

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИЗВЕСТИЯ

ВОЛГОГРАДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия

РЕОЛОГИЯ, ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Выпуск 7

№ 1 (128)

Межвузовский сборник научных статей
Издается с января 2004 г.

2014



Волгоград
2014

УДК 66.01/09:532.5

Учредитель: ФГБОУ 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»

президент 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;
д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ *А. П. Дарманиян*;
д-р. техн. наук, проф. ВПИ *О. А. Тишин*;
д-р. техн. наук, проф. ВПИ *В. М. Шаповалов*;
канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ *В. А. Балашиов*;
канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ *В. М. Яицук*;
канд. техн. наук, доцент ВолгГТУ *А. А. Шагарова* (ответственный секретарь) – т. 24-84-31, e-mail: pahr@vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 1 (128) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – 144 с. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 7).
ISBN 978–5–9948–1410–9

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. 74. Табл. 43. Библиогр.: 235 назв.

ISBN 978–5–9948–1410–9

© Волгоградский государственный
технический университет, 2014

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
Волгоградского государственного технического университета
№ 1(128), 2014 г.

Серия «РЕОЛОГИЯ, ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ»
(Выпуск 7)

Межвузовский сборник научных статей

Редактор *Л. И. Громова*

Компьютерная верстка *Е. В. Макаровой*

Темплан 2014 г. (научные издания). Поз. № 1.

Подписано в печать 18.02.2013. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,74. Уч.-изд. л. 16,26.
Тираж 100 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет.
400005, Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Шаповалов В. М., Меренцов Н. А.</i> Гидродинамические закономерности струйного абсорбера.....	5
<i>Баньковская Ю. Р., Голованчиков А. Б., Фомиченко В. В., Нефедьева Е. Э.</i> Анализ опытных данных по предпосевной обработке семян ударным давлением.....	7
<i>Косоголов А. В., Багмутов В. П., Захаров И. Н., Денисевич Д. С., Косоголова П. В.</i> Комбинированное поверхностное упрочнение стальных сплавов на основе электрохимической и ультразвуковой обработок.....	10
<i>Шагарова А. А., Дорохина Т. Б., Даниличева М. В.</i> Экспериментальные исследования влияния конструктивных и кинематических характеристик быстроходной и комбинированной мешалок на интенсивность и эффективность перемешивания.....	14
<i>Дулькин А. Б., Дулькин Б. А., Голованчиков А. Б.</i> Оценка времени замерзания воды в трубопроводе.....	19
<i>Голованчиков А. Б., Шибитов Н. С., Шибитова Н. В., Баев Д. А.</i> Удаление анионов хлора из раствора каустика в ионообменной колонне непрерывного действия.....	23
<i>Голованчиков А. Б., Ильин А. В., Ильина Л. А., Первакова Г. И.</i> Оценка вероятности улавливания частиц в гидроциклоне, батарее и каскаде гидроциклонов с учетом экспериментальных исследований.....	27
<i>Юркив Н. И., Поликарпов А. Д., Мельникова Т. В.</i> Влияние проницаемости призабойной зоны пластов, расположенных за ней, на распределение фильтрационных потоков.....	32
<i>Юркив Н. И.</i> Влияние плотности электромагнитного поля на процессы, происходящие в органическом и неорганическом мире.....	36
<i>Мельникова Т. В., Юркив Н. И.</i> Разработка физико-химических методов воздействия на призабойную зону водозаборных скважин.....	44
<i>Васильева Е. В., Голованчиков А. Б., Карев В. Н.</i> Устойчивые эмульсии на микроуровне по дисперсной фазе.....	51
<i>Меренцов Н. А., Голованчиков А. Б., Балашов В. А., Рязанов М. Г., Чугунова Е. Е.</i> Расчет вентиляторной градирни с капельным орошением.....	54
<i>Деулин Б. И.</i> Установка для экспресс-анализа концентрации ионов в водных растворах электролитов, выполненная на ионообменных колонках с дополнительным выходом.....	60
<i>Деулин Б. И.</i> Применение спектрофотометра с источником света в виде рос-лазера для пробоподготовки водных растворов электролитов.....	63
<i>Олейников А. В., Иванов В. В.</i> Шибберная задвижка для магистральных трубопроводов.....	66
<i>Князева А. С., Кидалов Н. А., Голованчиков А. Б.</i> Реологические свойства и гидродинамика в трубопроводах водно-глинистых суспензий с добавлением углещелочного реагента (УЩР) для формовочных смесей.....	69
<i>Васильева Е. В., Голованчиков А. Б., Дулькина Н. А., Ильина Л. А.</i> Снижение энергозатрат при двухслойном течении «тяжелых» нефтепродуктов в трубопроводе.....	72

<i>Ламскова М. И., Новиков А. Е.</i> Возможности и перспективы очистки сточных, оборотных и хозяйственно-бытовых вод природными алюмосиликатами.....	77
<i>Думский Ю. В., Чередникова Г. Ф., Думский С. Ю.</i> Новые процессы квалифицированного использования жидких побочных продуктов пиролиза углеводородного сырья.....	80
<i>Думский Ю. В., Чередникова Г. Ф., Думский С. Ю.,</i> Применение заменителя растительных масел.....	82
<i>Шишлянников В. В., Павлов Д. А., Каликин А. А.</i> Теплообмен в трубчатых реакторах идеального вытеснения.....	85
<i>Шагарова А. А., Шапошников А. П., Тарасенко Л. Е.</i> Реометрические исследования характеристик течения высоковязких сред в шнековых машинах при наличии тонкого пристенного слоя.....	87
<i>Воротнева С. Б., Голованчиков А. Б., Дулькина Н. А., Мурзенков Д. С.</i> Перспективные конструкции рулонных фильтрующих модулей.....	91
<i>Воротнева С. Б., Голованчиков А. Б., Коломиец С. Р., Коломиец Д. Р.</i> Абразивная гранула с положительной плавучестью.....	94
<i>Голованчиков А. Б., Аристова Ю. В., Дулькина Н. А.</i> Экспериментальное определение структуры потока методом двух индикаторов.....	98
<i>Меренцов Н. А., Балашов В. А., Дулькина Н. А., Орлянкина Я. А.</i> Методика оценки гидродинамических условий работы трубчатого каталитического реактора.....	101
<i>Курьева Л. В., Голованчиков А. Б., Каблов В. Ф., Дулькина Н. А.</i> Оценка процесса адсорбции паров диоксида из вентиляционных выбросов....	103
<i>Иваницкий М. С., Грига А. Д.</i> Ацетиленовый механизм образования бенз(а)пирена при сжигании газообразного топлива в топках энергетических котлов.....	109
<i>Васильев П. С., Рева С. Л., Рева Л. С., В. В. Савин, Голованчиков А. Б.</i> Определение предельной высоты падения капли, при которой не происходит нарушения сплошности объема жидкости на поверхности.....	111
<i>Ильина Л. А., Голованчиков А. Б., Ильин А. В., Васильева Е. В.</i> Снижение гидравлического сопротивления при двухслойном кольцевом течении высоковязкой жидкости в трубопроводе.....	114
<i>Лапина С. В., Бердникова Н. Ю.</i> Применение методов вибродиагностики для контроля за состоянием оборудования в химической промышленности.....	118
<i>Кузнецов А. В., Трусов А. С., Антонов В. В.</i> Экспериментальное исследование адсорбционной емкости адсорбента AP-B.....	121
<i>Залипаева О. А., Коберник А. А., Коберник Д. А.</i> Мобильная модульная система сжижения природного газа и перспективы ее применения на российском арктическом шельфе.....	124
<i>Яблонский В. О.</i> Влияние режимных параметров цилиндрического гидроциклона на гидродинамику течения нелинейно-вязкопластической жидкости.....	127
<i>Яцук В. М.</i> Течение концентрированной суспензии в длинном трубопроводе.....	131
<i>Яцук В. М., Залипаева О. А., Филимонова Д. С.</i> Применение тепловых насосов в ректификационных установках.....	133
<i>Тишин О. А., Харитонов В. Н.</i> Влияние условий перемешивания на интегральные характеристики химического процесса.....	136
КРАТКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СООБЩЕНИЯ	
<i>Шишлянников В. В.</i> Теплообмен при переработке химических продуктов на экструдере с несимметричным обогревом.....	140
<i>Шишлянников В. В., Каликин А. А., Павлов Д. А., Голованчиков А. Б.</i> Экспериментальное исследование диспергирования порошково-волокнистых суспензий.....	142

*В. М. Шаповалов**, *Н. А. Меренцов***

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУЙНОГО АБСОРБЕРА

***Волжский политехнический институт (филиал)**

Волгоградского государственного технического университета

****Волгоградский государственный технический университет**

Представлен теоретический анализ кинематических закономерностей движения свободной струи тяжелой жидкости в массообменном аппарате. Получена оценка времени пребывания жидкости в аппарате.

Ключевые слова: высота, время, скорость.

*V. M. Shapovalov**, *N. A. Merentsov***

HYDRODYNAMIC REGULARITIES OF THE JET ABSORBER

*** Volgograd Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University**

****Volgograd State Technical University**

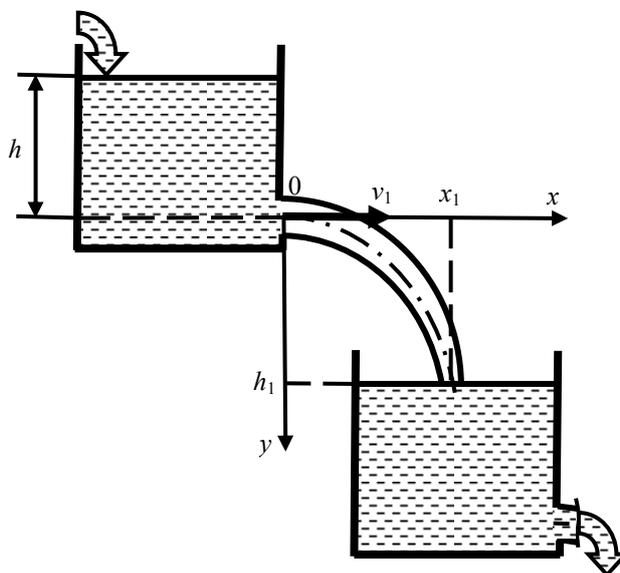
The theoretical analysis of kinematics laws of movement of a free jet of a heavy liquid in mass transfer the device is submitted. The estimation of time of stay of a liquid in the device is received.

Keywords: height, time, speed.

Рассматриваемое течение связано с работой многоярусного струйного абсорбера (десорбера). Для обоснованного конструирования переливных элементов аппарата необходимо знать кинематические закономерности движения свободной струи жидкости.

Расчетная схема течения и система координат представлены на рисунке. Имеется напорный сосуд (тарелка), высота жидкости, в котором относительно сливного отверстия, составляет h . Ось x – горизонтальна, соответственно, y – вертикальна. Начало декартовой системы координат помещено в центре отверстия. Координаты x , y описывают среднюю линию струи, которая проходит через центры поперечных сечений. Высота отверстия истечения верхнего сосуда – h_1 . Величины h и h_1 постоянны, как и расход жидкости. Капиллярные эффекты (волнообразование на поверхности струи и распад на капли), как и трение о воздух, не учитываем. Течение изотермическое. Вязкость жидкости пренебрежимо мала. Требуется найти протяженность полета струи до встречи с горизонтальной поверхностью нижнего сосуда.

Горизонтальная составляющая скорости частиц жидкости постоянна, и соответствует скоро-



Расчетная схема

сти истечения из насадка v_1 . Для точки соприкосновения x_1 можем записать соотношение

$$x_1 = v_1 t_1, \tag{1}$$

где t_1 – время пребывания струи в воздухе.

Согласно формуле Торричелли скорость истечения равна

$$v_1 = \alpha \sqrt{2gh}, \tag{2}$$

где α – коэффициент скорости, g – ускорение свободного падения. Коэффициент скорости зависит от формы насадка, числа Рейнольдса и числа Вебера. Поскольку скорость истечения не изменяется, то и коэффициент скорости сохраняет постоянное значение.

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим

$$x_1 = \alpha t_1 \sqrt{2gh}. \quad (3)$$

Уравнение вертикального перемещения частиц жидкости (свободного падения) без учета трения о воздух

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = g, \quad (4)$$

где t – время.

Начальные условия для уравнения (4)

$$t=0, \quad y=0, \quad \frac{dy}{dt} = 0. \quad (5)$$

Дважды проинтегрировав уравнение (4) с учетом условий (5), получим

$$y = \frac{gt^2}{2}.$$

С учетом условия соприкосновения струи с поверхностью $y = h$, $t = t_1$, найдем продолжительность пребывания частиц жидкости в полете

$$t_1 = \sqrt{\frac{2h_1}{g}}. \quad (6)$$

Подставив выражение (6) в формулу (3), получим дальность полета струи

$$x_1 = 2\alpha\sqrt{hh_1}. \quad (7)$$

Из полученного выражения (7) видно, что длина полета струи не зависит от ускорения свободного падения и плотности жидкости, а зависит только от высоты отверстия над плоскостью (h_1) и уровня жидкости в верхнем сосуде (h). Без учета трения струи о воздух форма струи параболическая.

Образование брызг зависит от скорости падения струи. Вертикальная составляющая скорости струи в точке падения

$$\frac{dy(t_1)}{dt} = gt_1 = \sqrt{2gh_1}.$$

Соответственно, результирующая скорость в точке падения v составляет

$$v = \sqrt{v_1^2 + \left[\frac{dy(t_1)}{dt} \right]^2} = \sqrt{2g(\alpha^2 h + h_1)}.$$

Следует отметить, что процессы массопереноса происходят в основном на поверхности

струи. Многоярусное (многотарельчатое) перетекание жидкости увеличивает время пребывания жидкости в аппарате и продолжительность межфазного взаимодействия. Пусть высота аппарата H . Тогда продолжительность однократного падения жидкости (t_2), согласно формуле (6), составит

$$t_2 = \sqrt{\frac{2H}{g}}. \quad (8)$$

Пусть число тарелок n $\left(n = \frac{H}{h_1 + h} \right)$. Полагая

$h \approx h_1$, можем записать $n = \frac{H}{2h}$. Продолжительность пребывания жидкости в аппарате (время преодоления всех n тарелок), с учетом выражения (6), составит

$$t_n = n \sqrt{\frac{2h_1}{g}} = n \sqrt{\frac{H}{gn}}.$$

Найдем, как влияет число тарелок на время пребывания. Для этого определим, во сколько раз увеличивается время пребывания за счет переливания жидкости между тарелками. С учетом выражения (8), имеем

$$N = \frac{t_n}{t_2} = \sqrt{\frac{n}{2}}.$$

Из полученного выражения видно, что продолжительность контактного взаимодействия фаз увеличивается с ростом числа тарелок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шаповалов, В. М. О форме свободной струи тяжелой капельной жидкости в потоке газа / В. М. Шаповалов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(104) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 6). – С. 58–61.
2. Меренцов, Н. А. Экспериментальная установка для исследования теплообменных процессов в насадочных устройствах градирен / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков, Я. А. Орлянкина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(88) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 5). – С. 78–80.
3. П. м. 117317 Российская Федерация, МПК В01J19/32. Насадка для массообменного аппарата / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Меренцов, Н. А. Дулькина, О. А. Залипаева, А. П. Шамьянова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – 2012106991/05 ; заяв. 27.02.2012 ; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18 (IV ч.).
4. Гидродинамика пленочных абсорберов с регулярной насадкой / Г. В. Рябчук [и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(49) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 2). – С. 54–56.

5. Голованчиков, А. Б. Моделирование нестационарного падения сферической капли в поле сил тяжести / А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов, Н. А. Меренцов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4(91) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 13). – С. 8–12.

6. Систер, В. Г. Принципы повышения эффективности тепломассообменных процессов / В. Г. Систер, Ю. И. Мартьянов. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 1998. – 508 с.

7. Испарительное охлаждение капель жидкости в воздушном потоке / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков, Я. А. Орлянкина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. №1 (88) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. –

120 с. (Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 5). – С. 62-65.

8. Насадки массообменных колонн / Б. А. Сокол, А. К. Чернышев, Д. А. Баранов [и др.] ; под ред. Д. А. Баранова. – М., 2009. – 358 с.

9. Моделирование гидромеханических и тепло- и массообменных процессов в вентиляторной градирне с капельным орошением и проволоочной насадкой / А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, Я. А. Орлянкина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 10(97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 14). – С. 22–28.

УДК 66.063

Ю. Р. Баньковская, А. Б. Голованчиков, В. В. Фомиченко, Е. Э. Нefeldieva

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПО ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКЕ СЕМЯН УДАРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Волгоградский государственный технический университет

Представлена экспериментальная установка для исследования предпосевной обработки семян ударным давлением. Приводятся экспериментальные данные влияния давления и времени его воздействия на семена. Методами регрессионного анализа определено влияние давления и импульса давления на индекс накопления вещества в растениях при предпосевной обработке семян ударным давлением.

Ключевые слова: эксперимент, установка, давление, импульс, семена.

Y. R. Bankovskaya, A. B. Golovanchikov, V. V. Fomichenko, E. E. Nefedieva

CORRELATION ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA ON PRESOWING TREATMENT OF SHOCK PRESSURE

Volgograd State Technical University

Shows the experimental setup for the study of the pre-processing of seeds shock pressure. The experimental data on the effect of pressure and time of exposure to the seeds. By regression analysis of the op-thinned effect of pressure and pulse pressure on the index of accumulation of substances in plants preliminary treatment of seeds shock pressure.

Keywords: experiment, setup, study, pressure, pulse, seeds.

В связи со сложившейся ситуацией, когда отечественные зернопроизводители вынуждены работать, с трудом окупая свои затраты, а иногда и в убыток, задача повышения урожайности зерновых культур является весьма актуальной. Эта задача решается путем выведения новых сортов и гибридов, получения генетически модифицированных организмов, совершенствованием агротехнологией, применением различных стимуляторов роста растений (химических, биологических, физических).

Наибольший интерес представляют физические стимуляторы и связано это с их относительной безвредностью и удобством применения. Воздействие физических стимуляторов выгодно отличается от химических технологичностью процесса тем, что позволяет снизить вероятность передозировки, приводящей к на-

рушению экологического равновесия и изменению наследственности.

Метод предпосевной обработки семян импульсным давлением относится к физическим стимуляторам. Преимущества метода заключается в точности дозирования, равномерности распределения в среде и мгновенности воздействия, при котором не происходит грубого механического разрушения объекта.

Выяснено, что предпосевная обработка семян импульсным давлением определенной дозы способствует повышению урожайности растений, кроме того, в отличие от других способов воздействия, является экологически безвредным.

Для проведения предпосевной обработки семян импульсным давлением разработана конструкция устройства, представленная на рис. 1 [1].

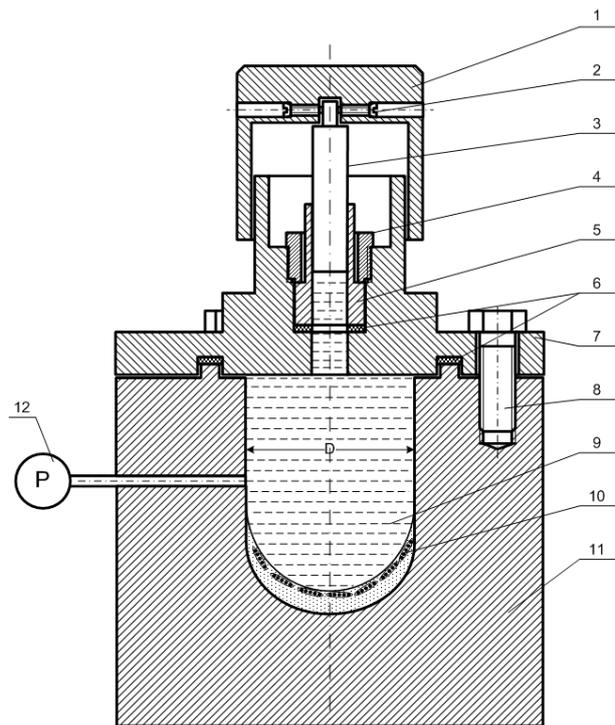


Рис. 1. Экспериментальная установка для проведения предпосевной обработки семян ударным давлением:
 1 – оголовок; 2 – регулировочные винты; 3 – поршень; 4 – прижимная втулка; 5 – втулка поршня; 6 – прокладка; 7 – съемная крышка; 8 – болт; 9 – вода; 10 – семена; 11 – защитный цилиндр; 12 – манометр

Принцип работы устройства следующий. В цилиндрическую емкость устанавливается кон-

тейнер с семенами, закрытыми тканью, заливают воду. Над защитным кожухом устанавливается съемный цилиндр с гильзой. Внутри гильзы и пружины устанавливается поршень с оголовком. По оголовку наносится удар, усилие которого через оголовок передается на поршень. Поршень, скользя вниз в гильзе, передает импульсное давление на воду, а через нее на обрабатываемые семена. После обработки производят разборку в обратном порядке и вынимают контейнер с обработанными семенами. Для исследования использовались семена ячменя.

Обработанные семена имеют большой запас резервных веществ на единицу длины, чем контрольные. Это указывает на возможность увеличения продуктивности и повышения устойчивости растений к неблагоприятным воздействиям. Всхожесть семян после обработки снижается, что является естественной реакцией на стимулирующее воздействие.

Каждый эксперимент содержит элемент неопределенности вследствие ограниченности экспериментального материала. Постановка повторных (или параллельных) опытов не дает полностью совпадающих результатов, потому что всегда существует ошибка опыта (ошибка воспроизводимости). Эту ошибку и нужно оценить по параллельным опытам. Для этого каждый опыт воспроизводился по возможности в одинаковых условиях [2].

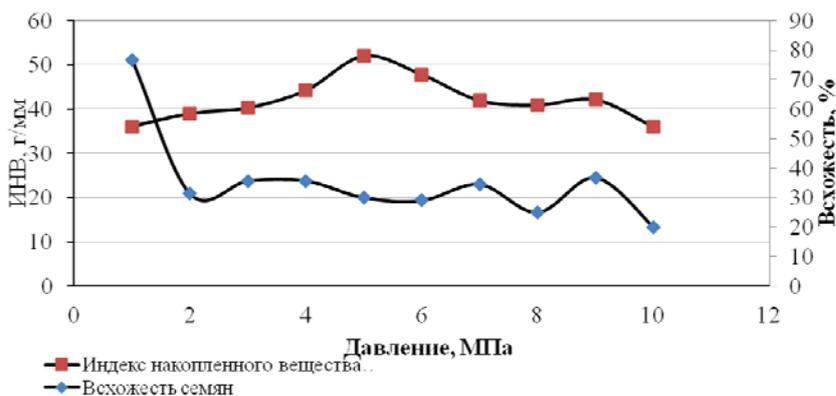


Рис. 2. Результат импульсного воздействия на семена

Зависимость ИНВ от давления можно описать уравнением второго порядка:

$$\text{ИНВ}_p = A + aP + bP^2 \quad (1)$$

Для семян ячменя коэффициенты уравнения $A = 31$ г/мм, $a = 2,03$, $b = -0,04$.

Сравниваемое количество дисперсий больше двух и одна дисперсия значительно превышает остальные, можно воспользоваться

критерием Кохрена. Так как расчетное значение $K_{\text{гp}} = 0,99$ больше табличного значения $K_{\text{гp таб}} = 0,4$, то дисперсия неоднородна, воспроизводимости нет.

Проверка однородности дисперсий производится с помощью критерия Фишера. Полученное значение $F_{\text{r}} = 8,4$ больше приведенного в таблице $F_{\text{r таб}} = 3,3$ для соответствующих степеней свободы и выбранного уровня значимо-

сти, это означает, что уравнение регрессии неадекватно.

Таблица 1

Экспериментальные и теоретические данные зависимости давления на индекс накопления вещества

P , атм	ИНВ экс. ср г/мм	ИНВ теор г/мм	Отклонение, %
1	34,7	33,1	-4,6
22	37,3	57,3	54,9
30	40,0	58,7	46,7
32	42,7	58,2	36,3
35	48,3	56,8	17,6
38	43,3	54,8	26,5
45	41,0	47,6	16,1
65	40,3	6,9	-82,9
70	38,3	-7,9	-120,6

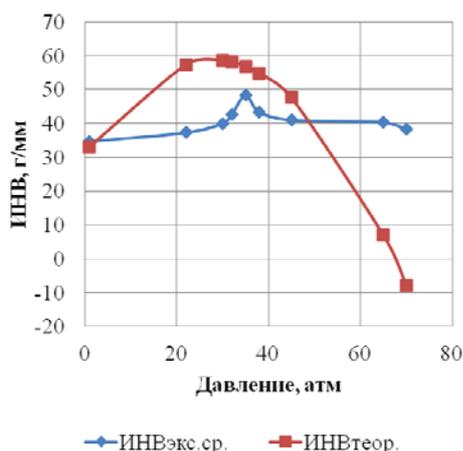


Рис. 3. График зависимости давления на индекс накопления вещества

Критерий Стьюдента для коэффициента $a-t_{ap} = 12,32$; для коэффициента $b-t_{bp} = 0,22$. Табличное значение критерия Стьюдента $t_T = 2,1$. Отсюда следует, $t_{bp} < t_T$, значит коэффициент b незначим.

Таблица 2

Экспериментальные и теоретические данные зависимости импульса давления на индекс накопления вещества

I_p , атм*с	ИНВэкс. ср., г/мм	ИНВтеор., г/мм	Отклонение, %
0,3	33,8	34,5	2,0
0,8	39,8	39,4	-1,1
1,1	43,0	41,8	-2,8
1,5	47,0	44,3	-5,8
2,2	47,2	46,8	-0,8
3	42,7	46,7	9,5

Коэффициент корреляции r показывает насколько существенна связь между функцией и аргументом. Чем больше коэффициент корреляции по абсолютной величине $\kappa = 1$, тем эта связь существенней. Так как коэффициент $r = -0,71$ отрицательный, зависимость слабая.

Зависимость ИНВ от импульса давления можно так же описать уравнением второго порядка:

$$\text{ИНВ}_p = A + aI_p + bI_p^2 \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения:

$$A = 31 \text{ г/мм}; a = 12,4; b = -2,4.$$

Расчетное значение $K_{ry} = 0,479$ меньше табличного значения $K_{rytab} = 0,53$, то воспроизводимость хорошая. Все точки лежат в пределах нормального распределения ошибок.

Полученное значение критерия Фишера $F_r = 3,951$ меньше приведенного в таблице $F_{rtab} = 4,53$ для соответствующих степеней свободы и выбранного уровня значимости, это означает, что дисперсии не отличаются друг от друга, т. е. что они однородны.

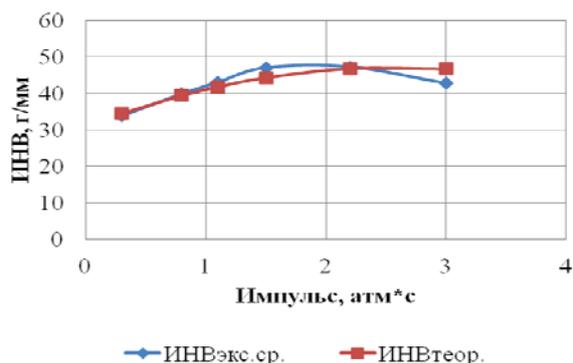


Рис. 4. График зависимости импульса давления на индекс накопления вещества

Критерий Стьюдента для коэффициента $a-t_{ap} = 20,3$, для коэффициента $b-t_{bp} = 3,9$. Табличное значение критерия Стьюдента $t_T = 2,1$. Отсюда следует, t_a и $t_b > t_T$, значит оба коэффициента значимы.

