значение будет соответствовать особенностям физических и химических свойств

конкретных почв и дает возможность прогнозировать максимальную возможность их уплотнения [5].

Почвы Волгоградской области по своим физико-механическим свойствам неоднородны. Можно выделить два основных типа почв, присутствующих географии нашей области – это каштановые и черноземы, которые, в свою очередь, могут быть представлены подтипами: светло-каштановые, каштановые и темно-каштановые, черноземы обыкновенные и южные. По механическому составу почвы могут быть легко-, средне- и тяжелосуглинистыми.

Обобщенные результаты многолетних исследований по плотности орошаемых почв представлены в табл. 1, где в числителе – плотность твердой фазы, а в знаменателе – плотность сложения почвы, т/м<sup>3</sup> [6, 7].

Таблица 1

Физические свойства подтипов почв Волгоградской области

Подтип почвы		Светло-каштановые	Каштановые	Темно-каштановые	Черноземы южные	Черноземы обыкновенные
Наименование горизонта	Пределы горизонтов, м					
$A_0A_1$	0–0,12	$\frac{2,50}{1,30}$	$\frac{2,63}{1,33}$	$\frac{2,45}{1,25}$	$\frac{2,41}{1,23}$	$\frac{2,45}{1,15}$
$A_1A_2$	0,12–0,25	$\frac{2,58}{1,32}$	$\frac{2,64}{1,36}$	$\frac{2,51}{1,28}$	$\frac{2,47}{1,26}$	$\frac{2,51}{1,20}$
$A_2$	0,25–0,37	$\frac{2,65}{1,38}$	$\frac{2,69}{1,45}$	$\frac{2,55}{1,35}$	$\frac{2,43}{1,29}$	$\frac{2,55}{1,27}$
$A_2B$	0,37–0,70	$\frac{2,69}{1,42}$	$\frac{2,76}{1,56}$	$\frac{2,58}{1,42}$	$\frac{2,47}{1,36}$	$\frac{2,58}{1,32}$
$B$	0,70–1,25	$\frac{2,67}{1,43}$	$\frac{2,78}{1,58}$	$\frac{2,60}{1,43}$	$\frac{2,49}{1,37}$	$\frac{2,60}{1,40}$
$BC_k$	1,25–1,63	$\frac{2,65}{1,54}$	$\frac{2,79}{1,60}$	$\frac{2,61}{1,50}$	$\frac{2,56}{1,47}$	$\frac{2,61}{1,47}$
$C_k$	> 1,63	–	–	–	–	–

На основании имеющихся данных по формуле (3) был определен коэффициент пористо-

сти по горизонтам для каждого подтипа почв (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2

Расчетное значение коэффициента пористости

Подтип почвы / Пределы горизонтов, м	Светло-каштановые	Каштановые	Темно-каштановые	Черноземы южные	Черноземы обыкновенные
0–0,12	0,923	0,977	0,963	0,960	1,130
0,12–0,25	0,954	0,941	0,964	0,961	1,092
0,25–0,37	0,92	0,855	0,884	0,889	1,008
0,37–0,70	0,894	0,769	0,815	0,817	0,954
0,70–1,25	0,867	0,759	0,818	0,818	0,857
1,25–1,63	0,721	0,744	0,736	0,740	0,776

Согласно полученным данным значение коэффициента пористости по горизонтам для южных черноземов и темно-каштановых почв отличается несущественно. Это обусловлено схожими физико-механическими свойствами.

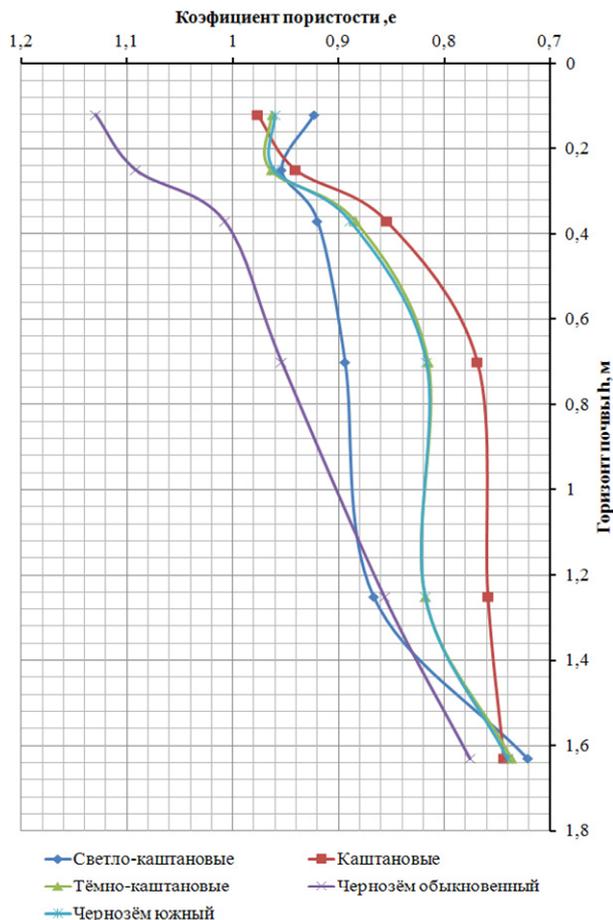


Рис. 1. Значение коэффициента пористости для различных подтипов почв в зависимости от глубины горизонта

Необходимо отметить, что оптимальное значение коэффициента пористости в горизонте 0–0,10 и 0,10–0,25 (биологически активная зона) для светло-каштановых и каштановых почв находится в пределах от 1 до 1,22, для черноземов южных и темно-каштановых – от 1 до 1,5, для черноземов обыкновенных – от 1,22 до 1,86 [8].

Таким образом, полученные данные по коэффициенту пористости в горизонте 0–0,10 и 0,10–0,25 для вышеперечисленных подтипов почв (табл. 2) не соответствуют их оптимальному значению, что говорит о нарушении формы частиц, межчастичных контактов и их связей, то есть происходят эрозионные процессы в почве.

Как было сказано выше, коэффициент уплотнения обратно пропорционален давлению

нагрузки. Известно, что основное уплотняющее воздействие на почву происходит движителями тракторов и машин, чем выше давление в шинах, тем выше уплотняющее воздействие. Согласно стандартам развитых стран давление колеса на почву не должно превышать 0,6 кг/см<sup>2</sup> [9].

В полевых условиях были проведены опыты по определению коэффициента уплотнения и построены компрессионные кривые усадки почвы (рис. 2). Давление, оказываемое на почву, варьировалось в пределах от 0,5 (ДТ-75М) до 1,4 (Т-150К, ХТЗ-150, К-700 и др.) кг/см<sup>2</sup>.

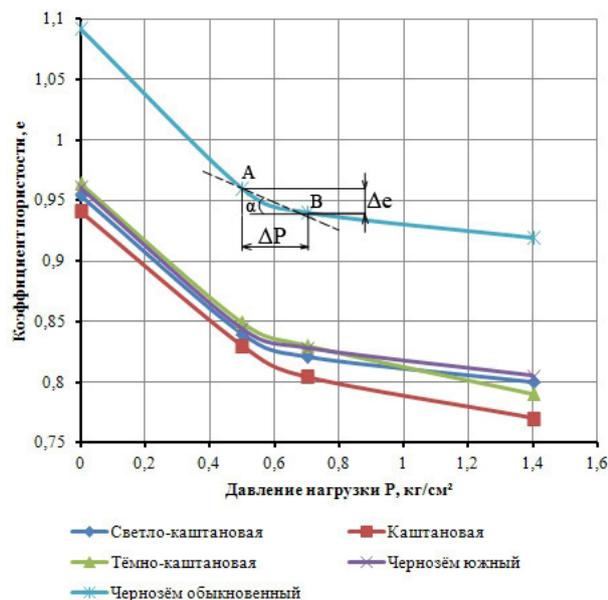


Рис. 2. Изменение коэффициента пористости почв Волгоградской области в зависимости от давления нагрузки

При рассмотрении на небольшом участке приращение давления нагрузки  $\Delta P$  получим соответствующее приращение  $\Delta e$ . Проведя касательную к кривой АВ, получим угол  $\alpha$  наклона компрессионной кривой, тангенс которой и есть коэффициент уплотнения (см. рис. 2).

При известном начальном коэффициенте пористости (без нагрузки) можно определить коэффициент относительного уплотнения (см<sup>2</sup>/кг):

$$\alpha_{от} = \frac{\alpha}{(1 + e_0)}, \quad (4)$$

где  $e_0$  – начальный коэффициент пористости в расчетном слое (0–0,25 м).

Упругие и остаточные деформации, возникающие в почве при давлении нагрузки, учитываются модулем деформации ( $E$ , кг/см<sup>2</sup>), который обратно пропорционален коэффициенту относительного уплотнения и прямо пропорционален некоторой функции Пуассона, учи-

тывающий вид напряженного состояния при компрессионном сжатии:

$$E = \frac{\beta_0}{\alpha_{от}}, \quad (5)$$

$$\beta_0 = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}, \quad (6)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона или бокового расширения почвы, принимаемый для суглинков –

0,35, глин – 0,42, песков и супесей – 0,3 [10].

Почвы Волгоградской области относятся преимущественно к средне- и тяжелосуглинистым, соответственно принимаем значение коэффициента Пуассона равным 0,35.

Расчетные характеристики деформации для различных подтипов почв в горизонте 0–0,25 м приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные характеристики деформации грунтов

Подтип почвы	Светло-каштановые	Каштановые	Темно-каштановые	Черноземы южные	Черноземы обыкновенные
Коэффициент уплотнения $a$ , см <sup>2</sup> /кг	0,095	0,13	0,095	0,08	0,1
Коэффициент относительного уплотнения $\alpha_{от}$ , см <sup>2</sup> /кг	0,049	0,067	0,048	0,041	0,048
Модуль деформации $E$ , кг/см <sup>2</sup>	16,56	12,11	16,91	19,79	16,90

По полученным значениям модуля деформации почвы, можно сделать вывод, что наиболее подвержены нагрузкам черноземы южные, у которых модуль деформации составляет 19,79 кг/см<sup>2</sup>, наименее подвержены каштановые почвы с модулем деформации 12,11 кг/см<sup>2</sup>. Светло-каштановые, темно-каштановые и черноземы южные занимают промежуточное место, значение модуля деформации находится в пределах **16 ≤ E ≤ 17**.

Согласно полученным данным для снижения техногенной нагрузки на южных черноземах необходимо применять трактора класса не выше 3. Это могут быть трактора класса 1,4 – МТЗ-80, класса 2 – МТЗ-1221, ЛТЗ-155 или класса 3 – ДТ-75М, Агромаш 90 ТГ, TERRION АТМ 3180.

На каштановых, светло-каштановых, темно-каштановых и черноземах обыкновенных можно использовать трактора класса 5 (ХТЗ, Т-150, К-700 и др. модификации, New Holland, Deutz-Fah, John Deere, Caterpillar и др.) при этом для почв с модулем деформации от 16 до 17 кг/см<sup>2</sup> желательнее использовать машины с более низким давлением в шинах или большей поверхностью контакта движителя с почвой. Это могут быть модифицированные трактора со спаренными и строенными колесами или колеса с широкопрофильными и арочными шинами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданова, Ю. Н. Реологические свойства систем ПВХ-пластификатор / Ю. Н. Богданова, А. В. Навроцкий, В. А. Навроцкий // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 1 (61). – С. 101–105.

(Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3).

2. Ефимов, М. В. Исследование реологического поведения жидкообразного нефтешлама мазутного остатка / М. В. Ефимов, В. А. Балашов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1 (74). – С. 9–12. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).

3. Рябчук, Г. В. Влияние реологических моделей жидкости на гидродинамические параметры процесса течения / Г. В. Рябчук, Н. Л. Щербакова // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – № 11 (37). – С. 53–55. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1).

4. Потехина, Л. Н. Реологические, оптические и структурные свойства растворов диацетатов целлюлозы для формирования полупроницаемых мембран / Л. Н. Потехина, В. М. Седелкин, А. Н. Суркова, О. В. Пачина // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 2 (75). – С. 170–174. (Сер. Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов. Вып. 8).

5. Шейн, Е. В. Курс физики почв: учебник / Е. В. Шейн. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.

6. Новиков, А. Е. Чизельно-отвальная агротехническая мелиорация почвы при возделывании кукурузо-бобовых смесей в условиях орошения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2009. – 20 с.

7. Новиков, А. Е. Влияние способа обработки на водно-физические свойства орошаемых светло-каштановых почв / П. И. Кузнецов, А. Е. Новиков // Мелиорация и водное хозяйство. – 2009. – № 2. – С. 37–39.

8. Зонально-провинциальные нормативы изменений агрохимических, физико-химических и физических показателей основных пахотных почв Европейской территории России при антропогенном воздействии / А. С. Фрид, И. В. Кузнецова, И. Е. Королева [и др.]. – М.: ГНУ Почв. институт им. В. В. Докучаева, 2010. – 176 с.

9. Ресурсосберегающие технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.agro.ru/blog/blog.aspx?id=84>.

10. Пьянков, С. А. Механика грунтов: учебное пособие / С. А. Пьянков, З. К. Азизов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 103 с.

УДК 66.023:532.5

*Н. А. Кузнецов, В. А. Балашов, Д. А. Федянина*  
**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИКИ  
 РАДИАЛЬНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА**

**Волгоградский государственный технический университет**

Рассматривается задача определения скорости течения внутри сборного центрального канала радиального каталитического реактора. Получены расчетные уравнения, способные описать гидродинамическую обстановку в реакторе данного типа.

*Ключевые слова:* радиальный реактор, гидродинамика, сопротивление, скорость фильтрации

*N. A. Kuznetsov, V. A. Balashov, D. A. Fedyanina*

**THE MATHEMATICAL MODEL OF THE HYDRODYNAMICS  
 OF CATALYTIC RADIAL FLOW REACTOR**

**Volgograd State Technical University**

This article presents the flow velocity examination inside central collecting flue of the catalytic radial flow reactor. The design equations generating hydrodynamics of this sort of the reactors are deduced.

*Keywords:* radial flow reactor, hydrodynamics, resistance, filtration rate

Данный тип реакторов широко применяется в нефтехимической промышленности, примером может служить реактор каталитического риформинга. Из-за сложности рассматриваемой задачи на сегодняшний день получены решения только для конкретных реакторов с заданными геометрическими и технологическими параметрами. Из-за неравномерности распределения полей скоростей и давлений дорогостоящий катализатор используется не полно по длине реактора, тем самым снижая экономическую эффективность аппарата.

Схема потоков в реакторе представлена на рис. 1. Исходный поток подается по периферии аппарата, проходит через наружную перегородку, слой катализатора и выходит через внутреннюю перегородку в центральную трубу.

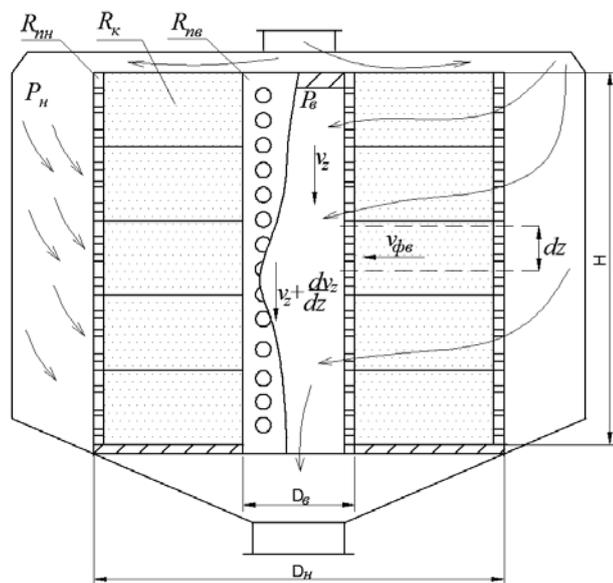


Рис. 1. Принципиальная схема реактора

В общем случае параметры:  $p_e$  – давление во внутренней трубе,  $p_n$  – давление в наружной трубе ( $p_e < p_n$ ),  $\Delta p_{nn}$  – сопротивление наружной перегородки,  $\Delta p_{ne}$  – сопротивление внутренней перегородки,  $\Delta p_k$  – сопротивление катализатора,  $v_{\phi e}$  – скорость истечения в центральный канал,  $v_{\phi n}$  – скорость истечение из наружного канала,  $v_\phi$  – скорость фильтрации сквозь слой катализатора являются переменными по оси Z.

Перфорированную стенку будем рассматривать как фильтрующую перегородку. Гидравлическое сопротивление радиального фильтрационного течения найдем как сумму

$$\Delta p_r = \Delta p_{ne} + \Delta p_k + \Delta p_{nn}, \tag{1}$$

где  $\Delta p_k = \frac{\mu}{k} \cdot W \cdot \ln\left(\frac{D_n}{D_k}\right)$  – гидравлическое сопротивление слоя катализатора;

$\Delta p_n = \mu \cdot R_n \cdot v_{\phi n}$  – гидравлическое сопротивление перегородки;

$$R_n = \frac{1}{\mu \cdot \eta \cdot \varepsilon} \sqrt{\frac{\rho \cdot F}{2}}$$

– сопротивление перегородки,  $\mu$  – динамическая вязкость,  $F$  – движущая сила,  $k$  – проницаемость слоя катализатора,  $\varepsilon$  – пористость стенки (доля живого сечения потока в пределах перфорированного участка стенки),  $\eta$  – коэффициент расхода.

Из уравнения неразрывности расход на единицу высоты фильтрационного потока равен

$$W = r \cdot v_\phi = r_e \cdot v_{\phi e} = r_n \cdot v_{\phi n} = const.$$

На основании указанных выше соотношений получим

$$\Delta p_{ne} = \mu \cdot R_{ne} \cdot v_{\phi e}, \tag{2}$$

где  $R_{ne}$  – сопротивление внутренней перегородки.

Аналогично получим

$$\Delta p_{nn} = \mu \cdot R_{nn} \cdot v_{\phi n} = \mu \cdot R_{nn} \cdot \left(\frac{D_e}{D_n}\right) \cdot v_{\phi e} = \mu \cdot R_{nn}^* \cdot v_{\phi e}, \quad (3)$$

где  $R_{nn}^* = R_{nn} \cdot \left(\frac{D_e}{D_n}\right)$  – приведенное сопротивление наружной перегородки,  $D_e$  – диаметр внутреннего канала,  $D_n$  – диаметр наружного канала.

Гидравлическое сопротивление слоя катализатора

$$\Delta p_k = \frac{\mu}{k} \cdot W \cdot \ln\left(\frac{D_e}{D_n}\right) = \frac{\mu}{k} \cdot r_e \cdot \ln\left(\frac{D_e}{D_n}\right) \cdot v_{\phi e} = \mu \cdot R_k^* \cdot v_{\phi e}, \quad (4)$$

где  $R_k^* = \frac{D_e}{2k} \cdot \ln\left(\frac{D_e}{D_n}\right)$  – приведенное сопротивление слоя катализатора.

Подставим уравнения (2–4) в уравнение (1) откуда получим

$$v_{\phi e} = \frac{(p_n - p_e)}{\mu \cdot (R_{ne} + R_k^* + R_{nn}^*)} = \frac{\Delta p_r}{\mu \cdot \sum R_i} \quad (5)$$

Составим уравнение материального баланса для участка  $dz$  внутреннего канала.

$$v_z \cdot \pi \cdot \frac{D_e^2}{4} + v_{\phi e} \cdot \pi \cdot D_e \cdot dz = (v_z + \frac{dv_z}{dz} dz) \cdot \frac{\pi \cdot D_e^2}{4} \quad (6)$$

Откуда

$$v_{\phi e} = \frac{dv_z}{dz} \cdot \frac{D_e}{4} \quad (7)$$

Приравняв (5) и (7) и учитывая (1) получим следующее уравнение

$$p_e = p_n - \mu \cdot \sum R_i \cdot \frac{D_e}{4} \cdot \frac{dv_z}{dz} \quad (8)$$

Для того чтобы решить нашу систему уравнений стоит ее замкнуть, то есть принять давление снаружи постоянным  $p_n = const$

Для произвольного сечения и одномерной модели известно уравнение

$$\frac{dp_e}{\rho} + \beta \cdot v_z \cdot dv_z + v_z^2 \cdot d\beta + \beta \cdot v_z \cdot (v_z - \Theta) \frac{dG}{G} + \lambda_0 \cdot \frac{v_z^2}{2} \frac{dz}{D_e}, \quad (9)$$

где  $\beta$  – коэффициент потока импульса, учитывающий неравномерность распределения скорости по сечению канала;  $\Theta$  – проекция вектора скорости отделяемых и присоединяемых масс

жидкости на направление движения основного потока в канале;  $G$  – расход жидкости через внутреннюю перегородку;  $v_z$  – средняя скорость течения,  $\lambda_0$  – коэффициент трения [1].

Для течения в сборном канале можно принять  $\beta \approx 1$  [2]. При этом полагают что  $\Theta = c \cdot v_z$  ( $0 \leq c \leq 1$ ). Очевидно, что для фильтрационного течения  $c$  будет зависеть от проницаемости и величины скорости фильтрации.

Расход через внутреннюю перегородку выразим как

$$G = \frac{\pi \cdot D_e^2}{4} \cdot v_z \cdot \rho, \quad (10)$$

Коэффициент трения определим как

$$\lambda_0 = \lambda + m \frac{v_{\phi e}}{v_z}, \quad (11)$$

где  $m$  – некоторый коэффициент пропорциональности.

Подставим полученные значения в исходное уравнение течения (9) и получим

$$\frac{d^2 v_z}{dz^2} - a_0 \frac{v_z \cdot dv_z}{dz} - b_0 \cdot v_z^2 = 0, \quad (12)$$

где  $a_0 = \frac{\rho \cdot (16 - 8c + m)}{2\mu \cdot \sum R_i \cdot D_e}$ ,  $b_0 = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \rho}{D_e^2 \cdot \mu \cdot \sum R_i}$ .

Представим уравнение (12) в безразмерном виде.  $u = v_z / v_0$  – безразмерная средняя скорость продольного течения в произвольном сечении ( $v_z$  – скорость в произвольном сечении,  $v_0$  – скорость на входе),  $x = z / H$  – безразмерная координата).

Тогда

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - a \frac{u \cdot du}{dx} - b \cdot u^2 = 0, \quad (13)$$

где  $a = \frac{v_0 \cdot \rho \cdot (16 - 8c + m)}{2\mu \cdot \sum R_i \cdot D_e}$ ,  $b = \frac{2 \cdot \lambda \cdot v_0 \cdot H}{D_e^2 \cdot \mu \cdot \sum R_i}$ .

Граничные условия для случая сбора жидкости:

при  $x = 0$ ,  $u = 0$ ,

при  $x = 1$ ,  $u = 1$ .

Расчет будем вести при условии  $b \cdot u^2 = 0$

$$\frac{du}{dx} - \frac{a \cdot u^2}{2} = C_1$$

Средняя скорость течения вдоль потока будет увеличиваться при сборе по всей длине трубы  $\frac{du}{dx} > 0$ . Для этого необходимым является условие

$$C_1 + \frac{a \cdot u^2}{2} > 0,$$

где  $\frac{a \cdot u^2}{2}$  изменяется в пределах от 0 до  $\frac{a}{2}$ , что возможно, если  $C_1 > -\frac{a}{2}$  величина положительная и  $C_1 > 0$

$$u = \frac{1}{C_1^*} \operatorname{tg}\left(\frac{a(x-C_2)}{2C_1^*}\right) \quad (14)$$

где  $C_1^* = \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{2C_1}}$ . Условие существования тангенса

$$-\frac{\pi}{2} < \frac{a(x-C_2)}{2C_1^*} < \frac{\pi}{2}$$

Из граничных условий и физических соображений получим

$$C_1^* = \operatorname{tg}\left(\frac{a}{2C_1^*}\right)$$

Значения константы  $C_1^*$  являются корнями этого трансцендентного уравнения и могут быть найдены путем его графического решения для разных численных значений коэффициента «а». На рис. 2 представлен найденный таким образом график значений константы  $C_1^*$  для ряда значений коэффициента «а».

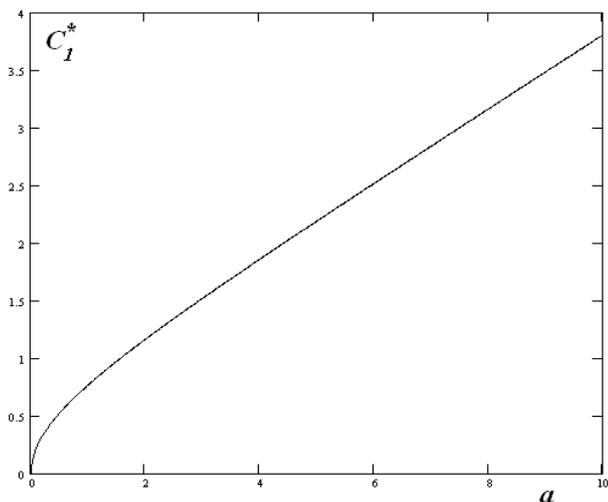


Рис. 2. Графическое определение коэффициента  $C_1^*$

Искомое расчетное уравнение для определения безразмерной средней скорости течения жидкости в канале с проницаемыми стенками в конечной форме запишется как

$$u^* = \frac{1}{C_1^*} \operatorname{tg}\left(\frac{ax}{2C_1^*}\right) \quad (15)$$

Значение констант  $C_1^*$  этого уравнения определяются по графику зависимости  $C_1^* = f(a)$ ,

изображенному на рис. 2. На рис. 3 представлены графики, показывающие характер изменения в канале вдоль потока средней безразмерной скорости течения жидкости для ряда значений коэффициента «а».