Тогда в линеаризированной системе координат уравнение (2) имеет вид:

$$\frac{\text{ИНВ}_p - 34}{I_p} = 12,43 - 2,39I_p \quad (3)$$

Коэффициент корреляции $r = -0,836$ отрицательный, то связь обратная, зависимость выше, чем от давления.

Выводы. Обработка экспериментальных данных показывает, что на эффективность предпосевной обработки семян оказывает влияние

не давление или время его экспозиции, а импульс давления, то есть произведение давления на время экспозиции. Только в этом случае обеспечивается воспроизводимость по критерию Кохрена, адекватность нелинейного уравнения регрессии (2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 114583 Российская Федерация, МПК А 01 С 1/00. Устройство для предпосевной обработки семян /

А. Б. Голованчиков, Е. Э. Нефедьева, В. В. Фомиченко, Ю. Р. Баньковская, Т. А. Дулькин ; заявитель и патенто-обладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). – № 2011146568/13 ; заявл. 16.11.11 ; опубл. 10.04.12.

2. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха, И. А. Потяженко. – Киев : КПИ – 1979 г.

УДК 66.063

А. В. Косогоров, В. П. Багмутов, И. Н. Захаров, Д. С. Денисевич, П. В. Косогорова

КОМБИНИРОВАННОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЬНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТОК

Волгоградский государственный технический университет

Исследована комплексная технология поверхностного упрочнения металлов, основанная на комбинации электромеханической обработки и безабразивной ультразвуковой финишной обработки, позволяющих гибко управлять характеристиками качества поверхности изделия. Представлены результаты исследования микротвердости и микрогеометрии поверхностного слоя образцов из различных марок стали как в исходном состоянии, так и с нанесенными плазменными покрытиями.

Ключевые слова: Сталь, электромеханическое упрочнение, ультразвуковая обработка, поверхностный слой.

A. V. Kosogorov, V. P. Bagmutov, I. N. Zakharov, D. S. Denisevich, P. V. Kosogorova

COMBINED SURFACE HARDENING OF STEEL BASED ALLOYS BY ELECTROMECHANICAL AND ULTRASONIC TREATMENTS

Volgograd State Technical University

There was investigated complex technology of surface metal hardening, which based on combination electro-mechanical treatment and finish non-abrasive ultrasonic treatment. It allows to simply controlling of characterizes of quality product s surface. There are results of microhardness' and microgeometries' research of surface layer of samples from different stamps of steel in reset and with plasma's surface

Keywords: Steel, electromechanical treatment, ultrasonic treatment, surface.

В нашей стране и во всем мире активно развивается химическая и нефтяная отрасли промышленности, где необходимо применение машин и приборов, работающих при повышенных скоростях и нагрузках. К актуальным задачам современных наукоемких производств относится получение изделий с оптимизированными под заданные условия функционирования структурой и свойствами. В этом направлении перспективным является использование интенсивных технологических полей (термических, силовых и др.) в различных сочетаниях, под действием которых формируется структура материала, отвечающая требуемому комплексу служебных свойств. Это находит свое воплощение, в том числе, в разработке технологий повышения эксплуатационных характеристик изделий за счет их поверхностного упрочнения комбинированными методами. Например, такие

разработки известны при сочетании химико-термических методов [1], лазерной [2], плазменной [3], электронно-лучевой [4], виброударной [5] обработок, применяемых для сталей, титановых сплавов [6, 7] и их композиций с другими металлическими материалами.

Одним из эффективных методов поверхностного упрочнения металлических материалов является электромеханическая обработка (ЭМО), основанная на совместном электротермическом и деформационном воздействии [8]. Являясь по своей сути комбинированным методом, ЭМО зачастую применяется в едином комплексе с другими способами модификации материалов [9], что позволяет наиболее полно реализовать потенциал их физико-механических и эксплуатационных характеристик. В ряде публикаций рассматриваются комбинированные технологии ЭМО в сочетании с поверхностным пластиче-

ским деформированием [10], ударной обработкой [11], фрикционным упрочнением [12], плазменным напылением [13, 14] и др.

Усложнение технологического процесса в таких случаях должно компенсироваться сокращением числа основных операций термической и финишной обработок, а также достижением наиболее полного комплекса требуемых свойств материала при минимизации затрат на дополнительное оборудование, оснастку и подготовку поверхности. В данной работе это обеспечивается комбинацией методов ЭМО и безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО), позволяющих гибко управлять характеристиками качества поверхности изделия. Проводятся исследования металлографической структуры и свойств поверхностного слоя сталей, упрочненных данным способом.

Комбинированная обработка состоит в последовательном проведении операций ЭМО и БУФО.

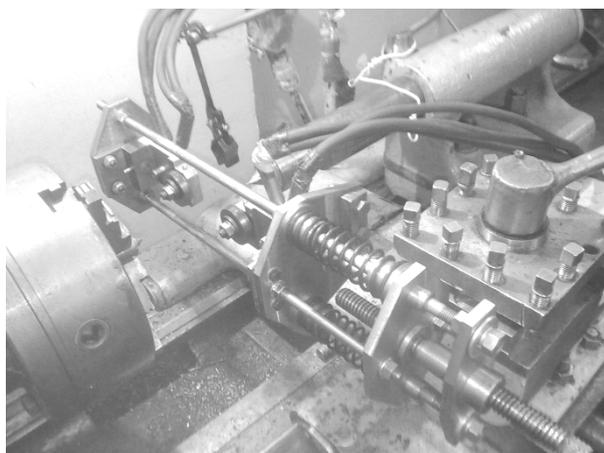
ЭМО заключается в контактном воздействии на локальную зону поверхности материала удельным давлением 100–1500 МПа и одновременной ее термической обработке при высоких скоростях нагрева и охлаждения до 10^5 °C/с за счет пропуска электрического тока плотностью 200–1000 А/мм² (рис. 1, а) [8]. В качестве электрод-инструмента применяются конические

ролики из твердого сплава ВК6С диаметром 60 мм, с углом заточки 3–5° и цилиндрической «ленточкой» контакта 0,5–0,7 мм.

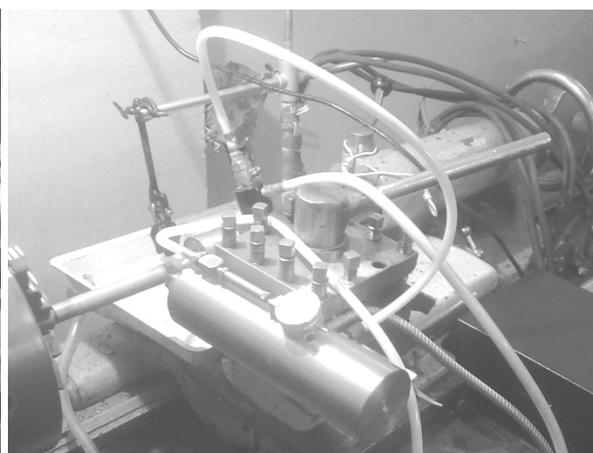
При БУФО излучатель ультразвука, колеблющийся с частотой 22 кГц, поджимается твердосплавным рабочим наконечником к поверхности детали с усилием до 1000 Н (рис. 1, б) [15]. Материал в зоне контакта пластически деформируется, происходит сглаживание вершин микронеровностей и упрочнение приповерхностного слоя с формированием сжимающих остаточных напряжений.

Технологии реализованы на токарном станке типа 16К20, перенастройка метода осуществляется путем смены инструментального приспособления в резце-держателе (рис. 1).

Использовались цилиндрические образцы из указанных материалов диаметром 15 мм и длиной 150 мм. При помощи рассматриваемых технологий на поверхности образца создавались участки, обработанные по каждому из методов: 1 – ЭМО, 2 – БУФО, 3 – ЭМО+БУФО, а также 4 – участок исходного (необработанного) материала. На каждом из участков вырезались поперечные шлифы для изучения структуры и микротвердости материала по глубине поверхностного слоя. Параметры шероховатости определялись с внешней обработанной поверхности образцов.



а



б

Рис. 1. Вид рабочей зоны при ЭМО (а) и БУФО (б) с установленным на токарном станке инструментальным приспособлением

В табл. 1 представлены основные режимы (скорость обработки V , подача S , плотность тока j , деформирующее усилие F) ЭМО и последующей БУФО для двух исследованных материалов – сталь 40, сталь Р6М5.

При исследовании использовалось следующее оборудование: профилограф-профилометр ПМ-7, лазерный микроскоп Olympus LEXT OLS 3000 (Западно-Чешский университет), микротвердомер ПМТ-3М.

Таблица 1

Режим	Сталь 40		Сталь Р6М5	
	ЭМО	БУФО	ЭМО	БУФО
V , м/мин	0,61	6,74	0,61	6,74
S , мм/об	0,2	0,8	0,5	0,2
j , А/мм ²	400	–	600	–
F , Н	100	100	160	100

Изучение микроструктуры образцов, упрочненных по указанной схеме, проводилось после каждого из этапов комбинированной обработки.

Полученные результаты свидетельствуют, что ультразвуковое воздействие по использованным режимам не оказывает заметного влияния на строение поверхностного слоя стальных

образцов (рис. 2, а). Структура металла после БУФО остается неизменной по глубине обработанной поверхности и соответствует исходному состоянию до обработки.

ЭМО сопровождается высокоскоростной закалкой поверхностного слоя стальных образцов (на глубину до 0,2–0,3 мм) с образованием бесструктурного мартенсита – гарденита, отличающегося повышенной твердостью и низкой травимостью (белый слой) [16].

Ультразвуковая обработка, проведенная после ЭМО, как и в случае с исходно неупрочненным материалом, не приводит к видимым изменениям в структуре металла (рис. 2, б) – строение упрочненного «белого слоя» после ЭМО и ЭМО+БУФО идентично.

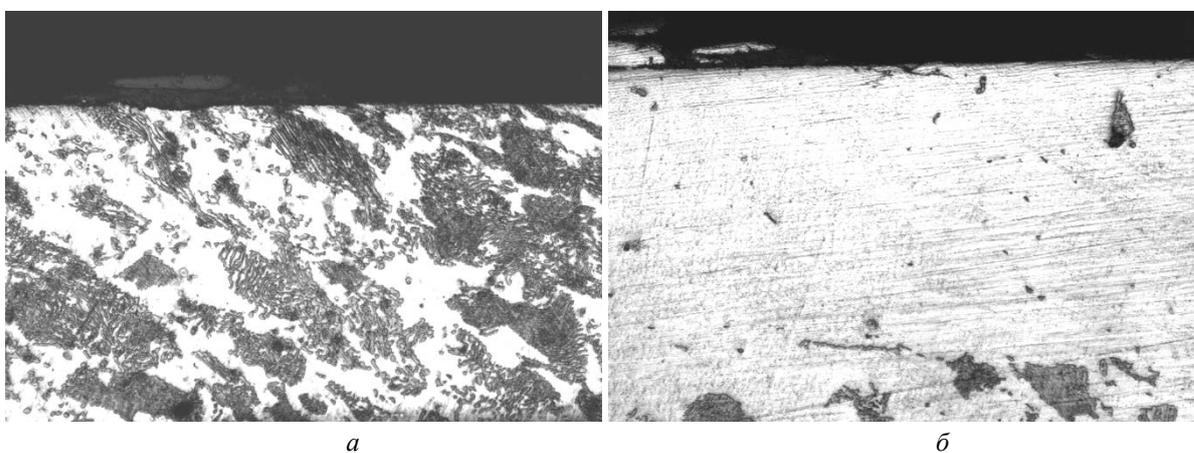


Рис. 2. Микроструктура поверхности образцов из нормализованной стали 40 после БУФО (а) и ЭМО+БУФО ($\times 2400$, лазерный микроскоп) (б)

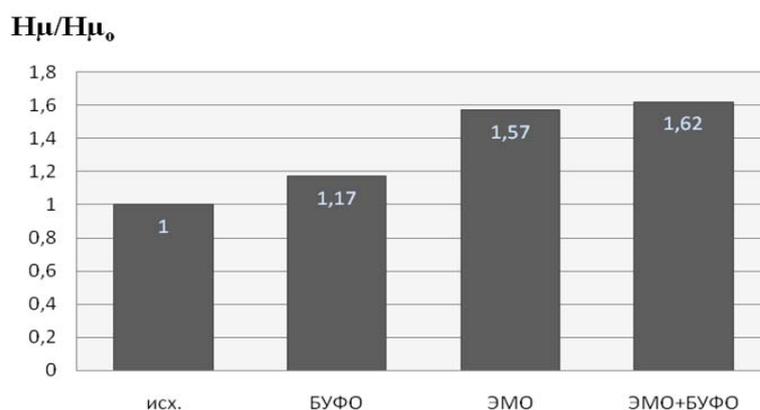


Рис. 3. Относительное изменение средней микротвердости поверхностного слоя образцов стали в исходном состоянии (исх.), после ультразвуковой (БУФО), электромеханической (ЭМО), и комбинированной (ЭМО+БУФО) обработок

На рис. 3 показано относительное изменение микротвердости поверхностного слоя стальных (на примере стали Р6М5) образцов после

ультразвуковой, электромеханической и комбинированной обработок.

После БУФО микротвердость поверхности

стальных образцов возрастает примерно на 17 % в связи с механическим упрочнением (наклепом) металла.

Высокоскоростная закалка стали в ходе ЭМО приводит к росту микротвердости от 40–60 % (для быстрорежущей стали, а также сталей в исходно закаленном состоянии) до 3–4 раз (для нормализованных средне- и высокоуглеродистых сталей).

При этом БУФО, проведенная после ЭМО, дополнительно повышает микротвердость не более чем на 5 % по сравнению с твердостью после ЭМО (рис. 3). Это объясняется исчерпанием возможностей деформационных механизмов упрочнения материала после ЭМО.

Результаты исследования микрогеометрии поверхности образцов показали (табл. 2), что в результате БУФО исходной поверхности среднее отклонение профиля R_a (на базовой длине 0,25 мм) снижается в 4 раза (с 0,47 мкм до

0,11 мкм, 11 класс), высота неровностей R_z – в 5 раз (с 2,61 до 0,47 мкм), наибольшая высота профиля R_{max} – в 4 раза (с 3,47 до 0,71 мкм).

Таблица 2

Параметры	исх.	БУФО	ЭМО	ЭМО+БУФО
R_{a2} , мкм	0,47	0,11	1,49	0,2
R_{z2} , мкм	2,61	0,47	6,57	3,47
R_{max} , мкм	3,47	0,71	11,49	10,51

После ЭМО исходной поверхности наблюдается образование высоких пиков неровностей на границе соседних треков, чередующихся с канавками (рис. 4), выдавленными в зоне контакта инструмента с поверхностью в ходе горячей пластической деформации металла. Это ведет к увеличению шероховатости поверхности почти в 4 раза (табл. 2).

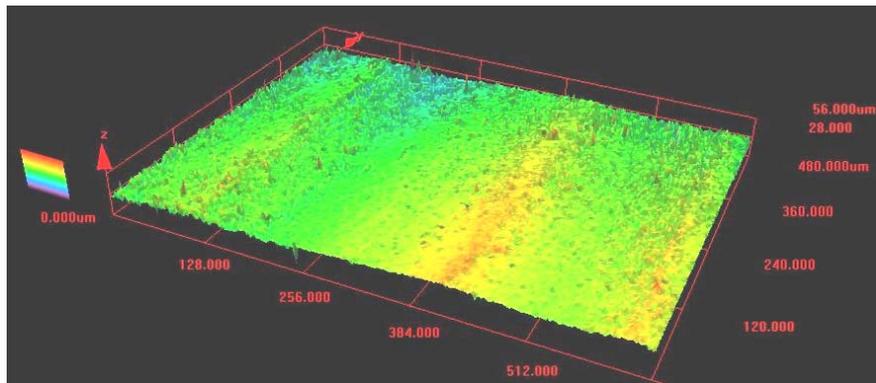


Рис. 4. 3D-профилограммы (лазерный микроскоп) поверхности образца из стали 40 после ЭМО

Ультразвуковая обработка, проведенная после ЭМО, позволяет снизить параметр R_a в 7 раз (с 1,49 до 0,2 мкм, 10 класс), R_z – в 2 раза (с 6,57 до 3,47 мкм), при этом максимальная высота неровностей R_{max} снижается менее чем на 10 % (с 11,49 до 10,51 мкм).

Для сталей основную роль в формировании уникальных характеристик поверхности играют процессы высокоскоростной термической обработки, приводящие к образованию специфических ультрадисперсных мартенситных структур. Образующийся высокопрочный поверхностный слой практически не поддается пластическим деформациям и механическому упрочнению при последующих нагружениях. В этой связи ультразвуковая обработка, проведенная после ЭМО, не приводит к существенным изменениям в структуре и микротвердости упрочненного поверхностного слоя стальных образцов. Основной эффект от применения ульт-

развукового воздействия заключается в повышении качества поверхности за счет выглаживания микронеровностей. На неупрочненной поверхности достигается снижение среднего отклонения профиля до 4 раз; на упрочненной ЭМО – до 7 раз. Однако во втором случае уменьшение параметра R_a происходит в результате сглаживания микровыступов, тогда как максимальный размер неровностей R_{max} остается практически неизменным. Это связано с наследованием после БУФО макрорельефа, полученного в ходе ЭМО при горячем выдавливании деформирующим инструментом на поверхности металла винтовой канавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров, В. А. Комбинированный технологический способ ХТО для поверхностного упрочнения сталей / В. А. Александров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2010. – № 5. – С. 27–31.

2. Чудина, О. В. Комбинированное поверхностное упрочнение углеродистых сталей лазерным легированием с последующим азотированием / О. В. Чудина, В. А. Александров, А. А. Брежнев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 4. – С. 33–37.
3. Гиржон, В. В. Структура и свойства поверхностных слоев железоуглеродистых сплавов после комбинированной лазерно-плазменной обработки / В. В. Гиржон, Т. А. Дмитренко // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 5. – С. 37–42.
4. Zenker, R. Electron meets nitrogen: combination of electron beam hardening and nitriding / R. Zenker // International Heat Treatment & Surface Engineering. – 2009. – Vol. 3, No. 4. – P. 141–146.
5. Болдырев, А. И. Упрочнение материалов виброударным и комбинированными методами с предшествующей электрохимической обработкой / А. И. Болдырев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 2. – С. 35–38.
6. Surface Hardening Treatment for Titanium Materials Using Ar-5 % CO Gas in Combination with Post Heat Treatment under Vacuum / Y. Z. Kim, T. Konno, T. Murakami, T. Narushima, C. Ouchi // Materials Transactions. – 2009. – Vol. 50, No. 12. – P. 2763–2771.
7. Dabala, M. Surface Hardening of Ti–6Al–4V Alloy Using Combined Electroless Ni–B Plating and Diffusion Treatments / M. Dabala, A. Variola, M. Magrini // Surface Engineering. – 2001. – Vol. 17, No. 5. – P. 393–396.
8. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация / В. П. Багмутов, С. Н. Паршев, Н. Г. Дудкина, И. Н. Захаров. – Новосибирск : Наука, 2003. – 318 с.
9. Эдигаров, В. Р. Классификация комбинированных методов обработки на основе электромеханического упрочнения / В. Р. Эдигаров, И. Ю. Килунин, В. В. Дегтярь // Современные наукоемкие технологии. – 2012. – № 3. – С. 32–35.
10. Дудкина, Н. Г. Исследование характеристик деформационного упрочнения стальных образцов, обработанных ЭМО+ППД / Н. Г. Дудкина, А. А. Садовин // Металлообработка. – 2012. – № 1. – С. 37–40.
11. Матлин, М. М. Особенности формирования упрочненного слоя при электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием / М. М. Матлин, Н. Г. Дудкина, А. Д. Дудкин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 6. – С. 38–40.
12. Комбинированное фрикционно-электрическое модифицирование стальных поверхностей трения / Ю. К. Машков, В. Р. Эдигаров, М. Ю. Байбарацкая, З. Н. Овчар // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 3. – С. 89–92.
13. Исследование структуры и свойств наноматериалов, полученных комбинированной обработкой / В. П. Багмутов, В. И. Калита, И. Н. Захаров, А. Ю. Иванников, Е. Б. Захарова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – Т. 10. – С. 102–106.
14. Упрочнение плазменных покрытий электромеханической обработкой / В. П. Багмутов, В. И. Калита, И. Н. Захаров, Д. И. Комлев, А. Ю. Иванников // Физика и химия обработки материалов. – 2008. – № 1. – С. 38–42.
15. Холопов, Ю. В. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка металлов / Ю. В. Холопов, А. Г. Зинченко, А. А. Савиных. – Л. : ЛДНТП, 1988. – 18 с.

УДК 66.063.8

А. А. Шагарова, Т. Б. Дорохина, М. В. Даниличева

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ
КОНСТРУКТИВНЫХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БЫСТРОХОДНОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ МЕШАЛОК
НА ИНТЕНСИВНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ**

Волгоградский государственный технический университет

Разработана методика экспериментальных исследований и проведен комплексный анализ влияния конструктивных и кинематических характеристик быстроходной и комбинированной мешалок на интенсивность и эффективность перемешивания жидких гетерогенных систем.

Ключевые слова: жидкие гетерогенные системы, перемешивание, механические перемешивающие устройства, быстроходная и комбинированная мешалки, интенсивность и эффективность перемешивания.

A. A. Shagarova, T. B. Dorokhina, M. V. Danilicheva

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE HIGH-SPEED
AND COMBINED STIRRERS DESIGN AND KINEMATIC
CHARACTERISTICS ON THE MIXING INTENSITY AND EFFECTIVENESS**

Volgograd State Technical University

The procedure of experimental studies is developed and the complex analysis of the influence high-speed and combined stirrers design and kinematic characteristics on mixing intensity and effectiveness of liquid heterogeneous systems is carried out.

Keywords: liquid heterogeneous systems, mixing, mechanical mixing devices, high-speed and combined stirrers, mixing intensity and effectiveness.

Перспективным направлением при перемешивании жидких сред является использование нового поколения оборудования, которое по-

зволяет увеличивать турбулизацию и циркуляцию потоков при одновременном снижении энергопотребления и металлоемкости [1, 2].

Для увеличения интенсивности и эффективности перемешивания высоковязких неньютоновских жидкостей, растворов, эмульсий и суспензий по всей высоте аппарата на кафедре ПАХП ВолгГТУ разработаны конструкции комбинированных смесителей [3–5].

Равномерное распределение перемешиваемой среды по всему объему аппарата обеспечивается комбинированной мешалкой, особенность конструктивного исполнения которой состоит в сочетании тихоходной и быстроходной мешалок. Кроме того, предлагаемые конструкции комбинированного смесителя обладают эффектом саморегулирования числа оборотов тихоходной мешалки, а значит самопроизвольные колебания (флуктуации) уровня перемешиваемой среды в смесителе не будут оказывать влияние на эффективность перемешивания [6].

Целью работы является разработка методики экспериментальных исследований и проведение комплексного анализа влияния конструктивных и кинематических характеристик быстроходной и комбинированной мешалок на интенсивность и эффективность перемешивания.

Экспериментальные исследования проводились на базе перемешивающего устройства ES-8300D, имеющем несколько сменных валов, на которые устанавливались быстроходная пропеллерная мешалка и разработанная комбинированная мешалка, описание конструкции которой приводится в литературе [5–7].

В качестве рабочих жидкостей использовались: вода и подсолнечное масло, практически несмешиваемые жидкости, в соотношении 1:1. Конечным продуктом перемешивания является эмульсия.

Получение устойчивой эмульсии зависит от интенсивности и времени перемешивания. В качестве параметра, характеризующего интенсивность перемешивания, может быть использован критерий Рейнольдса.

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot d_m^2}{\mu}, \quad (1)$$

ρ – плотность эмульсии, кг/м³; n – число оборотов мешалки, с⁻¹; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; d_m – диаметр мешалки, м.

Критерий мощности мешалки K_N :

$$K_N = \frac{N}{\rho \cdot n^3 \cdot d_m^5}, \quad (2)$$

где N – мощность, затрачиваемая на перемешивание, Вт.

Интегральной характеристикой интенсивности процесса перемешивания в аппарате слу-

жит коэффициент интенсивности [8], определяемый по формуле (3):

$$I = \frac{N}{V}, \quad (3)$$

где V – объем перемешиваемой жидкости, м³.

Для оценки эффективности перемешивания вводится коэффициент эффективности перемешивания, определяемый по формуле (4):

$$\Theta = \frac{\tau_{\text{пол}}}{\tau_{\text{эт}}}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{пол}}$ – время расслоения исследуемой эмульсии, с; $\tau_{\text{эт}}$ – время расслоения эталонной эмульсии, с.

Методика проведения эксперимента

1. В емкость для перемешивания заливаются исходные вещества: подсолнечное масло и вода в заданном объеме. Соотношение 1:1.

2. Устанавливается мешалка в патрон.

3. На блоке питания задается частота вращения вала двигателя.

4. Измеряется напряжение в сети и сила тока до начала перемешивания.

5. Включается двигатель мешалки и ведется процесс перемешивания до получения устойчивой эмульсии.

6. Фиксируются показания мультиметра.

7. Показания снимаются при пяти различных числах оборотов мешалки.

8. Готовится эталонная эмульсия при перемешивании на пропеллерной мешалке при следующих режимах: число оборотов вала мешалки – 1500 об/мин, время перемешивания 10 мин.

9. Определяется эталонное время расслоения эмульсии – $\tau_{\text{э}}$.

10. Определяются физические параметры эмульсии: плотность и коэффициент динамической вязкости.

11. Определяется критерий Рейнольдса.

12. Определяется мощность, расходуемая на перемешивание N .

13. Вычисляется критерий мощности K_N .

14. Обработываются экспериментальные данные в виде графических зависимостей $N = f(n)$ и $K_N = f(Re)$.

15. Рассчитываются коэффициенты эффективности и интенсивности

16. Обработываются графические зависимости эффективности от интенсивности $\Theta = f(I)$.

Была проведена серия опытов с различными объемами исследуемой среды и при различных оборотах мешалки. В ходе опыта для каждого

объема исследуемой жидкости определено время расслоения эмульсии.

Экспериментальные и расчетные данные приведены в табл. 1 и 2.

Время расслоения эталонной эмульсии, полученное пропеллерной мешалкой: $\tau_{\text{эт}} = 28,23$ мин.

Таблица 1

**Результаты исследований
для пропеллерной мешалки**

Число оборотов мешалки, об/мин	Объем перемешиваемой жидкости V , мл			
	400	500	750	900
	Значение силы тока $I \cdot 10^{-3}$, А			
250	14,15	14,35	14,55	15,12
500	21,05	21,75	22,35	23,14
750	23,55	24,65	25,35	26,24
1000	26,95	28,35	29,15	29,92
Значение мощности N , Вт				
250	3,29	3,34	3,39	3,52
500	4,90	5,07	5,2	5,39
750	5,49	5,74	5,91	6,11
1000	6,28	6,61	6,78	6,97
Время расслоения эмульсии τ , мин				
250	9,15	7,38	6,18	5,19
400	17,8	15,30	13,55	7,10
750	20,18	19,21	17,15	9,30
1000	22,56	21,53	20,31	11,07

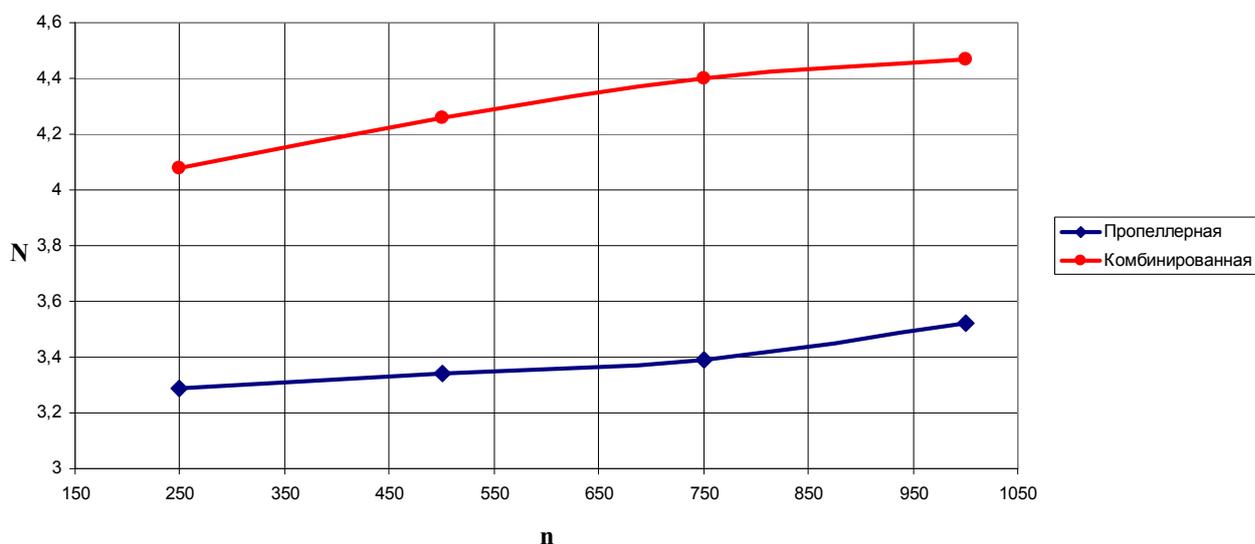
Значение напряжения в сети: $U = 233$ В.

Время расслоения эталонной эмульсии, полученной комбинированной мешалкой: $\tau_{\text{эт}} = 32,3$ мин.

Таблица 2

**Результаты исследований
для комбинированной мешалки**

Число оборотов мешалки, об/мин	Объем перемешиваемой жидкости V , мл			
	400	500	750	900
	Значение силы тока $I \cdot 10^{-3}$, А			
250	17,5	18,3	18,9	19,2
500	24,06	24,85	25,6	26,13
750	25,54	26,32	26,87	28,89
1000	29,85	30,69	31,25	32,41
Значение мощности N , Вт				
250	4,08	4,26	4,40	4,47
500	5,61	5,79	5,96	6,09
750	6,61	6,13	6,26	6,73
1000	6,96	7,15	7,28	7,55
Время расслоения эмульсии τ , мин				
250	16,53	14,57	12,43	8,50
400	25,36	22,99	20,54	13,55
750	28,36	24,32	22,44	16,21
1000	28,94	26,58	25,36	19,45

Рис. 1. График зависимости мощности от числа оборотов ($V = 400$ мл)

По полученным данным построены графики зависимости мощности, затраченной на перемешивание от числа оборотов мешалки для объемов $V = 400$ мл и 900 мл (рис. 1, 2).

Сравнительный анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 1 и 2, показывает, что мощность, затрачиваемая на перемешивание объема в 400 мл, возрастает на 15–20 %.

а при перемешивании объема в 900 мл увеличивается на 10–12 % при использовании комбинированной мешалки.

Зависимости критерия мощности от критерия Рейнольдса $K_N = f(Re)$ представлены на рис. 3, 4.

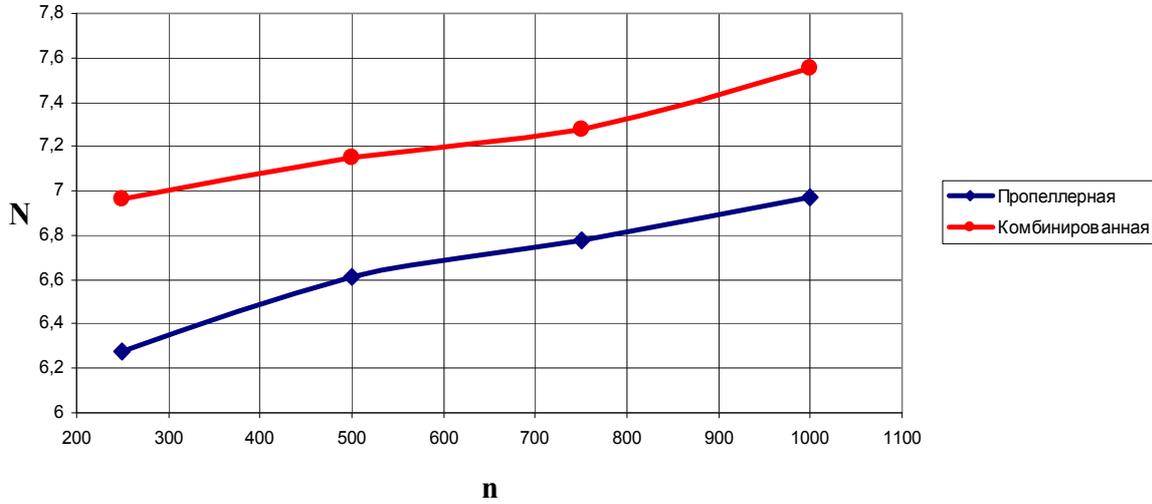


Рис. 2. График зависимости мощности от числа оборотов ($V = 900$ мл)

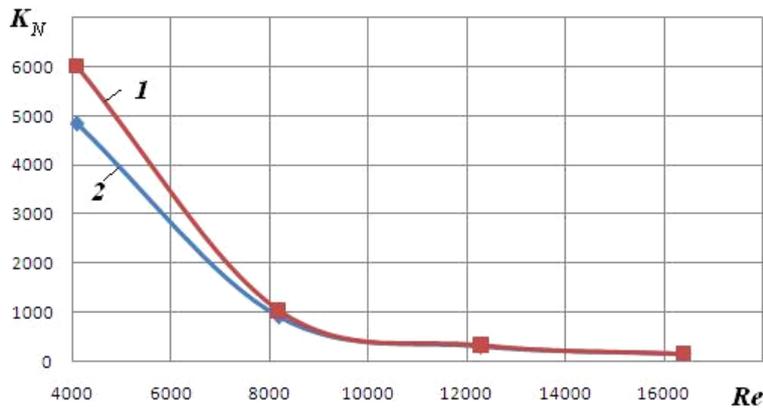


Рис. 3. График зависимости критерия мощности от числа Рейнольдса ($V = 400$ мл):
1 – комбинированная мешалка; 2 – пропеллерная мешалка

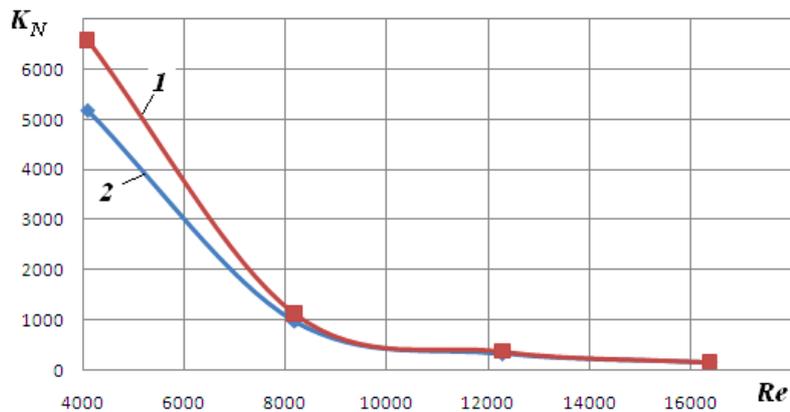


Рис. 4. График зависимости критерия мощности от числа Рейнольдса ($V = 900$ мл)

Совмещенный график зависимости коэффициента эффективности от коэффициента интенсивности для пропеллерной и комбинированной мешалок во всем диапазоне изменения числа оборотов мешалок представлен на рис. 5.

Совмещенный график зависимости коэффициента эффективности от коэффициента интенсивности для пропеллерной и комбинированной мешалок во всем диапазоне изменения числа оборотов мешалок представлен на рис. 5.

Проведенные экспериментальные исследования влияния конструктивных и кинематических характеристик быстроходной пропеллерной и комбинированной мешалок на потребляемую мощность, интенсивность и эффективность перемешивания показали:

– с ростом отношения высоты жидкости к диаметру аппарата затраты мощности комбинированной и обычной мешалками становятся одинаковыми, так при $H/d = 1$ отношение этих мощностей имеет значение 1,2, а при $H/d = 2,25$ отношение мощностей составляет $1,05 \div 1,07$. Это объясняется тем, что зона перемешивания сосредотачивается вокруг высокоскоростной пропеллерной мешалки, затраты мощности тихоходной рамной мешалки с увеличением высоты жидкости возрастают незначительно;

– с ростом интенсивности перемешивания устойчивость эмульсии, образующейся при перемешивании комбинированной мешалкой, возрастает при интенсивности $6,0 \text{ кВт/м}^3$ на $20 \div 25 \%$, а при значении интенсивности 15 кВт/м^3 увеличивается на $10 \div 12 \%$.

– работа комбинированной мешалки эффективнее простой пропеллерной, но ее использование целесообразно для перемешивания больших объемов жидкости, т.к. перемешивание малых объемов жидкости не дает высоких результатов эффективности в сравнении с обычной мешалкой. Как следует из рис. 5, при значении коэффициента эффективности $\Theta = 0,45$ устойчивость эмульсии повышается на $20 \div 25 \%$, а для достижения одинакового результата для обычной мешалки необходимо повысить мощность в 1,5 раза.

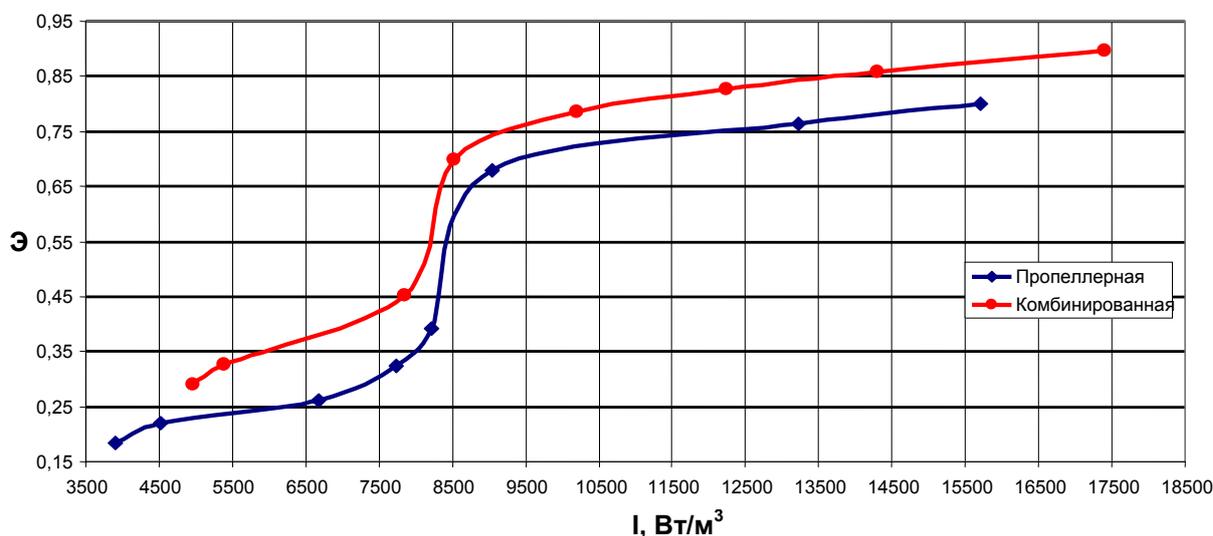


Рис. 5. График зависимости коэффициента эффективности от коэффициента интенсивности

Таким образом, комбинированные мешалки целесообразно применять для перемешивания жидкостей средней вязкости (до 100 сПз или $0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$) при удельных затратах мощности до $7,5 \text{ кВт/м}^3$ и числе оборотов быстроходной пропеллерной мешалки $200 \div 500 \text{ об/мин}$.

Комбинированные мешалки могут найти применение в ряде современных технологий при проведении химических процессов в жидкофазных реакторах. Комбинированный смеситель несложно установить как на вновь проектируемые аппараты, так и на находящиеся в эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перемешивание и аппараты с мешалками / Ф. Стренк; под ред. И. А. Шупляка. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.

2. Бальмонт, С. Д. Степень и интенсивность как основные параметры перемешивания жидких и гетерогенных сред / С. Д. Бальмонт, П. П. Гуюмджян, Т. М. Бальмонт // Современный наукоемкие технологии: сб. науч. ст. / Ивановский государственный технический университет. – Иваново, 2010. – № 1. – С. 48–50.

3. П. м. 119640 РФ, МПК В 01 F 7/16. Смеситель / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Г. И. Осауленко, А. А. Шагарова, М. В. Коржова, В. В. Миняло; ВолГТУ. – 2012.

4. П. м. 127325 РФ, МПК В01F7/16. Смеситель / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, А. А. Шагарова, М. В. Даниличева, А. Г. Шульгина, М. Е. Кисиль; ВолГТУ. – 2013.

5. П. м. 121454 Российская Федерация, МКП В 01F7/124. Смеситель / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, М. В. Даниличева, А. Г. Шульгина, Е. В. Васильева; ВолГТУ. – 2013.

6. Разработка комбинированных смесителей для перемешивания жидких гетерогенных систем / А. Б. Голованчиков, А. А. Шагарова, Н. А. Дулькина, М. В. Даниличева //

Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(104) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии» ; вып. 6). – С. 94–99.

7. Голованчиков, А. Б. Исследование работы комбинированной мешалки с дополнительной вибрацией / А. Б. Голованчиков, А. А. Шагарова, М. В. Даниличева // России – творческую молодежь : матер. I Всероссийской науч.-

практ. студ. конф., г. Камышин, 22–23 мая 2013 г. В 4 т. Т. 4 / КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 25–26.

8. Бальмонт, С. Д. Исследования механизмов процесса перемешивания жидких сред / С. Д. Бальмонт, П. П. Гуюмджян, Т. М. Бальмонт // Современные наукоемкие технологии : сб. науч. ст. / Ивановский государственный технический университет. – Иваново, 2009. – № 3. – С. 65–67.

УДК 621.64

А. Б. Дулькин, Б. А. Дулькин**, А. Б. Голованчиков****

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЗАМЕРЗАНИЯ ВОДЫ В ТРУБОПРОВОДЕ

*ОАО «Атомэнергопроект» Волгоградский проектный филиал
 **Московский энергетический институт (Технический университет)
 ***Волгоградский Государственный технический университет

Проведено математическое моделирование стационарного процесса охлаждения и замерзания воды в трубопроводе, покрытом слоем изоляции. Составлен алгоритм, программа и приведен пример расчета времени охлаждения воды от 4 до 0 °С и времени замерзания части воды, когда плотность воды и льда уменьшается и возникает опасность разрыва трубопровода при их объемном расширении.

Ключевые слова: время охлаждения, время замерзания, относительная деформация, напряжения в стенке трубопровода.

A. B. Dulkin, B. A. Dulkin**, A. B. Golovanchikov****

ASSESSMENT OF TIME OF FREEZING OF WATER IN THE PIPELINE

*JSC «Atomenergoproekt» Volgograd design branch
 ** Moscow Power Engineering Institute (Technical University)
 ***Volgograd State Technical University

Mathematical modeling of stationary process cooling and freezing in the pipeline is covered with insulating sheet. An algorithm, the program and the example of calculation of time cooling water from 4 to 0 °С and time of freezing of the water, when the density of the water and the ice is reduced, and there arises the danger of a pipeline rupture in their volumetric expansion.

Keywords: the cooling time, the freezing time, relative deformation, tension in the wall pipeline.

В соответствии с нормами проектирования, необходимость применения тепловой изоляции трубопроводов определяется в каждом конкретном случае, в зависимости от свойств транспортируемых веществ, места и способа прокладки трубопровода, требований технологического процесса и требований безопасности труда и взрывопожаробезопасности. Тепловой изоляции трубопроводы подлежат в следующих случаях:

– при необходимости предупреждения и уменьшения тепло- или холодопотерь (для сохранения температуры, предотвращения конденсации, образования ледяных, гидратных или иных пробок и т. п.);

– при температуре стенки трубопровода за пределами рабочей или обслуживаемой зоны выше 60 °С, а на рабочих местах и в обслуживаемой зоне при температуре выше 45 °С – во избежание ожогов;

– при необходимости обеспечения нормальных температурных условий в помещении.

Рассмотрим первый случай, когда необходимо уменьшить потери тепла от трубопровода, прокладываемого на открытом воздухе и исключить замерзание воды в трубопроводе. В некоторых случаях, покрытия трубопровода только лишь слоем теплоизоляции бывает недостаточно и приходится дополнительно применять обогрев трубопровода теплоспутником или с помощью электрообогрева, что приводит к удорожанию его конструкции, монтажа и эксплуатации. Поэтому целесообразно оценить необходимость применения обогрева трубопровода в холодное время года, прокладываемого на открытом воздухе, при эпизодическом заполнении трубопровода водой и последующем его опорожнении. При этом время до опорожнения трубопровода не регламентировано и может составлять до 8 часов (время рабочей смены на предприятии). Определив расчетными методами время замерзания воды в трубопроводе, можно организационными мерами (вписав время в технологический регламент работы

установки) исключить риск разрушения (размораживания) трубопровода замерзшей водой без использования дорогостоящего тепло- или электрообогрева.

Рассмотрим стационарный процесс теплопередачи от воды в трубопроводе через изоляцию к холодному воздуху. Полагаем, что термическое сопротивление теплоизоляции много больше термических сопротивлений теплоотдачи от воды к стенке трубопровода, ржавчины внутри и снаружи трубы и теплоотдачи от теплоизоляции к воздуху. В этом случае дифференциальное уравнение теплопередачи для цилиндрической однослойной изоляции имеет вид [1]

$$dQ = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (t_w - t_a) \cdot L}{\ln(d_n/d_e)} d\tau, \quad (1)$$

где L – длина трубопровода.

Дифференциальное уравнение теплового баланса для охлаждающейся воды может быть записано в виде

$$dQ = \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \cdot L \cdot \rho_w \cdot C_w dt_w. \quad (2)$$

Приравняв правые части уравнений (1) и (2) и разделяя переменные, получаем после интегрирования по параметру – времени выражение

$$\tau_w = \left(\frac{\rho_w \cdot C_w \cdot D_T^2}{8 \cdot \lambda} \right) \cdot \ln \left(\frac{D_n}{D_e} \right) \cdot \ln \left(\frac{t_{wh} - t_a}{t_{wk} - t_a} \right). \quad (3)$$

Определим время замерзания всего объема воды, находящейся в трубопроводе при 0°C [2].

Дифференциальное уравнение теплопередачи (1) преобразуется к виду

$$Q_3 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (0^\circ - t_a) \cdot L}{\ln(d_n/d_e)} \cdot \tau_3, \quad (4)$$

а уравнение теплового баланса для замерзающей воды

$$Q_3 = \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \cdot L \cdot \rho_w \cdot r_w. \quad (5)$$

Из совместного решения уравнений (4) и (5) получаем формулу для времени замерзания всей воды в трубопроводе

$$\tau_3 = \frac{\rho_w \cdot r_w \cdot D_T^2}{8 \cdot \lambda \cdot (0^\circ - t_a)} \cdot \ln \left(\frac{d_n}{d_e} \right). \quad (6)$$

Тогда суммарное время охлаждения воды до 0°C и ее полного замерзания определяется в виде

$$\tau_0 = \tau_w + \tau_3. \quad (7)$$

Определим напряжение в стенке трубопровода при замерзании в нем всего объема воды.

Объем всей замерзшей воды в трубопроводе с учетом коэффициента объемного расширения при изменении агрегатного состояния превращения воды в лед β составляет [2]

$$V_n = (1 + \beta) \cdot \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \cdot L. \quad (8)$$

Приращение объема замерзшей воды

$$\Delta V_n = V_n - \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \cdot L$$

или с учетом предыдущего выражения

$$\Delta V_n = \beta \cdot \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \cdot L.$$

В этом случае диаметр трубопровода увеличился бы и составил D_n .

Тогда $\frac{\pi \cdot D_n^2}{4} \cdot L - \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \cdot L = \Delta V_n$

или после алгебраических преобразований с учетом предыдущей формулы

$$D_n^2 - D_T^2 = \beta \cdot D_T^2. \quad (9)$$

Удлинение периметра трубопровода при замерзании всей воды составит

$$\Delta = \pi \cdot (D_n - D_T),$$

а относительное удлинение

$$\varepsilon = \frac{(D_n - D_T)}{D_T}, \quad (10)$$

что с учетом уравнения (8) приводит к алгебраическому выражению

$$\varepsilon \cdot (2 + \varepsilon) = \beta, \quad (11)$$

из которого относительная деформация определяется в виде

$$\varepsilon = \sqrt{-1 + \beta} - 1 \quad (12)$$

и с учетом численного значения коэффициента объемного расширения воды в лед при 0°C (см. табл. 1) дает величину

$$\varepsilon = 0,0536.$$

Тогда напряжения в стальной стенке трубопровода составили бы согласно закону Гука

$$\sigma_m = E \cdot \varepsilon = 112560 \text{ кг/см}^2, \quad (13)$$

что значительно больше допускаемых напряжений для стальных труб $[\sigma]$.

Необходимо найти долю α замерзшей в трубопроводе воды, при которой напряжения начинают превышать допускаемые.

Уравнение (8) для доли α объема замерзшей воды в трубопроводе запишется в виде

$$V_\alpha = (1 + \alpha \cdot \beta) \frac{\pi \cdot D_n^2}{4} \cdot L.$$

Тогда уравнение (11) после аналогичных для его вывода математических выкладок приобретает вид

$$\varepsilon \cdot (2 + \varepsilon) = \alpha \cdot \beta. \quad (14)$$

Подставляя в закон Гука (13) допускаемые напряжения $[\sigma]$ получаем выражение для допускаемой относительной деформации [3, 4]

$$[\varepsilon] = [\sigma] / E = \frac{1500}{2,1 \cdot 10^6} = 7,14 \cdot 10^{-4}.$$

Тогда допускаемая доля замерзшей в трубопроводе воды, при которой напряжения в стенке становятся равными допустимым напряжениям, определяются с учетом уравнения (14) выражением

$$[\alpha] = \frac{[\sigma] / E \cdot (2 + [\sigma] / E)}{\beta} \approx 0,013, \quad (15)$$

то есть уже при 1,3 % воды, превращаемой в лед, напряжения в стальной стенке трубопровода становятся равным допустимому напряжению $[\sigma]$.

Уравнение теплового баланса (5) для доли $[\alpha]$ замерзшей воды в трубопроводе запишется в виде

$$Q_\alpha = \alpha \cdot \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \cdot L \cdot \rho_w \cdot r_w, \quad (16)$$

решение которого совместно с уравнением (4) приводит к виду

$$\tau_\alpha = \frac{\alpha \cdot \rho_w \cdot r_w \cdot D_T^2}{8 \cdot \lambda \cdot (t_{\text{вк}} - t_a)} \cdot \ln \left(\frac{d_n}{d_e} \right). \quad (17)$$

Ниже в табл. 1 для примера представлены исходные и справочные данные, а также фиксированные параметры, рассчитанные по выведенным выше формулам.

Таблица 1

Исходные и справочные данные и расчетные параметры, соответствующие охлаждению и замерзанию воды в трубопроводе

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
Внутренний диаметр трубопровода	м	D_T	$27,6 \cdot 10^{-3}$
Внутренний диаметр изоляции	м	D_e	$32 \cdot 10^{-3}$
Наружный диаметр изоляции	м	D_n	$112 \cdot 10^{-3}$
Плотность воды	кг/м ³	ρ_w	1000
Теплоемкость воды	Дж/кг·К	c_w	4190
Температура воздуха	°С	t_a	см. табл. 2
Начальная температура воды	°С	$t_{\text{вк}}$	4
Температура замерзания воды	°С	$t_{\text{вк}}$	0
Коэффициент теплопроводности теплоизоляции (шлаковата)	Вт/м·К	λ	0,046
Удельная теплота плавления льда	Дж/кг	r_w	$3,34 \cdot 10^5$
Допускаемое напряжение в стальной стенке трубопровода	кг/см ²	$[\sigma]$	1500
Модуль упругости стали	кг/см ²	E	$2,1 \cdot 10^6$
Коэффициент объемного расширения при превращении воды в лед при 0 °С	К ⁻¹	β	0,11
<i>Расчетные параметры</i>			
Время охлаждения воды до температуры замерзания	мин	τ_w	см. табл. 2
Напряжения в стенке трубопровода при замерзании в ней всего объема воды	кг/см ²	σ_m	$1,12 \cdot 10^5$
Допускаемая относительная деформация в стенке трубопровода, при которой напряжения в ней равны допускаемому напряжению в стали	–	$[\varepsilon]$	$7,14 \cdot 10^{-4}$
Допускаемая доля замерзшей в трубопроводе воды, при которой напряжения в стальной стенке становятся равными допускаемому напряжению в стали	–	$[\alpha]$	0,013
Время замерзания допускаемой доли воды при 0 °С, при которой напряжения в стенке становятся равными допускаемому напряжению в стали	мин	τ_α	см. табл. 2
Общее время охлаждения воды и замерзания ее допускаемой доли, при которой напряжения в стенке становятся равными допускаемому напряжению в стали	мин	τ_0	см. табл. 2

В табл. 2 приведены результаты расчетов времени охлаждения всего объема воды в трубопроводе, времени замерзания ее допускаемой

доли, при которой напряжения в стенке трубопровода становятся равными допускаемому напряжению, а также сумма этих времен.

Таблица 2

Результаты расчетов времени охлаждения воды в трубопроводе от 4 °С до 0 °С и времени замерзания допускаемой доли воды [α], при которой напряжения в стенке трубопровода становятся равными допускаемому напряжению в стали, а также суммарное время до размораживания трубопровода в зависимости от температуры окружающего воздуха

Наименование параметра, его обозначение и размерность	Величина параметра						
Температура окружающего трубопровод воздуха (t_a , °С)	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5
Время охлаждения воды в трубопроводе с 4 °С до 0 °С, (τ_w , мин)	25	29	34,3	42,2	54,7	77,8	136
Время замерзания допускаемой доли воды [α], при которой напряжения в стенке трубопровода становятся равными допускаемым напряжениям в стали (τ_a , мин)	6,8	8	9,6	12	16	24	47,9
Время до размораживания трубопровода (суммарное время по строчкам 3 и 4)	31,8	37	43,9	54,2	70,7	101,8	183,9

Таким образом, для указанной конструкции трубопровода (D_w 32, толщина изоляции 40 мм) в заданных климатических условиях (например, при температуре наиболее холодной пятидневки минус 25 °С) имеется возможность не применять тепло- или электрообогрев только в случае гарантированного опорожнения трубопровода в течение 35–40 минут.

Трубопроводы следует прокладывать с уклоном таким образом, чтобы опорожнение трубопровода осуществлялось самотеком. При наличии в трассировке трубопровода мешков и других застойных зон, следует предусматривать в их нижних участках дренажные вентили или опорожнять трубопровод при помощи сжатого воздуха.