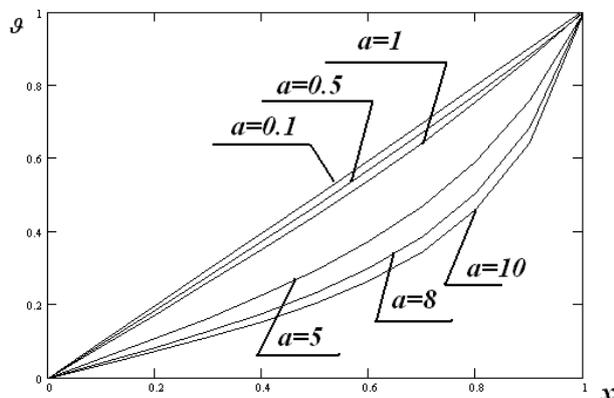


Рис. 3. Кривые распределения средней безразмерной скорости течения

С увеличением численного значения этого коэффициента, как видно из рис. 3, интенсивность снижения скорости течения жидкости вдоль канала по мере приближения к выходному сечению возрастает.

Зная среднюю скорость движения среды по внутреннему каналу, появляется возможность выровнять расход по всей длине перфорированной трубы. Это достигается за счет увеличения или уменьшения диаметра перфораций, то есть варьирования сопротивления перегородки на различных участках. Благодаря этому решению дорогостоящий катализатор используется наиболее полно, так как по всей длине наружной трубы рабочая среда подается в секцию с катализатором равномерно.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тишин, О. А. Особенности замера температуры в трубчатых каталитических реакторах / О. А. Тишин, Е. Климова [и др.] // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 1 (74) / ВолгГТУ. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. – 120 с. – (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4). – С. 61–65.
2. Быстров, П. И. Гидродинамика коллекторных теплообменных аппаратов / П. И. Быстров, В. С. Михайлов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
3. Петров, Г. А. Гидравлика переменной массы / Г. А. Петров. – Харьков: Изд. ХГУ, 1964. – 223 с.
4. Идельчик, И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов) / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
5. Приказчикова, Е. А. Течение в плоском канале с проницаемыми стенками / Е. А. Приказчикова, В. А. Ба-

лашов, В. В. Шишлянников // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. №1 (49) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – 88 с. – (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2). – С. 16–17.

6. Приказчикова, Е. А. Определение скорости течения жидкости в плоском канале прямоугольного сечения с проницаемыми стенками / Е. А. Приказчикова, В. А. Балашов, В. В. Шишлянников // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. №1 (61) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – 148 с. – (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3). – С. 56–59.

7. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

8. Милова, Д. А. Определение расхода жидкости при фильтрационном течении жидкости в плоском канале / Д. А. Ми-

лова, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. №1 (74) / ВолгГТУ. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. – 120 с. – (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4). – С. 9–12.

9. Милова, Д. А. Определение гидравлического сопротивления при фильтрации жидкости в цилиндрическом пористом слое / Д. А. Милова, В. А. Балашов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. №1 (49) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – 88 с. – (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 2). – С. 14–16.

10. Попов, Ю. В. Гидрирование некоторых непредельных соединений при катализе наночастицами металлов / Ю. В. Попов, В. М. Мохов, Д. Н. Небыков // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. №2 (75) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 192 с. – (Сер. Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов. Вып. 8). – С. 39–43.

УДК 66.045.5

*Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков, Я. А. Орлянкина*

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В НАСАДОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ ГРАДИРЕН

Волгоградский государственный технический университет

Приведено описание экспериментальной установки для исследования тепломассообмена и сравнительных испытаний различных типов насадочных устройств. Излагается методика проведения экспериментальных исследований.

*Ключевые слова:* охлаждение, насадка, градирня, капля, тепломассообмен.

*N. A. Merentsov, V. A. Balashov, A. B. Golovanchikov, J. A. Orlyankina*

### EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR RESEARCHING OF HEAT-MASS TRANSFER PROCESSES IN CAPPING DEVICES OF COOLING TOWERS

Volgograd State Technical University

In this paper the description of the developed experimental installation for researching of heat-mass transfer and comparatively tests for different types of capping devices are given. New method for experimental research has been developed.

*Keywords:* cooling, sprinkler, cooling tower, drop, heat-mass transfer.

Градирни получили широкое применение для охлаждения оборотной воды в химической, пищевой, энергетической, металлургической и других отраслях промышленности. В последнее время широкое распространение получают малогабаритные вентиляторные градирни модульного исполнения для организации локальных систем оборотного водоснабжения [1, 2, 6].

Основным конструктивным элементом градирни является ороситель, представляющий собой слой насадки, в пределах которой в условиях противоточного движения воздушного и капельно-пленочного водного потоков происходит охлаждение воды атмосферным воздухом. Важным показателем работы градирни является высокая интенсивность тепломассообменного процесса при наибольшей производительности по охлаждаемой воде и минималь-

ных энергетических затратах в расчете на единицу рабочего объема оросителя. Для малогабаритных градирен этот показатель имеет первостепенное значение, так как они являются вентиляторными. В силу этого, при прочих равных условиях эффективность работы малогабаритной вентиляторной градирни будет всецело зависеть от качества работы ее оросителя. Поэтому разработка новой насадки для оросителей градирен, обеспечивающей высокую степень тепломассообмена в воздушно-жидкостном потоке через ороситель, при его низком гидравлическом сопротивлении и достаточно высоком отношении расхода охлаждаемой воды к расходу воздуха, является одним из основных направлений на пути разработки новых высокоэффективных конструкций малогабаритных вентиляторных градирен.

В последние годы появился ряд новых перспективных насадок, например таких как ГИАП, ГИПХ, ВПЯМ, Хай-Пэк, Инжехим и др. [4, 5, 7]. Однако сравнительный анализ эффективности их работы применительно к оросителям малогабаритных вентиляторных градирен отсутствует или является недостаточным [3, 4]. Эти обстоятельства сдерживают как широкое использование некоторых из этих насадок при конструировании малогабаритных градирен, так и разработку методик расчета тепломассообменного процесса в условиях испарительного охлаждения. Поэтому проведение широкомасштабных экспериментальных исследований для новых типов насадочных устройств в области гидродинамики и тепломассообмена при испарительном охлаждении воды и получение опытных данных необходимых для разработки методик расчета малогабаритных вентиляторных градирен является актуальной задачей.

Разработанная экспериментальная установка позволяет исследовать гидродинамику насадочных устройств и тепломассообмен в условиях противоточного движения воздушно-водяного потока. Установка доступна для визуального наблюдения, развития гидроаэродинамических режимов движения воды и воздуха через насадку, определения удерживающей способности, гидравлического сопротивления, глубины охлаждения воды, коэффициентов тепло- и массообмена, исследования пристенных эффектов, которые в ряде случаев могут существенно влиять на результаты расчетов [8, 9, 10].

На рис. 1 и фотографии на рис. 2 приведена схема, поясняющая устройство и принцип работы установки для проведения указанного комплекса экспериментальных исследований.

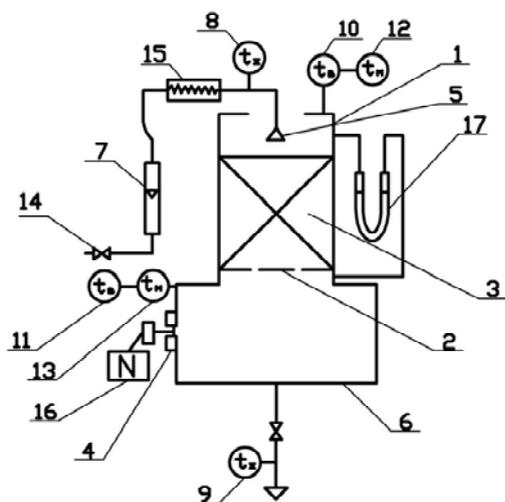


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



Рис. 2. Экспериментальная установка

Установка состоит из корпуса колонны 1 в котором размещается насадка 3, орошаемая водой с помощью распределителя 5, насадка противотоком продувается воздушным потоком поступающим из центробежного вентилятора 4. Стенки корпуса выполнены плоскими и прозрачными, что позволяет без искажения наблюдать и фиксировать с помощью скоростной видеокамеры работу насадки в различных гидродинамических режимах. Визуальная доступность данной установки позволяет оценить соотношение капельного и пленочного движения воды через насадку, что очень важно для математического моделирования процессов тепломассопереноса.

В установке реализована картриджная система сменных насадок, позволяющая осуществлять быструю смену насадок и обеспечивающая воспроизводимость измеряемых параметров в повторных экспериментах. Картридж представляет собой заполненный исследуемой насадкой прозрачный параллелепипед (121×121×800 мм) с опорной решеткой 2, помещаемый в корпус колонны 1.

Контролируемыми параметрами является: расход подаваемой на орошение воды, контролируемый ротаметром 7 и подогреваемый проточным водонагревателем 15, тепловая мощ-

ность которого регулируется лабораторным автотрансформатором. Температура воды контролируется с помощью температурных датчиков 8 на входе и 9 на выходе. Расход воздуха регулируется изменением подачи воздухоподдувки, число оборотов двигателя которой изменяется с помощью лабораторного автотрансформатора 16, и замеряется с помощью трубки Пито-Прандтля, установленной в канале подачи воздуха в водосборную емкость 6. Температура и влажность воздуха поступающего и уходящего из градирни фиксируются с помощью температурных датчиков (10–11) и гигрометров (12–13). Гидравлическое сопротивление слоя насадки фиксируется дифманометром 17.

Размеры изучаемых объемов насадки приближены к реальным размерам используемым в малогабаритных градирнях, что облегчает масштабный переход при проектировании новых конструкций градирен.

Таким образом, разработана экспериментальная установка для исследования широкого спектра показателей работы оросителей вентиляционных градирен. Результаты экспериментальных исследований позволяют выявить наиболее перспективные типы насадок для оросителей градирен и послужат исходным материалом для разработки методик их расчета.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меренцов, Н. А. Автономные системы оборотного водоснабжения для малотоннажных химических производств / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1(74). – 120 с. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4). – С. 102–104.

2. Гладков, В. А. Вентиляторные градирни / В. А. Гладков, Ю. И. Арефьев, В. С. Пономаренко. – М.: Стройиздат, 1976. – 216 с.

3. Каган, А. М. Сравнение эффективности промышленных насадок для испарительного охлаждения / А. М. Каган, А. С. Пушнов // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – № 4. – С. 44–48.

4. Фарахов, Т. М. Гидравлические характеристики новых высокоэффективных нерегулярных тепломассообменных насадок / Т. М. Фарахов, М. М. Башаров, И. М. Шигапов // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 2. – С. 192–207.

5. Боев, Е. В. Совершенствование конструкций полимерных оросителей градирен с целью повышения эффективности процесса охлаждения воды / Е. В. Боев, С. П. Иванов, В. Г. Афанасенко // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 12. – С. 30–34.

6. Пономаренко, В. С. Градирни промышленных и энергетических предприятий / В. С. Пономаренко, Ю. И. Арефьев. – М.: Энерготомиздат. – 1998. – 376 с.

7. Иванов, С. П. Разработка конструкции капельно-пленочного оросителя градирен на основе полимерных сетчатых оболочек и гофрированных труб / С. П. Иванов, Е. В. Боев // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – № 7. – С. 41–42.

8. Милова, Д. А. Фильтрационное течение жидкости в пристенной области плоского канала / Д. А. Милова, В. А. Балашов, Б. В. Симонов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 1 (61). – 148 с. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 3). – С. 59–61.

9. Милова, Д. А. Определение расхода жидкости при фильтрационном течении в плоском канале / Д. А. Милова, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1 (74). – 120 с. – (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4). – С. 12–15.

10. Тишин, О. А. Экспериментальное определение пористости слоя катализатора / О. А. Тишин, Е. В. Климова // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1 (74). – 120 с. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4). – С. 19–23.

УДК 66.063.8

*О. А. Тишин, В. Н. Харитонов*

#### АНАЛИЗ РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЯ В «FLOWVISION»

Волгоградский государственный технический университет

Рассмотрена возможность использования программы FlowVision для анализа гидродинамики центробежного статического смесителя. Создана математическая модель смесителя в программе и проведены расчеты с целью выявления структуры течения и сопоставления с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* центробежный статический смеситель, гидродинамика, FlowVision, математическое моделирование.

*O. A. Tishin, V. N. Haritonov*

#### ANALYSIS OF THE MIXER IN «FLOWVISION»

Volgograd State Technical University

Abstract: the possibility of using the program for the analysis of hydrodynamic FlowVision centrifugal static mixer. A mathematical model of mixing in the program and the calculations in order to identify the flow structure and comparison with experimental data.

*Keywords:* centrifugal static mixer, hydrodynamics, FlowVision, mathematical modeling.

В настоящее время широкое распространение получили небольшие по объему аппараты, предназначенные для предварительного перемешивания реагентов называемые центробежными статическими смесителями рис. 1, а. Серия таких устройств разработанных в ВолгГТУ [1–3] обладают малым гидравлическим сопротивлением, простой конструкцией и предназначены для смешивания нескольких потоков. Многочисленные экспериментальные исследования [4–11] этих аппаратов подтвердили эффективность их работы, оценили качество и энергетические затраты перемешивания но не привели к созданию математической модели адекватно описывающих гидродинамические процессы и позволяющих их всесторонне изучить.

В основе гидродинамической модели таких аппаратов лежит система уравнений Навье-Стокса но аналитическое ее решение представляет известные трудности. Однако бурный прогресс вычислительной техники и численных

методов расчета сделал доступным для анализа гидродинамики центробежных смесителей и не только программ численного моделирования. Анализ программного обеспечения, представленный на рынке, показал, что в наибольшей степени решению таких задач удовлетворяет программа FlowVision. Использование программы FlowVision при моделировании сложных явлений и процессов, в том числе с привлечением анимационных и других мультимедийных средств, позволяет в наглядном виде познакомиться со многими деталями явления или процесса, которые не могут быть отображены другими способами [12, 13].

Поэтому эта программа была использована для моделирования гидродинамической структуры потоков в центробежном статическом смесителе, чтобы проследить картину движения жидкости, изменения скорости, давления, и образование застойных зон в аппарате, а также сопоставить результаты расчета с данными полученными в результате экспериментов.

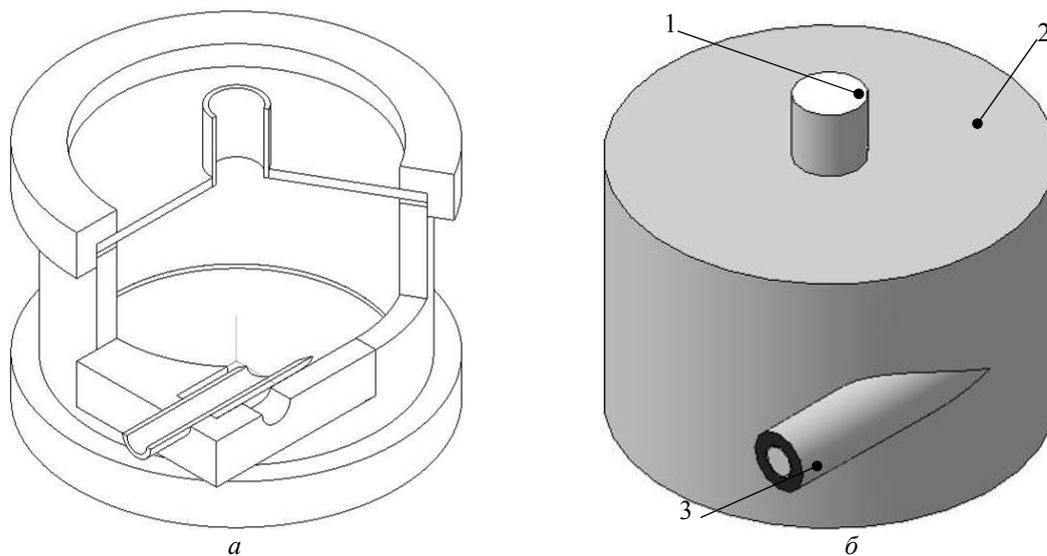


Рис. 1:

а – 3D модель смесителя; б – граничные условия: 1 – тип границы: свободный выход, тип граничного условия: нулевое давление/выход; 2 – тип границы: стенка, тип граничного условия: стенка, логарифмический закон; 3 – тип границы: вход/выход, тип граничного условия: нормальная скорость

Для реализации этой задачи была создана трехмерная модель расчетной области, представляющая собой проточную часть смесителя, в САПР Компас 3D т.к. программа FlowVision не имеет инструментов для их построения. Расчетная область была сохранена в файле с расширением STL и экспортирована в программу FlowVision. Для данной области задана к-ε модель турбулентной несжимаемой жидкости [14] и из предлагаемого списка выбраны, какие

уравнения этой модели необходимо рассчитать:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla(V \otimes V) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \left( (\mu + \mu_t) (\nabla V + (\nabla V)^T) \right) + S \quad (1)$$

$$\nabla V = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(VC) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla C \right) \quad (3)$$

После выбора модели были заданы физические параметры начальные, граничные условия рис. 1, б. В качестве физических параметров установлены свойства воды путем выбора из базы данных веществ, интегрированной в программу. Так как программа использует разностную схему для интегрирования уравнений модели, была создана расчетная сетка. Сначала была создана начальная сетка размером 20x10x20 ячеек, после чего

произведено ручное сгущение сетки в области входа струи в смеситель, а также задана адаптацией первого уровня по граничному условия «стенка» (рис. 2), что повышает качество моделирования (точность, сходимость) и в тоже время это не приводит к слишком большим тратам вычислительных ресурсов. Число расчетных ячеек составило чуть больше 13000, что укладывалось в ограничение демонстрационной версии программы.

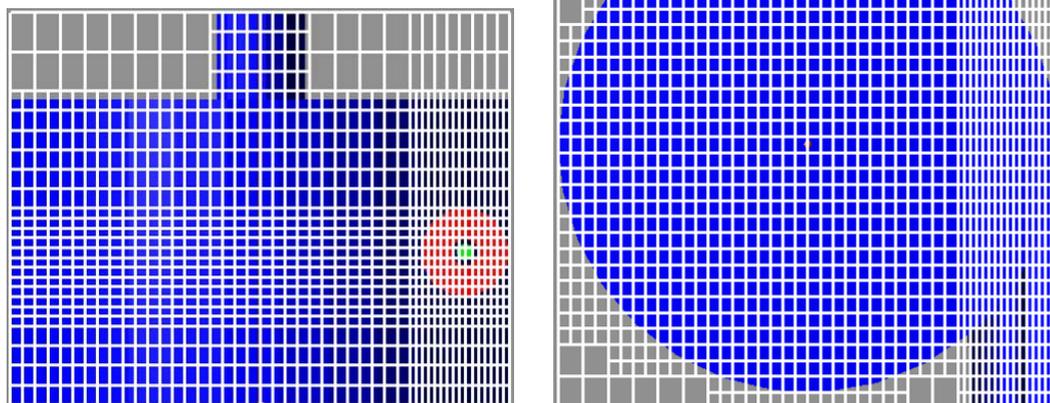


Рис. 2. Расчетная сетка

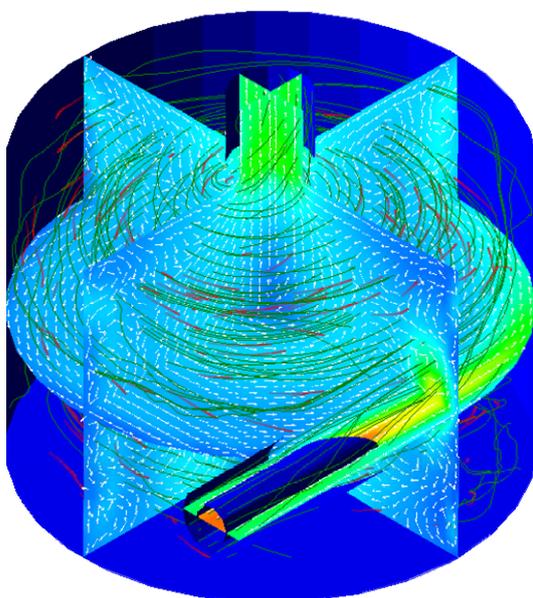


Рис. 3. Результаты расчета (поле скоростей и линии тока)

После чего был произведен запуск варианта на проведение расчета. В результате расчета были получены профили скоростей жидкости, давления и концентрации во всех точках расчетной области. Широкие возможности визуа-

лизации и анимации результатов расчета позволила выявить довольно сложную структуру потоков в смесителе (рис. 3).

Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными [4–11] по определению гидравлического сопротивления оказываемого потоку жидкости устройством и исследованиями структуры потоков, как функции распределения времени пребывания, показало удовлетворительное совпадение (рис. 4). Это позволяет сделать вывод о применимости и адекватности уравнений и методов их решения заложенных в программу.

К сожалению, ограничения демонстрационной версии программы не позволило провести расчет смесителя с химической реакцией, что не позволило задействовать для оценки точности расчетов экспериментальные данные по изучению микроперемешивания методом модельной реакции. Поэтому для моделирования более сложных процессов и получения более точных решений нужна полноценная версия программы и современная вычислительная техника.

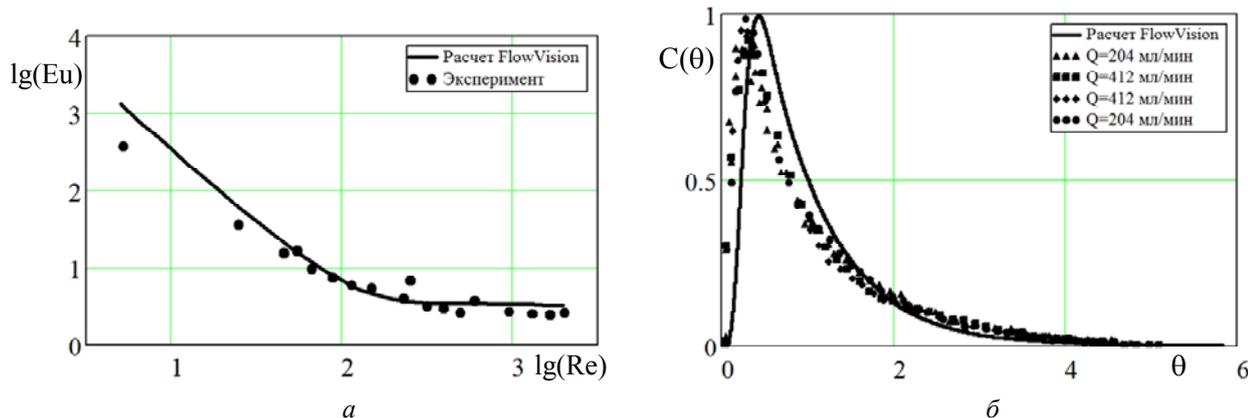


Рис. 4. Результаты сопоставления расчета и эксперимента:

*a* – зависимость гидравлического сопротивления смесителя от режима течения среды; *б* – кривая отклика смесителя на импульсное возмущение

Таким образом, применение программы FlowVision позволяет создать гидродинамическую модель статического центробежного смесителя, получить полную информацию о протекающих процессах и усовершенствовать смеситель, изменяя конструктивные и технологические параметры. Это, в свою очередь, позволяет существенно сократить время на проектирование и существенно сократить объем дорогостоящих физических экспериментов.

Авторы выражают большую благодарность сотрудникам компании «Тесис» за разработку и возможность воспользоваться программным комплексом такого уровня.

*Принятые обозначения*

- V* – скорость, м/с; *P* – давление, Па;
- C* – концентрация компонента;
- S* – параметр модели;
- Eu* – критерий Эйлера;
- Re* – критерий Рейнольдса;
- Sc* – число Шмидта;
- Sc<sub>t</sub>* – турбулентное число Шмидта;
- $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;
- $\mu_t$  – турбулентная динамическая вязкость, Па·с;
- $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;
- $\theta$  – безразмерное время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. № 1200957 СССР Вихревой смеситель / О. А. Тишин, А. П. Дарманян, С. Н. Романов, Н. И. Краснянский, М. К. Старовойтов, В. Н. Рязанов // Б. И. 1986, № 14.
2. А. с. № 1414444 СССР Вихревой аппарат / О. А. Тишин, Н. В. Тябин, А. П. Дарманян, С. Н. Романов, Ю. А. Шокоров, И. К. Моисеев // Б. И. 1988, № 29.
3. А. с. № 1606167 СССР Вихревой смеситель / О. А. Тишин, Н. В. Тябин, А. П. Дарманян, С. Н. Романов, Б. А. Митин, Е. А. Урецкий // Б. И. 1989, № 5.