Увеличить время до возникновения в трубопроводе допускаемых напряжений [σ] можно, если открыть систему любой арматурой на

трубопроводе и позволить воде, замерзающей в трубопроводе, вытекать, так как лед, образующийся на стенке, будет выдавливать незамерзшую воду, что уменьшает напряжения в стенке и увеличивает время до разрушения трубопровода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 2007. – 587 с.
2. Шавлов, А. В. Лед при структурных превращениях / А. В. Шавлов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 362 с.
3. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1985. – 512 с.
4. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы расчета на прочность. Приложение 1, таблица 5.

УДК 661.183.123.3

А. Б. Голованчиков, Н. С. Шибитов*, Н. В. Шибитова*, Д. А. Баев***

**УДАЛЕНИЕ АНИОНОВ ХЛОРА ИЗ РАСТВОРА КАУСТИКА
В ИОНООБМЕННОЙ КОЛОННЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ**

***Волгоградский государственный технический университет**

****ОАО «ХИМПРОМ»**

Рассмотрена возможность удаления анионов хлора из водного раствора NaOH, получаемого после электролиза и последующего выпаривания в ионообменной колонне непрерывного действия. Получены зависимости основных параметров: коэффициентов внешней массоотдачи и объемной массопередачи, расхода ионита, высоты слоя частиц и удельного объема очищаемого раствора от диаметра колонны.

Ключевые слова: анионообмен, ионы хлора, ионит в OH-форме, раствор NaOH.

A. B. Golovanchikov, N. S. Shibitov*, N. V. Shibitova*, D. A. Baev***

**REMOVAL ANIONS CHLORINE FROM A SOLUTION CAUSTIC
IN ION EXCHANGE TO A COLUMN OF CONTINUOUS ACTION**

***Volgograd state technical university**

****Open joint-stock company «CHIMPROM»**

The possibility of removal anions chlorine from the water solution NaOH, received after electrolysis and the subsequent evaporation in ion exchange to a column of continuous action is considered. Dependences of key parameters are received: coefficients of the external mass transfer and volume mass transfer, the consumption of ionite, heights of a layer of particles and specific volume of a cleared solution from diameter of a column.

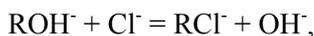
Keywords: anion exchange, ions of chlorine, ionite in the OH-form, a solution NaOH.

При электролизе поваренной соли и выпаривания водного раствора NaOH в нем остается исходный сырьевой компонент NaCl с массовым содержанием анионов хлора до 3 % [1, 2].

Дополнительными технологическими операциями, включающими кристаллизацию, содержание анионов хлора доводят до 0,5 % массовых, допускаемых в товарном каустике по регламенту. Однако эти операции требуют больших дополнительных энерго- и трудозатрат, что приводит к удорожанию готового продукта.

Целью работы является оценка возможности удаления ионов хлора из раствора каустика в процессе ионообмена в колонне непрерывного действия.

Для удаления избыточной концентрации анионов хлора в щелочном растворе можно применить ионообмен, причем использовать анионит в OH-форме. В этом случае реакция обмена имеет вид [3]



то есть из раствора удаляются анионы хлора, а в раствор переходят анионы OH⁻, которые способствуют увеличению концентрации щелочи в готовой продукции.

Рассмотрим физическую и математическую модели ионообменной колонны непрерывного действия.

Выделим кольцевой слой ионита высотой dz между сечениями I-II (рис. 1), обозначения и размерности параметров представлены в табл. 1.

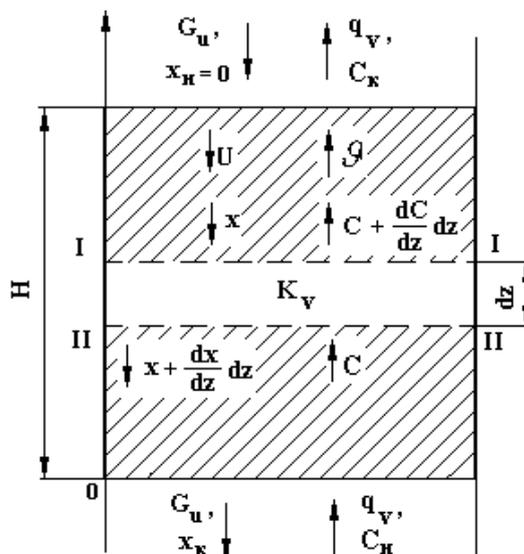


Рис. 1. Схема распределения концентраций и скоростей анионов хлора по высоте движущегося слоя ионита в растворе и частицах ионита при противоточном движении частиц ионита и раствора

Тогда элементарный материальный баланс по анионам хлора будет иметь вид [4-6]

$$+G_u dx = +q_v dC,$$

которое после интегрирования по параметрам

$$G_u \int_{x_H}^x dx = +q_v \int_{C_K}^C dC,$$

приводит к уравнению рабочей линии

$$G_u(x-x_H) = q_v(C-C_K) \tag{1}$$

Так как при $C = C_n$, $x = x_k$ получаем уравнение для определения расхода ионита

$$G_u = \frac{q_v(C_n - C_k)}{x_k - x_n}$$

При $x_n = 0$

$$G_u = \frac{q_v(C_n - C_k)}{x_k} \quad (2)$$

Сама рабочая линия описывается уравнением связи текущих концентраций в ионите x и растворе C (рис. 2, прямая 1)

$$x = \frac{q_v(C_n - C_k)}{G_u} \quad (3)$$

а равновесная линия для процесса ионообмена описывается уравнением, аналогичным формуле для изотермы Ленгмюре при абсорбции

$$C^* = \frac{x}{a - bx} \quad (4)$$

где $a = \frac{K_p x_o}{C_n}$, $b = \frac{(K_p - 1)}{C_n}$; x_o – полная обменная емкость анионита, кг/кг; K_p – константа равновесия анионита.

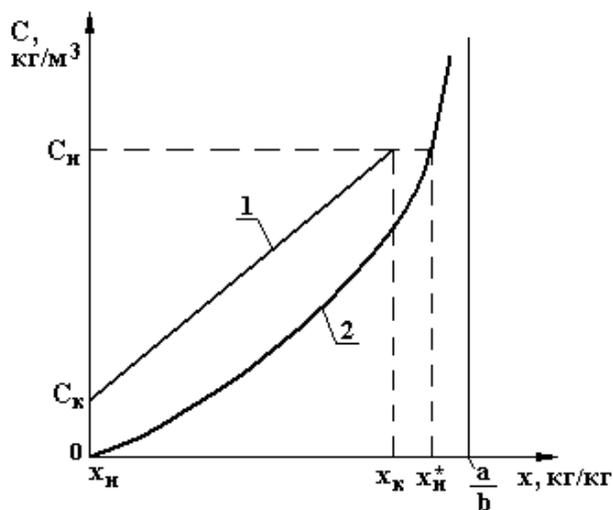


Рис. 2. Рабочая (1) и равновесная (2) линии ионообмена в колонне непрерывного действия

Составим дифференциальное уравнение для массопередачи в элементарном слое ионита высотой dz (рис. 1)

$$C \vartheta S = (C - \frac{\partial C}{\partial z} dz) \vartheta S + K_v S dz (C - C^*),$$

которое после алгебраических преобразований и разделения переменных принимает вид

$$dz = \frac{\vartheta}{K_v} \frac{dC}{C - C^*}.$$

Откуда высота движущегося сверху вниз слоя ионита описывается интегральным выражением

$$H = \frac{\vartheta}{K_v} \int_{C_k}^{C_n} \frac{dC}{C - C^*} \quad (5)$$

Объемный расход ионита описывается формулой

$$V_u = \frac{G}{\rho_n}$$

Тогда из уравнения неразрывности для части ионита получаем фиктивную скорость движения частиц ионита в слое

$$U = \frac{V}{S}$$

и время пребывания частиц в слое

$$\tau = \frac{H}{U}.$$

Расчеты коэффициентов поверхностной внешней массоотдачи β_y и объемной массопередачи K_v осуществляются по известным формулам [3, 4]

$$Sh = 2 + 1,5(Sc)^{1/3} \sqrt{(1 - \epsilon_0) Re}.$$

Из числа Шервуда находится поверхностный коэффициент внешней массоотдачи

$$\beta_c = \frac{Sh D_c}{d_3},$$

а затем объемный коэффициент массопередачи

$$K_v = \frac{G \beta_y (1 - \epsilon_0)}{d_3}.$$

Были проведены расчеты ионообменных колонн непрерывного действия для удаления анионов хлора из водного раствора NaOH по исходным данным, приведенным в табл. 1.

В табл. 2 представлены результаты расчетов основных параметров ионообменных колонн в зависимости от их диаметра.

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина								
10. Расход ионита	кг/ч	G_u	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63	4,63
11. Число единиц переноса		ЧЕП	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
12. Объемный расход ионита	м ³ /ч	V_u	$5,94 \cdot 10^{-2}$								
13. Высота движущегося слоя ионита	м	H	0,296	0,141	0,11	0,09	0,0646	0,0495	0,0396	0,0327	0,0276
14. Время пребывания ионита в колонне	ч	τ	1,61	3,07	3,75	4,39	5,61	6,72	7,77	8,69	9,57
15. Скорость движения ионита в колонне	м/с	U	$512 \cdot 10^{-7}$	$128 \cdot 10^{-7}$	$81,9 \cdot 10^{-7}$	$56,9 \cdot 10^{-7}$	$32,0 \cdot 10^{-7}$	$20,5 \cdot 10^{-7}$	$14,2 \cdot 10^{-7}$	$10,4 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$
16. Удельный объем очищаемого раствора	м ³ /кг	Y	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38

Как видно из материалов табл. 2 скорость движения частиц ионита на 3 и более порядков меньше скорости движения водного раствора щелочи. Так как плотность влажных набухших частиц ионита меньше плотности очищаемого раствора, то частицы будут обладать положительной плавучестью и целесообразно подавать раствор сверху вниз, а частицы ионита снизу вверх.

Расход ионита не зависит от диаметра колонны, а вот высота слоя ионита в значительной степени зависит от этого параметра. Поэтому для уменьшения габаритов и капитальных затрат целесообразно остановиться на колоннах малого диаметра $D_a = 0,2-0,6$ м, в которых высота слоя ионита соизмерима с диаметром колонны.

Интересно сравнить технологические параметры колонны периодического действия с неподвижным слоем ионита и колонны непрерывного действия с движущимся слоем ионита.

Расчеты, проведенные по алгоритму для колонн периодического действия для диаметра $D_a = 0,6$ м показывают преимущества колонн непрерывного действия. Так удельный объем очищаемого ионита одним килограммом частиц увеличивается в колонне непрерывного действия с 0,94 до 2,38 м³/кг, то есть в 2,5 раза. Степень использования обменной емкости за счет противоточного движения частиц ионита и рас-

твора (рис. 2) увеличивается с 39,6 до 97 %, т. е. в 2,45 раза. Гидравлическое сопротивление слоя ионита за счет уменьшения его высоты с 0,5 до 0,09 м снижается в 5,5 раз.

Однако существенным недостатком ионообменных колонн непрерывного действия, как и адсорбционных с движущимся слоем гранул адсорбента или колонных реакторов с движущимся слоем катализатора, является истирание и измельчение частиц ионита.

Для уменьшения истирания и измельчения частиц ионита можно собирать их несколько штук и покрывать оболочкой из прореженного текстильного материала с ворсом (рис. 3) [8].

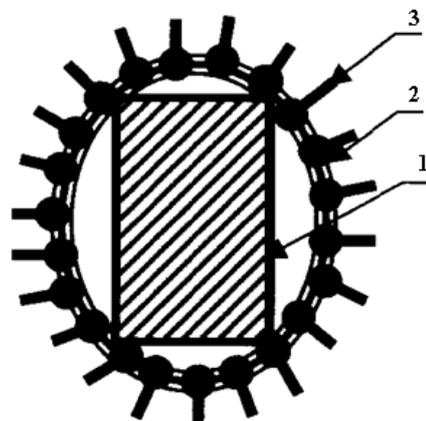


Рис. 3. Ионообменный материал в текстильной оболочке: 1 – частицы ионита, 2 – текстильная оболочка из прореженной ткани, 3 – ворс на ткани

Нити самой оболочки могут быть выполнены также из ионообменного материала для увеличения общей сорбционной емкости всего комплекса. Выполнение оболочки для частиц ионита так, что элементы ворса обращены наружу, не позволяет частицам сталкиваться друг с другом, внутри аппарата и при его подаче или отводе из него.

Экспериментальные исследования показывают, что истирание и измельчение частиц ионита в оболочке замедляется на порядок, хотя и вызывает рост диффузионного сопротивления при внешней массоотдаче почти в 2 раза. Кроме того, степень регенерации ионита обычно не превышает 90 %, т. е. $x_n \approx 0,1x_k$ [9–11].

В этом случае расчетные технологические параметры промышленной ионообменной колонны принимают численные значения:

– расход ионита $G_u = 5,15$ кг/ч;

– высота движущегося слоя ионита $H = 0,248$ м, который должен двигаться со скоростью $U = 6,32 \cdot 10^{-6}$ м/с и находиться в колонне $\tau = 10,9$ часа;

– удельный объем очищаемого раствора составит $Y = 2,13$ м³/кг.

Таким образом, применение частиц ионита, покрытых текстильной оболочкой с ворсом, позволяет даже при увеличении диффузионного сопротивления снизить гидравлическое сопротивление по сравнению с ионообменной колонной периодического действия в 2 раза, повысить удельный объем очищаемого раствора в 2,5 раза при регенерации ионита, составляющей 90 % от его конечной концентрации на выходе из колонны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Якименко, Л. М. Справочник по производству хлора, каустической соды и основных хлорпродуктов / Л. М. Якименко, Н. И. Пасманик. – М. : Химия, 1976.
2. Фурман, А. А. Приготовление и очистка рассола / А. А. Фурман, С. С. Штрайбман. – М. : Химия, 1966.
3. Дытнерский, Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1991. – 483 с.
4. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник. Т. 2 / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – 884 с.
5. Голованчиков, А. Б. Одновременная ионообменная очистка воды от ионов жесткости и железа / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, Н. А. Дулькина // Экологические системы и приборы. – 2011. – № 3. – С. 24–28.
6. Голованчиков, А. Б. Электроионообменная очистка воды от радиоактивного йода / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, Н. А. Дулькина // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2012. – № 3(70). – С. 52–54.
7. Каустическая сода (NaOH). http://www.kemira.com/regions/russia/site_collectionDocuments/documentation/brochures/brochure caustic soda.rus.pdf.
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. К. Беляева, А. Е. Караева, Н. А. Дулькина ; ГОУ ВПО ВолгГТУ. – 2009.
9. Тхи Тхюнг Зыонг Ле Сравнение ионообменных колонн периодического и непрерывного действия / Тхи Тхюнг Зыонг Ле, А. Б. Голованчиков // XV Межвуз. науч.-практич. конф. молодых ученых и студентов : тезисы докладов ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – С. 79–80.
10. Регенерация ионообменных материалов под действием комбинированного электрического поля / В. А. Козловцев, Р. В. Козловцев, А. Б. Голованчиков, Р. Н. Кулагин, П. А. Шаплыгин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов» ; вып. 7). – С. 112–118.
11. Адсорбент для очистки газов и жидкостей / Тхи Тхюнг Зыонг Ле, А. Е. Караева, Тхи Тхань Ван Ле, А. Б. Дулькин, А. Б. Голованчиков // XIII Регион. конф. молодых исследователей Волгоградской области : тезисы док. / ВолгГАСУ [и др.]. – Волгоград, 2009. – С. 82–84.

УДК 504.064.4

А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Л. А. Ильина, Г. И. Первакова

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ В ГИДРОЦИКЛОНЕ, БАТАРЕЕ И КАСКАДЕ ГИДРОЦИКЛОНОВ С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Волгоградский государственный технический университет

В результате экспериментальных исследований показано, что скорость вращения или окружная скорость потока в гидроциклоне уменьшается от входа к выходу. Проведено математическое моделирование эффективности работы гидроциклона с учетом этих экспериментальных данных.

Ключевые слова: гидроциклон, вероятность улавливания частиц, скорость вращения.

A. B. Golovanchikov, A. V. Ilin, L. A. Iilina, G. I. Pervakova

ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF TRAPPING PARTICLES IN HYDRO CYCLONE, A BATTERY AND A CASCADE OF HYDRO CYCLONES BASED ON THE PILOT STUDIES

Volgograd State Technical University

In the result of experimental studies have shown that the rate of rotation or circumferential speed of the flow in a hydrocyclone decreases from input to output. Mathematical modeling of the effectiveness of the work of the hydrocyclone with these experimental data. Keywords: hydrocyclone, the probability of particulate matter, the speed of rotation.

Keywords: hydroclone, probability of catching of particles, rotation speed.

Цель работы: математическое моделирование вероятности улавливания частиц в гидроциклоне с учетом полученного экспериментального профиля окружной скорости.

Для экспериментального определения локальных и средних значений окружной v_ϕ и продольной скоростей v_z в лабораторном гидроциклоне в средней части его цилиндрического корпуса была установлена трубка, на свободном конце которой имелось отверстие. Трубку можно было повернуть так, что это отверстие совпадало с направлением осевой или окружной скорости и было направлено навстречу потока, а путем радиального перемещения можно было определять эти скорости как функции радиуса r в кольцевом зазоре (между цилиндрическим корпусом и выходным патрубком), в котором частицы дисперсной фазы под действием центробежной силы отбрасываются к стенке корпуса. Зная диаметр отверстия в трубке и определяя экспериментально локальный расход как отношение локального объема жидкости V_L прошедшего за время t_L

$$q_L = V_L / t_L$$

по уравнению неразрывности находились профили окружной $v_\phi = v_\phi(r)$ и осевой скорости

$$v_z = v_z(r).$$

Экспериментальный профиль осевой скорости с локальными относительными ошибками, не превышающими $\pm 7\%$, соответствовал теоретически выведенному в работе [1].

$$v_z = 2\overline{v_z} \left[1 - \left(\frac{r}{R_n} \right)^2 + \frac{\left[1 - \left(\frac{R_e}{R_n} \right)^2 \right]}{\ln \left(\frac{R_e}{R_n} \right)} \ln r/R_n \right] \cdot B,$$

где постоянная

$$B = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{R_e}{R_n} \right)^2 + \frac{\left[1 - \left(\frac{R_e}{R_n} \right)^2 \right]}{\ln \left(\frac{R_n}{R_e} \right)} \right]},$$

то есть интегрально соответствовал расходу жидкости, подаваемой в гидроциклон

$$q_v = \frac{\pi(R_n^2 - R_e^2)}{4} \overline{v_z}$$

Профиль окружной скорости был геометрически подобен теоретически выведенному в работе [1]

$$v_\phi = \overline{v_\phi} \left[\ln \left(\frac{r}{R_n} \right) + \frac{\ln \left(\frac{R_n}{R_e} \right) \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right)}{\left(\frac{1}{R_e} \right)^2 - \left(\frac{1}{R_n} \right)^2 - \left(\frac{R_n^2 - R_e^2}{4} \right)} \right] r \cdot A, \quad (1)$$

где постоянная

$$A = \frac{R_n - R_e}{\left[\ln \left(\frac{R_n}{R_e} \right) \right]^2 - \left(\frac{1}{R_e} \right)^2 - \left(\frac{1}{R_n} \right)^2 - \left(\frac{R_n^2 - R_e^2}{4} \right)}, \quad (2)$$

но экспериментальное значение постоянной A было на 23 % меньше теоретически выведенной постоянной A .

На наш взгляд, это объясняется тем, что в теории предполагалось, что окружной расход равен расходу, подаваемому в гидроциклон

$$q_v = l \int_{R_e}^{R_n} v_\phi dr, \quad (3)$$

где l – длина зоны вращения (шаг винтовой траектории), остается постоянным во всем активном объеме гидроциклона. На самом деле из-за гидравлического сопротивления вращающегося потока очищаемой жидкости границы зоны вращения размываются, поэтому тангенциальные скорости (и локальные, и средняя) уменьшаются. Интересно, что рекомендуемая для расчета в гидроциклоне тангенциальная скорость в справочнике [4] больше расчетной скорости [3] движения во входном патрубке на 20 %, то есть расчетная тангенциальная скорость завышается по сравнению со средней, полученной на основании экспериментов, более чем 40 %.

Ниже в таблице приведены результаты расчетов гидроциклонов по алгоритму, учитывающему результаты экспериментов и уменьшающему тангенциальную скорость на 23 % и алгоритму, изложенному в работах [3, 4].

Расчеты проводились для гидроциклона ГНС-100 [2] с внутренним радиусом цилиндрической части $R_n = 50$ мм, наружным радиусом выходного патрубка $R_e = 20$ мм, эквивалентном радиусе входного патрубка $R_n = 6$ мм и высоте сепарационной зоны $L = 0,9$ м для сплошной фазы – воды с плотностью $\rho = 1000$ кг/м³, ди-

намической вязкостью $\mu = 10^{-3}$ Па·с, плотностью дисперсной фазы $\rho_r = 1010$ кг/м³.

Результаты расчетов параметров работы гид-

роциклона с учетом экспериментальных данных по окружной скорости в сравнении со стандартными расчетами, изложенными в работах [3, 4].

Таблица 1

Наименование параметра и размерность	Обозначение	Численные значения параметра	
		Учитывающее уменьшение окружной скорости на 23 %	По алгоритму, изложенному в работах [3, 4]
1. Расход, м ³ /ч	q_v	5	5
2. Скорость во входном патрубке, м/с	$v_{вх}$	12,29	12,29
3. Тангенциальная окружная скорость м/с	$v_{ок}$	11,36	14,77
4. Фактор разделения		263,1	443,8
5. Номинальный диаметр частиц, улавливаемых на 100 %, мк	d_0	69,6	56,4
6. Общая степень очистки	χ	0,66	0,8

Как видно из материалов, представленных в табл. 1, уменьшение тангенциальной или окружной скорости на 23 % в соответствии с экспериментальными данными и приводит к снижению среднего фактора разделения с 443 до 263, то есть на 40,6 %. Поэтому номинальный диаметр частиц, улавливаемых на 100 % возрастает на 22,7 %, а общая степень очистки снижается на 14 % или в относительных величинах на 17,5 %.

В табл. 2 проведены локальные значения рас-

четных параметров для частиц каждой фракции с учетом экспериментальных данных по окружной скорости в сравнении с расчетами по типовому алгоритму, изложенному в работах [3 и 4].

Как видно из расчетных параметров табл. 2 локальная степень улавливания частиц каждой фракции при учете экспериментальных данных по окружной скорости для частиц размером меньше номинального меньше, чем в теоретическом типовом алгоритме, изложенном в работах [3 и 4].

Таблица 2

Размеры и плотность распределения частиц дисперсной фазы в водной суспензии на входе в гидроциклон и концентрация уловленных частиц каждой фракции (в числителе – с учетом экспериментальных данных по окружной скорости, в знаменателе – без учета этих данных, то есть при расчете по типовому алгоритму, изложенному в работе [3 и 4])

Фракции	Диаметр частиц фракции d , мк	Доля частиц в исходной суспензии	Концентрация уловленных частиц
1	15	0,019	0,0009/0,00144
2	25	0,075	0,0094/0,0158
3	35	0,233	0,0295/0,0493
4	45	0,134	0,0525/0,0873
5	55	0,237	0,0793/0,131
6	65	0,130	0,103/0,130
7	75	0,119	0,119/0,119
8	85	0,103	0,103/0,103
9	95	0,079	0,079/0,079
10	105	0,047	0,047/0,047
11	115	0,029	0,024/0,024
12	125	0,009	0,009/0,009
		$\Sigma = 1$	$\Sigma = 0,66 / \Sigma = 0,8$

Таким образом, в типовой алгоритм расчетов локальных и интегральных параметров гидроциклона необходимо внести поправочный коэффициент $K_s = 0,77$, учитывающий уменьшение окружной скорости вращения потока за счет его трения о стенки корпуса и выходного патрубка.

По обоим вышеописанным алгоритмам: теоретическому и учитывающему, согласно экспериментальным данным, уменьшение окружной скорости на 23 % были проведены расчеты зависимостей степени очистки от числа гидроциклонов в каскаде, то есть установленных последовательно одинаковых гидроциклонов ГНС-100.

Как видно из графиков степень очистки в гидроциклонах, установленных в каскад, сначала круто возрастает, а затем при $n > 5$ повышается незначительно. Однако, как и для одного гидроциклона учет снижения окружной скорости на 23 %, полученного на основании экспериментальных исследований, приводит к уменьшению степени очистки. Поэтому для достижения степени очистки суспензии с частицами, описанными в табл. 2, $\eta = 0,9$ теоретически требуется 3 гидроциклона, установленных в каскад, а реально необходимо будет установить 5 гидроциклонов.

Обычно циклоны и гидроциклоны устанавливают в батарею, то есть параллельно. В табл. 3

приведены возможности использования стандартных гидроциклонов, устанавливаемых в батарею, с общим расходом $q_v = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$, при этом расход в каждом циклоне батареи лежит в рекомендуемом диапазоне расходов (см. последнюю строчку табл. 3, [4]).

Как видно из материалов табл. 3 для гидроциклонов ГН-80 возможна их установка в батарею от одного до двух. Для гидроциклонов ГН-60 от одного до трех. Однако увеличение числа гидроциклонов в батарее приводит не к увеличению, а к уменьшению общей степени очистки, так как объемный расход в каждом гидроциклоне уменьшается пропорционально их числу в батарее, а при одинаковых геометрических размерах фактор разделения уменьшается в квадрат раз.

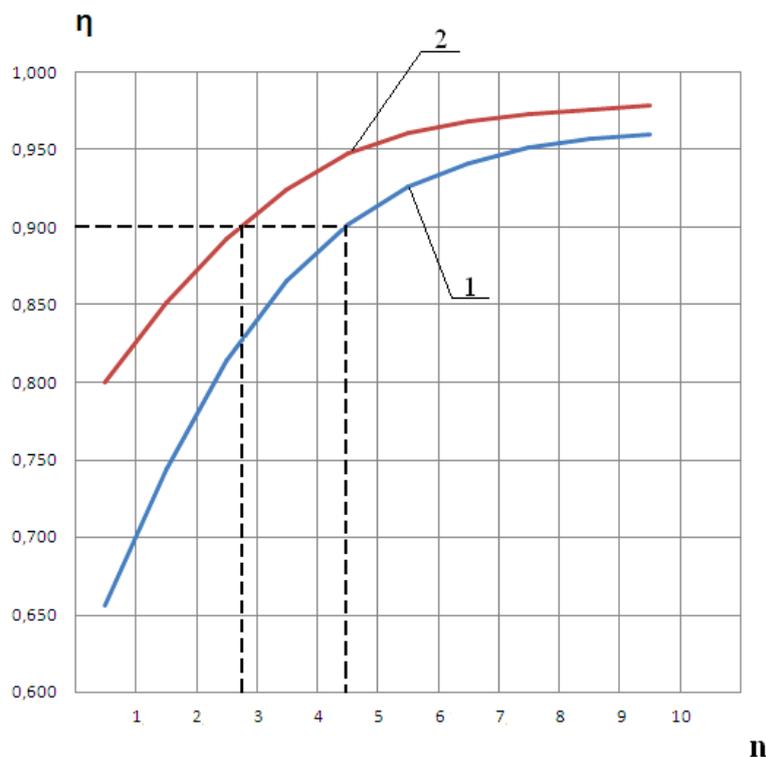
Так при переходе от одного к двум гидроциклонам в батарее ГН-80 фактор разделения уменьшается 1248 до 312. Соответственно снижается степень очистки.

А вот замена одного гидроциклона ГНС-100 на 2 или 3 гидроциклона ГН-60, установленных в батарею, т. е. параллельно увеличивает степень очистки, так как фактор разделения в последних гидроциклонах, установленных в батарею из-за уменьшения диаметра корпуса становится выше, чем в одном гидроциклоне ГНС-100.

Таблица 3

Геометрические и технологические характеристики гидроциклонов установленных в батарею (в числителе теоретическое значение параметра, в знаменателе уменьшение окружной скорости на 27 %)

Тип гидроциклона	ГНС-100	ГН-80	ГН-80	ГН-60	ГН-60	ГН-60	ГН-40	ГН-40	ГН-40	ГН-40	ГН-40
Диаметр цилиндрического корпуса, мм	100	80	80	60	60	60	40	40	40	40	40
Диаметр выходного патрубка, мм	40	32	32	20	20	20	16	16	16	16	16
Диаметр питающего патрубка, мм	12	10	10	8	8	8	6	6	6	6	6
Рабочая длина, м	0,9	0,72	0,72	0,54	0,54	0,54	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Расход в одном гидроциклоне $\text{м}^3/\text{ч}$	5	5	2,5	2,5	1,67	1,25	1,67	1,25	1	0,83	0,71
Число гидроциклонов в батарее	1	1	2	2	3	4	3	4	5	6	7
Степень очистки	0,8	0,9	0,77	0,9	0,832	0,77	0,961	0,944	0,914	0,89	0,87
	0,66	0,81	0,625	0,809	0,702	0,623	0,91	0,872	0,83	0,79	0,76
Номинальный диаметр частиц, улавливаемых на 100 %	56,4	42,2	59,2	42,2	51,5	59,3	30,9	35,6	39,7	43,4	46,9
	69,6	55,2	77,2	55,3	67,3	77,5	40,5	46,6	51,9	56,8	61,2
Фактор Разделения	443,8	1248	312	1156	515,7	288,9	3094	1733	1109	774	567
	263,1	740	185	685	305,8	171,3	1835	1028	657,8	459	336
Рекомендуемый диапазон расходов, $\text{м}^3/\text{ч}$	2,74÷10,16	1,85÷6,48		1,18÷3,7			0,65÷2,2				



Зависимость общей степени очистки от числа гидроциклонов в каскаде:
 1 – с учетом экспериментальных данных, уменьшающих среднюю окружную скорость на 23 %;
 2 – теоретическая зависимость, не учитывающая уменьшение средней окружной скорости [2, 4]

Проведем сравнение каскадной (см. рисунок, кривая 1) и батарейной установки гидроциклонов. Для достижения степени очистки $\eta = 0,9$, как было сказано выше, необходимо установить в каскад 5 гидроциклонов ГНС-100, а при установке гидроциклонов в батарею достаточно установить 3 гидроциклона ГН-40, диаметр которых в 2,5 раза меньше, а суммарная масса снижается в 4,2 раза.

Таким образом, учет экспериментальных данных по снижению средней окружной скорости очищаемой жидкости в гидроциклонах на 23 % позволяет увеличить точность расчетов ее степени очистки и подбирать число гидроциклонов в батарее или каскаде, обеспечивающих необходимую степень очистки. При этом, как и в батарее циклонов, установке гидроциклонов в батарею более выгодна, чем их установка в каскад и с точки зрения уменьшения размеров и числа гидроциклонов, обеспечивающих необходимую степень

очистки, и с точки зрения экономии материальных затрат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованцов, А. Б. Вероятность улавливания частиц в напорном гидроциклоне / А. Б. Голованцов, Г. И. Первакова, И. С. Бацокин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 10). – С. 5–9.
2. Голованцов, А. Б. Очистка высоковязких жидкостей в каскаде гидроциклонов / А. Б. Голованцов, Г. И. Первакова, И. С. Бацокин // Вестник Волгоградского архитектурно-строительного университета. – Волгоград, 2011. – (Серия: Строительство и архитектура ; вып. 21(40)). – С. 135–140.
3. Голованцов, А. Б. Влияние производительности на эффективность работы гидроциклона / А. Б. Голованцов, Г. И. Первакова, И. С. Бацокин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(74) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 4). – С. 55–58.
4. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник. Т. 2 / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд-во Н. Бочковой, 2003. – 884 с.

УДК 541

Н. И. Юркив, А. Д. Поликарпов*, Т. В. Мельникова*****ВЛИЯНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТОВ,
РАСПОЛОЖЕННЫХ ЗА НЕЙ, НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ*****ООО «НЕФТЕГАЗ-МОНИТОРИНГ»******Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИморнефть»
в г. Волгограде**

Создана объемная модель, состоящая из призабойной зоны и пластов с различной проницаемостью, соединенных между собой пористой средой, которая наглядно показывает сложность распределения фильтрации флюидов и закачиваемых жидкостей в пласте, объясняет расхождение между полученными результатами на линейных моделях в лаборатории и промысловыми исследованиями. Объемная модель позволяет совершенствовать как известные технологии воздействия на призабойную зону и пласт, так и создавать новые.

Ключевые слова: объемная модель, проницаемость, призабойная зона, фильтрационные потоки, продуктивность.

N. I. Yurkiv, A. J. Polikarpov*, T. V. Melnikova*****INFLUENCE OF PERMEABILITY OF A PRIZABOYNY ZONE AND THE LAYERS
LOCATED BEHIND IT, ON DISTRIBUTION OF FILTRATIONAL STREAMS*****NEFTEGAZ-MONITORING LLC******VolgogradNIPImorneft Branch of LUCOIL-Engineering LLC**

The volumetric model, which consists of the critical zone and the layers with different permeability, connected together by the porous medium, which clearly shows the complexity of distributing the filtration of fluids and inject rocking liquids in the layer, explains the divergence between the obtained results on the linear models in the laboratory and trade studies, is created. Volumetric model makes it possible to improve both known to the technology actions on the critical zone and layer and to create new.

Keywords: volumetric model, permeability, critical zone, filtrational flows, productivity.

Как известно, при бурении скважин, исходя из вероятности, можно вскрыть пласт с различной проницаемостью – начиная от непроницаемого до супер-коллектора. Но, в основном, наблюдается тенденция, что во вскрытый диапазон входит весь спектр неоднородности.

Кроме того, за пределами призабойной зоны находится пористая среда со всеми видами проницаемости. А, именно, эта неоднородность создает сложное распределение фильтрации в пласте.

Сопоставление лабораторных работ с результатами промысловых исследований доказала их несовпадение. Так, например, проницаемость евлановско-ливленского горизонта Памятно-Сасовского месторождения по гидродинамическим исследованиям составляет 1,35 мкм², а проницаемость, определенная нами на линейных моделях, по керну при пластовых условиях, колеблется от непроницаемых пластов до 0,164 мкм². Расхождение между результатами составляет практически 800 %. Кроме того, в экспериментах по исследованию керна наблюдается существенный перепад давления при фильтрации флюидов пласта на линейных моделях, в сравнении с промысловыми гидродинамическими результатами.

Для объективной оценки полученных результатов был проведен анализ работ по исследованию различных факторов, влияющих на продуктивность скважин и нефтеизвлечение, а именно: геологического строения пласта, литологии, давления, температуры, вязкости нефти, толщины граничного слоя, гидрофобных взаимодействий и других, на линейных моделях пласта.

Исходя из анализа большой разницы между гидродинамическими результатами и исследованиями керна в лабораторных условиях, мы пришли к выводу, что ответы скрыты в фильтрационных процессах призабойной зоны.

Как известно, для изучения фильтрационных характеристик различных пород: определения коэффициента вытеснения нефти водой, экспериментального обоснования продуктивности скважин, повышения нефтеотдачи, влияние буровых растворов на пористую среду и другие работы используют кернодержатели. Они представляют собой цилиндрический корпус высокого давления, внутри которого размещаются образцы породы различной проницаемости, скомпонованные в определенной последовательности. На входе размещаются образцы с более высокой, а на выходе с более низкой проницаемостью.

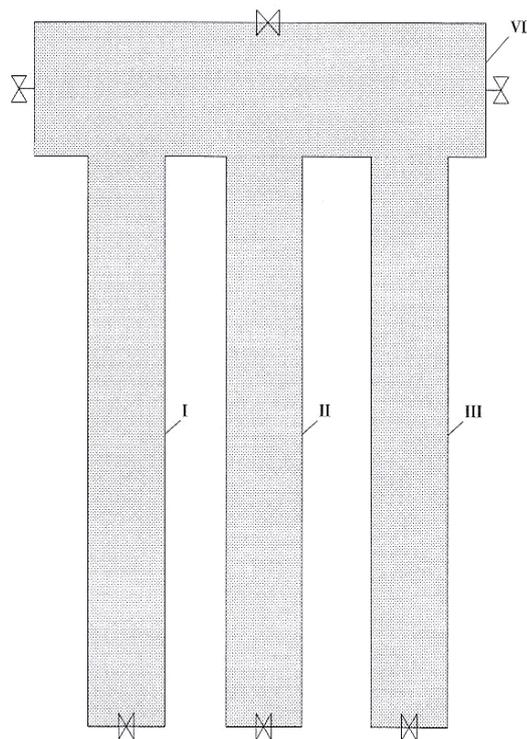


Схема объемной модели:
I – пласт 1, II – пласт 2, III – пласт 3,
IV – призабойная зона пласта

В естественных условиях вероятность размещения пород различной проницаемости зависит от первоначального геологического формирования. Фильтрация как флюидов пласта, так и закачиваемых реагентов происходит по наименее сопротивляемым зонам и каналам.

Исходя из того что призабойная зона пласта представляет собой сложный многогранный объект с неоднородным строением, с локальным развитием зон различной продуктивности как в самой призабойной зоне, так и в пластах – это приводит к сложному распределению фильтрации и сильно затрудняет определение оптимального режима разработки объекта. Кроме того, на распределение фильтрации в призабойной зоне большое влияние оказывает ее загрязнение.

Для моделирования процессов, происходящих как в призабойной зоне, так и в пластах, прилегающих к ней, без учета ее загрязнения, нами было предложено новое направление в исследовании пористых сред – использование объемной модели, как показано на рисунке.

Объемная модель позволяет моделировать призабойную зону и пласты различной проницаемости, соединенные между собой пористой средой. Ее использование приведет к более глубокому пониманию сложных процессов фильтрации в неоднородных пористых средах, механизмах взаимодействия происходящих между различными веществами и системами, но и дает возможность предложить новые технологии воздействия на призабойную зону и пласт в целом, а также увеличить эффективность известных применяемых методов.

В объемной модели использовали насыпные пористые среды, которые готовили заранее как для призабойной зоны, так и для каждого пласта в отдельности. Для приготовления насыпной пористой среды использовали, в основном, кварцевый песок, определенного размера, маршаллит, гидрофобизованный маршаллит в определенных соотношениях, необходимых для создания заданной проницаемости и нефтенасыщенности.

Модели откачивали и насыщали под вакуумом откачиваемой пластовой водой хлоркальциевого типа, которая относится к хлоридной группе. Химический состав следующий: $Cl^- = 101175,0$ мг/л; $HCO_3^- = 134,2$ мг/л; $Ca^{2+} = 15230,4$ мг/л; $Mg^{2+} = 3526,4$ мг/л; $Na^+ + K^+ = 41450,6$ мг/л. Общая минерализация 161,42 г/л; pH 5,5 – 6,0; вязкость 152 мПа·с.

Затем определили объем пор, пористость, проницаемость по призабойной зоне и каждому пласту в отдельности. Зная все параметры их собрали в единое целое. Переход от призабойной зоны к пластам осуществлялась через пористую среду. Характеристика призабойной зоны и моделей пласта представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика моделей

Наименование	L, см	F, см ²	V, см ³	M, %	Скорость, 40 м/год		Скорость, 390 м/год	
					K, мкм ²	P, атм	K, мкм ²	P, атм
ПЗ-1	41	10,747	95	21,6	0,061	0,320	0,066	1,92
ПЗ-2	41	10,747	115	26,1	0,167	0,08	0,142	0,896
ПЗ-3	41	10,747	119	27,0	1,056	0,064	1,863	0,125
Модель-1	141,5	8,81	295	23,7	0,072	1,537	0,084	6,144
Модель-2	143,5	8,81	320	25,4	0,273	0,28	0,303	1,85
Модель-3	142,5	8,81	415	33,1	1,178	0,094	1,293	0,5

Для исследования фильтрации в объемной модели и выяснении роли призабойной зоны в распределении потоков закачиваемой жидкости в призабойную зону и пласты с различной проницаемостью были проведены эксперименты. Результаты экспериментов были сведены в табл. 2–4.

Как видно из табл. 2–4 для экспериментов готовили модели: призабойной зоны с проницаемостью 0,061 мкм²; 0,167 мкм² и 1,056 мкм², а также модели пластов с проницаемостью 0,072 мкм², 0,273 мкм² и 1,178 мкм².

При компоновке первой модели использовали призабойную зону с проницаемостью 0,061 мкм² и моделей пластов 1–3. При компоновке второй модели использовали призабойную зону с про-

ницаемостью 0,167 мкм² и моделей пластов 1–3. Третья модель состояла из призабойной зоны с проницаемостью 1,056 мкм² и моделей пластов 1–3. Следовательно, эксперименты были проведены на трех объемных моделях.

Проведение экспериментов на трех объемных моделях с различной проницаемостью как призабойной зоны, так и пластов объясняется тем, что за призабойной зоной может находиться пористая среда с любой проницаемостью. Поэтому закачка пластовой воды производилась с той стороны, где находился пласт с одной из проницаемостей. Нам было интересно, как влияет призабойная зона с различной проницаемостью на распределение потоков по другим пластам.

Таблица 2

Влияние ПЗ-1 с проницаемостью 0,061 мкм² на пласты 1–3

Наименование	Скорость закачки, 40 м/год				Скорость закачки, 390 м/год			
	Линейная М		Объемная М		Линейная М		Объемная М	
	К, мкм ²	Р, атм	К, мкм ²	Р, атм	К, мкм ²	Р, атм	К, мкм ²	Р, атм
<i>Закачка пластовой воды в объемную модель со стороны пласта № 1</i>								
ПЗ-1	0,061	0,320	–	–	0,066	1,62	–	–
П-1	0,072	1,537	0,106	0,231	0,084	6,144	0,049	0,768
П-2	0,273	0,280	0,169	0,231	0,303	1,850	0,204	0,768
П-3	1,178	0,094	0,303	0,231	1,293	0,5	0,457	0,768
<i>Закачка пластовой воды в объемную модель со стороны пласта № 2</i>								
ПЗ-1	0,061	0,320	–	–	0,066	1,92	–	–
П-1	0,072	1,537	0,138	0,188	0,084	6,144	0,038	0,708
П-2	0,273	0,280	0,283	0,188	0,303	1,850	0,160	0,708
П-3	1,178	0,094	0,508	0,188	1,293	0,5	0,491	0,708
<i>Закачка пластовой воды в объемную модель со стороны пласта №3</i>								
ПЗ-1	0,061	0,320	–	–	0,061	1,92	–	–
П-1	0,072	1,537	0,164	0,120	0,084	6,144	0,024	0,548
П-2	0,273	0,280	0,358	0,120	0,303	1,85	0,148	0,548
П-3	1,178	0,094	0,684	0,120	1,293	0,5	0,811	0,548

Как видно из полученных результатов, табл. 2–4, при скорости закачки пластовой воды 40 м/год, в объемную модель, независимо от проницаемости призабойной зоны и пластов, находящихся за ней проницаемость возрастает при снижении давления от 6,65 до 15,5 раз по сравнению с линейной моделью. Эти результаты объясняют разницу между полученными экспериментальными данными на линейных моделях в лабораторных усло-

виях и промысловых гидродинамических исследований.

В тоже время с увеличением скорости закачки пластовой воды до 390 м/год в объемную модель проницаемость низкопроницаемого пласта существенно снижается как по сравнению с линейной моделью, так и со скоростью закачки пластовой воды в 40 м/год, независимо от проницаемости пористой среды находящейся за призабойной зоной.

Таблица 3

Влияние ПЗ-2 с проницаемостью 0,167 мкм² на пласты 1–3

Наименование	Скорость закачки, 40 м/год				Скорость закачки, 390 м/год			
	Линейная М		Объемная М		Линейная М		Объемная М	
	К, мкм ²	Р, атм	К, мкм ²	Р, атм	К, мкм ²	Р, атм	К, мкм ²	Р, атм
<i>Закачка пластовой воды в объемную модель со стороны пласта № 1</i>								
ПЗ-2	0,167	0,08	–	–	0,142	0,896	–	–
П-1	0,072	1,537	0,088	0,180	0,084	6,144	0,054	0,643
П-2	0,273	0,280	0,184	0,180	0,303	1,85	0,210	0,643
П-3	1,178	0,94	0,484	0,180	1,293	0,5	0,524	0,643
<i>Закачка пластовой воды в объемную модель со стороны пласта № 2</i>								
ПЗ-2	0,167	0,08	–	–	0,142	0,896	–	–
П-1	0,072	1,537	0,138	0,130	0,084	6,144	0,046	0,508
П-2	0,273	0,208	0,364	0,130	0,303	1,85	0,217	0,508
П-3	1,178	0,094	0,775	0,130	1,293	0,5	0,534	0,508
<i>Закачка пластовой воды в объемную модель со стороны пласта № 3</i>								
ПЗ-2	0,167	0,08	–	–	0,142	0,896	–	–
П-1	0,072	1,537	0,201	0,110	0,084	6,144	0,018	0,452
П-2	0,273	0,208	0,439	0,110	0,303	1,85	0,215	0,452
П-3	1,178	0,094	1,220	0,110	1,293	0,5	0,882	0,452

В среднепроницаемом пласте при скорости закачки 40 м/год пластовой воды в объемную модель, проницаемость снижается в низко- и среднепроницаемой зоне при расположении за ней низкопроницаемой пористой среды и только в высокопроницаемой зоне наблюда-

ется увеличение пласта два. При расположении средне- и высокопроницаемой пористой среды за призабойной зоной увеличивается проницаемость среднепроницаемого пласта по сравнению с линейной моделью.

Таблица 4

Влияние ПЗ-3 с проницаемостью 1,056 мкм² на пласты 1–3

Наименование	Скорость закачки, 40 м/год				Скорость закачки, 390 м/год			
	Линейная М		Объемная М		Линейная М		Объемная М	
	К, мкм ²	Р, атм	К, мкм ²	Р, атм	К, мкм ²	Р, атм	К, мкм ²	Р, атм
<i>Закачка пластовой воды в объемную модель со стороны пласта № 1</i>								
ПЗ-3	1,056	0,064	–	–	1,863	0,125		
П-1	0,072	1,537	0,099	0,099	0,084	6,144	0,083	0,420
П-2	0,273	0,280	0,452	0,099	0,303	1,850	0,322	0,420
П-3	1,178	0,094	1,032	0,099	1,293	0,5	0,830	0,420
<i>Закачка пластовой воды в объемную модель со стороны пласта № 2</i>								
ПЗ-3	1,056	0,064	–	–	1,863	0,125	–	–
П-1	0,078	1,537	0,207	0,097	0,084	6,144	0,079	0,408
П-2	0,273	0,280	0,5	0,097	0,303	1,85	0,334	0,408
П-3	1,178	0,094	1,106	0,097	1,293	0,5	0,890	0,408
<i>Закачка пластовой воды в объемную модель со стороны пласта № 3</i>								
ПЗ-3	1,056	0,064	–	–	1,863	0,125	–	–
П-1	0,072	1,537	0,230	0,091	0,084	6,144	0,068	0,396
П-2	0,273	0,280	0,532	0,091	0,303	1,85	0,304	0,396
П-3	1,178	0,094	1,235	0,091	1,293	0,5	1,020	0,396

С увеличением скорости закачки воды до 390 м/год при нахождении низкопроницаемой пористой среды картина относительно повторяется с картиной при скорости закачки пластовой воды в 40 м/год с линейной моделью. Но по сравнению со скоростью закачки воды в объемную модель при 390 м/год проницаемость снижается в средне- и высокопроницаемой зоне призабойной зоной, т. е. происходит перераспределение потоков с уменьшением в среднепроницаемых пластах.

Интерес представляют результаты полученные в объемной модели, как с высокопроницаемой призабойной зоной, так и высокопроницаемой пористой средой находящейся за призабойной зоной. При скорости закачки пластовой воды в 40 м/год повышение проницаемости наблюдается только в высокопроницаемой призабойной зоне и высокопроницаемой пористой среде по сравнению и линейной моделью во всех остальных случаях происходит снижение проницаемости высокопроницаемой пористой среды.

При высоких скоростях наиболее высокопроницаемый пласт по отношению к другим пластам объемной модели, проницаемость в нем возрастает, как по мере возрастания пористости среды находящейся за призабойной зоной в независимости от проницаемости призабойной зоны, но она ниже чем на линейной модели.

Выводы

1. Призабойная зона играет основную роль при распределении потоков закачиваемой жидкости в пористую среду при многократном снижении давления по сравнению с линейными моделями, в лабораторных условиях.

2. Низкие скорости отбора запасов или скорости закачиваемых реагентов стимулируют равномерный отбор углеводородов из пористой среды независимо от проницаемости, с максимальной отдачей пласта.

3. С увеличением скорости отбора запасов в безводный период добычи или увеличении скорости вытесняющих реагентов при обводненной добычи, происходит резкая дифференциация различных пластов, блокируются низкопроницаемые пласты, возрастают гидрофобные взаимодействия, стимулируется образование гидрозатворов, повышается обводненность продукции, снижается нефтеизвлечение.

4. Породы-коллекторы имеют не только неоднородное строение с различной проницаемостью, что приводит к сложному распределению фильтрации как в призабойной зоне, так и в пласте. Но на распределение фильтрации также сильно оказывает технологическое воздействие на пласт: бурение, вскрытие, капитальный ремонт и другие работы, в результате которых кольматируется пористая среда, снижается пористость, проницаемость. В связи с этим, исходя из анализа геологического строения объекта, технологического воздействия на пласт, полученных промысловых результатов, проведение исследований на объемной модели позволит принимать взвешенные решения как по повышению продуктивности скважин, так и методов воздействия на пласт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юрков, Н. И. Физико-химические основы нефтеизвлечения / Н. И. Юрков. – Москва : Изд-во ВНИИОЭНГ, 2005. – 365 с.

УДК 541

Н. И. Юрков

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ОРГАНИЧЕСКОМ И В НЕОРГАНИЧЕСКОМ МИРЕ

ООО «Нефтегаз-мониторинг»

В статье рассмотрены вопросы, связанные с изучением механизмов и взаимодействий, происходящих в живых организмах, при изменении электромагнитной плотности.

Ключевые слова: электромагнитная плотность, распределение электронной плотности, квант энергии, электромагнитные волны, раковые клетки, извлечение нефти.

N. I. Yurkov

DENSITY EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FIELD TO THE PROCESSES, PROCEEDING IN THE ORGANIC AND IN THE INORGANIC PEACE

NEFTEGAZ-MONITORING LLC

In the article the questions, connected with the study of mechanisms and interactions, proceeding in the living organisms, are examined with a change in the electromagnetic density.

Keywords: electromagnetic density, distribution of electron energy, the quantum of energy, electromagnetic waves, cancerous cells, the extraction of the oil.

Исходя из проведенного анализа работ [1–4], было получено, что электромагнитная плотность материи состоит из полей всех частиц входящих в нее, создает единое электромагнитное поле, которое объединяет все взаимодействия известные на сегодняшний день. Цементирующим материалом в ядрах и атомах служат элементарные частицы, которые и определяют плотность образований. Так, электромагнитная плотность у атома фтора выше чем у хлора в 3,2 раза, в то время как объем атома хлора выше, чем у атома фтора в 6,1 раз, т. е. чем меньше объем атома, тем выше электромагнитная плотность.

Если исходить из объема ядра, то его электромагнитная плотность во столько раз выше, во столько раз объем ядра меньше объема атома. Насколько ядра атомов элементов отличаются между собой объемом, настолько они отличаются между собой электромагнитной плотностью и стойкостью к распаду и превращению.

Таким образом, электромагнитная плотность ядер, атомов определяет все процессы, происходящие в окружающем нас мире.

Следуя И. Пригожину, можно утверждать, что структура окружающего нас физического мира основана не на устойчивых движениях и, тем более не на равновесиях, а на неустойчивости и флуктуации, которые определяют и создают невероятное многообразие форм, образований, структур различных по своему качеству и масштабам.

Фактором неустойчивости равновесия является излучение или поглощение квантовой энергии, которое идет как напрямую, так и через виртуальные частицы. Поглощение или отдача энергии приводит к повышению или понижению массы.

Гипотеза Планка говорит о том, что излучение или поглощение энергии материей происходит не непрерывно, а отдельными порциями – квантами энергии.

Тщательные измерения показали, что скорость испускания электронов не зависит от интенсивности падающего света, с возрастанием интенсивности возрастает лишь их число, причем возрастает пропорционально интенсивности. Это не согласуется с тем, что атомы представляют собой, в основном, пустое пространство, в котором ядро занимает всего лишь одну триллионную (10^{-12}) объема атома. Остальное пространство заполняет облако электронов расположенных «ни тут, ни там» – ничтожно малых островков твердого вещества в океане пустоты.

Исходя из табл. 1, объем атомов Периодической системы элементов, составляет от $2,6755 \cdot 10^{-25} \text{ см}^3$ до $1,614 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3$. Радиус электрона равен $2,818 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3$, тогда объем всех электронов в атомах составит от $1,0068 \cdot 10^{-38}$ до $1,006 \cdot 10^{-37} \text{ см}^3$.

Исходя из объема всех электронов, находящихся в атомной оболочке элемента, электроны занимают внутренний объем пространства атома от $2,789 \cdot 10^{-16} \text{ см}^3$ до $7,5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3$ (табл. 1), то есть все электроны занимают менее триллионной части объема атома.

Такие выводы трудно согласуются с тем, что каждый квант энергии, попадая в атом, взаимодействует с электроном, передает свою энергию, выбивает его из оболочки, хотя предполагалось бы, что квант должен, в основном, пролетать мимо, не оказывая существенного влияния на изменение в атоме.

Как видно из табл. 1, 2 объем атомов элементов находится в пределах от $2,673 \cdot 10^{-25} \text{ см}^3$ до $1,614 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3$, а масса электронов в атомной оболочке находится в пределах от $0,911 \cdot 10^{-27} \text{ г}$ до $8,108 \cdot 10^{-26} \text{ г}$. Тогда плотность электронов в атомной оболочке составляет от $1,8 \cdot 10^{-4}$ до $3,1 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^3$. Квант энергии $h\nu$ (h – постоянная Планка, равна $6,62 \cdot 10^{-27} \text{ эрг}\cdot\text{с}$), т. е. на один электрон в атомной оболочке элемента приходится от $0,082 \text{ эрг}\cdot\text{с}$ до $7,3 \text{ эрг}\cdot\text{с}$.