4. Дарманян, А. П. Исследование качества перемешивания жидких сред в статических смесителях / А. П. Дарманян, О. А. Тишин, Н. В. Тябин, С. Н. Романов // ЖПХ, 1988. – Т. 61. – № 9. – С. 2028–2032.
5. Дарманян, А. П. Исследование влияния степени смешения реагентов на скорость химической реакции в проточном реакторе / А. П. Дарманян, О. А. Тишин, Н. В. Тябин // В кн.: тез. докл. 8-й Всес. конф. по хим. реакторам / Химреактор-8 / Т. 2. – Чимкент, 1983. – С. 312–317.
6. Tishin, O. A. Experimental study of micromixing in centrifugal static mixer and investigation of mixing with its help In Proc / O. A. Tishin, A. P. Darmanian, S. N. Romanov, N. V. Tyabin // 6-th Conf. on Mixing, Pavia, Italy, 1988, p. 183–190.
7. Tishin, O. A. A study of homogenization efficiency of motionless mixer In Proc / O. A. Tishin, A. P. Darmanian, N. V. Tyabin S. N. Romanov // 10-Th Int. Congress «CHISA-90», Praha, Czechoslovakia, 1990, paper 39.59.
8. Тишин, О. А. Гидродинамика и эффективность работы статических смесителей Реология, процессы и аппараты химической технологии / О. А. Тишин, А. П. Дарманян, С. Н. Романов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. тр. – Волгоград: изд. ВолГТУ, 1993. – С. 51–56.
9. Тишин, О. А. Оценка качества перемешивания в проточных системах / О. А. Тишин // ВолгГТУ. – Волгоград, 1994, 12 с. – Деп. в ВИНТИ 25.01.95, N 225-B95.
10. Тишин, О. А. Статические смесители для перемешивания легкоподвижных сред / О. А. Тишин // ВолгГТУ. – Волгоград, 1995, 10 с.: ил. 5-Библиогр. 9 назв.- Рус- Деп. в ВИНТИ 19.12.95 N 3391-B95.
11. Tishin, O. A. Homogenization efficiency of continuous mixer In Proc. / O. A. Tishin // 12-Th Int. Congress «CHISA-96», Praha, Czech Republic, 1996, paper P. 7.4.
12. Кондранин, Т. В. Использование средств компьютерного моделирования в курсах механики жидкости и газа: учебно-методическое пособие / Сост. Т. В. Кондранин, Б. К. Ткаченко, М. В. Березникова [и др.]. – М.: МФТИ, 2005. – 112 с.
13. Кондранин, Т. В. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: учеб. пособие / Т. В. Кондранин, Б. К. Ткаченко, М. В. Березникова [и др.]. – М.: МФТИ, 2005. – 104 с.
14. Wilcox, D. C. Turbulence modeling for CFD / D. C. Wilcox // DCW Industries, Inc., 1994. – 460 p.

УДК 66.063

С. В. Лапшина

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РОТОРНОГО ВЫПАРНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ АРМ WINMACHINE

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

В данном исследовании разработана методика проведения прочностного расчета ротора роторно-пленочного выпарного аппарата с применением программной системы АРМ WinMachine.

*Ключевые слова:* роторно-пленочный аппарат, балансировка ротора, соосное размещение, вал, ступица, шарнирно закрепленная лопатка.

S. V. Lapshina

## INVESTIGATION OF ROTARY EVAPORATORS USING SOFTWARE SYSTEMS АРМ WINMACHINE

Volgograd Polytechnical Institute (Branch) VolgGTU

In this investigation we developed a method of strength calculation of the rotor rotary-film evaporator with a software system АРМ WinMachine.

*Keywords:* rotary-film evaporator, rotor balancing, coaxial placement, shaft, hub, hinged blade.

Преимуществами рассмотренного пленочного аппарата является кратковременный контакт раствора с поверхностью нагрева и некоторый рост коэффициента теплопередачи [1]. Недостатками пленочных аппаратов с подвижным ротором является их сравнительная небольшая производительность, сложность регулирования процесса при колебаниях давления греющего пара и начальной концентрации раствора, большая чувствительность к содержанию твердых частиц в выпариваемом растворе, наличие подвижных узлов требующих ухода и ремонта, а так же при их размещении необходимы большие производственные территории. Производительность пленочных аппаратов ограничена размерами ротора. Однако с увеличением диаметра и длины аппарата значительно усложняется балансировка ротора и обеспечения его соосного размещения в корпусе.

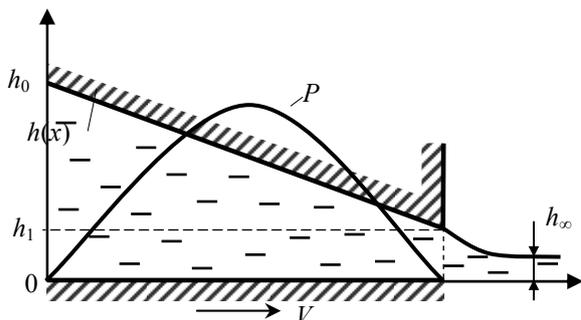


Рис. 1. Схема течения материала

При проектировании роторно-пленочного испарителя особое место уделяется проведению прочностных расчетов, как наиболее сложных и трудоемких.

В процессе работы валы испытывают значительные нагрузки, поэтому при определении оптимальных геометрических размеров валов необходимо выполнить комплекс расчетов, включающий в себя определение:

- статической прочности;
- усталостной прочности;
- жесткости при изгибе и кручении.

При высоких скоростях вращения необходимо определять частоты собственных колебаний вала для того, чтобы предотвратить попадание в резонансные зоны. Длинные валы проверяют на устойчивость.

Для расчета вала учитывали следующие нагрузки:

Собственный вес лопатки,  $m = 1,25$  кг.

Количество 17 штук.

Центробежная сила  $F_{ц} = 15,02$ .

Крутящий момент  $M_{кр} = 7500/6,28 = 1194$  Нм.

Изгибающий момент: рассчитывалось давление пленки жидкости на лопасть с учетом минимального и максимального зазора от 1 до 5 см, определялся объемный расход пленки жидкости в зависимости от окружной скорости ( $V = 1,9$ ) с учетом длины лопатки ( $l = 300$  мм), ширины лопатки 2 см, максимальный угол отклонения  $60^\circ$  и площадь лопатки  $0,006$  м<sup>2</sup>.

Расчетная схема течения представлена на рис. 1. Начальный зазор –  $h_0$ , конечный  $h_1$ , толщина покрытия –  $h_\infty$ . Считаем наклонную поверхность ножа неподвижной, а подложку движущейся поступательно со скоростью  $V$ .

Давление описывается функцией

$$P = \frac{6\mu V}{a} \left( \frac{1}{h_0 - ax} - \frac{1}{h_0} \right) - \frac{6\mu Q}{a} \left[ \frac{1}{(h_0 - ax)^2} - \frac{1}{h_0^2} \right].$$

Значение расхода найдем, используя граничное условие для давления в конце зоны течения  $x = l, h = h_1, P = 0$

$$Q = V \frac{h_0 h_1}{h_0 + h_1}.$$

Толщину покрытия найдем из условия неразрывности. Объемный расход покрытия для полотна единичной ширины на большом удалении от ракеля определяется равенством  $Q = Vh_\infty$ . Рассматривая совместно это выражение и расход на выходе из канала, находим

$$h_\infty = \frac{Q}{V} = \frac{h_1 h_0}{h_1 + h_0}.$$

Согласно полученному выражению толщина покрытия не зависит от протяженности зоны течения  $l$ , а только от соотношения высот входного зазора и выходного. В частности, при горизонтальном расположении ножа ( $h_1 = h_0$ ) толщина покрытия составляет  $h_\infty = h_0/2$ . Следовательно, в реальных условиях толщина покрытия находится в интервале  $h_1/2 \leq h_\infty < h_1$  [2].

Для сокращения времени расчета и исключения влияния человеческого фактора разработана методика прочностного расчета основного элемента аппарата – ротора в среде САПР АРМ WinMachine. АРМ WinMachine – наукоемкий программный продукт, созданный на базе современных инженерных методик проектирования, численных методов механики и математики. Ротор аппарата представляет собой сложную конструкцию состоящую из вала, ступицы насаженной на вал, опоры и непосредственно самих лопаток. Расчет сборочного элемента ротора производился при помощи метода конечных элементов (МКЭ). В нашей стране для реализации МКЭ разработана САД/САЕ система АРМ WinMachine, созданная в Научно-техническом центре «Автоматизированное проектирование машин» (НТЦ АПМ).

Для реализации расчета была создана 3D модель в САПР Компас (рис. 2), далее она импортирована в модуль АРМ Studio (рис. 3), где были проставлены силы и места закрепления, там же проведено разбиение модели на конечно-элементную сетку. После чего на расчет вал ротора отправлен в модуль АРМ Structure 3D.

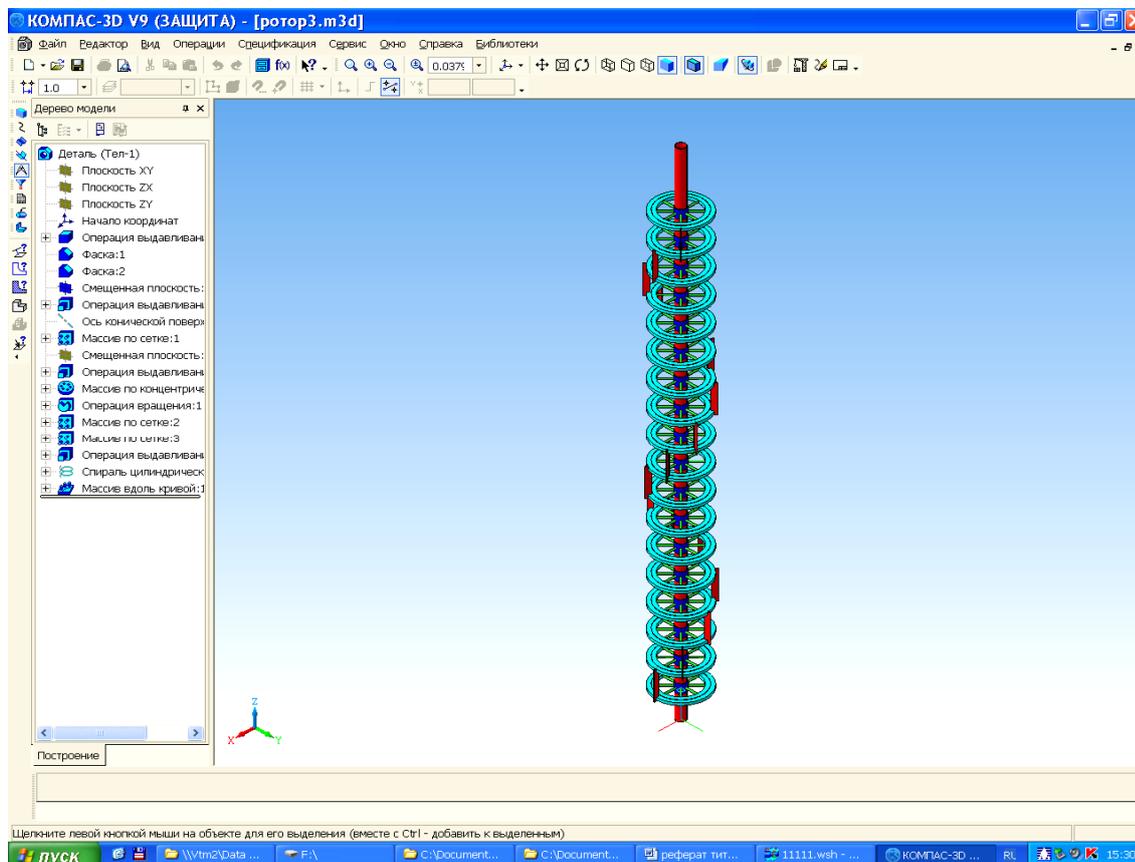


Рис. 2. Модель ротора

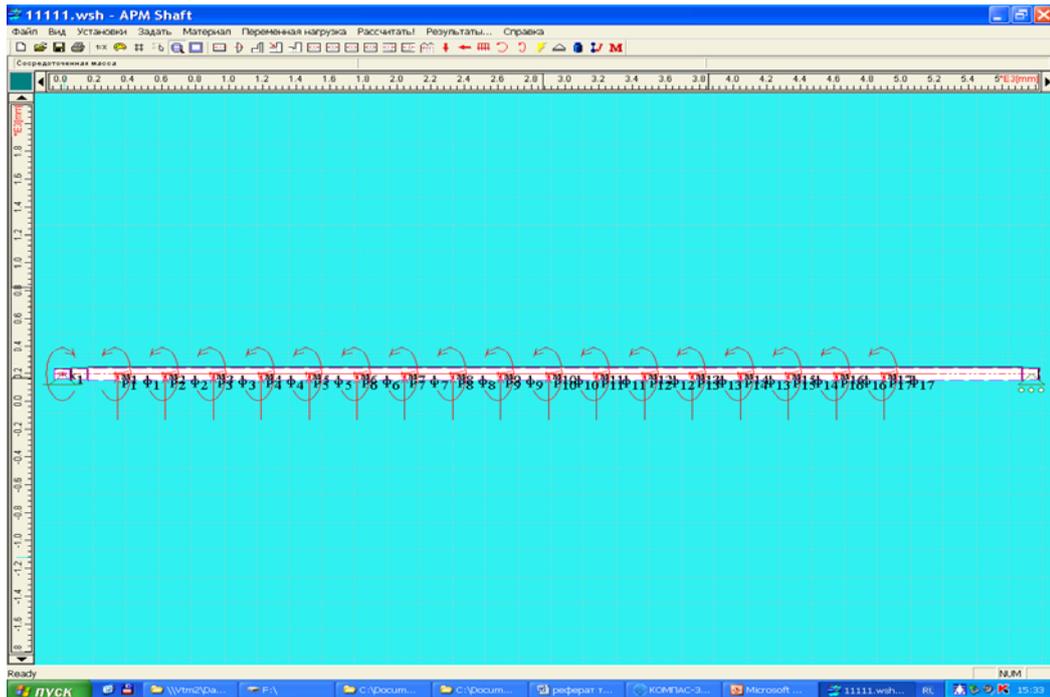


Рис. 3. Модель ротора APM Studio

Он позволяет рассчитать величины напряжений и деформаций в любой точке конструкции как с учетом внешнего нагружения, так и с учетом собственного веса каждого элемента. Для имитации работы конструкции были приложены нагрузки от ступицы, опоры и лопаток, учитывалось влияние рабочей среды на элемен-

ты конструкции.

Результаты расчетов с помощью специального визуализатора представляются в цветовой гамме, в виде изолиний или форме эпюр напряжений, моментов, сил, деформаций, что существенно облегчает анализ полученных результатов (рис. 4–6).

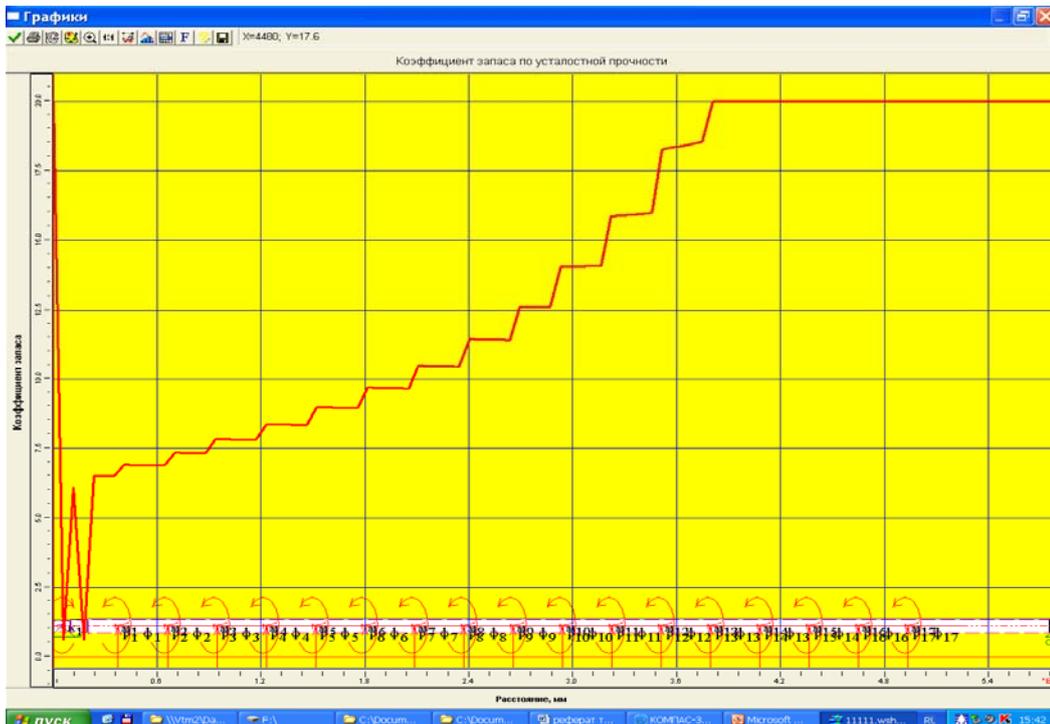


Рис. 4. Результаты расчета

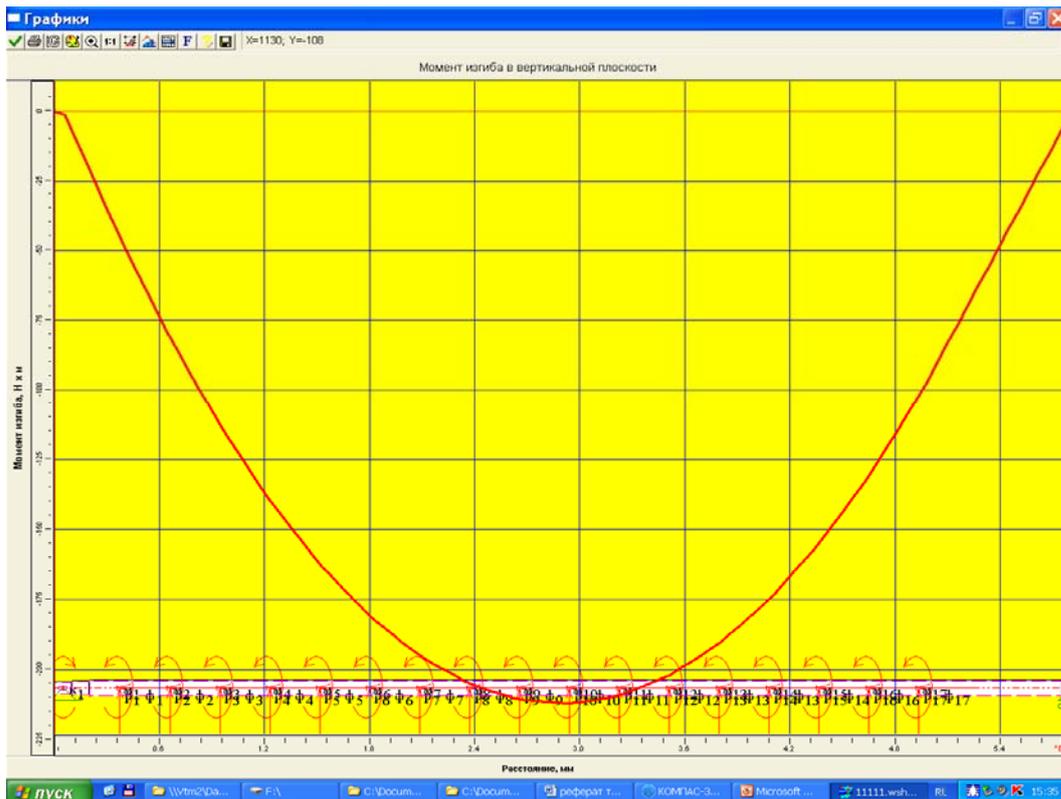


Рис. 5. Результаты расчета



Рис. 6. Результаты расчета

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доманский, И. В. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / В. П. Исаков, Г. Н. Островский [и др.]; под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л.: «Ма-

шиностроение», Ленингр. отд-ние, 1982. – 384 с.: ил.

2. Шаповалов, В. М. Математическое моделирование процессов переноса: учебное пособие / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – 183 с.

УДК 66.063.8

*Т. В. Островская, А. В. Девкин, О. А. Тишин***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ  
В АППАРАТЕ С МЕШАЛКОЙ****Волжский политехнический институт (филиал)  
Волгоградского государственного технического университета**

Работа посвящена исследованию процесса перемешивания в полупериодическом режиме работы аппарата с мешалкой. Исследовалась кинетика развала факела от условий перемешивания, числа оборотов, вязкости среды.

*Ключевые слова:* аппарат с мешалкой, перемешивание, микроперемешивание, модельная реакция, число оборотов, вязкость среды.

*T.V. Ostrovskaya, A.V. Devkyn, O.A. Tishin***EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON MIXING IN STIRRED  
TANK REACTOR****Volzhcky Polytechnical Institute (Branch)  
Volgograd State Technical University**

Work is devoted research of process on mixing in stirred tank reactor. It was investigated fast reaction and mixing from conditions of mixing, number of turns, viscosity of environment.

*Keywords:* the device with a mixer, hashing, microhashing, modeling reaction, number of turns, viscosity of environment.

Аппараты с перемешивающими устройствами являются одним из наиболее распространенных видов технологического оборудования. Применение такого оборудования обусловлено его универсальностью и возможностью использования для проведения различных процессов химической технологии. Одно из назначений аппаратов с перемешивающими устройствами – химические реакторы. В химических реакторах перемешивание оказывает значительное влияние на выходные характеристики химического процесса (степень превращения, селективность, выход). Особенно это проявляется при проведении быстрых со сложным механизмом химических реакций.

Исследованием процесса перемешивания посвящено значительное количество работ. Влияние перемешивания хорошо изучено для медленных химических реакций [1]. Для быстрых химических реакций влияние перемешивания изучено недостаточно. Одна из проблем состоит в изучении поведения струи дозируемого реагента в зоне подачи питания в реактор [2, 3]. В случае быстрой реакции оценка достаточно затруднена. Особенно это ощутимо в реакторах полупериодического и непрерывного режимах. Одной из причин, оказывающих влияние на ход химического процесса, является образование факела в зоне подачи дозируемого реагента. Поэтому исследование данной проблемы явилось целью настоящей работы.

В экспериментальных исследованиях использовался метод модельной реакции [4]. Для проведения экспериментов была создана установка, схема которой представлена на рис. 1. Установка состоит из аппарата объемом 15 литров. Корпус аппарата изготовлен из органического стекла (корпус прозрачный), что обеспечивало визуальное наблюдение за процессом и вести фото и видеосъемку. Аппарат снабжен перемешивающим устройством. Привод осуществлялся через ременную передачу от электродвигателя переменного тока. Управление приводом осуществлялось с помощью цифрового частотного преобразователя серии 3G3MV (4), с возможностью подключения и обмена данными по сети RS-485 для взаимодействия

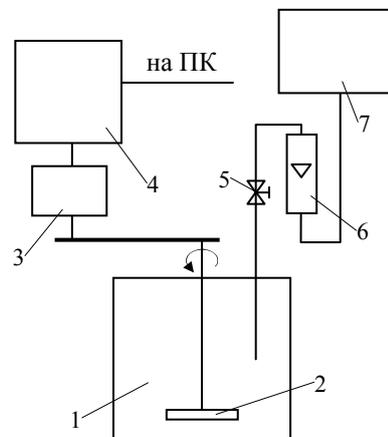


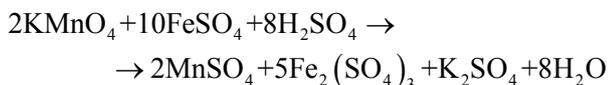
Рис. 1. Схема лабораторной установки

с персональным компьютером через USB-интерфейс. Емкость наполнялась раствором, содержащим окрашенный реагент (7). Скорость подачи раствора реагента контролировалась с помощью ротаметра (6), и регулировалась вентилем (5).

При помощи преобразователей интерфейсов Oven AC-3 и AC-4, последний из которых имеет USB выход для подключения к ПК, а так же соответствующего программного продукта OvenProcessManager, полученные данные были экспортированы в программу MicrosoftExcel. Процесс перемешивания зафиксировался с помощью на фото и видеосъемки.

В ходе эксперимента измерялись: скорость вращения мешалки; мощность потребляемая на перемешивание; глубина погружения в жидкость трубки дозирования; размеры трубки дозирования и ее расположение в плане; концентрации исходных реагентов; расход дозируемого реагента; температура в помещении и в аппарате; размеры факела (окрашенной – неразрушенной струи дозируемого реагента) и зоны реакции (все размеры определяются по фотографии); измерение вязкости среды. Перед началом эксперимента аппарат заполнялся раствором железного купороса. Объем раствора составлял 10 л. Раствор перманганата калия дозировался постепенно, скорость дозирования в ходе эксперимента поддерживалась постоянной.

Для того что бы оценить как влияют условия перемешивания на химический процесс использовался метод обесцвечивания реагентов. Для изучения процесса микроперемешивания в работе использован метод модельной реакции. Для этого использовалась хорошо известная в аналитической химии реакция:



Реакция относится к категории мгновенных химических реакций, поэтому при равномерном распределении реагентов по объему происходит мгновенное обесцвечивание массы. Растворы реагентов готовились таким образом, чтобы после перемешивания концентрация при условии равномерного распределения была равна:

$$\text{KMnO}_4 = 0,0025 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1};$$

$$\text{FeSO}_4 = 0,01275 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1};$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = 0,01 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}.$$

Железный купорос был использован в небольшом избытке для гарантированного обесцвечивания при перемешивании.

При дозировании реагента на выходе из трубки образовывался факел.

В случае использования мгновенной химической реакции взаимодействие протекает на поверхности вихрей, и незавершенность процесса перемешивания проявляется в наличии окрашенных фрагментов как в объеме аппарата, так и на выходе из него. Качество перемешивания оценивалось визуально, по наличию окрашенных фрагментов в объеме аппарата. Отсутствие визуально наблюдаемых фрагментов внутри объема аппарата оценивалось как отсутствие реакции в объеме аппарата.

Полученные в ходе эксперимента цифровые фотографии обрабатывались с помощью специальной графической программы «Компас 3D», в результате чего были получены трехмерные изображения факела и зоны проведения реакции.

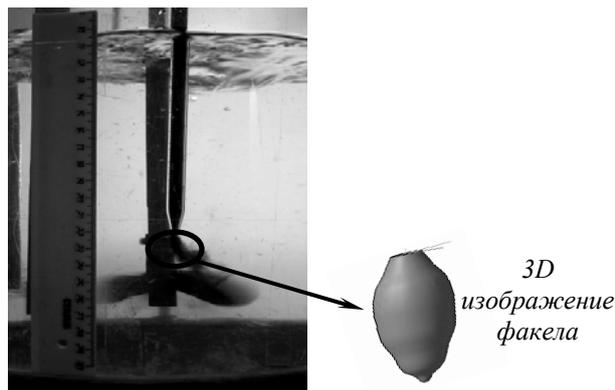


Рис. 2. Трехмерное изображение факела, полученное в результате обработки фотографии

С помощью созданной трехмерной модели факела определялся его объем и площадь поверхности.

В ходе экспериментов было установлено, что размеры факела зависят от скорости вращения мешалки и глубины погружения трубки дозирования. В качестве параметра, от которого зависят размеры факела, был использован средний объемный коэффициент массопереноса [4–6]:

$$\bar{k}_m = 0,0006V^{-0.52} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} (\ln(Sc) - 1,27)^{-1}. \quad (1)$$

Среднее значение мощности рассеиваемой в единице массы определялось по известной зависимости:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{K_N \cdot \rho \cdot n_m^3 \cdot d_m^5}{V \cdot \rho}. \quad (2)$$

Известно, что энергия рассеивается по объему перемешиваемой среды неравномерно [2, 3]. Поэтому значение местного коэффициента массопереноса определялось по значению мощности рассеиваемой в данной точке объема:

$$\varepsilon_{\text{мест}} = n_{\text{мест}} \cdot \bar{\varepsilon}. \quad (3)$$

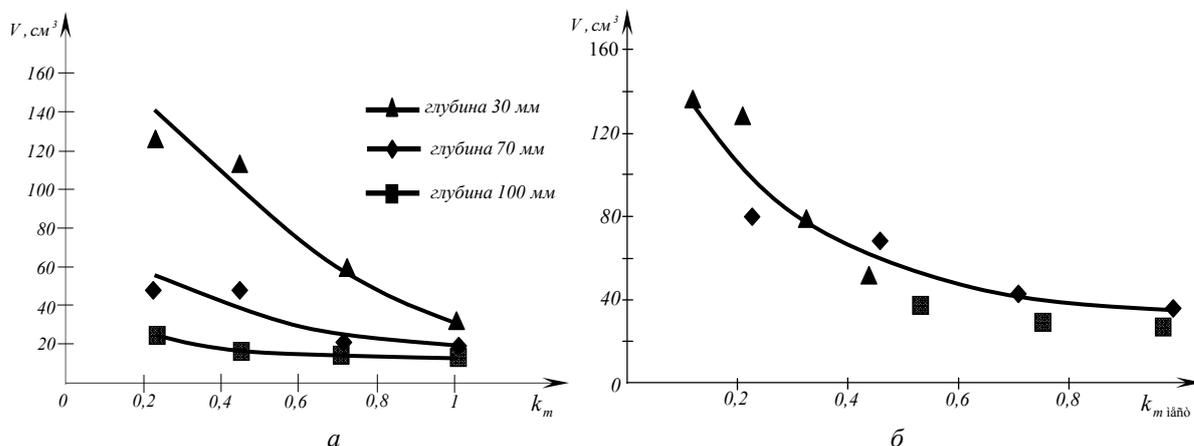


Рис. 3. Зависимость изменения объема зоны реакции от среднего по объему коэффициента массопереноса (а) и местного коэффициента массопереноса (б)

Как видно из графиков, размеры факела зависят от положения точки ввода потока реагента и величины коэффициента массопереноса. Размеры факела удовлетворительно согласуются с величиной местного коэффициента переноса (рис. 3, б).

В ходе экспериментальных исследований установлено, что:

1. В химических реакторах в зоне подачи реагента образуется факел, размеры которого зависят от скорости величины местного коэффициента массопереноса и положения точки ввода реагента.

2. Факел существует при любых условиях перемешивания.

3. В случае проведения быстрой реакции взаимодействие реагентов осуществляется вблизи зоны дозирования, и химическая реакция и не распространяется по всему объему.

#### Список условных обозначений

- $D$  – коэффициент молекулярной диффузии;  
 $d_m$  – диаметр мешалки,  
 $h_{mp}$  – глубина погружения трубки;  
 $K_N$  – критерий мощности;  
 $N$  – мощность перемешивания;  
 $n_m$  – число оборотов мешалки;  
 $n_{\text{мест}}$  – коэффициент учитывающий реальное распределение рассеиваемой мощности;

Значения корректирующего множителя для глубин погружения трубки питания 30; 70 и 100 мм были приняты равными 0,4; 0,6 и 1,0 соответственно [2].

На рис. 3 Представлена зависимость объема факела от величины коэффициента массопереноса.

- $V$  – объем жидкости в аппарате;  
 $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;  
 $\bar{\varepsilon}, \varepsilon_{\text{мест}}$  – среднее и местное значение удельной мощности;  
 $\rho$  – плотность жидкости в аппарате;  
 $Sc = \frac{\nu}{D}$  – число Шмидта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Baldyga J., Henczka M., Makowski L. Effects of mixing on parallel chemical reactions in a continuous – flow stirred – tank reactor // Chem. Eng. Res. and Des. – 2001 – v 79, № 8 P. 895 – 900.
2. Verschuren, M. Feed stream mixing in stirred tank reactors // Chem. Engng. Sci. – 2003 – v. 57, № 11 P. 1497 – 1513.
3. Vicum, L. Investigation of the influence turbulent mixing on precipitation processes carried out in stirred tank reactors // A.I.Ch.E. Journal. – 2005/ v 93, № 2 P. 320–331.
4. Тишин, О. А. Определение условий предварительной смешанности в аппаратах с мешалками / О. А. Тишин, И. Н. Дорохов // Журнал прикладной химии. – 2002. – Т. 75. – № 11. – С. 1877–1880.
5. Тишин, О. А. Определение условий обеспечивающих в аппаратах с мешалками распределение времени пребывания, соответствующее модели идеального перемешивания / О. А. Тишин, И. Н. Дорохов, А. Ф. Качегин // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2002. – С. 70–73.
6. Тишин, О. А. Выбор числа оборотов перемешивающего устройства в реакторе с мешалкой / О. А. Тишин, А. В. Девкин // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 16 (61). – С. 89–92.

УДК 54.058

А. Б. Голованчиков, Ю. В. Аристова, С. Б. Воротнева, А. Е. Новиков

## ЭЛЕКТРОЛИЗЕР ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ПРИМЕСЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

Рассмотрена конструкция электролизера для очистки промышленных сточных вод от ионов тяжелых металлов, который может найти применение в металлургической, машиностроительной, химической промышленности и в экологии при очистке промышленных стоков. Предложенная конструкция позволит упростить его эксплуатацию и обеспечить изготовление из обычного проката конструкционной стали как корпуса и конического днища, так и стальных электродов катода и анода.

*Ключевые слова:* электролиз, электролизер, сточные воды, постоянный ток, электроды.

А. В. Golovanchikov, J. V. Aristova, S. B. Vorotneva, A. E. Novikov

## ELECTROLYZER FOR SEWAGE WATER OF IMPURITIES

Volgograd State Technical University

The design of the electrolyzer for the treatment of industrial waste water from heavy metal ions, which can be used in metallurgy, machine building, chemical industry and environment while cleaning effluent. The proposed design will simplify its operation and to ensure production of conventional rolled-steel casing and a tapered bottom and steel cathode and anode electrodes.

*Keywords:* electrolysis, electrolyzer, waste water, electrodes.

Конструкция промышленных аппаратов для проведения электролитических процессов определяется характером процесса. В гидрометаллургии и гальванотехнике используют преимущественно так называемые ящичные электролизеры, представляющие собой открытую емкость с электролитом, в которой размещают чередующиеся катоды и аноды, соединенные соответственно с отрицательными и положительными полюсами источника постоянного тока. Разрабатываются электролизеры и для высоких давлений. В современных электролизерах широко применяют пластические массы, стекло и стеклопластики, керамику [1, 2].

Основным недостатком электролизеров является сложность конструкции и эксплуатации в связи с необходимостью подготовки катода в виде блока спрессованной стружки, с трудностями при равномерном заполнении зазора анода стружкой, а также необходимостью установки диафрагмы и ее регенерации, сложности при установке стальных неподвижных электродов. Кроме того, при использовании трехфазного переменного тока энергозатраты выше, чем при использовании постоянного тока, и помимо алюминиевого или дуралюминиевого лома растворяются стальные неподвижные электроды, что требует их периодической замены [3, 4].

Целью разработанной конструкции электролизера явилось устранение вышеперечисленных недостатков [5].

Электролизер для очистки сточных вод от тяжелых металлов, содержит прямоугольный корпус, выполненный из конструкционного ма-

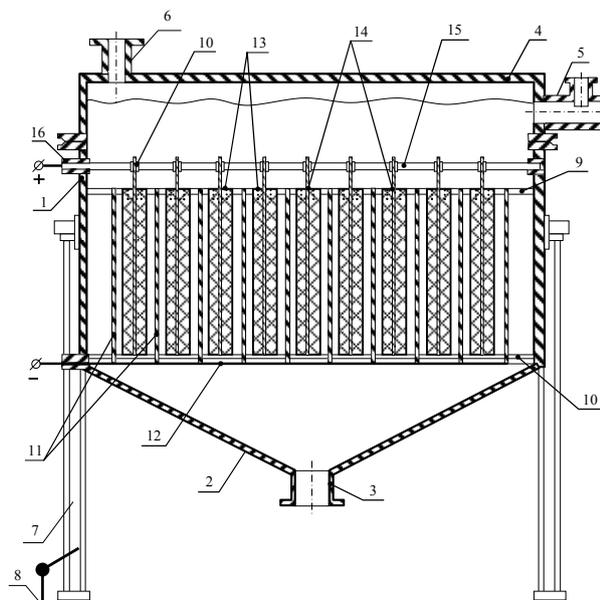


Рис. 1. Электролизер для очистки сточных вод от тяжелых металлов;

1 – корпус; 2 – днище; 3, 5, 6 – патрубок; 4 – крышки; 7 – опоры; 8 – заземление; 9, 10 – рамы; 11 – пластины; 12, 14, 15 – шина; 13 – контейнеры; 16 – диэлектрические пробки

териала, например, стального проката с конусным днищем и патрубком подвода сточной воды, внутри которого неподвижно установлены стальные электроды и электрод, выполненный в виде перфорированного пластикового контейнера, заполненного металлическим ломом. При этом корпус соединен с заземлением. Неподвижные стальные электроды изготовлены в виде плоских пластин, подключенных к отрицательному источнику постоянного тока, а электрод – контейнер выполнен в виде набора

чередующихся со стальными электродами прямоугольных контейнеров, симметрично установленных между стальными электродами, при этом внутри каждого контейнера симметрично установлена плоская шина, соединенная с положительным полюсом источника постоянного тока. Аппарат снабжен съемной крышкой с патрубком для отвода очищенной воды и патрубком для отвода газов электролиза и воздуха.

Электролизер для очистки воды работает следующим образом [5].

Открывают патрубок 3 и подают в корпус 1 сточную воду, которая заполняет днище 2, корпус и часть крышки 4 до уровня с патрубком 5. Открывают патрубок 6 и подают на шины 12 и 15 разность потенциалов от источника постоянного тока.

Так как положительный полюс источника постоянного тока соединен шиной 15 с плоскими шинами 14, установленными осесимметрично в прямоугольных перфорированных пластиковых контейнерах 13 с ломом, то от них равномерно по всему объему металлического лома передается положительный заряд, под действием которого лом растворяется.

Около поверхности пластин 11 стальных электродов, присоединенных шиной 12 к отрицательному источнику постоянного тока идет восстановление ионов тяжелых металлов, находящихся в сточной воде.

Очищенная вода поднимается вверх по корпусу в съемную крышку 4 и сливается по патрубку 5 из электролизера. Газы, образующиеся при электролизе воды, отводятся через патрубок 6 в систему вентиляции.

Так как металлический лом в контейнерах 13 растворяется, и его необходимо в них добавлять, то для этого периодически крышка 4 снимается и металлический лом легко засыпается в контейнеры 13.

Такая конструкция аппарата упрощает его изготовление и эксплуатацию, а следовательно, приводит к снижению расходов.

Преимущества конструкции электролизера в следующем:

– выполнение корпуса в виде прямоугольника позволяет установить в нем стальные электроды в виде плоских пластин, а перфорированные пластиковые контейнеры прямоугольной формы обеспечивают максимальные площади поверхностей смежных электродов, а значит, одинаковые плотности тока, и равномерное растворение металлического лома во

всех контейнерах по их обеим боковым сторонам [6–8];

– присоединение корпуса к заземлению не требует специальных диэлектрических материалов и позволяет использовать обычную конструкционную сталь;

– присоединение плоских пластин к отрицательному полюсу источника постоянного тока позволяет создать большую поверхность катода с двух сторон плоских пластин, что способствует восстановлению растворенных ионов металлов;

– выполнение контейнера в виде набора контейнеров, имеющих прямоугольную форму и симметрично установленных между стальными электродами, позволяет увеличить площадь поверхности металлического лома и создать одинаковый зазор между электродами по всей длине и высоте электродов;

– присоединение металлического лома в контейнерах к плоской шине, установленной осесимметрично с контейнером и соединенной с положительным полюсом источника постоянного тока позволяет подавать одинаковый положительный потенциал на металлический лом, что приводит к его равномерному растворению по всей высоте и ширине каждого контейнера;

– использование постоянного тока предотвращает растворение неподвижных плоских пластин стальных электродов, так как они подключены через шину к отрицательному полюсу источника постоянного тока в отличие от электролизеров, где используется трехфазный переменный ток, приводящий к растворению стальных электродов;

– кроме того, уменьшаются затраты электроэнергии, идущие на растворение металлического лома в контейнерах, так как при использовании переменного тока значительная часть его энергии идет на нагревание сточной воды;

– плоские пластины и соответственно плоские шины с контейнерами позволяют обрабатывать весь объем сточной воды, проходящей через корпус, электрическими зарядами, так как зазоры между плоскими пластинами и металлическим ломом в плоских контейнерах одинаковые по всей ширине прямоугольного корпуса, что приводит к упрощению изготовления и эксплуатации узлов и деталей электролизера и выравниванию степеней очистки воды по ее объему в межэлектродных зазорах корпуса.

Таким образом, конструкция электролизера позволяет упростить его конструкцию и экс-

платацию (за счет перехода на постоянный ток) и предотвратить растворение стальных неподвижных электродов за счет того, что обеспечивается изготовление из обычного проката конструкционной стали как корпуса и конического днища, так и стальных электродов катода и плоских шин анода, а также развиваются большие поверхности стальных электродов-катодов и боковые поверхности металлического лома, являющегося анодом, и равномерно восстанавливаются на боковых поверхностях стальных плоских пластин, являющихся катодами, ионы растворенных в сточной воде металлов, и растворяется металлический лом в прямоугольных контейнерах, являющихся анодом [9,10].

Такой аппарат может найти применение в металлургической, машиностроительной, химической промышленности, а также в экологии при очистке промышленных стоков.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Залипаева, О. А. Регулирование состава смеси в процессе очистки отходов предприятий / О. А. Залипаева, А. С. Трусов, А. В. Ляпков, Ю. В. Аристова / Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. научн. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1(74). – С. 96. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4)
2. Ефремов, М. Ю. Использование электрического поля для подготовки воды в пароэнергетических установках / М. Ю. Ефремов, А. Б. Голованчиков, А. В. Добряков /

Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. научн. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1(74). – С. 114. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 4).

3. Платонов, Е. Г. Эластомерные электроды рукавного типа / Е. Г. Платонова, В. Ф. Корнюшко, О. П. Отченашев, Ю. П. Смирнов / Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. научн. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 2(68). – С. 167. (Сер. Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов. Вып. 7).

4. Веденина, Н. В. Анализ и прогнозирование опасности химических соединений и веществ / Н. В. Веденина, А. Г. Кравец / Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. научн. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 6(66). – С. 87. (Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 8).

5. Пат. 97995 Российская Федерация, МПК С 02 F 1/463. Электролизер для очистки сточных вод от тяжелых металлов / А. Б. Голованчиков, Т. В. Хохлова, Ю. В. Аристова, А. О. Бондаренко, Н. А. Дулькина, А. В. Добряков; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. Заявл. 23.04.10; опубл. 27.09.10.

6. Якименко, Л. М. Электролиз воды / Л. М. Якименко, И. Д. Модылевская, З. А. Ткачек. – М.: Химия, 1970.

7. Якименко, Л. М. Электродные материалы в прикладной электрохимии / Л. М. Якименко. – М.: Химия, 1977.

8. Сиволобова, Н. О. Влияние структуры потоков на степень обеззараживания воды в электрическом поле / Н. О. Сиволобова, А. Б. Голованчиков, М. Г. Новиков / Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. научн. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – № 11(37). – С. 23. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1).

9. Авербух, И. П. Важнейшие химические производства / А. Я. Авербух, И. П. Мухленов [и др.]. – М.: Высшая школа. 1990.

10. Фиошин, М. Я. Электролиз в неорганической химии / М. Я. Фиошин, А. Н. Павлов. – М.: Наука, 1976.

УДК 66.022

*А. Б. Голованчиков, И. М. Дородникова, А. С. Трусов*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРА АВТОМОБИЛЯ О ВЯЗКОУПРУГОЕ ОГРАЖДЕНИЕ

Волгоградский государственный технический университет

Рассмотрена динамика торможения при ударе автомобиля о вязкоупругое препятствие. Используется модель Кельвина с ограничениями по допускаемому ускорению.

*Ключевые слова:* динамика торможения, удар автомобиля, модель Кельвина.

*A. B. Golovanchikov, I. M. Dorodnikova, A. S. Trusov*

### MODELLING OF BLOW OF THE CAR ABOUT THE VISCOELASTIC PROTECTION

Volgograd State Technical University

The dynamics of braking with the impact of automobile against viscoelastic obstacle is examined. The model of Calvin is used by the calculation of limitations on the permissible acceleration.

*Keywords:* dynamics of braking, car blow, Calvin's model.

Рассмотрим динамику удара автомобиля о вязкоупругое препятствие, описываемое так называемой моделью Кельвина, то есть параллельным соединением вязкого и упругого звеньев (рис. 1) [1].

В момент удара при  $t = 0$ ,  $x = 0$ ,

$$v = v_0 \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение для рассматриваемого случая имеет вид

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} + kx = 0, \quad (2)$$

где  $M$  – масса автомобиля с водителем и пассажирами, кг;  $x$  – деформация, м;  $\eta$  – коэффициент вязкости,  $\frac{\text{Н} \times \text{с}}{\text{м}}$ ;  $k$  – коэффициент упругости, Н/м.

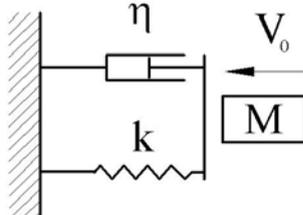


Рис. 1. Схема удара автомобиля массой  $M$  с начальной скоростью  $V_0$  об ограждение

Однородное дифференциальное уравнение второго порядка (2) имеет характеристическое уравнение

$$r^2 + \frac{\eta}{M}r + \frac{k}{M} = 0,$$

корни которого могут быть представлены в виде

$$r_{1,2} = -\frac{\eta}{2M} \pm \sqrt{\left(\frac{\eta}{2M}\right)^2 - \frac{k}{M}}.$$

Здесь возможны три случая [2]:

1. два корня действительные и разные

$$\left(\frac{\eta}{2M}\right)^2 \geq \frac{k}{M};$$

2. два корня действительные и мнимые

$$\left(\frac{\eta}{2M}\right)^2 \leq \frac{k}{M};$$

3. два корня действительные и одинаковые

$$r_{1,2} = -\frac{\eta}{2M} \quad \text{при} \quad \left(\frac{\eta}{2M}\right)^2 = \frac{k}{M}. \quad (3)$$

Анализ всех трех случаев показывает, что наибольший интерес представляет последний, при котором путь торможения наименьший, а ускорение имеет точку экстремума.

Решение дифференциального уравнения (2) при условии (3) имеет вид [2]

$$x = (C_1 + C_2 t) e^{\frac{-\eta}{2M} t} \quad (4)$$

С учетом начального условия (1) для деформации  $x$  получаем  $C_1 = 0$ , тогда

$$x = C_2 t \exp\left(-\frac{\eta}{2M} t\right),$$

$$\frac{dx}{dt} = C_2 \exp\left(-\frac{\eta}{2M} t\right) - C_2 t \left(\frac{\eta}{2M}\right) \exp\left(-\frac{\eta}{2M} t\right). \quad (5)$$

С учетом начального условия (1) для скорости  $v = \frac{dx}{dt}$  получаем  $C_2 = v_0$ , тогда

$$x = v_0 t \exp\left(-\frac{\eta}{2M} t\right), \quad (6)$$

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{\eta}{2M} t\right) - v_0 t \left(\frac{\eta}{2M}\right) \exp\left(-\frac{\eta}{2M} t\right) \quad (7)$$

$$\text{и} \quad a = -v_0 \left(\frac{\eta}{2M}\right) \exp\left(-\frac{\eta}{2M} t\right) \left[2 - t \left(\frac{\eta}{2M}\right)\right]. \quad (8)$$

Ускорение  $a$  не должно превышать при ударе возможностей человеческого тела [3, 4].

В пределе  $a \approx -10g$ . Принимаем  $a = -100 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ .

Беря производную по  $t$  из выражения (8) и приравнявая ее нулю, получаем

$$\frac{da}{dt} = v_0 \left(\frac{\eta}{2M}\right)^2 \exp\left(-\frac{\eta}{2M} t\right) \cdot \left[3 - \left(\frac{\eta}{2M}\right) t\right] = 0.$$

Тогда получаем, что максимальное значение ускорения после удара достигается при  $t = \frac{6M}{\eta}$ , тогда  $a = v_0 \left(\frac{\eta}{2M}\right) \exp(-3)$  и положительное.

При  $t = 0$ ,  $a_0 = -2v_0 \left(\frac{\eta}{2M}\right)$ , то есть в момент удара ускорение в  $\left[\frac{a_0}{a} = 2 \exp(3)\right] = 40$  раз больше, чем в точке экстремума.

Поэтому при  $t = 0$  принимаем  $a_0 = -100 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$  и, подставляя в уравнение (8) это значение  $a_0$ , получаем  $2v_0 \frac{\eta}{2M} = 100$ .

Если скорость в момент удара  $v_0 = 90 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 25 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ , а масса автомобиля с водителем и пассажирами была  $M = 1000$  кг, то коэффициент вязкости должен равняться

$$\eta = \frac{M \cdot 100}{v_0} = 4M = 4000 \frac{\text{Н} \times \text{с}}{\text{м}},$$

а коэффициент упругости  $k$  с учетом выражения (3)

$$k = \frac{\eta^2}{4M} = 4000 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Уравнения (6), (7) и (8) с рассчитанными численными параметрами будут иметь вид

$$\begin{aligned} x &= 25t \exp(-2t); \\ v &= 25 \exp(-2t) [1 - 2t]; \\ a &= -100 \exp(-2t) [1 - t]; \end{aligned} \quad (9)$$

Скорость уменьшается до нуля за время  $t_K = 0,5$  с, при этом деформация вязкоупругого ограждения (рис.1) составит

$$x_K = \frac{25t_K}{\exp(2t_K)} = \frac{25 \cdot 0,5}{e} = 4,58 \text{ м.}$$

Графики уравнений (9), записанных в параметрическом виде как зависимости скорости и ускорения от деформации, представлены на рис. 2.

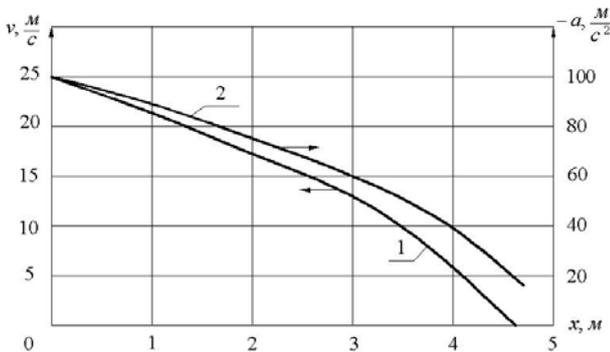


Рис. 2. Зависимость скорости (1) и ускорения (2) от деформации вязкоупругого ограждения

Сравним полученные результаты при ударе автомобиля о вязкоупругое ограждение (параллельное соединение звеньев вязкости и упругости – модель Кельвина), с ударом только об упругое ограждение (когда коэффициент вязкости в механической модели  $\eta \rightarrow 0$ , рис. 1).

Дифференциальное уравнение (2) преобразуется к виду

$$M = \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0. \quad (10)$$

Решение для этого уравнения имеет вид [3]

$$\left. \begin{aligned} x &= \left( \frac{v_0}{\sqrt{k}} \right) \sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right) \\ v &= v_0 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right) \\ a &= -v_0 \sqrt{\frac{k}{M}} \sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right) = -\frac{k}{M}x \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Если  $a_{\max} = -100 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ , то при  $\sqrt{\frac{k}{M}}t = \frac{\pi}{2}$ ,

$$v_0 = 25 \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ и } M = 1000 \text{ кг, } t_K = \frac{1,57}{4} = 0,392 \text{ с,}$$

при таком  $t_K$   $v=0$ , а путь торможения  $x = \frac{25}{4} = 6,25$ м, то есть путь торможения увеличивается на 36 % по сравнению с рассмотренной выше вязкоупругой моделью ограждения.