Таблица 1

Распределения электронной плотности в химических элементах

Элемент	Кол-во электронов	Объем атома, см^3	Объем электронов в атомной оболочке, см^3	Масса электронов, г	Электронная плотность, г/см^3
F	9	$2,675 \cdot 10^{-25}$	$2,013 \cdot 10^{-38}$	$8,199 \cdot 10^{-27}$	$3,065 \cdot 10^{-2}$
Cl	17	$1,626 \cdot 10^{-24}$	$3,802 \cdot 10^{-38}$	$1,549 \cdot 10^{-26}$	$9,526 \cdot 10^{-3}$
Sr	38	$4,154 \cdot 10^{-24}$	$8,5 \cdot 10^{-38}$	$3,462 \cdot 10^{-26}$	$8,334 \cdot 10^{-3}$
Ir	77	$1,028 \cdot 10^{-23}$	$1,722 \cdot 10^{-38}$	$7,015 \cdot 10^{-26}$	$6,824 \cdot 10^{-3}$
Os	76	$1,028 \cdot 10^{-23}$	$1,7 \cdot 10^{-37}$	$6,924 \cdot 10^{-26}$	$6,735 \cdot 10^{-3}$
Pt	78	$1,099 \cdot 10^{-23}$	$1,745 \cdot 10^{-37}$	$7,106 \cdot 10^{-26}$	$6,466 \cdot 10^{-3}$

Продолжение табл. 1

Элемент	Кол-во электронов	Объем атома, см ³	Объем электронов в атомной оболочке, см ³	Масса электронов, г	Электронная плотность, г/см ³
Mg	12	$1,712 \cdot 10^{-23}$	$2,684 \cdot 10^{-38}$	$1,093 \cdot 10^{-26}$	$6,384 \cdot 10^{-3}$
Re	75	$1,075 \cdot 10^{-23}$	$1,678 \cdot 10^{-37}$	$6,833 \cdot 10^{-26}$	$6,356 \cdot 10^{-3}$
W	74	$1,147 \cdot 10^{-23}$	$1,655 \cdot 10^{-37}$	$6,741 \cdot 10^{-26}$	$5,877 \cdot 10^{-3}$
Au	79	$1,248 \cdot 10^{-23}$	$1,767 \cdot 10^{-37}$	$7,197 \cdot 10^{-26}$	$5,767 \cdot 10^{-3}$
Ta	73	$1,131 \cdot 10^{-23}$	$1,63 \cdot 10^{-37}$	$6,65 \cdot 10^{-26}$	$5,115 \cdot 10^{-3}$
O	8	$1,694 \cdot 10^{-24}$	$1,79 \cdot 10^{-38}$	$7,288 \cdot 10^{-27}$	$4,31 \cdot 10^{-3}$
N	7	$1,496 \cdot 10^{-24}$	$1,566 \cdot 10^{-38}$	$6,377 \cdot 10^{-27}$	$4,263 \cdot 10^{-3}$
Hg	80	$1,712 \cdot 10^{-23}$	$1,79 \cdot 10^{-37}$	$7,288 \cdot 10^{-26}$	$4,257 \cdot 10^{-3}$
Rh	45	$1,006 \cdot 10^{-23}$	$9,843 \cdot 10^{-38}$	$4,1 \cdot 10^{-26}$	$4,076 \cdot 10^{-3}$
Ru	44	$1,006 \cdot 10^{-23}$	$9,843 \cdot 10^{-38}$	$4,008 \cdot 10^{-26}$	$3,984 \cdot 10^{-3}$
Hf	72	$1,68 \cdot 10^{-23}$	$1,611 \cdot 10^{-37}$	$69,559 \cdot 10^{-26}$	$3,904 \cdot 10^{-3}$
Pd	46	$1,075 \cdot 10^{-23}$	$1,03 \cdot 10^{-37}$	$4,191 \cdot 10^{-26}$	$3,899 \cdot 10^{-3}$
Tc	43	$1,051 \cdot 10^{-23}$	$9,619 \cdot 10^{-38}$	$3,917 \cdot 10^{-26}$	$3,727 \cdot 10^{-3}$
Na	11	$2,822 \cdot 10^{-23}$	$2,461 \cdot 10^{-38}$	$1,002 \cdot 10^{-26}$	$3,547 \cdot 10^{-3}$
S	16	$4,702 \cdot 10^{-24}$	$3,58 \cdot 10^{-38}$	$1,458 \cdot 10^{-26}$	$3,418 \cdot 10^{-3}$
Mo	42	$1,123 \cdot 10^{-23}$	$9,395 \cdot 10^{-38}$	$3,826 \cdot 10^{-26}$	$3,407 \cdot 10^{-3}$
Ag	47	$1,248 \cdot 10^{-23}$	$1,05 \cdot 10^{-37}$	$4,282 \cdot 10^{-26}$	$3,351 \cdot 10^{-3}$
Pb	82	$2,24 \cdot 10^{-23}$	$1,83 \cdot 10^{-38}$	$7,47 \cdot 10^{-26}$	$3,335 \cdot 10^{-3}$
Tl	81	$2,318 \cdot 10^{-23}$	$1,81 \cdot 10^{-37}$	$7,379 \cdot 10^{-26}$	$3,183 \cdot 10^{-3}$
Fe	26	$8,362 \cdot 10^{-24}$	$5,816 \cdot 10^{-38}$	$2,369 \cdot 10^{-26}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$
Ni	28	$8,164 \cdot 10^{-24}$	$6,264 \cdot 10^{-38}$	$2,551 \cdot 10^{-26}$	$3,125 \cdot 10^{-3}$
Bi	83	$2,52 \cdot 10^{-23}$	$1,857 \cdot 10^{-37}$	$7,744 \cdot 10^{-26}$	$3,071 \cdot 10^{-3}$
Cu	29	$8,766 \cdot 10^{-24}$	$6,487 \cdot 10^{-38}$	$2,642 \cdot 10^{-26}$	$3,04 \cdot 10^{-3}$
Co	27	$8,164 \cdot 10^{-24}$	$6,04 \cdot 10^{-38}$	$2,46 \cdot 10^{-26}$	$3,013 \cdot 10^{-3}$
C	6	$1,908 \cdot 10^{-24}$	$1,342 \cdot 10^{-38}$	$5,466 \cdot 10^{-27}$	$2,865 \cdot 10^{-3}$
Nb	41	$1,328 \cdot 10^{-23}$	$9,172 \cdot 10^{-38}$	$3,735 \cdot 10^{-26}$	$2,813 \cdot 10^{-3}$
Sn	50	$1,649 \cdot 10^{-23}$	$1,119 \cdot 10^{-37}$	$4,555 \cdot 10^{-26}$	$2,762 \cdot 10^{-3}$
Cd	48	$1,587 \cdot 10^{-23}$	$1,074 \cdot 10^{-37}$	$4,373 \cdot 10^{-26}$	$2,756 \cdot 10^{-3}$
Sb	51	$1,744 \cdot 10^{-23}$	$1,141 \cdot 10^{-37}$	$4,646 \cdot 10^{-26}$	$2,657 \cdot 10^{-3}$
As	33	$1,355 \cdot 10^{-23}$	$7,382 \cdot 10^{-38}$	$3,006 \cdot 10^{-26}$	$2,657 \cdot 10^{-3}$
Cr	24	$8,562 \cdot 10^{-24}$	$5,369 \cdot 10^{-38}$	$2,186 \cdot 10^{-26}$	$2,553 \cdot 10^{-3}$
Ga	31	$1,23 \cdot 10^{-23}$	$6,935 \cdot 10^{-38}$	$2,824 \cdot 10^{-26}$	$2,515 \cdot 10^{-3}$
Mn	25	$9,183 \cdot 10^{-24}$	$5,593 \cdot 10^{-38}$	$2,278 \cdot 10^{-26}$	$2,481 \cdot 10^{-3}$
Zn	30	$1,123 \cdot 10^{-23}$	$6,711 \cdot 10^{-38}$	$2,733 \cdot 10^{-26}$	$2,434 \cdot 10^{-3}$
Ge	32	$1,23 \cdot 10^{-23}$	$7,158 \cdot 10^{-38}$	$2,915 \cdot 10^{-26}$	$2,37 \cdot 10^{-3}$
In	49	$1,912 \cdot 10^{-23}$	$1,096 \cdot 10^{-37}$	$4,464 \cdot 10^{-26}$	$2,335 \cdot 10^{-3}$
Ac	89	$3,497 \cdot 10^{-23}$	$1,991 \cdot 10^{-37}$	$8,108 \cdot 10^{-26}$	$2,319 \cdot 10^{-3}$
Te	52	$2,054 \cdot 10^{-23}$	$1,163 \cdot 10^{-37}$	$4,737 \cdot 10^{-26}$	$2,306 \cdot 10^{-3}$
V	23	$1,006 \cdot 10^{-24}$	$5,145 \cdot 10^{-38}$	$2,095 \cdot 10^{-26}$	$2,082 \cdot 10^{-3}$
Ra	88	$4,097 \cdot 10^{-23}$	$1,964 \cdot 10^{-37}$	$8,017 \cdot 10^{-236}$	$1,957 \cdot 10^{-3}$
Rn	86	$4,097 \cdot 10^{-23}$	$1,924 \cdot 10^{-37}$	$7,835 \cdot 10^{-26}$	$1,912 \cdot 10^{-3}$
La	57	$2,733 \cdot 10^{-23}$	$1,275 \cdot 10^{-37}$	$5,193 \cdot 10^{-26}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$

Окончание табл. 1

Элемент	Кол-во электронов	Объем атома, см ³	Объем электронов в атомной оболочке, см ³	Масса электронов, г	Электронная плотность, г/см ³
Si	14	6,78·10 ⁻²⁴	3,318·10 ⁻³⁸	1,275·10 ⁻²⁶	1,88·10 ⁻³
Zr	40	1,967·10 ⁻²³	8,948·10 ⁻³⁸	3,644·10 ⁻²⁶	1,852·10 ⁻³
Se	34	1,712·10 ⁻²³	7,606·10 ⁻³⁸	3,097·10 ⁻²⁶	1,809·10 ⁻³
Ti	22	1,301·10 ⁻²³	4,92·10 ⁻³⁸	2,00·10 ⁻²⁶	1,537·10 ⁻³
P	15	9,183·10 ⁻²⁴	3,356·10 ⁻³⁸	1,367·10 ⁻²⁶	1,489·10 ⁻³
H	1	6,22·10 ⁻²⁵	2,237·10 ⁻³⁹	0,911·10 ⁻²⁷	1,46·10 ⁻³
Y	39	2,479·10 ⁻²³	8,724·10 ⁻³⁸	3,553·10 ⁻²⁶	1,433·10 ⁻³
Bz	35	2,567·10 ⁻²⁴	7,83·10 ⁻³⁸	3,189·10 ⁻²⁶	1,242·10 ⁻³
B	5	3,815·10 ⁻²⁴	1,119·10 ⁻³⁸	4,555·10 ⁻²⁷	1,194·10 ⁻³
Xe	54	4,331·10 ⁻²³	1,208·10 ⁻³⁸	4,919·10 ⁻²⁶	1,136·10 ⁻³
Ba	56	4,512·10 ⁻²³	1,252·10 ⁻³⁸	5,102·10 ⁻²⁶	1,131·10 ⁻³
Sc	21	1,844·10 ⁻²³	4,698·10 ⁻³⁸	1,913·10 ⁻²⁶	1,037·10 ⁻³
J	53	4,702·10 ⁻²⁴	1,186·10 ⁻³⁷	4,828·10 ⁻²⁶	1,023·10 ⁻³
Kr	36	3,245·10 ⁻²³	8,053·10 ⁻³⁸	3,28·10 ⁻²⁶	1,011·10 ⁻³
Al	13	1,222·10 ⁻²³	2,461·10 ⁻³⁸	1,184·10 ⁻²⁶	9,69·10 ⁻³
Fr	87	9,176·10 ⁻²³	1,946·10 ⁻³⁷	7,926·10 ⁻²⁶	8,638·10 ⁻³
Cs	55	7,518·10 ⁻²³	1,23·10 ⁻³⁷	5,01·10 ⁻²⁶	6,664·10 ⁻³
Ar	18	2,959·10 ⁻²³	4,027·10 ⁻³⁸	1,891·10 ⁻²⁶	6,391·10 ⁻³
Be	4	6,031·10 ⁻²⁴	8,948·10 ⁻³⁹	3,644·10 ⁻²⁷	6,037·10 ⁻³
Ca	20	3,196·10 ⁻²³	4,474·10 ⁻³⁸	1,822·10 ⁻²⁶	5,7·10 ⁻⁴
Ne	10	1,712·10 ⁻²³	2,237·10 ⁻³⁸	9,11·10 ⁻²⁷	5,321·10 ⁻⁴
Rb	37	6,376·10 ⁻²³	8,277·10 ⁻³⁸	3,371·10 ⁻²⁶	5,287·10 ⁻⁴
Po	84	1,614·10 ⁻²²	1,88·10 ⁻³⁷	7,652·10 ⁻²⁶	4,741·10 ⁻⁴
K	19	5,494·10 ⁻²³	4,25·10 ⁻³⁸	1,731·10 ⁻²⁶	3,15·10 ⁻⁴
Li	3	1,557·10 ⁻²³	6,311·10 ⁻³⁹	2,733·10 ⁻²⁷	1,755·10 ⁻⁴

Таблица 2

Распределение электронной плотности в Периодической системе элементов в таблице Д. И. Менделеева

1	Периодическая система элементов Д. И. Менделеева						H	He	Триады		
	2	3	4	5	6	7	8				
2	Li 1,755·10 ⁻⁴	Be 6,037·10 ⁻³	B 1,194·10 ⁻³	C 2,865·10 ⁻³	N 4,263·10 ⁻³	O 4,31·10 ⁻³	F 3,065·10 ⁻²	Ne 6,391·10 ⁻⁴			
3	Na 3,547·10 ⁻³	Mg 6,384·10 ⁻³	Al 9,69·10 ⁻³	Si 1,88·10 ⁻³	P 1,489·10 ⁻³	S 3,418·10 ⁻³	Cl 9,526·10 ⁻³	Ar 6,391·10 ⁻⁴			
4	K 3,15·10 ⁻⁴ Cu 3,04·10 ⁻³	Ca 5,7·10 ⁻⁴ Zn 2,434·10 ⁻³	Sc 1,037·10 ⁻³ Ga 2,515·10 ⁻³	Ti 1,537·10 ⁻³ Ge 2,37·10 ⁻³	V 2,082·10 ⁻³ As 2,657·10 ⁻³	Cr 2,553·10 ⁻³ Se 1,809·10 ⁻³	Mn 2,481·10 ⁻³ Br 1,242·10 ⁻³	Kr 1,011·10 ⁻³	Fe 3,13·10 ⁻³	Co 3,013·10 ⁻³	Ni 3,125·10 ⁻³
5	Rb 5,287·10 ⁻⁴ Ag 3,351·10 ⁻³	Sr 8,334·10 ⁻³ Cd 2,756·10 ⁻³	Y 1,433·10 ⁻³ In 2,335·10 ⁻³	Zr 1,852·10 ⁻³ Sn 2,762·10 ⁻³	Nb 2,813·10 ⁻³ Sb 2,664·10 ⁻³	Mo 3,407·10 ⁻³ Te 2,306·10 ⁻³	Tc 3,727·10 ⁻³ I 1,023·10 ⁻³	Xe 1,136·10 ⁻³	Ru 3,984·10 ⁻³	Rh 4,076·10 ⁻³	Pd 3,899·10 ⁻³
6	Cs 6,64·10 ⁻⁴ Au 5,767·10 ⁻³	Ba 1,131·10 ⁻³ Hg 4,257·10 ⁻³	La 1,9·10 ⁻³ Ta 3,183·10 ⁻³	Hf 3,904·10 ⁻³ Pb 3,335·10 ⁻³	Ta 5,115·10 ⁻³ Bi 3,071·10 ⁻³	W 5,877·10 ⁻³ Po 4,74·10 ⁻⁴	Re 6,356·10 ⁻³	Rn 1,912·10 ⁻³	Os 6,735·10 ⁻³	Ir 6,824·10 ⁻³	Pt 6,466·10 ⁻³
7	Fr 8,638·10 ⁻⁴	Ra 1,957·10 ⁻³	Ac 2,319·10 ⁻³								

Из полученных результатов видно, что каждый элемент на квант энергии реагирует неоднозначно. Поэтому истинное значение влияния кванта энергии на реакционную способность атома необходимо определить экспериментально.

Плотность атомов на твердой поверхности достигает $10^{19}/\text{м}^2$ [5].

Каждый из электронов создает свое магнитное поле. Общее магнитное поле состоит из полей всех частиц – это среднеарифметическая величина. Образовавшиеся единое электромагнитное поле объединяет все взаимодействия известные на сегодняшний день. Цементирующим материалом в ядрах и атомах служат элементарные частицы, которые и определяют плотность образований. Плотность электронов в атомной оболочке зависит от объема атомов, общей массы электронов – это определяет плотность электромагнитного поля атома, индивидуальность и реакционную способность каждого элемента. При испускании или поглощении кванта энергии нарушается плотность поля, которое изменяет реакционную способность атомов и соединений. Число выбитых электронов пропорционально числу квантов, которые определяются интенсивностью света. Это результат не объясним иначе как на основе допущения, что свет представляет собой поток световых квантов, который может выбить электрон непосредственно в момент столкновения с частицей света.

Закон Видемана–Франца устанавливает, что электронная и тепловая проводимости пропорциональна друг к другу, а их отношение пропорционально абсолютно температуре.

Рождаться и исчезать могут не только фотоны. Самопроизвольно либо под воздействием энергии одни частицы исчезают, другие появляются. Это одно из самых поразительных общих свойств микромира – универсальная взаимная превращаемость.

Взаимодействие между двумя электронами в квантовой теории поля является результатом обмена фотонами. Каждый из электронов испускает фотоны (кванты переходящего взаимодействия электромагнитного поля) которые поглощаются другими электронами. Это справедливо и для других взаимодействий.

При поглощении или испускании квантов происходит изменение электромагнитной плотности поля приводящей к взаимодействию между атомами к увеличению или уменьшению электромагнитной плотности поля. Увеличение

электромагнитного поля необходимо трактовать как отрицательный заряд, а уменьшение – положительный с изменением химической активности вещества. Например, при нагревании воды изменяется ее рН, табл. 3.

Таблица 3

Зависимость рН раствора, от температуры

Температура, 0 °С	Дистиллированная вода, рН	Пластовая вода, плотность 1100 кг/м ³ , рН
20	7,00	5,45
30	6,80	5,00
40	5,70	4,75
50	5,40	4,62
60	5,20	4,30
70	5,00	4,14
80	4,75	3,94
90	4,52	3,76

Поэтому химические элементы в одних соединениях выступают как несущие отрицательный, а в других как положительный заряд. Это не относится к фтору, который не меняет свой заряд в различных соединениях ввиду большой электромагнитной плотности поля. Определяя заряд, мы тем самым определяем плотность поля, возможные взаимодействия между различными соединениями.

Исходя из табл. 1, электромагнитная плотность у атома фтора выше чем у хлора в 3,2 раза, в то время как объем атома хлора выше чем у атома фтора в 6,1 раз, то есть чем меньше объем атома тем выше электромагнитная плотность.

Если исходить из объема ядра атома, то его электромагнитная плотность во столько раз выше во столько раз объем ядра меньше объема атома. Поскольку, ядра атомов элементов отличаются между собой размерами, настолько они отличаются между собой электромагнитной плотностью, стойкостью к распаду и превращением.

Таким образом, электромагнитная плотность ядер и атомов определяет все происходящие процессы в окружающем нас мире.

Частицы, которые рождаются, а затем поглощаются на промежуточных этапах процесса, называют виртуальными.

Тепловое излучение – это процесс распространения тепловой энергии с помощью электромагнитных волн. При тепловом движении принимают участие лишь исчезающая малая часть электронов, то есть теплоемкость электронов малая.

При сопоставлении с элементарными частицами они имеют квантовую природу – их энергия и импульс слагаются из множества отдельных порций – квантов. Квантами электромагнитного поля являются фотоны, кванты других полей соответствуют всем остальным известным элементарным частицам. Поле, таким образом, есть физическое отражение существования бесконечной совокупности частиц – квантов.

Волновая теория подтверждена в области видимого света и оказалось также справедливой для волн всего диапазона как с волнами Герца, так и рентгеновскими лучами – лучами, где могут наблюдаются типично волновые явления (преломление, интерференция, дифракция, рассеивание).

В настоящее время нет больше сомнений в том, что для всех видов излучений волновая теория применима в той степени, что и для света. Различные виды излучения и их свойства зависят только от длины волны.

Все виды электромагнитного излучения имеют одинаковую природу и различаются лишь длиной волны, которые и формируют единую теорию поля.

Так, американский астрофизик Брендок Картер обнаружил, что равновесие между гравитационным и электромагнитным взаимодействием внутри звезд соблюдается почти с немыслимой точностью. Вычисления показали, что изменение любого из взаимодействий всего лишь на 10^{-40} его величины повлекло бы за собой катастрофу для звезд типа Солнца. Существующее галактическое магнитное поле создается электромагнетизмом.

Классификация излучения в зависимости от длины волны приведена в табл. 4.

Таблица 4

Классификация электромагнитного излучения в зависимости от длины волны

Виды излучения	Длина волны
Слабое взаимодействие	10^{-14} мм
Сильное взаимодействие	10^{-12} мм
Космическое	0,05 мкмк
Гамма-излучение	0,5–0,10 мкмк
Рентгеновское	1–20 мкмк
Ультрафиолетовое	20 мкмк – 0,4 мк
Видимое	0,4–0,8 мк
Тепловое (инфракрасное)	0,8 мк – 0,8 мм
Радиоволны	0,2 мм – X км
Гравитация	∞
1 мкмк = 10^{-9} мм; 1 мкмк = 10^{-6} м; 1 мк = 10^{-3} мм	

Количественные различия в длинах электромагнитных волн приводит к тому, что общие стороны явлений для различных волн – проявляются с различной отчетливостью. Так, квантовые или корпускулярные свойства проявляются наиболее существенно в коротковолновом излучении. Наоборот, характерные волновые свойства отчетливо наблюдаются у радиоволн.

Большинство твердых, жидких и газообразных соединений состоят из гетероатомов и имеют сплошной спектр излучения. К числу твердых тел, имеющих сплошной спектр излучения, относятся непроводники электричества, а также различные металлы в окисленном состоянии. Некоторые соединения излучают энергию только в определенных интервалах длин волн, т. е. испускают энергию с прерывным спектром. К ним относятся металлы и газы, которые характеризуются выборочным или селективным излучением. Излучение различных соединений отличаются. Они зависят от природы соединений, температуры, для газов еще и толщиной слоя и давлением. Большинство встречающихся в природе и технике твердых и жидких соединений имеют значительную излучательную способность. Поэтому в процессе теплообмена участвуют лишь тонкие поверхностные слои. Для проводников тепла толщина этих слоев имеет порядок 1 мк, для непроводников тепла – порядок 1 мм. Поэтому, применительно к твердым соединениям, а также жидкостям тепловое излучение в ряде случаев приближенно можно рассматривать как поверхностные явления. Газообразные вещества имеют значительно меньшее излучение, чем твердые и жидкие. В излучении газов участвуют все частицы, и процесс теплового излучения носит объемный характер.

Излучение всех тел зависит от температуры. С увеличением температуры излучение увеличивается, так как увеличивается внутренняя энергия тела. Изменение температуры тела вызывает не только изменение абсолютной величины интенсивности излучения, но сопровождается еще излучением спектрального состава. С повышением температуры повышается интенсивность длинноволновой части спектра. Излучение зависит от температуры значительно больше, чем от процесса теплопроводности и конвекции. Поэтому при низких температурах преобладающую роль может играть теплообмен за счет конвекции и теплопроводности, а при высоких – основным видом переноса тепла может быть тепловое излучение.

Как известно, в условиях окружающей среды основные изменения в живой и неживой природе проходят незаметно. Поэтому они представляют собой особый интерес. Под воздействием незаметного излучения или теплового движения исчезающая малая часть атомов принимает участие в этих изменениях, которые предопределяют разрушение старых и стимулируют образование новых соединений, изменяют их свойства и механизмы реакций. Образовавшиеся соединения являются более стойкими, чем ранее существовавшие. Эти изменения происходят как в органических, так и неорганических соединениях, состоящих из гетероатомов. Происходящие процессы очень важны во всех сферах. Но особый интерес, в свете вышесказанного, представляют для нас возникновение и развитие раковой клетки.

Клетка представляет собой сложнейшую гетерогенную систему. Изменение в ее составе и строении может происходить под воздействием излучения волн различной длины, от элементов или веществ, вирусов, бактерий, стресса, длительной депрессии и т. п. Поэтому точно предсказать механизм возникновения той или другой злокачественной опухоли не представляется возможным [7, 8].

Более важным является то, что после перерождения клетки ее развитие идет по одному и тому же механизму, это дает нам возможность найти лекарства для лечения этой болезни. Все эти изменения проходят в очень узком диапазоне температур. Так, например, для того чтобы погибла раковая клетка достаточно повысить ее температуру всего на два градуса: во-первых, для этого можно применять вещества, которые при взаимодействии с раковой клеткой локально повышали бы температуру на два градуса или другие лекарства, чтобы повышали температуру всего тела; во-вторых, использовать элементы или вещества с повышенной электронной плотностью по сравнению с теми соединениями, которые образуют раковую клетку и будут разрушаться под их действием, независимо от того, что она сама продуцирует кислую среду [7, 8].

Но, с другой стороны, решение этой задачи облегчается тем, что, как известно, плотность клеток и части их органелл (митохондрий, ядерного матрекса, цитоза) обычно снижается в состоянии активной пролиферации, то есть, плотность преобразованной клетки ниже и она более рыхлая, чем здоровая.

Органические и неорганические вещества поглощают кванты энергии всего диапазона волн, начиная со слабого взаимодействия и заканчивая гравитацией (табл. 3). Все виды электромагнитных излучений, стимулируют в атомах изменение плотности электромагнитного поля и тем самым инициируют разрушение старых и образование новых соединений. Например, коррозию металлов, разрушение полимерных соединений, влияют на жизнедеятельность живых существ, растений и т. д. Наибольшие изменения происходят в тех системах, которые состоят из гетероатомов. Причем, эти процессы идут незаметно. Они становятся заметными лишь тогда, когда достигают какой-то критической величины.

Как известно, особое влияние на взаимодействие между различными фазами оказывает давление. Увеличение давления позволяет уменьшить расстояние между реагирующими молекулами, увеличить число молекул в единице объема. Под давлением происходит сжатие вещества и увеличение плотности, частоты столкновений, ускорение химических реакций, а также становится возможным использование различных излучений, которые ранее не оказывали влияния на реакцию из-за короткой длины волны.

Кроме того, для усиления возбуждения и увеличения электромагнитной плотности атомов и молекул используют температуру и, тем самым, активируют реакционную способность наряду с уменьшением расстояния между соединениями.

Исходя из вышеприведенных материалов, для получения тех же продуктов можно использовать различные фазы и вещества с повышенной электронной плотностью, не прибегая к увеличению давления и температуры.

Так, нами были использованы вещества с повышенной электронной плотностью для нейтрализации сероводорода в добываемых углеводородных газах.

Как известно, для очистки углеводородных газов от сероводорода и сероуглеродных соединений применяются установки Клауса. Нейтрализация сероводорода составляет 96 %. Реакция проходит при давлении и высоких температурах. Основной недостаток – утилизация отходящих кислых газов, которые приводят к высоким эксплуатационным затратам и капиталовложениям на строительство и оборудование очистных сооружений.

Используя вещества с повышенной электромагнитной плотностью, нами была создана технология нейтрализации сероводорода с помощью раствора бишофита [6].

Нейтрализация сероводорода проходит в две стадии: 1 – нейтрализация сероводорода; 2 – регенерация раствора с отделением серы. Нейтрализация сероводорода и регенерация раствора проходят при температуре окружающей среды. Нейтрализация – от минус 10 °С до плюс 50 °С. Регенерация от 0 °С до плюс 50 °С. Регенерированный раствор снова поступает для нейтрализации. Один объем раствора бишофита используют в течение одного года, при соблюдении технологии. Концентрация сероводорода в углеводородном газе после нейтрализации составляет – от плюс 5 °С до 35 °С, менее 10 мг/м³ газа, то есть в этих условиях сероводород практически полностью нейтрализован.

Коррозия оборудования при температуре 20 °С составляет 0,001÷0,004 мм/год, при температуре 50 °С – 0,006÷0,009 мм/год.

Этот механизм успешно работает, например, в растениях для связывания молекулярного азота, усвоения газов в живых организмах и т. п.

Как известно, на сегодняшний день, конечный коэффициент нефтеизвлечения составляет 30–40 % в пласте остается 30–70 % нефти.

Существует проблема извлечения остаточной нефти из пласта, который состоит из трех сложнейших систем: во-первых, нефти, в состав которой входят более 1,5 миллиона органических и гетероорганических соединений; во-вторых, пластовой воды, где можно найти соли любых металлов различной концентрации; в-третьих, пористая среда, состоящая из всевозможных минералов, из которой необходимо максимально извлечь углеводороды.

Для решения проблемы нефтеизвлечения, мы использовали вещества с повышенной электромагнитной плотностью. Нами была предложена технология [6], с учетом всех систем составляющих нефтяной пласт со сложным воздействием, с помощью которого полностью отмывается остаточная пленочная нефть из тех каналов и пропластков, по которым прошел вытесняющий раствор с увеличением коэффициента охвата. По этой технологии, при обводнении и отборе извлекаемых запасов в 98 %, дополнительно из пласта извлекается 40–45 % остаточной нефти.

Полученные результаты не зависят от температуры и давления в пласте.

Выводы

Таким образом, исходя из проведенного анализа материалов, электромагнитная плотность материи состоит из полей всех частиц, входящих в нее, создает единое поле, которое объединяет все взаимодействия. Цементирующим материалом в ядрах и атомах служат элементарные частицы, которые и определяют плотность образований. Так, например, электромагнитная плотность у атома фтора выше чем у хлора в 3,2 раза, в то время как объем атома хлора выше, чем у атома фтора в 6,1 раз, то есть чем меньше объем атома, тем выше электромагнитная плотность.

Если исходить из объема ядра, то его электромагнитная плотность во столько раз выше, во столько раз объем ядра меньше объема атома. Насколько ядра атомов элементов отличаются между собой объемом, настолько они отличаются между собой электромагнитной плотностью и стойкостью к распаду и превращениям.

Таким образом, электромагнитная плотность ядер и атомов определяет все процессы, происходящие в окружающем нас мире.

Происходящие взаимодействия в атомах, между атомами, молекулами, веществами в живой и неживой природе под воздействием квантов энергии дают возможность понять механизм происходящих процессов, синтезировать новые соединения, которые ранее трудно было бы получить, создавать новые технологии, материалы и др.

Понимание механизмов и взаимодействий, происходящих в живых организмах, при изменении электромагнитной плотности дает возможность создавать и по-новому использовать лекарства от болезней, в том числе и от болезней, которые в настоящее время, считаются неизлечимыми.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физика микромира (маленькая энциклопедия). – М.: Советская энциклопедия, 1980. – 527 с.
2. Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.
3. Некрасов, Б. В. Основы общей химии Т. 1–2 / Б. В. Некрасов. – М.: Химия, 1973. – 1344 с.
4. Несмеянов, А. Н. Начала органической химии / А. Н. Несмеянов, Н. А. Несмеянов Т. 1–2. – М.: Химия, 1969. – 1487 с.
5. Моррисон, С. Химическая физика поверхности твердого тела / С. Моррисон. – М.: Мир, 1980. – 488 с.
6. Юркив, Н. И. Физико-химические основы нефтеизвлечения / Н. И. Юркив. – М.: ВНИИОЭНГ, 2005. – 365 с.
7. Акоев, И. Г. Биофизика познает рак / И. Г. Акоев. – М.: Наука, 1988. – 160 с.
8. Абрамова, Ж. И. Человек и противooksидлительные вещества / Ж. И. Абрамова, Г. И. Окселендр. – Л.: Наука, 1985. – 230 с.

УДК 541

Т. В. Мельникова, Н. И. Юркив*****РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН*****Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИморнефть»******ООО «НЕФТЕГАЗ-МОНИТОРИНГ»**

Разработаны физико-химические методы воздействия на призабойную зону, обеспечивающие максимальное сохранение (восстановление) ее фильтрационно-емкостных характеристик, повышение эксплуатационной надежности и экологической безопасности строительства и эксплуатации водозаборных скважин.

Ключевые слова: призабойная зона, керн, проницаемость, буровые растворы, кислотные растворы, водозаборная скважина.

T. V. Melnikova, N. I. Yurkiy*****DEVELOPMENT OF PHYSICAL AND CHEMICAL METHODS
OF IMPACT ON THE PRIZABOYNY ZONE OF WATER WELLS*****VolgogradNIPImorneft Branch of LUCOIL-Enginiring LLC, Volgograd******NEFTEGAZ-MONITORING LLC.**

Are developed the physical chemistry methods of action on the critical zone, which ensure the maximum retention (restoration) of its filtrational-capacitive characteristics, an increase in the operational reliability and ecological safety of building and operation of water-intake bore holes.

Keywords: critical zone, core, permeability, drilling mud, acidic solutions, water-intake bore hole.

В России за последние 100 лет централизованным водоснабжением были обеспечены почти 99,8 % городов и 88 % поселков городского типа. Однако на практике высокая централизация систем водоснабжения (единый общегородской водозабор, единая водоочистная станция и т. д.) создает опасность тяжелых последствий при возникновении чрезвычайных ситуаций. В проектах Федеральных законов: «О питьевой воде и питьевом водоснабжении» и «О безопасности водоснабжения», в «Концепции водоснабжения Волгоградской области «Чистая вода» (2009–2020) и других документах предпочтение отдается использованию подземных вод, а там, где используется поверхностный источник, на случай чрезвычайных ситуаций рекомендуется строительство резервного, дополнительного забора подземных вод, который обеспечивает население питьевой водой нормативного качества и в достаточном количестве, снижение риска для здоровья, улучшение уровня жизни населения, и повышение качества предоставления коммунальных услуг.

В настоящее время, резервные водозаборы подземных вод работают в Брянске, Зеленограде, Кемерово, Томске и др. Однако многие крупные города не имеют резервных водисточников для действующих систем водоснабжения (Барнаул, Омск и др.), что с точки зрения безопасности недопустимо. Кроме того, там, где резервные водисточники используются, не решены вопросы обеспечения их безо-

пасного строительства и эксплуатации, обусловленные комплексом физико-химических процессов коагуляции происходящих в призабойной зоне водозаборных скважин. Полностью предотвратить явление коагуляции пласта в процессе строительства и эксплуатации скважин невозможно.

Цель работы состояла в повышении эксплуатационной надежности и экологической безопасности строительства и эксплуатации водозаборных скважин, за счет снижения эффекта коагуляции в призабойной зоне.

В решении проблемы прогнозирования качественного строительства водозаборных скважин и дальнейшей их безопасной эксплуатации важное место занимает экспериментальная оценка влияния различных факторов (литология и неоднородность коллектора, поверхность пористой среды, химический состав подземных вод, гидрофобные взаимодействия, температура, изменение давления и др.) на проницаемость моделируемой призабойной зоны.

Модель призабойной зоны, в соответствии с требованиями ОСТ 39-195-86, представляет собой составной цилиндрический образец из керна изучаемого объекта. Диаметр единичных образцов 0,026 м, длина 0,03 м, общая длина модели составляет 0,27 м.

Моделирование строительства водозаборной скважины осуществлялось при исследовании динамической фильтрации твердой фазы буровых растворов и их фильтратов в приза-

бойной зоне, установление размера зон их проникновения (ее загрязнения) и выбора конкретных рецептов.

По закону Пуайзеля расход жидкости Q через пористую среду составит:

$$Q = \frac{m \cdot R^2 \cdot F \cdot \Delta p}{8\mu \cdot L} \quad (1)$$

По закону Дарси расход жидкости через эту же пористую среду составит:

$$Q = \frac{K \cdot F \cdot \Delta p}{\mu \cdot L} \quad (2)$$

Внедрение фильтра определяется следующими основными факторами: проницаемостью и толщиной наружной фильтрационной корки; снижением абсолютной проницаемости в зоне, занятой внутренней коркой; глубиной проникновения фильтра. Влияние этих факторов оценивалось на основе экспериментов с вычислительным обобщением их результатов:

Проницаемость пород призабойных зон, характеризующая коэффициентом проницаемости, определяли согласно линейному закону фильтрации Дарси:

$$K = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{\tau \cdot F \cdot \Delta p} \quad (3)$$

Влияние различных по составу технологических жидкостей на проницаемость призабойной зоны до воздействия (K_n) и после (K_k), оценивали с помощью коэффициента восстановления проницаемости:

$$C_B(r) = \frac{K_k}{K_n} \quad (4)$$

Моделирование процесса эксплуатации водозаборных скважин, включало в себя удаление фильтрационной корки, сформировавшейся на торце образца, с помощью реагентной кислотной обработки.

Для оценки проникающей способности фильтра бурового раствора (промывочных жидкостей), коэффициента восстановления проницаемости модели призабойной зоны в целом и составляющих ее единичных образцов был адаптирован лабораторный комплекс, включающий установку УИПК (рис. 1).

Исследование влияния различных по составу и свойствам технологических жидкостей на фильтрационно-емкостные свойства пород призабойной зоны позволило оценить эффективность строительства и последующую работу водозаборных скважин с учетом проведенных нами экспериментальных исследований.

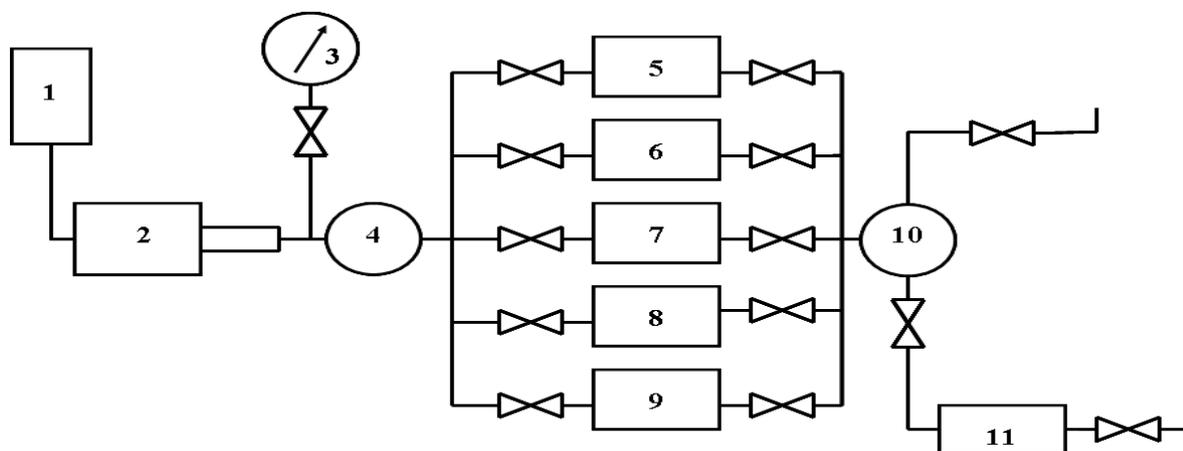


Рис. 1. Принципиальная схема установки УИПК:

1 – масляный бак, 2 – пресс, 3 – манометр, 4 – масляный распределитель, 5–9 емкости для химических реагентов, 10 – устройство распределения реагентов, 11 – кернодержатель

В табл. 1 представлены результаты исследований влияния традиционных глинистых (1) и обработанных различными реагентами в небольших количествах (НТФ, КМЦ, NaOH, N₂CO₃, УЩР, КССБ и др.) (2) буровых растворов на коэффициент восстановления проницаемости в призабойной зоне.

Из табл. 1 видно, что после воздействия глинистыми буровыми растворами, наблюдается загрязнение призабойной зоны, вследствие ее коагуляции, а максимальный коэффициент восстановления проницаемости составляет 0,38. Проведенные исследования однозначно доказали их отрицательное воздействие на водоносные пласты.

Таблица 1

Результаты влияния традиционных глинистых буровых растворов на коэффициент восстановления проницаемости

Фазовая проницаемость по воде, мД		Коэффициент восстановления проницаемости, Св, доли ед.
Исходная, Кн ¹	После воздействия бурового раствора, Кн ²	
14,50	5,1	0,35
38,5	5,3	0,13
18,60	7,2	0,38

В последнее время наибольшее распространение получили ингибирующие биополимерные буровые растворы. Их влияние на коэффициент восстановления проницаемости, представлен в табл. 2.

Из сравнения коэффициентов восстановления проницаемости кернов (табл. 2) видно, что ингибирующий биополимерный буровой раствор оказывает значительно меньшее отрицательное влияние на проницаемость призабойной зоны, чем глинистый буровой раствор. Коэффициенты восстановления проницаемости кернов после его воздействия в 1,8–2 раза меньше, чем после воздействия биополимерного раствора.

Таблица 2

Влияние ингибирующих биополимерных буровых растворов на коэффициент восстановления проницаемости

Фазовая проницаемость по воде, мД		Коэффициент восстановления проницаемости, Св, доли ед.
Исходная, Кн ¹	После воздействия бурового раствора, Кн ²	
26,0	18,0	0,69
24,5	15,8	0,64
23,8	16,3	0,68

Учитывая, что степень сохранения (восстановления) проницаемости зависит от количества и глубины проникновения фильтра в призабойную зону, в связи с этим необходимо максимально ограничивать его проникновение за счет введения кольматанта. Из рассмотренных нами кольматантов наилучшее влияние наблюдалось у мраморной крошки в количестве не менее 5 %. Из рис. 2 видно, что добавление мраморной крошки позволит в 2 раза увеличить проницаемость ингибирующих биополимерных в сравнении с глинистыми растворами.

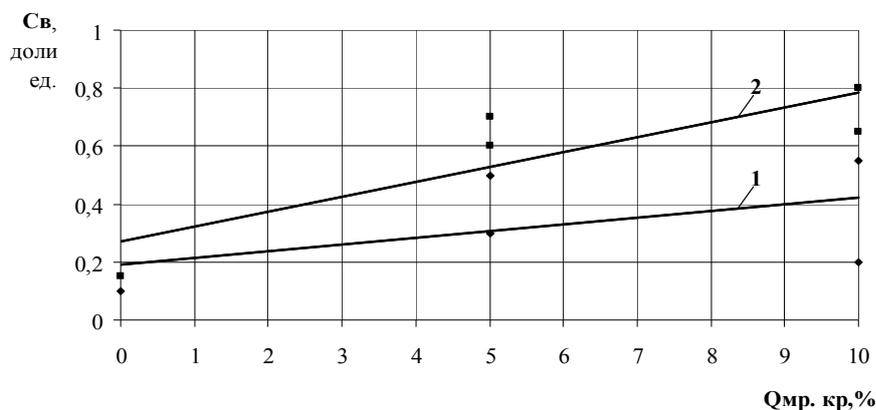


Рис. 2. Зависимость коэффициента восстановления проницаемости призабойных зон от содержания мраморной крошки в глинистом (1) и биополимерном (2) растворах

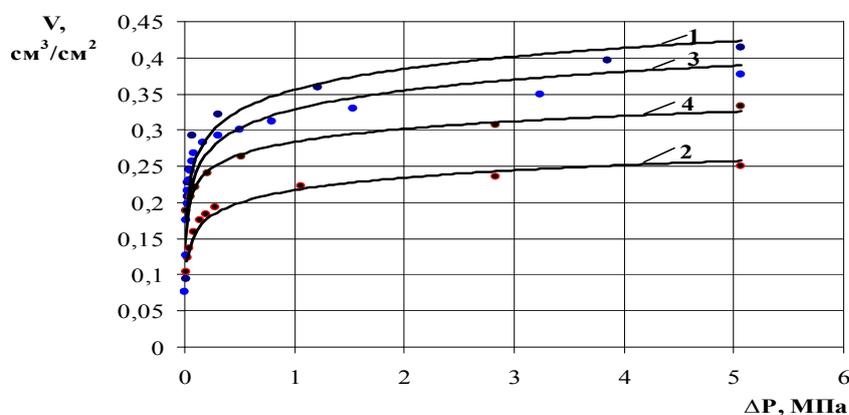


Рис. 3. Результаты аппроксимации экспериментальных данных изменения объема закачанного бурового раствора от давления:
1 – буровой раствор № 1; 2 – буровой раствор № 2; 3 – буровой раствор № 3; 4 – буровой раствор № 4

На рис. 3 представлены результаты исследований влияния традиционных глинистых (№ 1), глинистых модифицированных (№ 3), ингибирующих биополимерных (№ 2), биополимерных модифицированных глиной (№ 4) буровых растворов с добавлением мраморной крошки на кольматацию призабойной зоны сеноманского водоносного горизонта.

Проанализировав результаты экспериментальных исследований по кольматации пород призабойных зон, мы воспользовались про-

$$\text{Для бурового раствора № 1} - V_1(\Delta P) = 0,0416 \ln(P) + 0,356, \quad (5)$$

$$\text{Для бурового раствора № 2} - V_2(\Delta P) = 0,025 \ln(P) + 0,2169, \quad (6)$$

$$\text{Для бурового раствора № 3} - V_3(\Delta P) = 0,0375 \ln(P) + 0,3287, \quad (7)$$

$$\text{Для бурового раствора № 4} - V_4(\Delta P) = 0,0258 \ln(P) + 0,2839. \quad (8)$$

Отличие полученных аппроксимирующих функций заключается в значении их коэффициентов, которые в свою очередь зависят от физико-химического состава и свойств влияния анализируемых буровых растворов на пористую среду призабойной зоны водозаборных скважин.

Проверка по критерию Фишера показала их достаточную адекватность:

$$F_{pA1} = 5,37; \quad F_{pB1} = 12,37 > F_T = 3,1 \text{ для } p = 0,05$$

$$F_{pA2} = 6,12; \quad F_{pB2} = 12,87 > F_T = 3,1 \text{ для } p = 0,05$$

$$F_{pA3} = 6,32; \quad F_{pB3} = 13,17 > F_T = 3,1 \text{ для } p = 0,05$$

$$F_{pA4} = 5,88; \quad F_{pB4} = 12,64 > F_T = 3,1 \text{ для } p = 0,05$$

Коэффициенты корреляции – $R_{1,2,3,4} = 0,99$ достаточно близки к единице, что подтверждает оптимальность полученного решения для функции и параметров.

Как показали результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 3, независимо от изменения давления и исходной проницаемости кернов, при соприкосновении бурового раствора с поверхностью пористой среды в течение 3–7 минут происходила ее закупорка, т. е. за это время на торце образца формируется корка из твердой фазы бурового раствора. При этом минимально возможные размеры проникновения в пористую среду (менее 2 мм) имел ингибирующий буровой раствор № 2, в котором после формирования корки даже при превышении давления более 5,0 МПа поступление фильтрата не наблюдалось, а добавка в безглинистый раствор глины (кривая 4) увеличивает объем кольматации пласта по сравнению с безглинистым раствором.

На рис. 4 представлен график зависимости,

граммным пакетом Curve Expert 1.4 и установили, что полученные данные лучше всего аппроксимировать экспоненциальной зависимостью. В программе были определены коэффициенты (V_0, k) для каждого бурового раствора, а также соответствующие коэффициенты корреляции – R .

Для уточнения коэффициентов воспользовались программой PTC Mathcad 14.0. Нами были найдены следующие коэффициенты для искомых зависимостей:

полученной расчетным методом, проницаемости кернов от объема фильтрата бурового раствора, который выходил после прокачки бурового раствора через призабойную зону сеноманских пластов.

Как видно из рис. 4, после воздействия ингибирующего биополимерного бурового раствора на торце образца образовалась тонкая непроницаемая фильтрационная корка, препятствующая проникновению фильтрата в пласт, и предотвращающая загрязнение призабойной зоны.

В случае с глинистыми растворами № 1 и № 3, через образовавшуюся корку (2 мм) при перепаде давлений $\Delta P \geq 2,0$ МПа и выше фильтрат бурового раствора поступал в пористую среду, что свидетельствует о глубоком загрязнении пласта и призабойной зоны. Об этом свидетельствуют результаты исследований влияния глинистых растворов. Так, глинистый раствор без минеральной добавки (кривая 1), кольматирует «основательно» пористую среду, его фильтрат не перестает поступать в пласт даже при проницаемости менее одной сотой доли миллидарси, а добавка в глинистый раствор мраморной крошки (кривая 3), уменьшает объем кольматации пористой среды по сравнению с глинистым раствором и замедляет поступление фильтрата в пористую среду.

Определяющим фактором, применения ингибирующих биополимерных буровых растворов с мраморной крошкой для строительства водозаборных скважин, с точки зрения обеспечения экологической безопасности является отсутствие в предлагаемых растворах техногенно опасных компонентов, все вещества имеют 4 класс опасности. В связи с этим они являются экологически безопасными для окружающей среды.

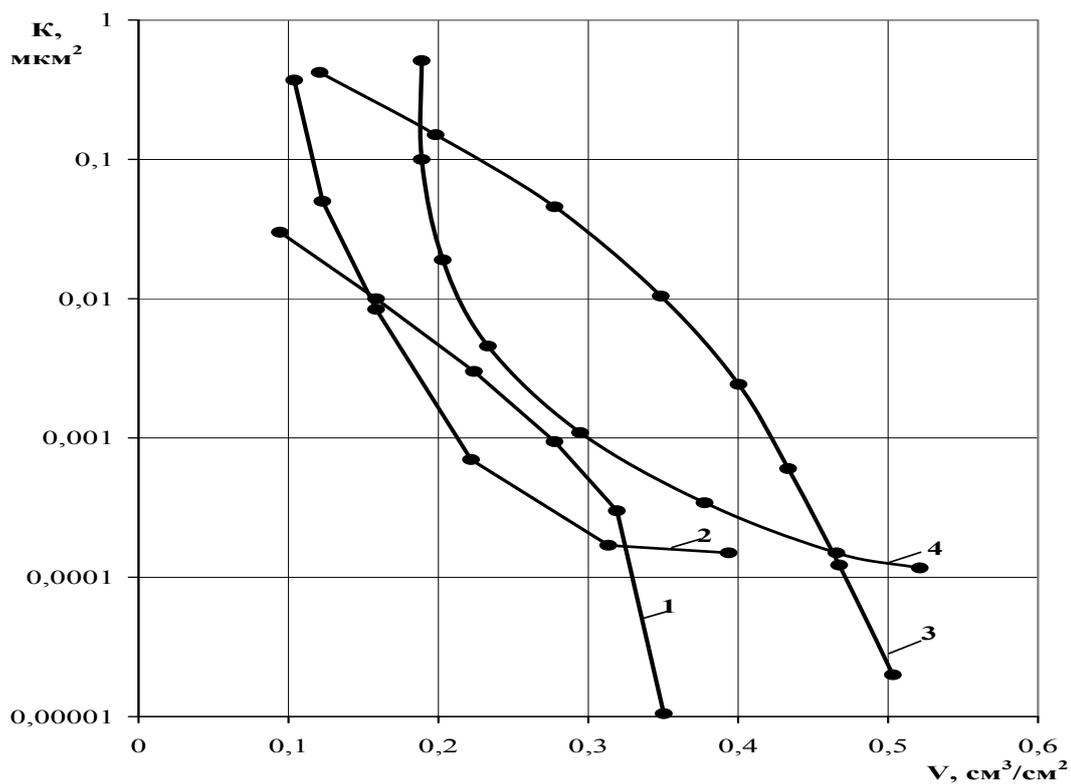


Рис. 4. Зависимость изменения проницаемости кернов, от объема фильтрата бурового раствора:
1 – буровой раствор № 1; 2 – буровой раствор № 2; 3 – буровой раствор № 3; 4 – буровой раствор № 4

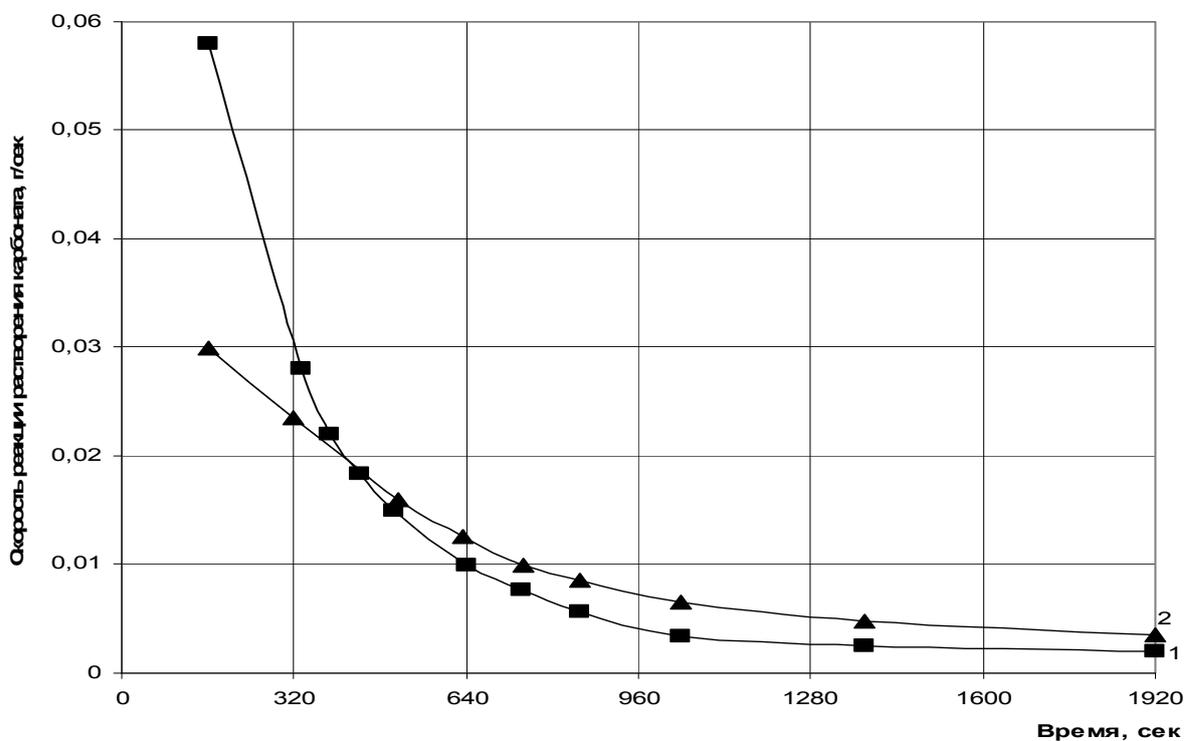


Рис. 5. Зависимость скорости реакции растворения карбоната от времени:
1 – 24 % соляная кислота; 2 – 12 % соляная кислота

Вторым направлением работ по повышению надежности и экологической безопасности водозаборных скважин стала разработка кислот-

ных растворов восстанавливающих естественную проницаемость призабойной зоны и повышающих их производительность.

Из многообразия методов используемых для воздействия на призабойную зону наибольшее распространение получила соляно-кислотная обработка. Однако кислотному воздействию свойственно быстрое снижение эффективности и малая глубина проникновения в карбонатный коллектор.