Сравним также полученные результаты с ударом только об ограждение со звеном вязкости (когда коэффициент упругости в механической модели  $k \rightarrow 0$ , рис. 1)

Дифференциальное уравнение (2) принимает вид

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} = 0.$$

Его решение описывается уравнением [2]:

$$x = \frac{-C_1}{\left(\frac{\eta}{M}\right)} \exp\left(-\frac{\eta}{M}t\right) + C_2.$$

При  $t = 0, x = 0$ , то есть  $C_1 = C_2$ .

Последнее уравнение для скорости приобретает вид:

$$v = C_1 \exp\left(-\frac{\eta}{M}t\right).$$

При  $t = 0, v = v_0$  и  $C_1 = v_0$ .

Тогда

$$\left. \begin{aligned} &= \frac{v_0}{\left(\frac{\eta}{M}\right)} [1 - \exp\left(-\frac{\eta}{M}t\right)]; \\ x \quad v &= v_0 \exp\left(-\frac{\eta}{M}t\right); \\ a &= -v_0 \left(\frac{\eta}{M}\right) \exp\left(-\frac{\eta}{M}t\right). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Для  $a_{\max} = -100 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ,  $v_0 = 25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ,  $M = 1000$  кг из последнего уравнения системы (12) получаем:

$$-100 = -25 \frac{\eta}{1000}, \text{ тогда } \eta = 4000 \frac{\text{Н} \times \text{с}}{\text{м}}.$$

Система уравнений (12) для полученных численных значений приобретает вид

$$\begin{aligned} x &= 6,25 [1 - \exp(-4t)]; \\ v &= 25 \exp(-4t); \\ a &= -100 \exp(-4t). \end{aligned} \quad (13)$$

Недостатком рассматриваемой модели с вязким элементом в ограничении является то, что скорость до нуля уменьшается за время

$t \rightarrow \infty$ . Допускаем, что за время удара скорость снижается в 10 раз, то есть до  $v_K = 2,5 \frac{M}{c}$ . Тогда время деформации после удара составит согласно второму уравнению системы (13)

$$\exp(4t_K) = 10 \text{ или } 4t_K = 2,3,$$

тогда 
$$t_K = \frac{2,3}{4} = 0,575 \text{ с},$$

а 
$$x_K = 6,25[1 - 0,1] = 5,62 \text{ м}.$$

Для модели ограждения с вязким элементом уменьшение скорости в 10 раз с  $25 \frac{M}{c}$  до  $2,5 \frac{M}{c}$  происходит при деформации 5,62 м, то есть в 1,23 раза большей, чем в ограждении с параллельным соединением звеньев упругости и вязкости.

Таким образом, механическая модель ограждения с параллельным соединением звеньев упругости и вязкости – модель Кельвина при механическом ускорении, не превышающем 10 g, уменьшает на 23–36 % деформацию ограждения по сравнению с отдельно установленными в ограждении звеньями – только упругим или вязком.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тябин, Н. В. Реологическая кибернетика / Н. В. Тябин. – Волгоград, Волгоградская правда, 1981 г. – 173 с.
2. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

3. Янбиков, Д. В. Использование отработанных автопокрышек в качестве эластичного ограждения автодорог / Д. В. Янбиков, А. Б. Голованчиков // В кн.: научное сообщение Волгоградского клуба докторов наук, бюл. №16. – 2007. – С. 41–44.

4. Смиранный, Л. Н. Весомая невесомость (Из записок космонавта-исследователя) / Л. Н. Смиранный // Ж. Наука и жизнь. – 2007. – № 5. – С. 36–42.

5. Голованчиков, А. Б. Реодинамика вязкоупругих процессов в максвелловской и кельвиновской моделях / А. Б. Голованчиков, И. М. Дородникова, Д. В. Янбиков // Известия ВолГТУ. – 2009. – Т. 1. – № 2. – С. 8–11.

6. Голованчиков, А. Б. Математическое моделирование столкновения автомобиля с вязкоупругим препятствием / А. Б. Голованчиков, Д. В. Янбиков, И. М. Дородникова // Известия ВолГТУ. – 2009. – Т. 6. – № 6. – С. 12–13.

7. Голованчиков, А. Б. Методика определения реологических параметров нелинейной вязкоупругой жидкости / А. Б. Голованчиков, И. М. Дородникова // Известия ВолГТУ: сб. научн. тр. / ВолГТУ. – Волгоград. – 1987. – С. 23–27. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии).

8. Голованчиков, А. Б. Расчет и проектирование эластичного ограждения автодорог / А. Б. Голованчиков, Ю. Ф. Полковников, Т. А. Голованчикова // Известия ВолГТУ: сб. научн. ст. / ВолГТУ. – Волгоград. – 2004. – № 5. – С. 21–23.

9. Голованчиков, А. Б. Энергозатраты при вращении дорна с маловязким пограничным слоем / А. Б. Голованчиков, А. А. Шагарова, Н. А. Дулькина, И. М. Дородникова // Известия ВолГТУ: сб. научн. ст. / ВолГТУ. – Волгоград. – 2007. – № 1. – С. 8–9.

10. Голованчиков, А. Б. Устройство для измерения вязкоупругих характеристик полимерных материалов / А. Б. Голованчиков, И. М. Дородникова, А. В. Ильин // Информационный лист №60-031-99 ВолГТУ. – Волгоград ЦНТИ, 1999.

УДК 541.183.001.57

**А. Б. Голованчиков, А. В. Кузнецов, М. Ю. Ефремов, А. С. Трусов**

### ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ОСУШКИ ВОЗДУХА В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ СИЛИКАГЕЛЯ

Волгоградский государственный технический университет

Проведено физическое и математическое моделирование процесса осушки воздуха в адсорбере периодического действия.

Проанализировано влияние давления на основные технологические характеристики процесса и геометрические размеры аппарата.

*Ключевые слова:* осушка воздуха, давление, силикагель, время адсорбции, статическая емкость.

**A. B. Golovanchikov, A. V. Kuznetsov, M. U. Efremov, A. S. Trusov**

### EFFECT OF PRESSURE ON THE PROCESS OF DRY AIR IN THE FIXED SILICA GEL LAYER

Volgograd State Technical University

Conducted a physical and mathematical modeling of drying air in the batch adsorber.

The influence of pressure on the main technological characteristics of the process and the geometric dimensions of the apparatus.

*Keywords:* drying air, pressure, silica gel, time of adsorption, static capacitance.

В монографии [1] подробно описана методика осушки воздуха в адсорберах периодического действия на гранулах цеолита. Недостатком осушки воздуха на гранулах цеолита является необходимость ее проведения при низких температурах и высоком давлении. В учебном пособии [2] рассмотрена методика расчета адсорберов периодического действия для паров органических веществ по известной изотерме адсорбции стандартного вещества – бензола на гранулах активного угля, однако сказано, что из-за гидрофобности его поверхности осушку воздуха на активном угле проводить нецелесообразно.

Целью работы является теоретическое изучение возможности осушки воздуха при нормальной температуре и при невысоком избыточном давлении.

Нами в работе [3] описана равновесная зависимость для системы «водяной пар – воздух – гранулы силикагеля», полученная экспериментально и хорошо описываемая уравнением Ленгмюра [4]

$$a = \frac{A \cdot b \cdot c}{1 + b \cdot c}, \quad (1)$$

где  $A = 0,127$  кг/кг – полная статическая емкость силикагеля;  $b = 1884,5$  м<sup>3</sup>/кг – коэффициент.

График этой равновесной зависимости (1) представлен на рис. 1.

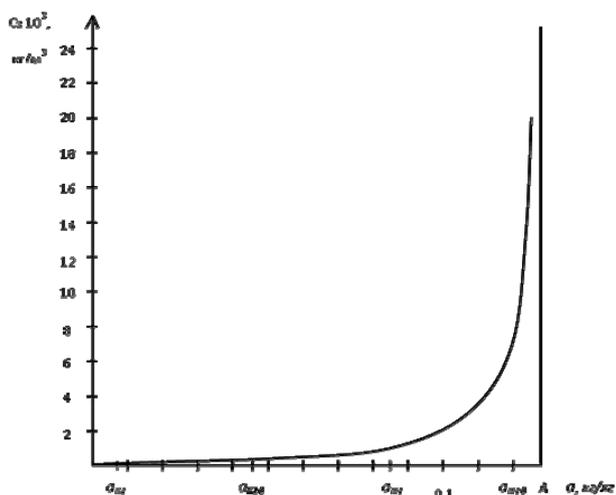


Рис. 1. Равновесная линия при осушке воздуха силикагелем ( $a_{н1} - a_{к1}$ ) – рабочий диапазон концентраций силикагеля при давлении 1,033 ат; ( $a_{н10} - a_{к10}$ ) – то же при давлении 10 ат

Выведем уравнение элементарного материального баланса для сечений адсорбера I и II (рис. 2) [5, 6].

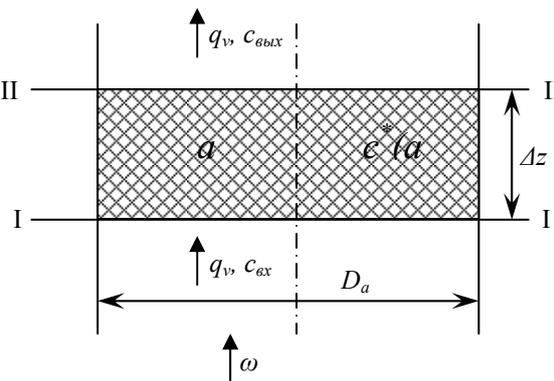


Рис. 2. Схема распределения концентраций извлекаемого компонента  $a$  в газе и адсорбенте для элементарного слоя высотой  $\Delta Z$  в момент времени  $\tau$

Выделим в неподвижном слое силикагеля между сечениями I и II элементарный слой высотой  $\Delta Z$ . Диаметр адсорбера  $D_a$ , скорость газового потока,  $\omega$  а объемный расход  $q_v$ , элементарный объем адсорбента между сечениями I–II:

$$\Delta V = \frac{\pi D_a^2}{4} \cdot \Delta Z,$$

а его масса

$$\Delta G = \Delta V_a \rho_n.$$

Тогда элементарный материальный баланс для времени  $\tau$  за время  $\Delta \tau$  по извлекаемому компоненту для выделяемого объема адсорбента  $\Delta V_a$  запишется в виде

$$q_v (C_{ex} - C_{вых}) \cdot \Delta \tau = \beta_y \Delta V [C_{ex} - C^*(a)] \Delta \tau,$$

откуда концентрация в газе извлекаемого компонента на выходе из рассматриваемого слоя  $\Delta Z$  на высоте  $Z$  в момент времени  $\tau$  может быть представлена уравнением

$$C_{вых} = C_{ex} - \left( \beta_y \frac{\Delta V}{q_v} \right) \cdot [C_{ex} - C^*(a)] \quad (2)$$

Концентрация извлекаемого компонента  $a$  в рассматриваемом слое  $dZ$  к моменту времени  $\tau$  равна сумме

$$a = \sum_{i=1}^{k-1} a(i),$$

а каждое значение  $C^*(a)$  находится для конкретного времени

$$\tau = \sum_{i=1}^{k-1} i \cdot \Delta \tau,$$

по формуле равновесия Ленгмюра (1), где  $\Delta \tau = \Delta Z / \omega$ .

Тогда концентрация  $a(k)$  из материального баланса по извлекаемому компоненту в адсорбенте запишется в виде

$$a(k) = a + q_v \Delta \tau / \Delta G. \quad (3)$$

**Зависимость технологических параметров и геометрических размеров адсорбционной колонны при осушке воздуха в неподвижном слое силикагеля от давления (высота слоя силикагеля  $H = 1$  м)**

Наименование параметра	размерность	обозначение	Величина					
			1,033	2	4	10	30	70
Давление	ат	$p$	1,033	2	4	10	30	70
Производительность по воздуху	м <sup>3</sup> /ч	$q_v$	1240	642	321	128,3	42,8	18,3
Скорость воздуха	м/с	$\omega$	0,524	0,297	0,21	0,133	0,077	0,05
Расчетный диаметр колонны	мм	$Da$	916	875	736	585	444	360
Масса силикагеля	кг	$G$	444	378	318	252	192	155
Коэффициент внешней массоотдачи	с <sup>-1</sup>	$\beta_y$	26,8	16,5	10	5	2,3	1,2
Начальная концентрация воды в воздухе	кг/м <sup>3</sup>	$C_n \cdot 10^3$	1,035	2,0	4,0	10	30	70
Равновесная ей концентрация воды в силикагеле	кг/кг	$a_n^* \cdot 10^2$	8,4	10	11,2	12,1	12,5	12,6
Конечная (допуская с учетом давления) концентрация паров воды в воздухе	кг/м <sup>3</sup>	$C_k \cdot 10^4$	0,31	0,6	1,2	3	9	21
Равновесная ей концентрация воды в силикагеле	кг/кг	$a_k^* \cdot 10^2$	0,7	1,29	2,35	4,6	8	10,1
Плотность воздуха	кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	1,21	2,41	4,84	12,1	36,3	84,6

В таблице приведены результаты расчетов основных технологических параметров адсорбера с неподвижным слоем силикагеля при осушке воздуха, при этом коэффициент внешней массоотдачи, являющейся лимитирующей стадией процесса массопередачи рассчитывался по известной формуле [2]

$$\beta_y = \frac{1,6D_p \omega^{0,54}}{v^{0,54} d_3^{1,46}},$$

где допускается фиктивная скорость воздуха [4]

$$\omega_p = 0,75 \sqrt{\frac{0,0167 \cdot \rho_n \cdot d_3 \cdot g}{\rho}},$$

а коэффициент диффузии водяных паров в воздухе

$$D_p = D_0 \cdot \left(\frac{1,033}{P_a}\right) \cdot \left(\frac{273+t}{273}\right)^{\frac{3}{2}}.$$

Высота слоя силикагеля выбиралась постоянной и равной  $H = 1$  м, насыпная плотность силикагеля  $\rho_n = 550$  кг/м<sup>3</sup>, диаметр гранул  $d_3 = 0,0042$  м, динамическая вязкость воздуха  $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$  Па·с, число интервалов при  $n = 100$ ,  $\Delta Z = 0,01$  м.

Как видно из расчетных данных таблицы объемная производительность по воздуху с ростом давления пропорционально уменьшается и монотонно, но нелинейно уменьшаются допускаемая скорость воздуха, диаметр колонны и масса силикагеля в ней. Пропорционально с ростом давления возрастает начальная концентрация паров воды воздуха и конечная (допускаемая с учетом давления) концентрация паров воды в осушенном воздухе на выходе из

колонны. Соответственно на равновесной линии сдвигается в сторону больших концентраций рабочий диапазон их измерения (рис. 1, диапазоны измерения концентраций для давлений 1,033 и 10 ат). Это приводит сначала (до давления  $p = 10$  ат) к существенному росту степени использования статической емкости силикагеля и удельного объема осушаемого воздуха (объема воздуха отнесенного к 1 кг силикагеля) от давления (рис. 3, кривая 1 и рис. 4). Однако время адсорбции (до остановки колонны на регенерацию силикагеля) при этом снижается с 28 часов до 22,8 часа, то есть на 18,6 %, хотя последнее связано с уменьшением диаметра адсорбера и соответственно уменьшением массы в нем силикагеля с 444,5 кг до 252,5 кг, то есть на 43 %, так как высота слоя силикагеля во всех расчетах принималась постоянной  $H = 1$  м [7, 8].

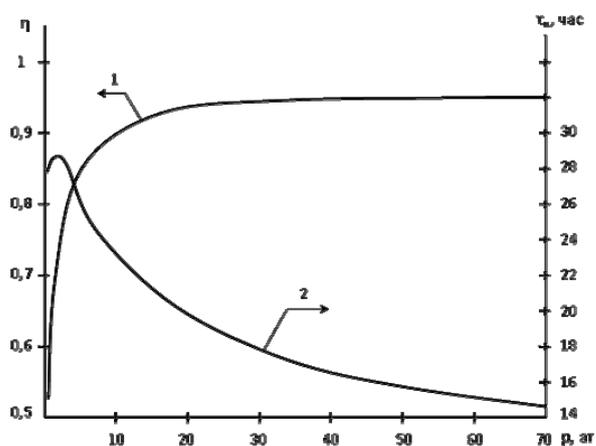


Рис. 3. Зависимость степени использования статической емкости силикагеля (1) и времени адсорбции (2) от давления

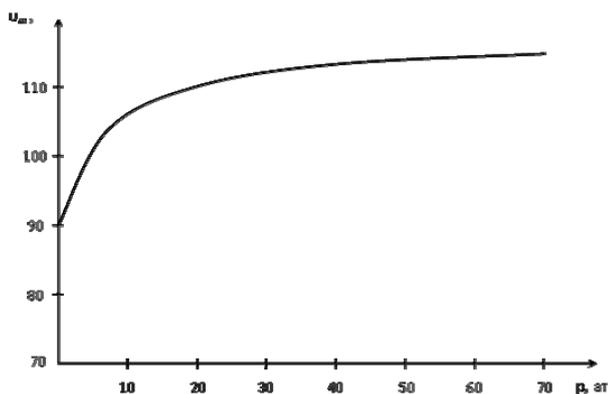


Рис. 4. Зависимость удельного объема осушаемого воздуха от давления

На рис. 5 и 6 представлены профили концентраций водяных паров в воздухе и в силикагеле по высоте слоя для атмосферного давления и давления 10 ат и для конечных моментов адсорбции соответственно.

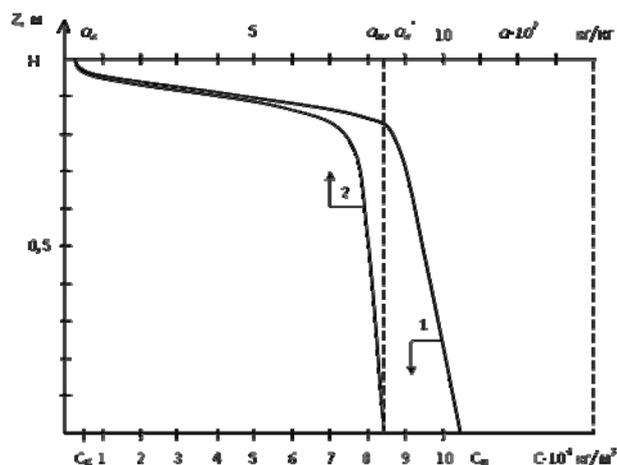


Рис. 5. Профили концентраций водяных паров в воздухе (1) и в силикагеле (2) по высоте слоя для давления 1,033 ат в конце процесса адсорбции  $\tau_k = 27,65$  ч

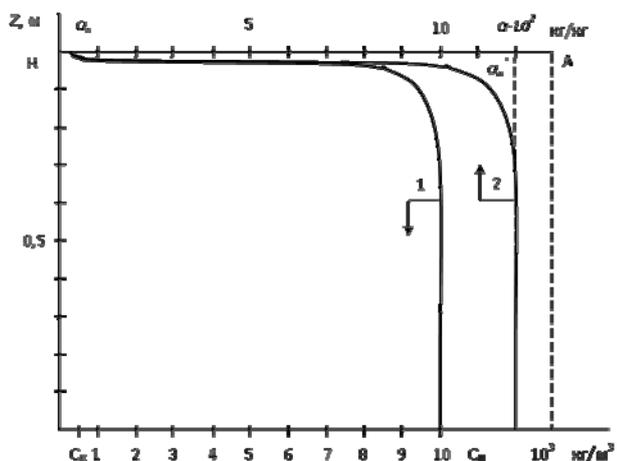


Рис. 6. Профили концентраций водяных паров в воздухе (1) и в силикагеле (2) по высоте слоя для давления 10 ат в конце процесса адсорбции  $\tau_k = 22,78$  ч

Как видно из графиков этих рисунков степень использования статической емкости  $A$  силикагеля значительно возрастает при давлении 10 ат по сравнению с этим же параметром при атмосферном давлении, причем во втором случае на 90 % высоты динамическая емкость адсорбента используется полностью (линия 2 на рис. 6 идет практически вертикально), то есть в конце рабочего цикла гранулы силикагеля в массообменном процессе не участвуют и воздух в них движется в режиме фильтрации.

Таким образом, при осушке воздуха силикагелем целесообразно в качестве оптимального выбрать давление  $P = 10$  ат со степенью использования статической емкости адсорбента более чем на 90 % при высокой удельной производительности по объему  $V_m > 100$  м<sup>3</sup>/кг и достаточно большим рабочим временем цикла осушки  $\tau_k > 20$  часов. Эти преимущества воздуха наглядны при сравнении с осушкой воздуха на зернах цеолита, когда рабочее давление достигает 60–80 ат и низкие отрицательные температуры, которые обеспечивают не только массообменный процесс адсорбции, но и простую конденсацию паров при вымораживании [9, 10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глизманенко, Д. Л. Получение кислорода / Д. Л. Глизманенко. – М.: Химия, 1965. – С. 402.
2. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – Изд. 8-е, пер. и доп. – Л: Химия, 1976. – С. 552.
3. Голованчиков, А. Б. Интенсификация сорбционных процессов в электрическом поле: учебное пособие / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов. – Волгоград, РПК «Политехник», 2005. – С. 72.
4. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1984. – С. 592.
5. Голованчиков, А. Б. Моделирование процессов адсорбции и электроадсорбции / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, Н. А. Дулькина // Известия ВолгГТУ. – Волгоград, 2001. – № 9 (82). – С. 14–18. (Сер. Актуальные проблемы управления вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 11).
6. Голованчиков, А. Б. Влияние электрического поля на степень очистки воздуха в процессе адсорбции / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, В. И. Лапицкий // Известия ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – № 11(37). – С. 27–30. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 1).
7. Пат. м. 99353 РФ, МПК В 01 J 20/28. Адсорбент для очистки газов и жидкостей от вредных примесей / А. Б. Голованчиков, Ю. В. Аристова, Н. А. Дулькина, М. Ю. Ефремов, А. В. Добряков, П. А. Комкин; ВолгГТУ. – 2010.
8. Пат. № 2361662 РФ МПК В 01 J 20/28. Адсорбент для очистки газов и жидкостей от вредных примесей / А. Б. Голованчиков, А. В. Добряков, М. Ю. Ефремов, Ю. Л. Беляева, А. Э. Караева, Б. А. Дулькин; ВолгГТУ. – 2009.

9. Голованчиков, А. Б. «Рубашка» для гранул адсорбента / А. Б. Голованчиков, Тхи Тхюи Зьонг, Ле Тхи Тхань Ван // *Фундаментальные исследования*. – 2008. – № 11. – С. 55.

10. Голованчиков, А. Б. Исследование процесса адсорбции газов в электрическом поле / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов // *Теоретические основы химической технологии*. – 2003. – Т. 37. – № 5. – С. 548–550.

УДК 665.6:6602

*В. Ф. Решетов, Ю. А. Бадьин*

### ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ИЗНОСА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗМЕЕВИКОВ ПЕЧЕЙ С УЧЕТОМ ФАКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт  
нефтехимического оборудования, Волгоград**

Данная статья описывает метод оценки остаточного ресурса высокотемпературных змеевиков промышленных пламенных печей. Задача рассматривается с точки зрения обоснования необходимости проведения исследований длительной прочности долго работавшего металла. Метод основан на учете эффекта снижения фактических напряжений в конструкции за счет наличия прибавок на коррозию.

*Ключевые слова:* остаточный ресурс, змеевики, длительная прочность.

*V. F. Reshetov, Yu. Badin*

### ESTIMATING THE REMAINING LIFE OF EXISTING FIRED HEATERS' COILS USED AT HIGH TEMPERATURES

**All-Russian Scientific, Researching and Construction Institute of Equipment  
for Oil Refining and Petrochemical Industry, Volgograd**

This work presents a method for estimating the remaining life of fired heaters' coils. The problem is discussed from the viewpoint of considering the needness for creep resistance testing. The method took into consideration the effects of stress reductions produced by corrosion allowance.

*Keywords:* remaining life, coils, creep resistance.

Известно, что по пределу длительной прочности, определенной при испытаниях металла в лабораторных условиях по стандартной методике можно рассчитать конструкционную длительную прочность элементов.

Метод расчета на прочность элементов длительно эксплуатирующихся змеевиков основан на положениях нормативно-технического документа РТМ 26-02-67-84 [1], который в основном совпадает с американским стандартом API Standard 530 [2]. Сам расчет проводится по номинальным допускаемым напряжениям материала змеевика.

Допускаемые напряжения материала элементов змеевиков, работающих при высоких температурах (для углеродистых сталей при расчетной температуре стенки  $T > 425$  °С, для низколегированных сталей  $T > 490$  °С, для сталей аустенитного класса при  $T > 590$  °С) назначаются с учетом длительной прочности металла ( $\sigma_{д.п.}$ ) при заданной расчетной температуре и на принятый проектный срок службы, который составляет обычно 100 тыс. часов, что соответствует 12 годам эксплуатации.

В то же время в литературе [3] указывается, что ни теоретически, ни экспериментально не

доказано, что по результатам испытаний на длительную прочность долго работавшего металла на основании определения его предела длительной прочности можно прогнозировать оставшийся срок службы до вероятного разрушения изготовленной из него конструкции.

При расчете остаточного ресурса обычно используются расчетные формулы и коэффициенты запаса прочности по механическим характеристикам материала, применяемые для расчета на прочность проектируемого оборудования. Для подтверждения возможности их использования, как правило, выполняют исследования структуры металла и его физико-механических свойств с целью установления отсутствия поврежденности металла (недопустимого изменения структуры металла и снижения механических свойств).

На основании подхода, предложенного в [2], предлагается метод оценки, основанный на учете фактических толщин стенок змеевиков в процессе эксплуатации.

Для труб основная формула определения расчетной толщины стенки ( $S_p$ ) имеет вид согласно [1, 2]:

$$S_p = \frac{P \cdot D}{2 \cdot [\sigma] + P},$$

где  $P$  – расчетное давление;  $D$  – наружный диаметр труб;  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение материала при расчетной температуре для принятого проектного срока эксплуатации,  $[\sigma] = \sigma_{д.п.Lmin}$ ;  $\sigma_{д.п.Lmin}$  – минимальное значение предела длительной прочности за расчетный срок службы.

Так как в процессе эксплуатации трубы подвергаются коррозионному и эрозионному износу, обгоранию, а также материал элементов змеевиков претерпевает структурные изменения (вызывающие изменение физико-механических свойств), то, в общем случае, исполнительные толщины элементов ( $S$ ) выполняются с увеличением относительно расчетной толщины стенки на величину принятой эксплуатационной прибавки на износ  $C$ .

$$S = S_p + C$$

Рассмотрим трубу змеевика с исполнительной толщиной  $S$ , эксплуатируемая в условиях постоянства напряжений в конструкции  $\sigma_p$  в течении некоторого отрезка времени –  $\Delta t$ . Максимально возможное время эксплуатации (до предельного состояния)  $t_p$  будет функцией  $\sigma_p$ :

$$t_p = f(\sigma_p)$$

Доля исчерпанного ресурса эксплуатации определяется соотношением  $\Delta t / t_p$ . Для непрерывного во времени процесса доля исчерпанного ресурса  $F$  будет изменяться по времени (увеличиваться) и определяться интегралом

$$F(t) = \int_0^t \frac{dt}{t_p}$$

$t_o$  – время эксплуатации;  $t_p$  – максимально возможное время эксплуатации (до предельного состояния) при определенном напряжении в конструкции  $\sigma_p$ , которое определяется согласно эмпирической формулы

$$t_p = f(\sigma_p) = m \cdot \sigma_p^{-n},$$

где  $m, n$  – постоянные параметры материала (конкретной марки стали или сплава), определяемые на основе исследования физико-механических свойств.

При  $F = 1$  ресурс эксплуатируемой конструкции исчерпан.

Остаточный ресурс  $R$  связан с  $F$  соотношением  $R = 1 - F$

Если проведенные в ходе обследования змеевиков исследования подтверждают отсутствие поврежденности металла устанавливают только небольшие структурные изменения, то это может служить основанием для вывода о

возможности использования данной зависимости при оценке степени исчерпания ресурса змеевиков.

Для проектного ресурса:

$$t_R = m \cdot \sigma_R^{-n}$$

$t_R$  – проектный ресурс;  $\sigma_R$  – длительная прочность металла, обеспечивающая эксплуатацию в течении  $t_R$ ;

Отсюда соотношение:

$$t_p = t_R \left( \frac{\sigma_R}{\sigma_p} \right)^n$$

Таким образом, доля исчерпанного ресурса определится по формуле:

$$F(t) = \int_0^t \left( \frac{\sigma_p(t)}{\sigma_R} \right)^n \frac{dt}{t_R}$$

Так как во время эксплуатации непрерывно протекает процесс коррозионного и эрозионного повреждения элементов змеевиков, то их толщины непрерывно уменьшаются и потому фактические напряжения в конструкции увеличиваются со временем:

$$\sigma_p(t) = \frac{P}{2} \left( \frac{D}{S_\phi(t)} - 1 \right)$$

В общем случае фактическая толщина стенки элементов змеевика может быть определена по формуле:

$$S_\phi(t) = S - C_K t$$

где  $C_K$  – скорость коррозионного и эрозионного износа, может быть определена из замеров толщин стенок элементов, например, по методике [4]; обычно в качестве расчетного значения  $C_K$  принимается наибольшее значение, определенное для всех конструкционных элементов змеевика по формуле с округлением в большую сторону:

$$C_K = \frac{S - S_\phi}{\Gamma_o - \Gamma}$$

$S$  – первоначальная (исполнительная) толщина стенки;  $S_\phi$  – минимальная фактическая толщина стенки элемента;  $\Gamma$  – год начала эксплуатации;  $\Gamma_o$  – год обследования.

Как правило, принимается

$$S_\phi = S_\phi^*,$$

где  $S_\phi^*$  – минимальная фактическая замеренная толщина стенки элемента.

Но, в общем случае, для определения  $C_K$  необходимо учитывать все виды износа, например, кроме коррозионного и эрозионного изно-

са учитывать образование дефектного слоя металла, например, вследствие обезуглероживания металла. В этом случае, учитываемую в расчете фактическую толщину ( $S_\phi$ ) необходимо уменьшить на толщину дефектного слоя (который замеряется приборами контроля толщины стенок, но вследствие обезуглероживания потерял прочность):

$$S_\phi = S_\phi^* - S_{\text{деф}}$$

В качестве первого приближения можно принять:

$$\sigma_p(t) = \sigma_R \left( \frac{S_p}{S_\phi(t)} \right) \quad F(t) = \int_0^{t_0} \left( \frac{S_p}{S - C_K t} \right)^n \frac{dt}{t_R}$$

$$F(t) = \left( \frac{S_p^n}{t_R} \right) \int_0^{t_0} \left( \frac{1}{S - C_K t} \right)^n dt$$

Окончательно

$$F(t) = \left( \frac{S_p^n}{(n-1)C_K t_R} \right) \left[ \left( \frac{1}{S - C_K t} \right)^{n-1} - \left( \frac{1}{S} \right)^{n-1} \right]$$

Данная формула позволяет по заданным исходным значениям исполнительной толщины стенок элементов  $S$ , проектного срока службы  $t_R$ , параметра материала  $n$ , расчетной толщины стенки  $S_p$  (определенной по [1]), а также фактической скорости коррозии  $C_K$  (определенной по результатам замеров по принятой методике [4]) позволяет оценить фактический износ конструкций змеевика.

Рассмотрим примеры расчетов.

*Пример № 1*

Змеевик камеры радиации, печь пиролиза установки ЭП-300.

Дата начала эксплуатации – 1984 г., дата обследования – 2010 г.

Проектный срок эксплуатации – 12 лет (100 тыс. часов)

Фактический срок эксплуатации  $t_\phi = 26$  лет.

Трубы змеевика:  $\varnothing 125 \times 9,5$  Материал – 45X25H20C,

Параметр для данной стали:  $n = 5$  (согласно данных [1, 2]);

Давление рабочее,  $P = 0,7$  МПа

Температура рабочая/расчетная,  $T = 855/905$  °C,  $[\sigma]^{905} = 10,5$  МПа [1].

$$S_p = \frac{0,7 \cdot 125}{2 \cdot 10,5 + 0,7} = 4,1 \text{ мм}$$

По результатам замеров толщин стенок змеевика фактическая минимальная замеренная толщина стенок труб составила:

$$S_\phi^* = 8,8 \text{ мм.}$$

Согласно выполненным исследованиям структуры металла труб с внутренней и наружной стороны металла труб имеется в наличии дефектный (обезуглерожженный) слой суммарной толщины  $S_{\text{деф}}$  до 1,5 мм.

Назначаемый срок дальнейшей эксплуатации – 4 года.

*Результаты расчета:*

Расчет ведется для двух интервалов времени, для фактически проработанного срока эксплуатации (26 лет) и для назначаемого срока безопасной эксплуатации (4 года и больше)

*Для фактически проработанного срока эксплуатации:*

В качестве исходной толщины стенки труб принимается исполнительная толщина стенки труб  $S$ , а в качестве расчетной скорости коррозии принимается фактическая скорость коррозии, определенная по замерам, согласно принятой методике верхняя максимальная оценка скорости коррозии. Так как имеется в наличии дефектный слой металла, то толщина его должна быть исключена из расчета на прочность и потому фактическая толщина металла принимается меньшей на величину  $S_{\text{деф}}$ :

$$S_\phi = S_\phi^* - S_{\text{деф}} = 8,8 - 1,5 = 7,3 \text{ мм}$$

Фактическая скорость износа (верхняя максимальная оценка)

$$C_K = (9,5 - 7,3) / 26 = 0,085 \text{ мм/год}$$

Основная расчетная формула:

$$F(t) = \left( \frac{S_p^n}{(n-1)C_K t_R} \right) \left[ \left( \frac{1}{S - C_K t} \right)^{n-1} - \left( \frac{1}{S} \right)^{n-1} \right]$$

Результаты расчета  $F(t)$  представлены в виде кривой  $I$  (см. рис. 1).

Доля исчерпанного ресурса (износ) на момент окончания проектного срока по критерию длительной прочности –  $F(12) = 0,032$ .

На момент обследования –  $F(26) = 0,11$ .

*Для прогнозируемого срока безопасной эксплуатации:*

В качестве исходной толщины стенки труб принимается фактическая толщина стенки труб  $S_\phi$ , а в качестве расчетной скорости коррозии принимается фактическая скорость коррозии, определенная по замерам, согласно принятой методике ее верхняя максимальная оценка скорости коррозии, дополнительно округленная в большую сторону до значения 0,1 мм/год,  $S_\phi = 7,3$  мм.

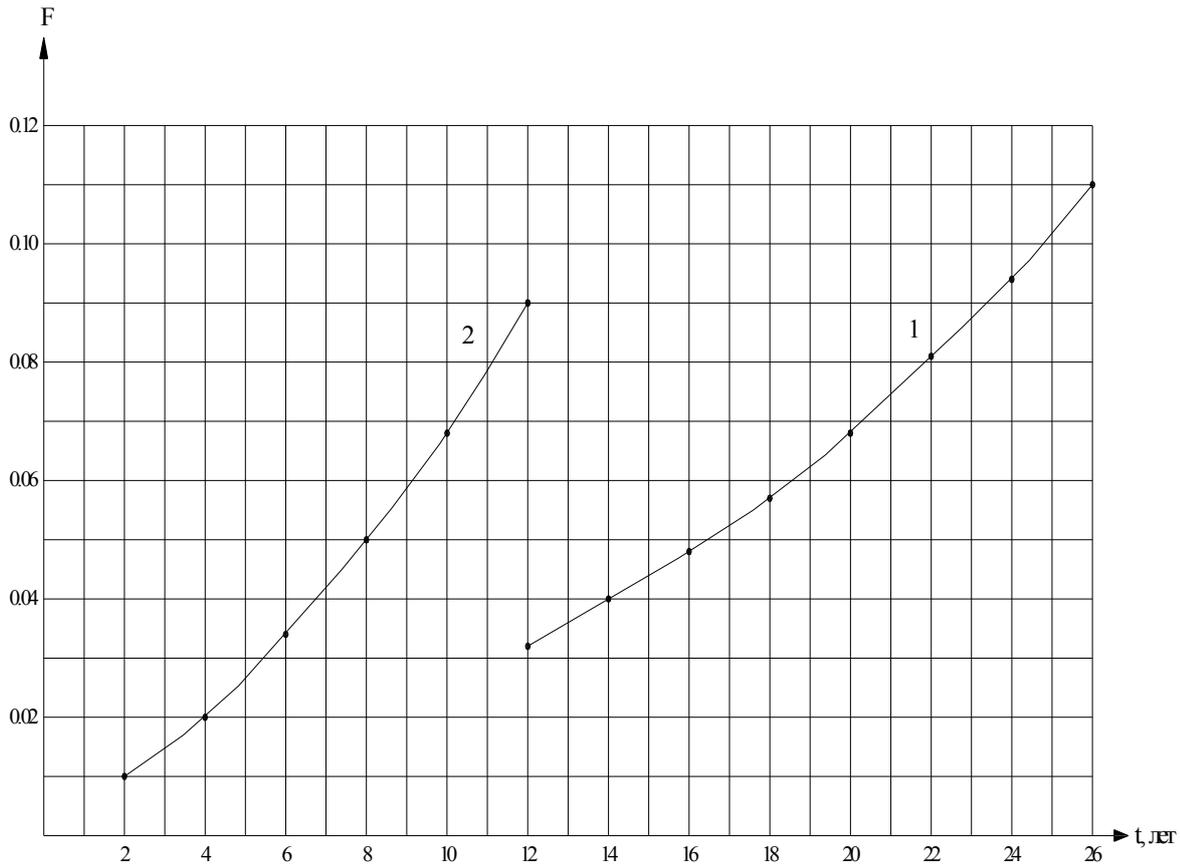


Рис. 1. Результаты расчета доли исчерпанного ресурса

Так как фактическая скорость износа  $C_k = 0,085 < 0,1$ , то принимаем:

$$C_k = 0,1 \text{ мм/год}$$

Основная расчетная формула принимает вид:

$$F'(t) = \left( \frac{S_p^n}{(n-1)C_k t_R} \right) \left[ \left( \frac{1}{S_\phi - C_k t} \right)^{n-1} - \left( \frac{1}{S_\phi} \right)^{n-1} \right]$$

Результаты расчета  $F(t)$  представлены в виде кривой 2 (рис. 1).

Окончательно доля исчерпанного ресурса должна определяться с учетом фактически отработанного срока эксплуатации, то есть

$$F(t) = F(t_\phi) + F'(t)$$

Доля исчерпанного ресурса (износ) по критерию длительной прочности на момент окончания назначенного срока безопасной эксплуатации –  $F(4) = 0,02$ , а с учетом доли, исчерпанной на момент обследования:

$$F(30) = F(26) + F'(4) = 0,11 + 0,02 = 0,13$$

*Пример № 2*

Змеевик камеры радиации, печь нагрева сырья, установка каталитического риформинга.

Дата начала эксплуатации – 1984 г., дата обследования – 2007 г.

Проектный срок эксплуатации – 12 лет (100 тыс. часов).

Фактический срок эксплуатации – 145 тыс. часов (18 лет).

Трубы змеевика:  $\varnothing 108 \times 9$ , материал – 1Х2М1,  $N = 7$  [1, 2].

Давление рабочее  $P = 5,0$  МПа.

Температура рабочая/расчетная,  $T = 530/580$  °С,  $[\sigma]^{580} = 50$  МПа [1].

$$S_p = \frac{5.0 \cdot 108}{2 \cdot 50 + 5.0} = 5.2 \text{ мм}$$

По результатам замеров толщин стенок змеевика фактическая минимальная замеренная толщина стенок труб составила  $S_\phi^* = 7,5$  мм.

Исследования структуры металла не выявили ее существенных изменений и наличия дефектного слоя металла.

Назначаемый срок дальнейшей эксплуатации – 4 года.

*Результаты расчета:*

Расчет ведется для двух интервалов времени, для фактически проработанного срока экс-

платации (18 лет) и для назначаемого срока безопасной эксплуатации (4 года и больше).

*Для фактически проработанного срока эксплуатации:*

В качестве исходной толщины стенки труб принимается исполнительная толщина стенки труб  $S$ , а в качестве расчетной скорости коррозии принимается фактическая скорость коррозии, определенная по замерам, согласно принятой методике верхняя максимальная оценка скорости коррозии.

Фактическая скорость износа (верхняя максимальная оценка)

$$C_k = (9,0 - 7,5) / 18 = 0,083 \text{ мм/год}$$

Основная расчетная формула:

$$F(t) = \left( \frac{S_p^n}{(n-1)C_k t_R} \right) \left[ \left( \frac{1}{S - C_k t} \right)^{n-1} - \left( \frac{1}{S} \right)^{n-1} \right].$$

Доля исчерпанного ресурса (износ) на момент окончания проектного срока по критерию длительной прочности –  $F(12) = 0,033$ ;

На момент обследования –  $F(18) = 0,064$ ;

*Для прогнозируемого срока безопасной эксплуатации:*

В качестве исходной толщины стенки труб принимается фактическая толщина стенки труб  $S_\phi$ , а в качестве расчетной скорости коррозии принимается фактическая скорость коррозии, определенная по замерам, согласно принятой методике ее верхняя максимальная оценка скорости коррозии, дополнительно округленная в большую сторону до значения 0,1 мм/год.

$$S_\phi = S_\phi^* = 7,5 \text{ мм}$$

Так как фактическая скорость износа  $C_k = 0,083 < 0,1$ , то принимаем:

$$C_k = 0,1 \text{ мм/год}$$

Основная расчетная формула принимает вид

$$F'(t) = \left( \frac{S_p^n}{(n-1)C_k t_R} \right) \left[ \left( \frac{1}{S_\phi - C_k t} \right)^{n-1} - \left( \frac{1}{S_\phi} \right)^{n-1} \right].$$

Окончательно доля исчерпанного ресурса должна определяться с учетом фактически от-

работанного срока эксплуатации, то есть

$$F(t) = F(t_\phi) + F'(t)$$

Доля исчерпанного ресурса (износ) по критерию длительной прочности на момент окончания назначенного срока безопасной эксплуатации –  $F'(4) = 0,031$ , а с учетом доли, исчерпанной на момент обследования:

$$F(22) = F(18) + F'(4) = 0,064 + 0,031 = 0,095$$

Таким образом, можно сделать вывод, что проводить исследования длительной прочности металла в приведенных примерах на момент обследования нет необходимости, т. к. на момент окончания назначенного нового срока эксплуатации змеевики сохраняют остаточный ресурс работоспособности.

Обращает также внимание, что в примерах износ по критерию длительной прочности незначителен, что связано с принятым значительным запасом по толщине стенки змеевиков.

Расчет на прочность длительно эксплуатирующихся змеевиков необходимо выполнять с учетом результатов обследования, замеров фактических толщин стенок и скорости износа, что позволит определить уровень фактических напряжений, при которых эксплуатируются элементы змеевика и оценить фактический уровень износа элементов змеевика и необходимость проведения исследований на длительную прочность их металла. При этом в обязательном порядке должны проводиться исследования структуры и физико-механических свойств металла, подтверждающих отсутствие поврежденности металла за срок предыдущей эксплуатации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РТМ 26-02-67-84. Методика расчета на прочность элементов печей, работающих под давлением.
2. API Standard 530. «Calculation of heater tube thickness in petroleum refineries».
3. Антикайн, П. А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов / П. А. Антикайн. – М.: Энергия, 1980.
4. Инструкция по определению скорости коррозии металла стенок корпусов сосудов и трубопроводов. – Волгоград, 1983.

УДК 665.6:6602

*Ю. А. Бадьин, В. Ф. Решетов, В. М. Ящук***МЕТОД СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕПЛООБМЕНА  
НА УСТАНОВКАХ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ****Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт  
нефтехимического оборудования, Волгоград**

Описывается метод оптимального проектирования систем теплообмена на примере блоков теплообмена установок первичной переработки нефти, состоящих из стандартных кожухотрубчатых теплообменников.

*Ключевые слова:* системы теплообмена, структура теплообменной системы, стандартные теплообменники.

*Yu. A. Badin, V. F. Reshetov, V. M. Yashchuk***METHOD TO DESIGNING EFFECTIVE HEAT EXCHANGER NETWORKS  
OF CRUDE DISTILLATION UNITS****All-Russian Scientific, Researching and Construction Institute of Equipment  
for Oil Refining and Petrochemical Industry, Volgograd**

The work addresses a method to designing effective heat exchanger network (HEN) of Crude Distillation Units. The method is tailored for optimization HEN consisting of standard heat exchanger.

*Keywords:* heat exchanger networks, network structure, standard heat exchanger.

Рациональным путем снижения потерь в теплообменных системах подогрева сырья на установках первичной переработки нефти является совершенствование схем теплообмена между нагреваемыми и охлаждаемыми потоками.

Задача оптимизации схемы теплообмена может быть сформулирована следующим образом: дана система установленной структуры, известно общее количество и типоразмеры теплообменных аппаратов, первоначальные температуры, расходы и теплофизические свойства технологических потоков известны, определены конечные температуры технологических потоков (минимальные для «горячих» потоков, отводимых с установки), необходимо за счет изменения структуры системы увеличить степень рекуперации тепла, в практическом смысле – увеличить температуру нагрева «холодного» потока, то есть нефти.

Задача синтеза в силу большой размерности (большого количества потоков и типоразмеров теплообменного оборудования), нелинейного характера зависимостей теплофизических свойств потоков и коэффициентов теплообмена, наличия сложной структуры системы (разветвленная структура с обратными рециклами потоков) не может быть решена аналитическими методами. Потому возникает задача разработки метода синтеза, позволяющего получать схемы с высокой эффективностью.

В литературе имеется достаточно большое количество методов синтеза оптимальных теплообменных схем [1–5].

Задача оптимизации блоков теплообмена установок первичной переработки нефти имеет особенности, которые облегчают ее решение:

– наличие единственного «холодного» потока (нефти); различие теплофизических свойств необессоленной и обессоленной нефти может быть соответствующим образом учтено в программной реализации метода и не должно требовать введения дополнительного «холодного» потока;

– конечные температуры «горячих» потоков, как правило, достигаются использованием холодильного оборудования и потому можно сосредоточиться исключительно на задаче повышения конечной температуры нефти;

– рассматривается задача оптимизации существующего теплообменного блока, то есть типоразмеры используемого теплообменного оборудования уже определены.

Дополнительно можно указать, что необходимым правилом при синтезе схемы теплообменной системы должно быть принято построение 2-х поточной (в некоторых случаях при больших объемах прокачиваемой нефти 3-х поточной) по нефти системы. Расщепление же других потоков системы в большинстве случаев не оправдывает себя; в силу их значительно меньших объемов в сравнении с нефтью, а также можно указать на общую структурную особенность отечественных установок первичной переработки нефти, характеризующихся невысокими значениями объемов промежуточных орошений основных колонн.

В настоящей работе делается попытка разработки и практического использования метода оптимизации схем теплообмена с большим числом потоков и теплообменных аппаратов. Рассмотрим разработку эффективной схемы теплообмена на установке первичной переработки нефти.

Схема установки с потоками, относящимися к теплообменной системе, приведена на рис. 1, а параметры технологических потоков представлены в табл. 1.

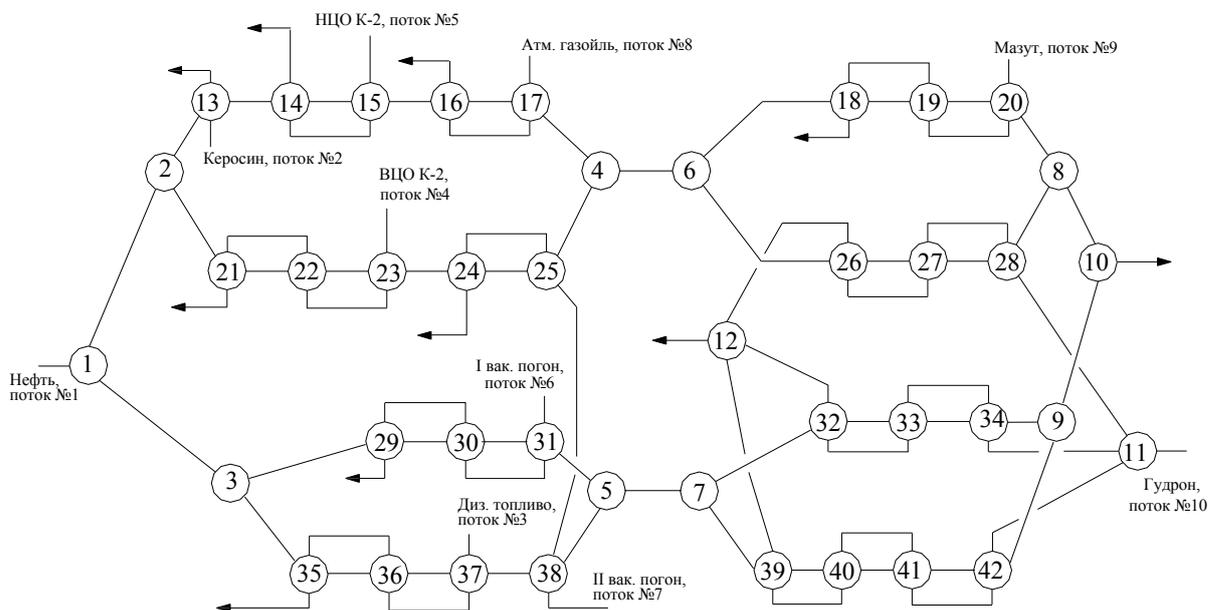


Рис. 1. Схема существующего блока теплообмена:

1, 2, 3, 6, 7, 11 – делители потоков; 4, 5, 8, 9, 10, 12 – смесители потоков; 13–42 – теплообменники

Таблица 1

Параметры технологических потоков

Наименование теплоносителей	Расход, т/час	Температура, °С		
		Вход в систему	Выход из системы*	Выход с установки (теплоносители) и вход в колонны (ЦО)
«Холодные» потоки				
Нефть	390	40	196,5	–
«Горячие» потоки				
Керосин	45	147	107,6	60
Дизельное топливо	104	250	143,9	70
Верхнее циркуляционное орошение К-2	143	196	131,2	60
Нижнее циркуляционное орошение К-2	177	250	200,6	75
1-й вакуумный погон К-6	71	214	104,9	100
2-й вакуумный погон К-6	51	290	166,7	130
Атмосферный газойль	20	290	139,5	150
Мазут	50	345	214,1	120
Гудрон	102	345	247,5	120

\* – Выходные температуры приведены по результатам расчета.

Опишем метод построения внутренней подсистемы с заданным числом потоков, на которые расщепляются исходные потоки (как «холодного потока» (нефти), так и «горячих» потоков).

Построение схемы теплообмена происходит последовательно, начиная с «горячего» конца,

то есть с принятой температуры нефти на выходе из системы (которая в дальнейшем корректируется по результатам общего расчета всей системы). На каждом шаге синтеза производится выбор пары взаимодействующих потоков, типоразмера аппарата, а также выбор величины термических сопротивлений (или их

расчет, исходя из принятой модели их образования). Для отсеечения нерациональных вариантов вводится понятие минимально допустимой разницы температур потоков (например, 10 °С). Так как процесс теплообмена в очень значительной степени зависит от степени загрязнений стенок труб теплообменных аппаратов, то здесь возникает задача верного назначения величин этих термических сопротивлений загрязнений. В качестве первого приближения могут быть приняты значения, рекомендуемые согласно справочным документам в зависимости от вида теплоносителей.

Так как процесс расчета теплообменного аппарата производится в обратную сторону, с «горячего» конца, то результатом его являются величины входных температур «горячего» и «холодного» потоков. Сам процесс расчета требует организации циклического численного решения. Выбор конкретной пары потоков для теплообмена с конкретного теплообменника при построении общей схемы теплообмена должен производиться на основе принятого критерия. В качестве такого критерия может быть использовано правило, что выбираются такая пара потоков и конкретный теплообменник, для которых количество передаваемого тепла (плотность теплового потока) является максимальным и соответственно входные тем-

пературы потоков для теплообмена являются минимальными. Если для «горячего» потока достигается требуемая минимальная выходная температура, то данный поток исключается из дальнейшего рассмотрения. Для «холодного» потока (или нескольких потоков нефти) процесс расчета считается законченным, если будет достигнута температура менее и равная входной температуре на входе в теплообменную систему. Процедура повторяется снова, пока не будут исчерпаны заданные в качестве исходного количества теплообменные аппараты или же будут достигнуты минимальные температуры «холодных» потоков. Если же при заданной выходной температуре нефти процесс расчета не может быть завершен, т. е. если температура нефти задана слишком высокой и достичь ее при заданном количестве теплообменных аппаратов и заданной входной температуре нефти не представляется возможным, то становится необходимым коррекция расчетной выходной температуры нефти в сторону снижения. Процесс также требует организации циклического численного расчета. Результатом является получение значения выходной температуры нефти и структуры теплообменной системы, обеспечивающей ее достижение с обратного хода.

Существует возможность общего повышения эффективности рекуперации тепла за счет

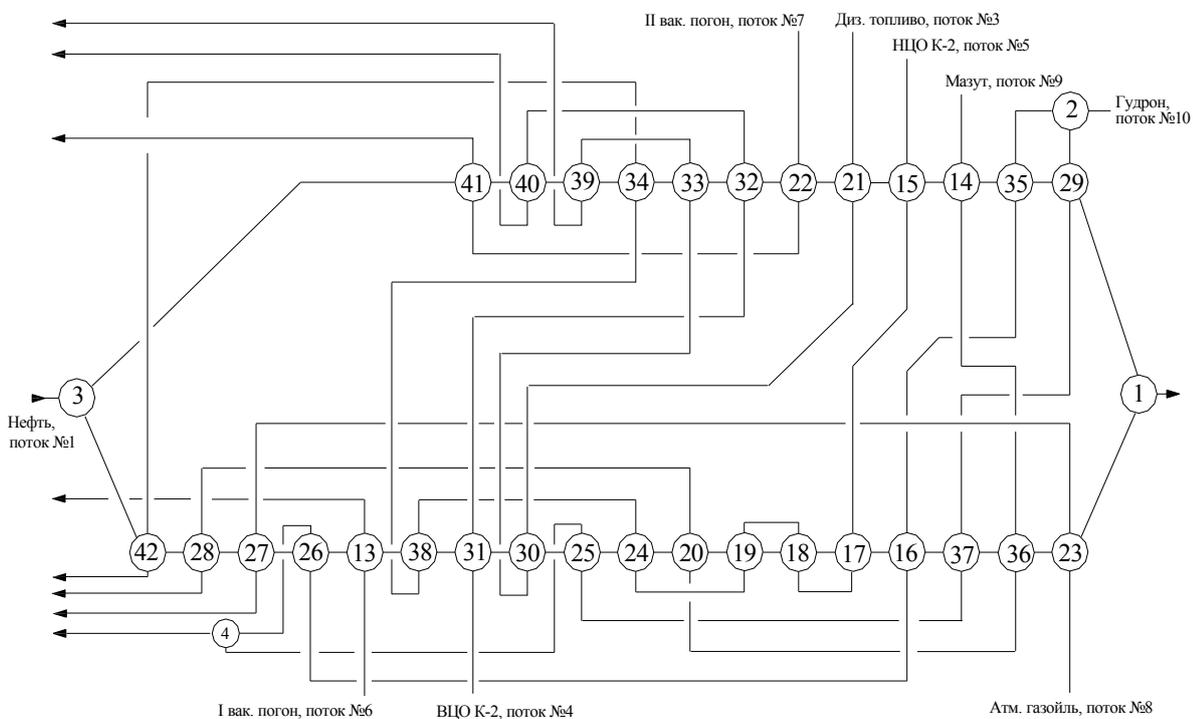


Рис. 2. Оптимизированная схема блока теплообмена:  
2,3 – делители потоков; 1, 4 – смесители потоков, 13–42 – теплообменники

отказа от синтеза систем с равномерным распределением температур по потокам. Наоборот, ставится задача такой организации структуры системы, где разные ветви «холодных» потоков будут воспринимать разную тепловую нагрузку, то есть будет организован более горячий «холодный» поток и более холодный «холодный» поток. В общем случае за счет такой организации системы ее эффективность работы повысится за счет более выгодного выбора потоков для теплообмена (в данном случае фактически опять используется эвристическое правило о большей эффективности теплообмена потоков с более высокими входными температурами). В практическом смысле это означает,

что организуется процесс расчета с «холодной» стороны. Производится установка дополнительных теплообменников и перенос теплообменников с более холодного потока нефти на более горячий поток нефти. Процесс продолжается до тех пор, пока достигается общее повышение выходной температуры потоков нефти после смешения.

Результатом расчета является схема соединения потоков, обеспечивающая повышение температуры потока нефти на выходе в сравнении с исходной схемой и с более равномерным распределением теплообменников по потокам нефти, (рис. 3 (12 и 18 теплообменных аппаратов)).

Таблица 2

Результаты расчета теплообменной системы

Наименование теплоносителей	Расход, т/ч	Температура, °С		
		Вход в систему	Выход из системы*	
			До реконструкции	После реконструкции
«Холодные» потоки				
Нефть	390	40	196,5	219,7
«Горячие» потоки				
Керосин	45	147	107,6	–
Дизельное топливо	104	250	143,9	152,9
Верхнее циркуляционное орошение К-2	143	196	131,2	147,2
Нижнее циркуляционное орошение К-2	177	250	200,6	149,1
1-е циркуляцион. орошение К-6	71	214	104,9	192,9
2-е циркуляцион. орошение К-6	51	290	166,7	163,1
Атмосферный газойль	20	290	139,5	139,7
Мазут	50	345	214,1	166,0
Гудрон	102	345	247,5	273,7

\* – Выходные температуры приведены по результатам расчета.

Как показывают результаты расчета (табл. 2), выходная температура нефти на выходе составит 219,7 °С в сравнении с 196,5 °С исходной системы. Можно отметить низкую эффективность использования потока керосина (вследствие, прежде всего, его небольшого расхода), потому он исключен из построения системы и его охлаждение должно производиться только в холодильниках. Как видно, эффект получен в основном за счет использования потока нижнего циркуляционного орошения основной колонны К-2 (потока с наибольшим расходом) и потока мазута, а также рациональной установки теплообменников большего типоразмера в конце по ходу потока нефти. Переобвязка системы с 4-х поточной структуры по нефти на 2-х поточную улучшила общую эффективность рабо-

ты теплообменников за счет повышения скорости движения теплоносителей. Последнее также уменьшит образование отложений, что улучшит процесс теплообмена.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кэйс, В. М. Компактные теплообменники / В. М. Кэйс, А. Л. Лондон. – М.: Энергия, 1967. – 224 с.
2. Методы и средства автоматизированного расчета химико-технологических систем / Н. В. Кузичкин, С. Н. Саутин, А. Е. Пунин. – Л.: Химия, 1987.
3. Современные методы оптимального проектирования систем теплообмена. – М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1986.
4. Бажан, П. И. Справочник по теплообменным аппаратам / П. И. Бажан, Г. Е. Каневец, В. М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 367 с.
5. Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т. 1 / Пер. с англ., под ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

УДК(532.135.533.17): 532.5

*О. А. Залипаева, А. С. Трусов, Ю. В. Аристова*

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОБОБЩЕННЫХ КООРДИНАТ  
К ЗАДАЧЕ О РАСТЕКании ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

**Волгоградский государственный технический университет**

Обосновывается метод обобщенных координат при решении задачи о растекании вязкой жидкости и сопоставляется полученное решение с аналогичными выражениями.

*Ключевые слова:* жидкость, растекание, обобщенные координаты, радиус.

*O. A. Zalipaeva, A. C. Trusov, J. V. Aristova*

**APPLICATION OF THE METHOD OF THE GENERALIZED COORDINATES TO THE PROBLEM  
ABOUT FLOWING PROPERTY THE VISCOUS LIQUID**

**Volgograd State Technical University**

The method of the generalized coordinates is proved at the problem decision about растекании a viscous liquid and the received decision is compared with similar expressions.

*Keywords:* a liquid, растекание, the generalized coordinates, radius.

Данная задача решается на основании уравнений Лагранжа [1–4], в которых строятся функции потенциальной и кинетической энергии **E** и диссипативной функции **D**. Эти функции связаны системой уравнений:

$$\frac{\partial E}{\partial q} = \frac{\partial D}{\partial q'}$$

где  $q$  – обобщенные координаты;  $q' = \frac{dq}{dt}$  – обобщенные скорости, черточкой обозначена производная по времени.

Эта система уравнений в гидромеханике подтверждает то обстоятельство, что движущая сила – потенциальная энергия – расходуется на трение и диссипирует.

Решение задачи о растекании осесимметричной жидкости проводится в цилиндрической системе координат, в предположении, что свободная поверхность удовлетворительно описывается уравнением:

$$h = a(R^2 - r^2)^n \quad (1)$$

где  $h$ ,  $r$  – высота и текущий радиус свободной поверхности;  $R$  – максимальный радиус поверхности;  $a$ ,  $n$  – параметры.

В решении предполагается, что показатель степени  $n$  мало изменяется во времени, а параметры  $r$ , а являются обобщенными координатами и изменяются во времени. На основании уравнения (1) строится уравнение связи.

$$V = 2\pi \int_0^R hrdr = \frac{\pi}{1+n} aR^{2(1+n)} \quad (2)$$

Последнее уравнение служит уравнением связи, из которого при постоянном объеме можно найти:

$$a = \frac{(1+n)V}{\pi R^{2(1+n)}} \quad (3)$$

Течение происходит под действием избытка потенциальной энергии жидкости относительно горизонтальной поверхности, которая служит нулевым отсчетом потенциальной энергии. Тогда, потенциальная энергия равна:

$$E = \pi g \rho \int_0^R h^2 r dr = \frac{(1+n)^2 g \rho V^2}{2\pi(1+2n)R^2} \quad (4)$$

С учетом того, что растекание жидкости происходит в объеме небольшой высоты с малыми скоростями [5, 6] и практический интерес представляет исследование растекания высоковязких жидкостей, изменением кинетической энергии при использовании уравнений Лагранжа можно пренебречь, кроме того при постановке задачи не учитывается затраты энергии на преодоление сил поверхностного натяжения. Для сопоставления решений полученных из классических уравнений движения и методом Био целесообразно исключить влияние сил поверхностного натяжения жидкости. В действительности влияние сил поверхностного натяжения на растекание жидкости обнаруживается только на периферии зоны течения при растекании жидкости на твердую поверхность. В этом случае существенное влияние оказывает и смачиваемость жидкости и поверхности. В данной постановке предполагается, что смачивание жидкости и поверхности идеально и не оказывает влияние на растекание по поверхности. Таким образом, полная энергия жидкости описывается уравнением (4).

Для определения величины интенсивности скоростей деформации необходимо задать поле

скоростей и удовлетворить граничным условиям прилипания на твердой стенке и отсутствия касательных напряжений на свободной поверхности и уравнению неразрывности.

Как отмечалось выше, при интегральном методе решения, к которым относится и рассматриваемый метод Био, точность решения мало чувствительна к заданию функции описывающей изменение поля скоростей в пространстве. Для компоненты скорости  $v_r$  вводится следующая зависимость, описывающая изменение этой компоненты в пространстве:

$$v_r = \frac{\dot{R}}{R} r \left( \frac{2z}{h} - \left( \frac{z}{h} \right)^2 \right) = \frac{\dot{R}}{R} r \frac{z}{h} \left( 2 - \frac{z}{h} \right) \quad (5)$$

и компоненты  $v_z$  с учетом сохранения уравнения неразрывности на свободной поверхности жидкости описывается выражением:

$$v_z = a(R^2 - r^2)^n \left( \frac{\dot{a}}{a} + 2n \frac{\dot{R}}{R} \right) \frac{z}{h} \left( 1 + \frac{1}{3} \frac{z^2}{h^2} \right). \quad (6)$$

Необходимо отметить, что заданные функции удовлетворяют граничным условиям прилипания к поверхности и условию осевой симметрии. Уравнение течения приближенно и только для свободных поверхностей, при  $z = h$  удовлетворяется полностью.

В реологических исследованиях [7–9] вводится понятие среднего градиента скорости, равного интенсивности скоростей деформации, который определяется как отношение максимальной скорости к гидравлическому радиусу, в соответствии с отношением:

$$r_r = \frac{V}{F},$$

где  $F$  – твердая поверхность, смоченная жидкостью.

С учетом сделанного предположения, для течения по наклонной поверхности диссипативная функция принимает вид

$$D = \mu v^2 \frac{F^2}{V} \quad (7)$$

Для рассматриваемой задачи скорость на поверхности изменяется и, если выражение интенсивности скоростей деформации подставить в выражение компонент скоростей, то диссипативная функция примет вид

$$D = \mu v^2 \frac{\pi^2 R^4}{V} \quad (8)$$

где  $\mu$  – вязкость среды;  $v$  – модуль скорости на свободной поверхности, которая определяется как средняя интегральная величина следующим образом: радиальная составляющая скорости на

свободной поверхности изменяется в соответствии с выражением:

$$v_{r \max} = \frac{\dot{R}}{R} r \quad (9)$$

Радиальная скорость на свободной поверхности задается из условия, что на оси она равна 0, а на максимальном радиусе – наибольшая и равна  $\dot{R}$ , а азимутальная составляющая скорость максимальна на оси и равна 0 на максимальном радиусе  $\frac{dh_{\max}}{dt}$ :

$$v_z = \left( \frac{\dot{a}}{a} + 2n \frac{\dot{R}}{R} \right) a (R^2 - r^2)^n \quad (10)$$

Тогда средние интегральные величины для компонент и модуля скорости определяются выражением:

$$v_{r \text{cp}} = \frac{2}{3} \dot{R}$$

$$v_{z \text{cp}} = \frac{1}{1+n} \left( \frac{\dot{a}}{a} + 2n \frac{\dot{R}}{R} \right) a R^{2n}$$

$$v^2 = v_{r \text{cp}}^2 + v_{z \text{cp}}^2 = 4 \left( \frac{1}{9} + \frac{1}{\pi^2} \frac{V_0^2}{R^6} \right) \dot{R}^2 \quad (11)$$

Для дальнейшего решения необходимо задать изменение радиальной и осевой скоростей по радиусу осевой координаты и провести интегрирование в соответствии с уравнением (8), которое с учетом уравнения (11) приводит к выражению

$$D = 4\mu \left( \frac{1}{9} + \frac{V^2}{\pi^2 R^6} \right) \frac{\pi^2 R^4}{V} (R')^2 \quad (12)$$

Составляется уравнение, описывающее изменение максимального радиуса растекающейся жидкости:

$$R' = \frac{9(1+n)^2 g \rho V^3}{8(1+2n)\mu R(9V^2 + \pi^2 R^6)} \quad (13)$$

из которого определяется зависимость радиуса растекающейся жидкости во времени при начальном условии  $R(t=0) = R_0$ :

$$R^8 - R_0^8 + \frac{36}{\pi^2} V^2 (R^2 - R_0^2) = \frac{9(1+n)^2 g \rho}{\pi(1+2n)\mu} V^3 t \quad (14)$$

Последнее уравнение отличается от полученных ранее, так как учитывает влияние осевого течения на деформацию жидкости. Сопоставление выражения (14) с аналогичными решениями [10, 11] показывает их полную аналогию и подтверждает возможность применения метода обобщенных координат для определения изменения экстремальных размеров растекающейся жидкости.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курс теоретической механики: учебник для вузов по направлению подгот. дипломир. специалистов в области техники и технологии / В. И. Дронг, В. В. Дубинин, М. М. Ильин [и др.]; под ред. К. С. Колесникова. – 3-е изд., стер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана – (Механика в техническом университете: В 8 т. Т. 1). 2009. – 735 с.
2. Павловский, М. А. Теоретическая механика. Динамика: учеб. для вузов / М. А. Павловский, Л. Ю. Акинфиева, О. Ф. Бойчук; под общ. ред. М. А. Павловского. – Киев: Выща шк., 2007. – 479 с.
3. Теоретическая механика: сб. научно-метод. ст. / М-во образования РФ. Научно-метод. совет по теорет. механике. Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, ин-т механики; под ред. Ю. Г. Мартыненко. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – Вып. 25. – 213 с.
4. Цивильский, В. Л. Теоретическая механика: учебник для вузов / В. Л. Цивильский. – М.: Высшая школа, 2008. – 318 с.
5. Быховский, А. И. Растекание / А. И. Быховский. – Киев: Наукова Думка, 1983. – 192 с.
6. Шапиро, Г. И. О растекании вязкой жидкости по горизонтальной поверхности / Г. И. Шапиро // ПМТФ. 1983. – № 3. – С. 45–48.

7. Трусов, А. С. Определение деформации дисперсных частиц при движении / А. С. Трусов, О. А. Залипаева, М. Ю. Ефремов // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. научн. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2009. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии).
8. Трусов, С. А. Обобщенное уравнение связи группового всплытия пузырей / Трусов, С. А., Г. В. Рябчук, О. А. Залипаева, Т. А. Никитенко // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. научн. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2003. – С. 34–36. (Сер. Химия и химическая технология. Вып. 4).
9. Трусов, С. А. Численное моделирование уравнений математической физики, связанных с химическими реакциями и массопереносом / С. А. Трусов, В. М. Волчков, В. Н. Стяжин, Т. А. Никитенко // Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии: Сб. науч. тр. / ВолГТУ. – Волгоград, 2002. – Вып. 6. – С. 185–189.
10. Трусов, А. С. Растекание осесимметричного объема массы под действием силы тяжести / А. С. Трусов, С. А. Трусов, Г. В. Рябчук // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. научн. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 1997. – С. 28–33. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии).
11. Трусов, А. С. Двухслойное течение высоковязкой жидкости под действием силы тяжести / А. С. Трусов, С. А. Трусов, Г. В. Рябчук, В. И. Лапицкий // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. научн. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 1997. – С. 145–147. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии).

УДК 66.02.09

*О. А. Тишин, М. Ю. Тимошин***ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ  
В ПРОЦЕССЕ СИНТЕЗА МЕТИЛМЕРКАПТАНА****Волгоградский государственный технический университет**

Настоящая работа была посвящена оценке эффективности энергопотребления в процессе синтеза метилмеркаптана. Авторами в ходе энергетического анализа показано, что более рациональное использование тепла химической реакции позволяет снизить подвод тепла к технологической схеме на 15 % и уменьшить количество аппаратов в схеме.

*Ключевые слова:* энергопотребление, эффективность использования энергоресурсов, энергетический метод.

*O. A. Tishin, M. J. Timoshin***ESTIMATE OF ENERGY EFFICIENCY OF INDUSTRIAL OF METHYLMERCAPTAN SYNTHESIS****Volgograd state technical university**

In this article are brought results of the energy examination of the industrial of methylmercaptan synthesis in a part of heat providing. It is shown heat balance in synthesis process, noted remarks on operation system of heat providing. The advisable actions are brought on reduction heats at usages of the system.

*Keywords:* energy efficiency, energy economy, heat supply, heating, heat balance, heat loss.

Вопросам экономии энергетических ресурсов уделяется в настоящее время значительное внимание. Более рациональная организация технологического процесса позволяет решить такую проблему. Рассмотрим решение данной задачи на примере синтеза метилмеркаптана. Один из вариантов синтеза [1] предполагает получение продукта в одну стадию с последующим использованием теплоты реакции, за счет регенерации части выделяемой энергии в системе охлаждения продуктов реакции. Рече-

нерированная тепловая энергия используется затем для получения пара, используемого затем в качестве энергоносителя. Однако такой вариант ведения процесса не лишен недостатков. К числу таковых можно отнести невысокую степень производительность по продукту. Количество получаемого пара тоже невелико и его параметры невысоки, что ограничивает его возможности использования в качестве энергоносителя. В настоящее время синтез метилмеркаптана ведут в цепочке последовательных ре-

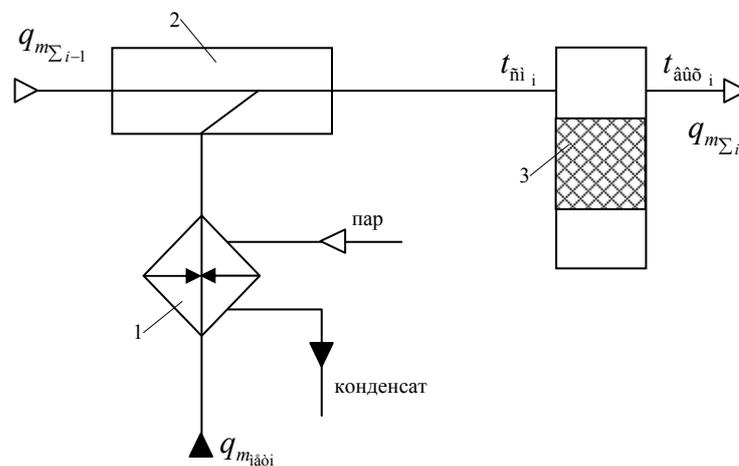
акторов [2]. Весь необходимый для синтеза сероводород подается в первую по ходу процесса секцию. Метанол подается отдельно в каждую секцию двумя потоками. Одна часть метанола непосредственно впрыскивается в поток выходящих газов из предыдущей секции, а вторая часть предварительно нагревается в подогревателе и затем впрыскивается в газовый поток. В каждую секцию подается одинаковое количество метанола. При такой организации технологического процесса теплота реакции используется более полно. Однако и такой вариант оформления процесса не лишен недостатков, что приводит к перерасходу пара используемого для подогрева метанола. Поэтому возникла задача оценки эффективности использования в процессе получения метилмеркаптана. Этой целью осуществлен анализ энергопотребления на установке и предложены рекомендации по снижению расхода пара применяемого в процессе. Анализ энергопотребления осуществлен с применением энергетического метода [3, 4].

Тепловая энергия извне поступает с потоком пара, используемого для подогрева метанола. Необходимо подобрать условия проведения процесса (расход метанола в каждой секции, температуру, до которой надо подогревать

его и температуру смеси подаваемой на синтез в каждой секции). Количество пара сравнивалось с расходными значениями, приведенными в регламенте.

#### Анализ эффективности энергопотребления энергии

Расчетная схема установки представлена на рисунке. Синтез метилмеркаптана осуществляется следующим образом. Для синтеза в качестве сырья используются сероводород (газ) и метиловый спирт (жидкость). Мольное соотношение сероводород – спирт 1,45:1,0. Весь используемый для синтеза водород подается на вход схемы. Перед первой каталитической секцией газ подогревается топочными газами в теплообменнике до температуры 360–370 °С. В смесителе в поток подогретого сероводорода впрыскивается жидкий метанол. Метанол смешивается с сероводородом, испаряется и газовая смесь поступает в первую каталитическую секцию. Температура газового потока на выходе из смесителя должна быть от 330 до 360 °С. В каталитической секции реакции смесь разогревается за счет теплоты реакции и на выходе из секции температура газового потока должна быть в пределах 350–410 °С. Процесс повторяется в каждой ступени каскада.



Расчетная схема установки:

1 – подогреватель метанола, 2 – смеситель, 3 – каталитическая секция

#### Материальный баланс по потокам:

В смеси, уходящей из каждой каталитической секции, содержится:  
сероводорода:

$$q_{m_{H_2S_i}} = q_{m_{H_2S_0}} - \frac{M_{H_2S}}{M_{\text{мет}}} \sum_2^i q_{m_{\text{мет}_i}}; \quad (1)$$

метилмеркаптана:

$$q_{m_{\text{мерк}_i}} = \frac{M_{\text{мерк}}}{M_{\text{мет}}} \sum_1^i q_{m_{\text{мет}_i}}; \quad (2)$$

ВОДЫ:

$$q_{m_{P_2O_{i,i}}} = \frac{M_{H_2O}}{M_{\text{мет}}} \sum_1^i q_{m_{\text{мет}_i}}. \quad (3)$$

Массовый расход среды на выходе из каталитической секции:

$$q_{m_{\Sigma_{\text{ш}}}} = q_{m_{H_2S_0}} - \frac{M_{H_2S}}{M_{\text{мет}}} \sum_2^i q_{m_{\text{мет}_{\text{ш}}}} + \frac{M_{\text{мерк}}}{M_{\text{мет}}} \sum_1^1 q_{m_{\text{мет}_{\text{ш}}}} + \frac{M_{H_2O}}{M_{\text{мет}}} \sum_1^1 q_{m_{\text{мет}_{\text{ш}}}} \quad (4)$$

Энергетический баланс смесителя-испарителя:

$$q_{m_{\text{мет}_i}} \cdot c_{p_{\text{мет}_j}} \cdot (t_{\text{мет}_i} - t_{\text{мет}_0}) + t_{i-1} \cdot (q_{m_{H_2S}} \cdot c_{p_{H_2S}} + q_{m_{\text{мерк}}} \cdot c_{p_{\text{thr}}} + q_{m_{H_2O}} \cdot c_{p_{H_2O}})_{i-1} = t_{\text{см}_i} \cdot (q_{m_{H_2S}} \cdot c_{p_{H_2S}} + q_{m_{\text{мерк}}} \cdot c_{p_{\text{мерк}}} + q_{m_{H_2O}} \cdot c_{p_{H_2O}})_{i-1} + q_{m_{\text{мет}_i}} \left[ c_{p_{\text{мет}_j}} \cdot (t_{\text{кип}} - t_{\text{мет}_i}) + r + c_{p_{\text{мет}_i}} \cdot (t_{\text{см}_i} - t_{\text{кип}}) \right] \quad (6)$$

Температура смеси на выходе из смесителя и на входе в каталитическую секцию:

$$t_{\text{см}_i} = \frac{q_{m_{\text{мет}_i}} \cdot c_{p_{\text{мет}_j}} \cdot (t_{\text{мет}_i} - t_{\text{мет}_0}) - \left[ t \left( q_{m_{H_2S}} \cdot c_{p_{H_2S}} + q_{m_{\text{мерк}}} \cdot c_{p_{\text{мерк}}} + q_{m_{H_2O}} \cdot c_{p_{H_2O}} \right) \right]_{i-1} + q_{m_{\text{мет}_i}} \left[ c_{p_{\text{мет}_j}} \cdot (t_{\text{кип}} - t_{\text{мет}_i}) + r - c_{p_{\text{мет}_i}} \cdot t_{\text{кип}} \right]}{\left( q_{m_{H_2S}} \cdot c_{p_{H_2S}} + q_{m_{\text{мерк}}} \cdot c_{p_{\text{мерк}}} + q_{m_{H_2O}} \cdot c_{p_{H_2O}} \right)_{i-1} + (q_{m_{\text{мет}_i}} \cdot c_{p_{\text{мет}_i}})_i} \quad (7)$$

Энергетический баланс каталитической секции установки:

$$t_{\text{см}_i} \cdot (q_{m_{H_2S}} \cdot c_{p_{H_2S}} + q_{m_{\text{мерк}}} \cdot c_{p_{\text{мерк}}} + q_{m_{H_2O}} \cdot c_{p_{H_2O}})_{i-1} + q_{m_{\text{мет}_i}} \cdot \left[ c_{p_{\text{мет}_j}} \cdot (t_{\text{кип}} - t_{\text{мет}_i}) + r + c_{p_{\text{мет}_i}} \cdot (t_{\text{см}_i} - t_{\text{кип}}) + \Delta H_p \right] = t_{\text{вых}_i} \cdot (c_{p_{H_2S}} \cdot q_{m_{H_2S}} + c_{p_{\text{мерк}}} \cdot q_{m_{\text{мерк}}} + c_{p_{H_2O}} \cdot q_{m_{H_2O}})_i \quad (8)$$

Температура газового потока на выходе из каталитической секции:

$$t_{\text{вых}_i} = \frac{t_{\text{см}_i} \cdot (q_{m_{H_2S}} \cdot c_{p_{H_2S}} + q_{m_{\text{мерк}}} \cdot c_{p_{\text{мерк}}} + q_{m_{H_2O}} \cdot c_{p_{H_2O}})_{i-1} + q_{m_{\text{мет}_i}} \left[ c_{p_{\text{мет}_j}} \cdot (t_{\text{кип}} - t_{\text{мет}_i}) + r + c_{p_{\text{мет}_i}} \cdot (t_{\text{см}_i} - t_{\text{кип}}) + \Delta H_p \right]}{\left( q_{m_{H_2S}} \cdot c_{p_{H_2S}} + q_{m_{\text{мерк}}} \cdot c_{p_{\text{мерк}}} + q_{m_{H_2O}} \cdot c_{p_{H_2O}} \right)_i} \quad (9)$$

Затраты энергии на разогрев метанола:

$$q_{\text{раз}} = \sum_2^8 q_{m_{\text{мет}}} \cdot c_{p_{\text{мет}}} \cdot (t_{\text{мет}_i} - t_{\text{мет}_0}) \quad (10)$$

Расход пара на разогрев метанола равен:

$$q_{m_{\text{пар}}} = \frac{q_{\text{раз}}}{r_{\text{пар}}} \quad (11)$$

Система уравнений (1–10) была дополнена уравнениями для расчета степени превращения метанола в каталитической секции:

$$\frac{dC_{\text{мет}_i}}{dl} = -\frac{1}{v_i} \cdot r_i^*(T_i) \quad (12)$$

$$\frac{dT_i}{dl} = \frac{T_0}{T_i \cdot v_i \cdot \rho_{\text{см}_i}(T_i) \cdot c_p(T_i)} \cdot (\Delta H_p \cdot r_i^*(T_i)) \quad (13)$$

и гидравлического сопротивления сети:

$$N_{\text{пот}} = \sum_1^8 \frac{\Delta p_i}{\rho_{\text{см}_i}} q_{m_i} \quad (14)$$

Гидравлическое сопротивление системы определялось по правилу аддитивности [5]. Сопротивление отдельных участков определялись по известным соотношениям [5]. В качестве

Энергетический баланс по каждой секции:

Энергетический поток из выходящий из предыдущей секции:

$$q_{t_{i-1}} = t_{\text{вых}_{i-1}} \cdot (c_{p_{H_2S}} \cdot q_{m_{H_2S}} + c_{p_{\text{мерк}}} \cdot q_{m_{\text{мерк}}} + c_{p_{H_2O}} \cdot q_{m_{H_2O}})_{i-1} \quad (5)$$

варьируемых параметров использованы способ подачи метанола, количество метанола подаваемого в каждую секцию, температура до которой необходимо подогревать метанол перед впрыскиванием. Учитывалось изменение свойств газов от температуры [6].

В качестве рекомендаций предложено подавать метанол в каждую секцию одним потоком через подогреватель. Количество метанола подаваемого в каждую секцию возрастает по мере увеличения номера секции. Подогревать метанол перед подачей до температуры разной для каждой секции. Использование всех рекомендаций позволит понизить потребление пара используемого для синтеза на 15–20 % по сравнению с расходом пара в соответствии с регламентом.

Список обозначений

- $C$  – концентрация,
- $c_p$  – теплоемкость,
- $q_m$  – массовый поток,
- $N_{\text{пот}}$  – мощность, затрачиваемая на перемещение газовой среды,

$q_t$  – тепловой поток,  
 $l$  – длина слоя катализатора,  
 $\Delta p_i$  – гидравлическое сопротивление участка сети,  
 $r, r_{\text{пар}}$  – теплота испарения, конденсации,  
 $r_i^*$  – скорость химической реакции,  
 $T, t$  – температура,  
 $v$  – скорость движения газового потока,  
 $\rho$  – плотность.

*Подстрочные символы*

Мерк – меркаптан,  
 метж – метанол жидкость,  
 метп – метанол пар,  
 мет0 – начальное значение параметра,  
 пар – греющий пар,  
 $\text{H}_2\text{S}$  – сероводород,  
 $\text{H}_2\text{O}$  – вода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юкельсон, И. И. Технология основного органического синтеза / И. И. Юкельсон. – М.: Химия, 1968, с.
2. Тимофеев, В. С. Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза: учебн. пособие для вузов / В. С. Тимофеев, Л. А. Серафимов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2003. – 536 с.
3. Калекин, В. С. Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения в химической технологии: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. – 92 с.
4. Лисиенко, В. Г. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание в 2-х книгах / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Падыничев. – М.: Теплотехник, 2005 г.
5. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник: В 2 кн. / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носков [и др.]; под ред В. Г. Айнштейна. – Логос: Высшая школа, 2002. – Кн. 1. – 912 с.
6. Дж. Пери. Справочник инженера-химика. Т. 1 / Перевод с англ. под ред. акад. Н. М. Жаворонкова и чл.-корр. АН СССР П. Г. Романокова : Химия, 1969. – С. 640.

УДК 622.692.12:539.376

*Н. Н. Польская\*, А. Ю. Самойленко\*, А. Б. Голованчиков\*\*, С. В. Делия\**

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ДЕПРЕССОРНОЙ ОБРАБОТОК  
 НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕФТИ**

\* Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИморнефть»  
 \*\* Волгоградский государственный технический университет\*

Исследовано влияние термической и депрессорной обработок на реологические свойства высокопарафинистой нефти. Оценена зависимость транспортных свойств обработанных образцов нефти от времени их хранения.

*Ключевые слова:* термическая обработка нефти, депрессорная присадка, реологические свойства.

*N. N. Polskaya\*, A. J. Samojlenko\*, A. B. Golovanchikov\*\*, S. V. Delia\**

**INFLUENCE THERMAL AND DESQUEEZING PROCESSINGS  
 ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF OIL**

\* ООО «LUKOIL-ENGINEERING» «VolgogradNIPImoroil»  
 \*\* Volgograd State Technical University\*

The influence of thermal treatments and of depressant on the rheological properties of highly paraffinic oil is investigated. The dependence of transport properties of the processed samples of oil on time of their storage is estimated.

*Keywords:* thermal processing of oil, depressant, rheological properties.

Нефть месторождения им. Ю. Корчагина скважины ВП-2 является высокопарафинистой с температурой застывания  $t = +11$  °С (по ГОСТ 20287–91). В интервале температур  $+20-0$  °С она является неньютоновской жидкостью. Все эти факторы значительно усложняют трубопроводный транспорт нефти (увеличение давления страгивания нефти, застывание нефти в трубопроводе при технологической остановке), который осуществляется по дну Каспийского моря.

Существуют различные способы решения проблем, возникающих при перекачке высокопарафинистых нефтей по трубопроводам. Наибольшее распространение среди них получили метод обработки нефти депрессорными присадками и метод термической обработки [1].

Под термообработкой нефти обычно понимается нагрев нефти до определенной температуры, лежащей выше температуры начала выпадения твердых парафинов, и последующее ее

охлаждение [2]. В результате в нефти образуются менее прочные (по сравнению с исходными) кристаллические структуры твердых парафинов, что в целом положительно сказывается на реологических свойствах нефти. Депрессорные присадки представляют собой вещества, при введении которых в малых дозах в нефть достигается существенное снижение температуры застывания и улучшения текучести при низких температурах [3].

В каждом конкретном случае для нефти подбирается температура обработки, дозировка депрессорной присадки и температура ее введения. Основным показателем, свидетельствующим об эффективности применяемых методов, являются снижение температуры застывания нефти, уменьшение статического и динамического напряжений сдвига и эффективной (или показателя консистенции) и пластической вязкости. Также важным параметром служит длительность достигаемого эффекта, поскольку на практике не редки случаи технологической остановки перекачки нефти по транспортному трубопроводу на продолжительное время. В результате чего высокопарафинистая нефть, как правило, застывает и закупоривает трубопровод.

Для улучшения транспортных свойств нефти из скважины ВП-2 месторождения им. Ю. Корчагина были опробованы: термическая обработка нефти при температурах 60, 70 и 80 °С и обработка нефти депрессорной добавкой Flexoil CW-288 при температуре 70 °С (дозировка реагента составила 50 г/т). Была исследована зависимость реологических свойств обработанных нефтей от времени их хранения.

Целью работы являлось изучение влияния на реологические свойства нефти месторождения им. Ю. Корчагина термической обработки и обработки депрессорной присадкой Flexoil CW-288.

Реологические свойства нефти изучались на ротационном вискозиметре «Reotest-2» по РД 39-0147103-329-86 «Методика определения реологических параметров высоkozастывающих нефтей», при температуре 0 °С. Исследования проводились на прямом и обратном ходе вискозиметра с измерительным инструментом «цилиндр-цилиндр» в диапазоне скоростей сдвига от 13,5 до 656 с<sup>-1</sup>. Замеры статического напряжения сдвига выполнялись после 1 часа стабилизации нефти при заданной температуре и скорости сдвига 1,5 с<sup>-1</sup>. Режим течения исследован в условиях дискретного повышения

(прямой ход) и снижения (обратный ход) скорости сдвига. Время стабилизации течения при прямом ходе и обратном ходе – 5 минут.

На рис. 1. представлены реологические кривые течения нефтей, подвергнутых термообработке при температурах 60, 70, 80 °С, исходной нефти и обработанной депрессатором. Срок хранения обработанных проб – 0 дней.

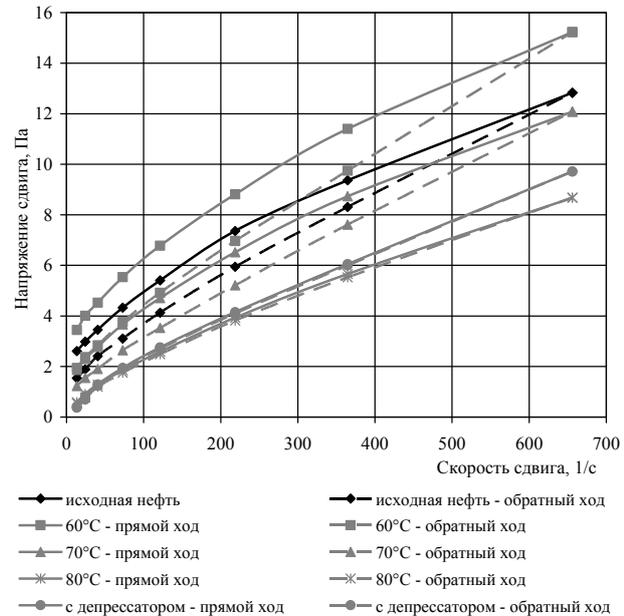


Рис. 1. Реологические кривые течения исходной нефти, термообработанной при температурах 60, 70, 8 °С и обработанной депрессорной присадкой (срок хранения – 0 дней)

Реологические зависимости описываются уравнением Гершеля-Балкли [4]:

$$\tau = \tau_0 + K \gamma^n, \tag{1}$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига при скорости сдвига  $\gamma$ , Па;  $\tau_0$  – начальное динамическое напряжение сдвига, Па;  $\gamma$  – скорость сдвига, с<sup>-1</sup>;  $K$  – показатель консистенции;  $n$  – степень нелинейности.

Путем математической обработки представленных кривых определены коэффициенты уравнения Гершеля-Балкли (табл. 1, 2).

Полученные данные свидетельствуют о том, что наибольшим положительным эффектом по улучшению реологических свойств обладают термическая обработка при 80 °С и обработка нефти депрессорной добавкой Flexoil CW-288. Кроме того, нефть, обработанная депрессатором не обладает тиксотропными свойствами, как исходная и термообработанные нефти. Термообработка нефти при 70 °С несколько улучшает, а обработка при 60 °С значительно ухудшает свойства нефти. Так, значе-

Таблица 1

## Коэффициенты уравнения течения нефти (время хранения – 0 дней)

Тип нефти, °С	Статическое напряжение сдвига, Па	Начальное динамическое напряжение сдвига, Па	Показатель консистентности	Степень нелинейности	R <sup>2</sup>
Пусковой режим (прямой ход ротационного вискозиметра)					
Исходная нефть	10,02	1,70	0,159	0,656	0,999
Нефть с депрессатором	1,29	0,13	0,063	0,776	0,998
Нефть, обработанная при 60 °С	7,63	2,3	0,225	0,624	0,999
Нефть, обработанная при 70 °С	4,08	1,05	0,143	0,672	0,999
Нефть, обработанная при 80 °С	1,43	0,15	0,068	0,748	0,999
Стационарный режим (обратный ход ротационного вискозиметра)					
Исходная нефть	–	0,91	0,089	0,749	0,999
Нефть с депрессатором	–	0,13	0,063	0,776	0,998
Нефть, обработанная при 60 °С	–	1,25	0,094	0,765	0,999
Нефть, обработанная при 70 °С	–	0,64	0,077	0,762	0,998
Нефть, обработанная при 80 °С	–	0,14	0,055	0,780	0,999

Таблица 2

## Коэффициенты уравнения течения нефти (время хранения – 30 дней)

Тип нефти, °С	Статическое напряжение сдвига, Па	Начальное динамическое напряжение сдвига, Па	Показатель консистентности	Степень нелинейности	R <sup>2</sup>
Пусковой режим (прямой ход ротационного вискозиметра)					
Исходная нефть	10,02	1,70	0,159	0,656	0,999
Нефть с депрессатором	2,14	0,25	0,077	0,755	0,999
Нефть, обработанная при 60 °С	14,22	3,60	0,196	0,642	0,997
Нефть, обработанная при 70 °С	7,57	1,85	0,181	0,653	0,997
Нефть, обработанная при 80 °С	6,71	1,00	0,108	0,706	0,998
Стационарный режим (обратный ход ротационного вискозиметра)					
Исходная нефть	–	0,91	0,089	0,749	0,999
Нефть с депрессатором	–	0,25	0,077	0,755	0,999
Нефть, обработанная при 60 °С	–	1,30	0,157	0,693	0,998
Нефть, обработанная при 70 °С	–	1,00	0,117	0,718	0,989
Нефть, обработанная при 80 °С	–	0,80	0,080	0,752	0,996

ние эффективной вязкости на стационарном режиме при скорости сдвига  $24,3 \text{ с}^{-1}$  и температуре  $0 \text{ °С}$  для исходной нефти равно  $77,64 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ , для термообработанных при  $60, 70$  и  $80 \text{ °С}$  –  $97,58 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ ,  $63,72 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ ,  $31,93 \text{ мПа}\cdot\text{с}$  соответственно, для нефти после депрессорной обработки –  $28,33 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ .

В целях изучения стабильности эффекта, достигаемого в результате различных видов

обработки нефти, было проведено сопоставление результатов реологических исследований нефти спустя 30 дней после обработки (рис. 2.). Лучшими реологическими свойствами обладает нефть, содержащая депрессорную присадку. Отсутствие тиксотропных свойств сохраняется.

Эффект обработки при  $80 \text{ °С}$  снижается, но остается положительным по сравнению с исходной нефтью. Реологические свойства нефти,

обработанной при 70 °С, со временем ухудшаются. Так, значение эффективной вязкости на стационарном режиме при скорости сдвига  $24,3 \text{ с}^{-1}$  и температуре 0 °С для исходной нефти равно 77,64 мПа·с, спустя 30 дней для термообработанных при 60, 70 и 80 °С – 112,3 мПа·с, 95,3 мПа·с, 70,21 мПа·с соответственно, для нефти с депрессорной обработкой – 44,24 мПа·с.

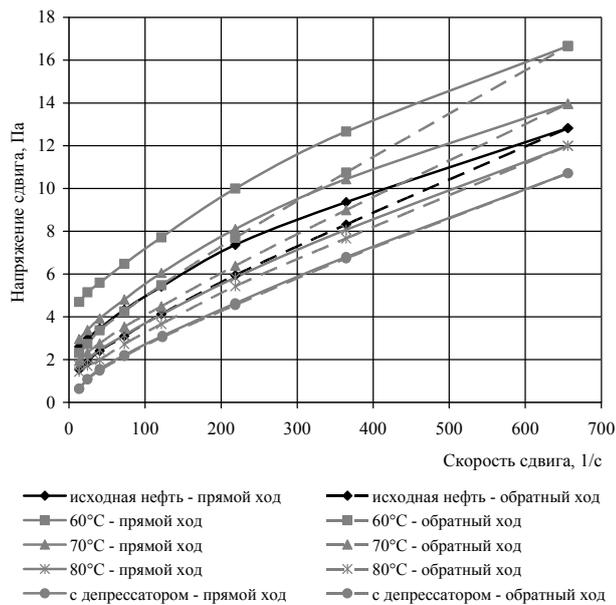


Рис. 2. Реологические кривые течения исходной нефти, термообработанной при температурах 60, 70, 80 °С и обработанной депрессорной добавкой (срок хранения – 30 дней)

Статическое напряжение сдвига в процессе хранения обработанных проб увеличивается. Приведенные на рис. 3 гистограммы показыва-

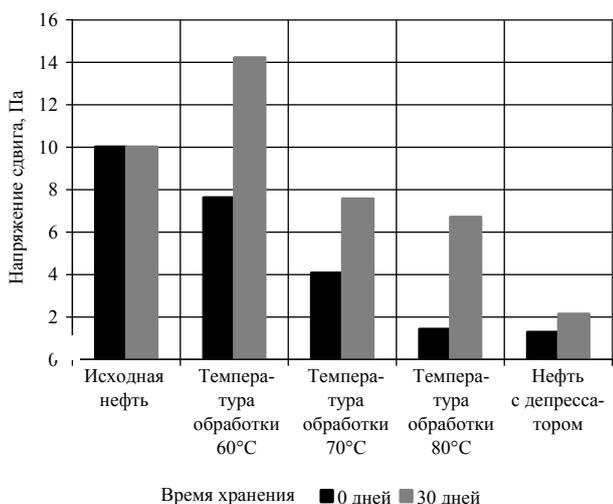


Рис. 3. Зависимость статического напряжения сдвига исходной и обработанных нефтей от времени их хранения

ют, что статическое напряжение сдвига для всех нефтей через 30 дней увеличивается, однако, только у нефти, обработанной при 60 °С, значение статического напряжения сдвига превышает статическое напряжение сдвига исходной нефти ( $\tau_{0\text{дн.}} = 7,63 \text{ Па}$ ,  $\tau_{30\text{дн.}} = 14,22 \text{ Па}$ ). У нефтей, обработанных при 70 и 80 °С, статическое напряжение сдвига растет, но не достигает значения напряжения сдвига исходной нефти ( $\tau_{0\text{дн.}} = 4,08 \text{ Па}$ ,  $\tau_{30\text{дн.}} = 7,57 \text{ Па}$ ;  $\tau_{0\text{дн.}} = 1,43 \text{ Па}$ ,  $\tau_{30\text{дн.}} = 6,71 \text{ Па}$ , соответственно). Менее всего меняется статическое напряжение сдвига нефти, обработанной депрессорной присадкой ( $\tau_{0\text{дн.}} = 1,29 \text{ Па}$ ,  $\tau_{30\text{дн.}} = 2,14 \text{ Па}$ ).

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Течение всех исследованных образцов нефти месторождения им. Ю. Корчагина при температуре 0 °С в диапазоне скоростей сдвига от 13,5 до 656  $\text{с}^{-1}$  описывается реологическим уравнением Гершеля-Балкли. Исходная и термообработанные нефти обладают тиксотропными свойствами. Наличие тиксотропных свойств свидетельствует о том, что нефть при данной температуре является нереостабильной жидкостью, то есть жидкостью с нестационарными реологическими характеристиками, зависящими от времени или предыстории процесса ее обработки. Нефть с депрессорной присадкой не обладает тиксотропными свойствами, что делает ее более реологически предсказуемой.

2. Наибольшим положительным эффектом по улучшению реологических свойств обладает термическая обработка при 80 °С и обработка нефти депрессорной добавкой Flexoil CW-288 (при сравнении реологических свойств свежеработанных нефтей). Термообработка нефти при 70 °С практически не меняет, а обработка при 60 °С значительно ухудшает свойства нефти.

3. Эффект от термообработки нефти при 80 °С спустя 30 дней значительно снижается. Обработанная при указанной температуре нефть по реологическим свойствам приближается к исходной нефти. Добавление к нефти депрессорной присадки Flexoil CW-288 делает ее даже спустя месяц более текучей по сравнению с необработанной нефтью.

4. Проведенные исследования указывают на возможность улучшения реологических свойств нефти, обработанной депрессорной добавкой, с предварительным нагревом до температуры 80 °С.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дьячук, А. И. К вопросу исследований влияния депрессорных присадок на свойства высокопарафинистых нефтей при их трубопроводном транспорте / А. И. Дьячук, А. Г. Ахмадеев, М. А. Сафин, Е. Родионова, Е. Шутова // IV Международная конференция «Химия нефти и газа». – Томск, 2000. – С. 518–520.
2. Саяхов, Б. К. Влияние термообработки на реологические параметры нефтей и их смесей / Б. К. Саяхов, Т. К. Алдыяров, С. С. Кожабеков, В. Б. Сигитов, А. В. Габдракипов, А. Г. Дидух, С. Ю. Гузов // Нефть и газ. – 2004. – № 4. – С. 91–98.
3. Андреева, Л. Н. Депрессорные присадки и механизм их действия / Л. Н. Андреева, Л. В. Цыро, Ф. Г. Унгер // Нефть и газ. – 2006. – № 1. – С. 102–108.
4. Маковей, Н. Гидравлика бурения / Н. Маковей. – М.: Недра, 1986. – 536 с.

Научное издание

**ИЗВЕСТИЯ**  
**Волгоградского государственного технического университета**  
**№ 1(88), 2012 г.**

Серия «РЕОЛОГИЯ, ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ»  
(Выпуск 5)

*Межвузовский сборник научных статей*

Редактор *Л. И. Громова*  
Компьютерная верстка *Е. В. Макаровой*

Темплан 2012 г. (научные издания). Поз. № 6.  
Подписано в печать 31.01.2012. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,94. Уч.-изд. л. 15,09.  
Тираж 150 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет.  
400005, Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ  
400005, Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

В сборнике научных статей «Известия ВолгГТУ», серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии» публикуются статьи, которые являются результатом научно-исследовательских работ в области гидромеханики и теплообмена реологически сложных сред в различных процессах химической технологии.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия сборника, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редакция направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на дискетах или компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Дискета должна быть вложена в отдельный конверт, на этикетке дискеты указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, в котором работает автор статьи. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 "Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления". Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводится на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail), документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.