Для выяснения закономерностей и факторов, влияющих на эффективность кислотных обработок были проведены экспериментальные исследования по взаимодействию 12 % и 24 % раствора соляной кислоты с керновым материалом в поверхностных условиях (при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Как видно из рис. 5, скорость реакции 24 % соляной кислоты с исследуемой карбонатной породой в первые две минуты (120 с) выше (на 97 %), по сравнению с 12 %. Через шесть минут (360 с) скорость реакции 24 % раствора соляной кислоты уже превышает всего на 8 %, а в дальнейшем снижается. Основной причиной снижения скорости реакции 24 % раствора соляной кислоты является образовавшийся хлорид кальция, препятствующий подходу активной кислоты к поверхности породы.

Результаты экспериментальных исследований показали, что, на взаимодействие соляной кислоты с естественной породой влияет: концентрация раствора кислоты, температура, присутствие в растворе неорганических соединений.

Для обоснования разработки технологий соляно-кислотных растворов и ликвидации факторов, повлиявших на загрязнение призабойной зоны скважин были проведены эксперименты на образцах карбонатной породы в пластовых условиях при температуре $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В результате реакции взаимодействия ки-

слоты с породой, образуется хлорид кальция, двуокись углерода. В раствор переходят многовалентные металлы, в частности двух- и трехвалентное железо, которое закупоривают микро- и макропоры, тем самым приводят к интенсивному возрастанию давления и невозможности закачки кислоты в пласт.

Для предупреждения выпадения гидроксида железа в пласте в процессе прокачки кислоты по трубам, в кислотный раствор вводили стабилизирующие добавки – комплексообразователи (органические кислоты), которые способны образовывать комплексные соединения, растворимые в воде. Кроме того, органические кислоты существенно снижают скорость реакции раствора соляной кислоты с породой.

Для снижения межфазного натяжения между закачиваемым кислотным раствором, флюидами пласта и пористой средой, а также для предотвращения образования гидрофобных эмульсий и активного выноса из пласта продуктов реакции в кислотный раствор вводили ингибитор (поверхностно – активное вещество).

Как показали исследования при взаимодействии разработанных соляно-кислотных растворов с пористой средой происходит растворение фильтрационной корки, загрязняющей призабойную зону и глубокое проникновение раствора в пласт сразу по нескольким каналам, что позволяет более полно их очистить и вывести загрязняющие отложения, через одно отверстие.

Применение разработанных соляно-кислотных растворов позволит в 3–4 раза увеличить фильтрационно-емкостные характеристики пород призабойных зон водозаборных скважин, в сравнении с используемой соляно-кислотной обработкой.

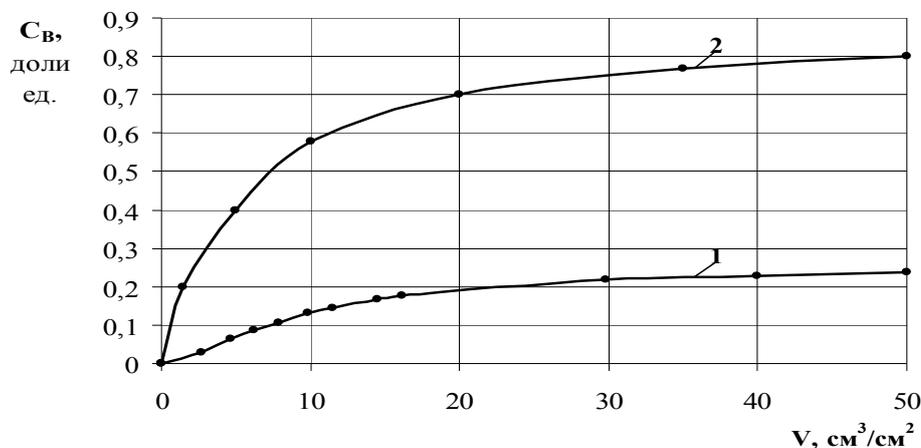


Рис. 6. Зависимость восстановления проницаемости пород призабойных зон в зависимости от объема прокачиваемой воды, после обработки пласта: 1 – соляной кислотой (12 % и 24 %); 2 – разработанными соляно-кислотными растворами

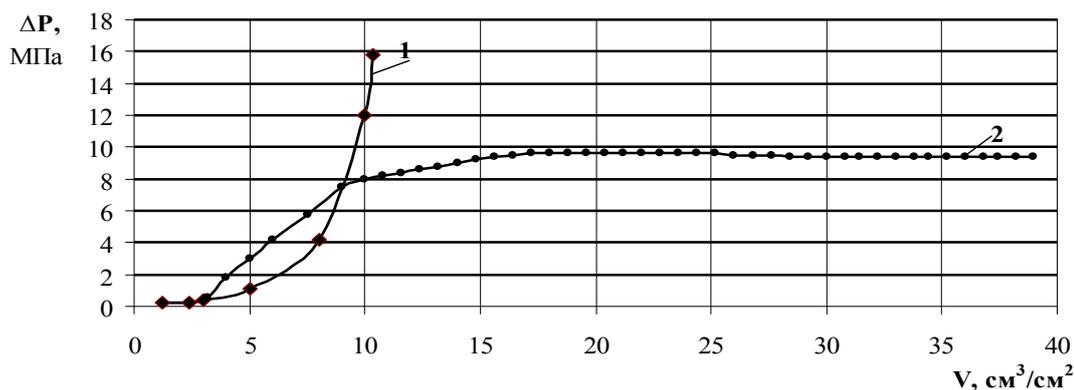


Рис. 7. Зависимость перепада давления от объема прокачанной: 1 – соляной кислоты; 2 – разработанных соляно-кислотных растворов

На рис. 7 показана зависимость перепада давления от объема прокачанной кислоты.

Как показали результаты исследования, представленные на рис. 7, закачка раствора соляной кислоты идет при интенсивном возрастании давления как для 24 %, так и 12 % концентрации, что значительно повышает опасность возникновения гидроразрыва по-

род призабойной зоны водозаборных скважин. А закачка разработанных соляно-кислотных растворов идет равномерно (порционно), чем обеспечивается высокий уровень экологической безопасности при восстановлении проницаемости призабойной зоны и повышении продуктивности водозаборных скважин.

Таблица 3

Сравнительный анализ используемых и разработанных методов повышения надежности строительства и эксплуатации водозаборных скважин

Наименование	Методы воздействия на ПЗВС			
	при строительстве		при эксплуатации	
Назначение	ГБР	ИББР	СКО	СКР
Тип раствора	ГБР	ИББР	СКО	СКР
Стоимость скважины, тыс. руб.	1700	3150	2200	3000
Стоимость СКО, тыс. руб.	(2200)·3	–	(2200)·3	–
Общая стоимость скважины, тыс. руб.	8300	3150	8800	3000
Эксплуатационный эффект, %	20	80	25	80

ГБР – глинистый буровой раствор, ИББР – ингибирующий биополимерный буровой раствор, СКО – соляно-кислотная обработка, СКР – соляно-кислотные растворы.

В табл. 3 приведена сравнительная стоимость строительства водозаборных скважин с использованием различных буровых растворов.

В ы в о д ы

1. Установлена способность безглинистых биополимерных буровых растворов на основе полисахаридных полимеров с добавлением кислоторастворимого кольматанта – карбоната кальция надежно кольматировать призабойную зону, сохраняя естественную проницаемость пластов на 70–80 % и обеспечивать экологически безопасное строительство водозаборных скважин. Все вещества, входящие в состав растворов, имеют 4 класс опасности. В связи с этим они являются экологически безопасными для окружающей среды.

2. В результате проведенных экспериментальных исследований были определены факторы, влияющие на эффективность взаимодействия растворов кислот с карбонатной породой: концентрация раствора кислоты, температура, присутствие в растворе неорганических соединений и др.

3. Установлена способность соляно-кислотных растворов, на основе соляной кислоты, ингибитора и комплексообразователя глубоко проникать в пласт, растворять многофазные загрязняющие его отложения, восстанавливая при этом фильтрационно-емкостные свойства призабойной зоны и обеспечивая необходимый уровень экологической безопасности.

4. Анализ стоимости строительства и эксплуатации водозаборных скважин показал, что

наблюдается тенденция к снижению затрат на строительство и эксплуатацию водозаборных скважин в 2,6 и 2,9 раз при использовании разработанных методов. Эксплуатационный эффект увеличился в 3–4 раза, а частота остановок водозаборных скважин сведена к минимуму.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юркив, Н. И. Физико-химические основы нефтеизвлечения / Н. И. Юркив. – М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 2005. – 365 с.

2. Юркив, Н. И. Повышение эффективности разработки обводнившихся месторождений / Н. И. Юркив, А. Д. Поликарпов, Т. В. Мельникова. – М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 2009. – № 7. – С. 33–36 с.

3. Бикчурин, Т. Н. Опыт применения «защитных» полимеров в качестве кольматантов при бурении скважин / Т. Н. Бикчурин, Р. Р. Бикбулатов, А. А. Кондратьев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2005. – № 6. – С. 22–24.

4. Федосов, Р. И. Разработка и совершенствование гидрорелевых буровых растворов с целью повышения скорости бурения, качества вскрытия продуктивных пластов и снижения стоимости строительства скважин: дисс. канд. техн. наук / Р. И. Федосов. – Краснодар, 1996.

УДК 54-148+ 544.773.33 + 665.753.4

*Е. В. Васильева**, *А. Б. Голованчиков**, *В. Н. Карев***

УСТОЙЧИВЫЕ ЭМУЛЬСИИ НА МИКРОУРОВНЕ ПО ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЕ

*Волгоградский государственный технический университет

**Волгоградский филиал Российского государственного университета туризма и сервиса

Приведены результаты эксперимента смешивания дизельного топлива с водно-ацетоновым и водно-спиртовыми растворами. Показаны возможные преимущества эмульсий дизельного топлива с водно-спиртовым раствором. Предлагается использовать полупроницаемые мембраны для создания устойчивых эмульсий.

Ключевые слова: эмульсия, дизельное топливо, этанол, ацетон, полупроницаемые мембраны, микрокапли.

*E. V. Vasileva**, *A. B. Golovanchikov***, *V. N. Karev***

THE STABLE EMULSIONS ON MICROLEVEL BY DISPERSED PHASE

*Volgograd State Technical University

**Volgograd branch of the Russian State University of Tourism and Services

There were made the experiment of the mixing diesel with water and acetone and diesel with water and ethanol. There are possible advantages of the emulsion diesel and hydroalcoholic solution. It is proposed to use a semi-permeable membrane to create stable emulsions.

Keywords: Emulsion, diesel, ethanol, acetone, semipermeable membrane, microdroplet.

Необходимым условие образования эмульсий является полная или частичная нерастворимость капель дисперсной фазы в дисперсионной среде. Поэтому жидкие вещества, образующие эмульсию, должны различаться по полярности.

Эмульсии можно получить искусственно в результате механического диспергирования жидкостей [1].

Устойчивые эмульсии получают с помощью ультразвука. Пользуясь этим методом, следует учитывать, что ультразвуковые колебания способны изменять свойства эмульгатора. В ряде случаев, особенно при работе с биологическими объектами, такое воздействие нежелательно [2].

Цель работы: анализ способов получения устойчивых эмульсий и результатов экспериментов для эмульсий, в которых плотность капель дисперсной среды равняется плотности дизельного топлива.

Для получения и стабилизации эмульсий часто применяют гомогенизацию. Это способ, характерный только для эмульсий, состоит в продавливании жидкости через отверстия. При этом образующиеся струйки жидкости распадаются на капли дисперсной фазы. Гомогенизация позволяет получить систему, близкую к монодисперсной. Для повышения устойчивости эмульсии грубодисперсные эмульсии продавливают через отверстия меньших размеров. Это позволяет уменьшить размеры капель и увеличить седиментационную устойчивость эмульсии. Например, применяют гомогенизацию молока, которая снижает размер жировых капель на 1–2 порядка, что увеличивает время хранения продукта.

Например, для стабилизации бимодальной эмульсии нефть в воде с низкой вязкостью и, с эмульгатором, непрерывная фаза – вода, диспергирующая – нефть, соотношение нефть/во-

да – от примерно 70:30 до примерно 85:15 по весу; дисперсная фаза нефти характеризуется двумя различными размерами капель нефти D_L и D_S , где D_L около 10 до 40 микрон D_S меньше или равна 5 мкм, отношение D_L/D_S больше или равно 4, при этом доля капель в нефти D_L составляет от 45 до 85 %.

Для того чтобы обеспечить заданные свойства по вязкости, нужно использовать только обес-

соленную и обезвоженную нефть. Значение вязкости может быть изменено без изменения отношения нефть/вода. Для этого нужно изменить соотношение крупных капель D_L по отношению к количеству капель D_S в дисперсной фазе [3].

Наиболее стойкие эмульсии образуют высоковязкие нефти (см. таблицу): повышенная вязкость дисперсионной среды препятствует столкновению глобул воды и их укрупнению [4].

Классификация нефтей по эмульсионности

Группа	Эмульсионность	Физико-химическая характеристика нефтей			
		Плотность, кг/м ³	Вязкость · 10 ⁶ , м ² /с	Содержание, %	
				смола	асфальтенов
I	Высокоэмульсионные	860–890	> 15	8–20	2–4
II	Среднеэмульсионные	840–860	7–12	5–8	0,6–1,5
III	Низкоэмульсионные	700–840	4–8	> 5	0,7–1,0

Был проведен ряд экспериментов, задачей которых стало получение эмульсий дизельного топлива с водно-спиртовой смесью (ВСС) и водно-ацетоновой смесью (ВАС). Вода, этиловый спирт и ацетон не растворимы в дизельном топливе, но этиловый спирт и вода, а также ацетон и вода хорошо растворяются друг в друге.

Объемные соотношения воды и этилового спирта в смеси подбирали таким образом, чтобы плотности ВСС была максимально приближена к плотности дизельного топлива. Аналогично выбирали объемное соотношение воды и ацетона.

Плотность дизельного топлива. Для получения такой же плотности ВСС смешали 13,7 мл этилового спирта (содержащего 94 % C_2H_5OH) и 1,3 мл воды, для получения такой же плотности ВАС смешали 13,3 мл ацетона и 1,7 мл воды. Плотность измерялась с помощью пикнометра при 20 °С. Результаты опытов приведены ниже.

Опыт № 1: смешали 15 мл ДТ и 15 мл ВСС (13,7 мл этилового спирта + 1,3 мл воды) в делительной воронке (объемное соотношение, % ДТ:ВСС = 50:50). Полученная эмульсия была стабильна в течении 1 часа, а затем началось разделение: верхняя фаза – желтая мутная эмульсия (14,5), нижняя фаза – светло-желтая эмульсия с мелкими каплями (14 мл). Разделенные фазы перегнали на воздушной бане при атмосферном давлении. В верхней фазе содержится большее количество этилового спирта t начала перегонки 79 °С, температура конца перегонки 98 °С (t кипения этилового спирта

78,5 °С), кубовый остаток (2 мл) – мутная желтая эмульсия. В нижней фазе содержится 0,5 мл этилового спирта, который перегонялся при $t = 78$ °С, кубовый остаток – желтая мутная эмульсия, в основном, дизельное топливо.

В опытах № 2 и № 3 объемы дизельного топлива и ВСС брались соответственно: 20 мл и 10 мл (объемные соотношения ДТ:ВСС = 66,66:33,33), и 25 мл и 5 мл (объемные соотношения ДТ:ВСС = 83,33:16,66). Деление фаз началось через 1 час: верхняя фаза – желтая мутная эмульсия (опыт № 3 – 18 мл), (опыт № 4 – 26 мл); нижняя фаза – светло-желтая эмульсия (опыт № 2 – 11 мл), (опыт № 3 – 4 мл).

Опыт № 4: смешали 15 мл ДТ и 15 мл ВАС (13,3 мл ацетона и 1,7 мл воды) в делительной воронке (объемное соотношение, % 50:50). Полученная эмульсия через 30 минут разделилась: верхняя фаза – желтая мутная эмульсия ($V = 15,8$ мл), нижняя фаза – прозрачная желтая жидкость ($V = 12,4$ мл). Разделенные фазы перегнали на водяной бане при атмосферном давлении: в верхней фазе содержится 1 мл ацетона, который перегонялся при $t = 58$ °С (температура кипения ацетона 56,24 °С), кубовый остаток – светло-желтый прозрачный, содержит дизельное топливо (13,4 мл). В нижней фазе содержится основное количество ацетона температура начала перегонки 56 °С, температура конца перегонки 62 °С (температура кипения ацетона 56,24 °С), кубовый остаток – 2 мл светло-желтой эмульсии. Показатель преломления отогнанного ацетона $n_n^{20} = 1,3591$.

В опытах № 5 и № 6 объемы ДТ и ВАС брались соответственно: 20 мл и 10 мл (объемное соотношение, % ДТ:ВАС = 66,66:33,33), и 25 мл и 5 мл (объемное соотношение, % ДТ:ВАС = 83,33:16,66). Деление фаз началось через 45 минут: верхняя фаза – желтая мутная эмульсия (опыт № 5 – 21,5 мл), (опыт № 6 – 26 мл); нижняя фаза – прозрачная желтая жидкость с небольшим количеством мелких капель (опыт № 5 – 7,5 мл); (опыт № 6 – 2мл).

Из опытов видно, что стабильная эмульсия дизельного топлива с ВСС и ВАС, получается потому что плотность дисперсной фазы и дисперсной среды одинакова, при этом содержание капель раствора воды и спирта или воды и ацетона очень малы. Для того чтобы использовать эту эмульсию в двигателе содержание воды не должно превышать 10 %. В опыте № 3 содержание ВСС не превышает 4 %, в опыте № 5 содержание ВАС не превышает 7,5 %, а в опыте № 6 – 4 %.

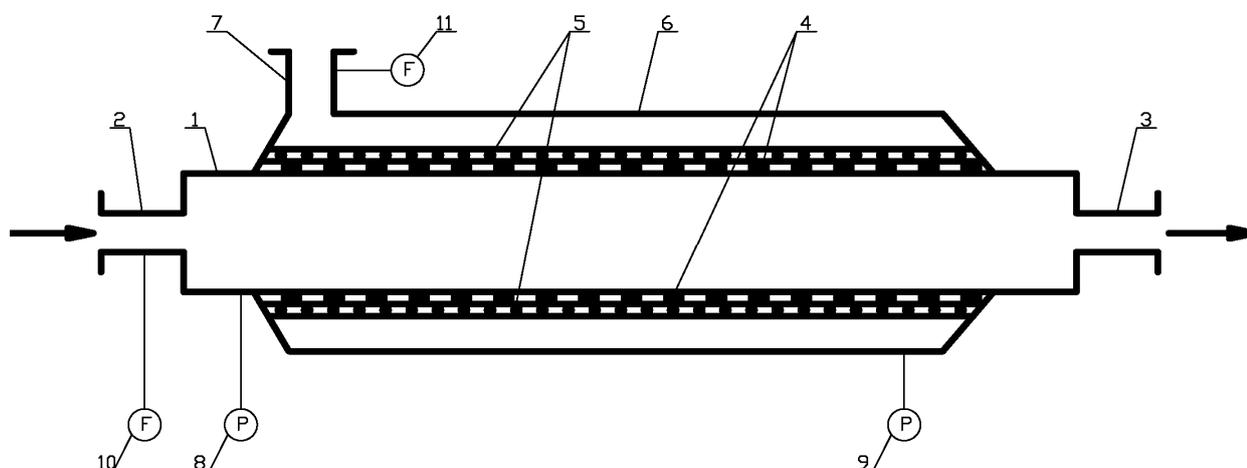
Как известно применение стабильных эмульсий ВСС дает следующие преимущества для использования в дизельных двигателях:

- улучшение смесеобразования;
- уменьшения теплового напряжения процесса;
- уменьшение закоксовывания топливоподающих системы дизеля (уменьшения количества отложений);
- уменьшения концентрации оксидов азота и сажи;
- большее цетановое число;
- низкая склонность к дымлению;
- интенсивно выгорания;
- отсутствие сажи [5].

Предложена конструкция устройства для создания эмульсий с микрокаплями, включающее в себя корпус, внутри которого размещены пластины с отверстиями, при этом пластины установлены вдоль потока среды и на каждой пластине снаружи закреплены полупроницаемые мембраны, а сами пластины с мембранами закрыты в герметичном кожухе с патрубком для подачи воды или жидкого раствора, плотность которого равна плотности дизельного топлива.

Установка пластин с отверстиями вдоль потока среды и закрепление на каждой пластине снаружи полупроницаемой мембраны позволяет калибровать капли жидкого раствора при течении его сквозь поры мембран по размеру, близкому к размеру этих пор в мембранах. Это снижает размер микрокапель в жидкой смеси и обеспечивает узкий фракционный состав этих капель в ней, что повышает качество получаемой эмульсий.

Установка пластин с отверстиями с полупроницаемыми мембранами в герметичном кожухе с патрубком для подачи капель жидкого раствора, позволяет создать в этом герметичном кожухе избыточное давление, большее чем давление в корпусе, чтобы обеспечить подачу раствора из кожуха через микропоры полупроницаемой мембраны с заданным расходом. Это обеспечивает равномерную подачу микрокапель в основной поток жидкости, например дизельного топлива, предотвращает коалесценцию капель в ней, создает устойчивую эмульсию микрокапель узкого фракционного состава и в целом повышает качество получаемой эмульсий.



Устройство для приготовления эмульсий:

1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – пластина с отверстиями; 5 – полупроницаемая мембрана; 6 – кожух; 7 – патрубок; 8, 9 – манометры; 10, 11 – расходомеры

Основной поток высокомолекулярной жидкости, например, мазут марки М 100 подают под давлением p_1 , которое контролируют манометром 8, по патрубку 2, с расходом q_1 , который контролируют расходомером 10, в корпусе 1. Одновременно по патрубку 7 под давлением $p_2 > p_1$, которое контролируют манометром 9, в кожухе 6 подают раствор с малым размером молекул, например, водный раствор этанола или ацетона. Его расход q_2 контролируют расходомером 11, так чтобы отношение расходов $q_2/q_1 = C$, обеспечивающее необходимую концентрацию водного раствора в мазуте. Так как давление молекул воды в кожухе 6 p_2 больше, чем давление мазута p_1 в корпусе 1, то молекулы водного раствора, имеющие размер меньший, чем размер пор в полупроницаемых мембранах 5, свободно проходят сквозь эти поры и поступают в основной поток мазута, образуя в нем тонкодисперсную эмульсию с размером капель на микроуровне и узкого фракционного состава.

В качестве полупроницаемой мембраны была установлена мембрана для микрофльтрации «Владипор» МФА-МА № 10 с диаметром пор 0,95–1,05 мкм.

Таким образом, закрепление на каждой пластине с отверстиями полупроницаемых мембран и их установке вдоль потока среды внутри герметичного кожуха с патрубком для подачи

водного раствора позволяет создавать устойчивую тонкодисперсную эмульсию с размером капель микроуровневого класса и узким фракционным составом, равномерно распределять микрокапли эмульсии по объему жидкой смеси. Кроме того, такую эмульсию можно приготовить с помощью полупроницаемых мембран при невысоком избыточном давлении в кожухе (по сравнению с давлением в корпусе) и с заданной концентрацией капель в эмульсии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Малышева, Ж. Н.* Теоретическое и практическое руководство по дисциплине «Поверхностные явления и дисперсные системы»: учеб. пособ. / Ж. Н. Малышева, И. А. Новаков; ВолгГТУ. – 3-е изд., перераб. и доп. – Волгоград, 2011. – 352 с.
2. *Захарченко, В. Н.* Коллоидная химия: учеб. для медико-биолог. спец. вузов / В. Н. Захарченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 238 с.
3. Пат. № 5503772 США, МПКВ01J 13/00. Bimodal emulsion and its method of preparation / Nunez G., Rivas H., Intevp G., S.A. – 1996.
4. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин [электронный ресурс]. – 2013. – режим доступа: <http://www.judywhiterealestate.com/podgotovka/oils83.htm>
5. *Васильева, Е. В.* Исследование устойчивости многокомпонентных эмульсий / Е. В. Васильева, А. Б. Голованчиков, Г. Н. Карева // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 1(104) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 6). – С. 50–53.

УДК 66.045.54

Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов, М. Г. Рязанов, Е. Е. Чугунова

РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНИ С КАПЕЛЬНЫМ ОРОШЕНИЕМ

Волгоградский государственный технический университет

Приводится методика инженерного расчета вентиляторной градирни с капельным орошением на заданную производственную мощность для систем оборотного водоснабжения, на основе экспериментальных данных в области гидродинамики и интенсивности теплопереноса.

Ключевые слова: вентиляторные градирни, капельное орошение, проволочная насадка, коэффициенты тепло- и массопередачи.

N. A. Merentsov, A. B. Golovanchikov, V. A. Balashov, M. G. Ryazanov, E. E. Chugunova

CALCULATION OF VENTILATOR COOLING TOWER WITH DRIP IRRIGATION

Volgograd State Technical University

In this paper the method of the ventilation cooler with drip irrigation calculation is described. All calculations are based on the experimental data on the intensity of heat and mass transfer and are made for given production output.

Keywords: ventilation cooling tower, drip irrigation, wire nozzle, coefficients of heat- and mass transfer.

Отвод низкопотенциального тепла от воды путем ее охлаждения воздухом широко используется в различных технических устройствах и технологических системах строительной, хи-

мической, нефтегазовой, энергетической, металлургической, атомной и других отраслях промышленности [1, 7]. Разработка конструкций градирен, обладающих относительно высо-

кой тепловой производительностью при малых габаритных размерах, является актуальной инженерной задачей.

Эффективность работы градирни всецело определяется эффективностью работы ее оросителя. Перспективными в этом отношении, как показано в работе [2, 3], являются оросители, имеющие волокнистую структуру и обладающие высокими значениями пористости и удельной поверхности. Важной характеристикой такой волокнистой структуры является ее простота и доступность изготовления. Для испарителя в качестве насадки предлагается использовать упругую стальную проволоку или полимерные нити различной толщины и профиля из отходов сталепроволочного канатного завода или завода синтетического волокна [6]. Из подобного материала нетрудно изготовить блоки в форме куба или параллелепипеда с размерами сторон порядка 200–400 мм, это позволяет визуально контролировать их внутреннюю структуру. При необходимости блоку можно придать требуемую жесткость путем заключения его в проволочный каркас. Из таких блоков можно набрать ороситель требуемых размеров. В оросителях, в зависимости от величины эквивалентного диаметра, который может изменяться в пределах от 5 до 10–12 мм и скорости воздушного потока, может быть реализован как капельно-пленочный, так и капельный режим орошения. Оросители с высокими значениями эквивалентного диаметра обладают малым гидравлическим сопротивлением и могут иметь повышенные высотные размеры.

В работе рассматривается тепломассообменный процесс охлаждения воды в градирне, ороситель которой работает в капельном режиме орошения.

Целью работы является разработка методики инженерного расчета определения размеров оросителя для заданных условий работы градирни по расходам охлаждаемой воды и воздуха, температурам потоков воды и воздуха в крайних сечениях оросителя при известных начальных параметрах потока воздуха по влажности. В основу расчета положено определение поверхностей контакта фаз, обеспечивающих требуемый теплосъем путем теплообмена и требуемый влагообмен, с последующим согласованием значений этих поверхностей. В расчете используются найденные экспериментальные значения коэффициентов тепло- и массопередачи для принятой насадки и удерживаемого насадкой потока капель жидкости [4, 5].

Методика расчета представляется в виде алгоритма последовательно выполняемых расчетов по определению технологических и геометрических параметров градирни:

1. Начальное влагосодержание воздуха на входе в градирню

$$x_H = \frac{0,622\varphi_H p_H^*}{(1,033 - \varphi_H p_H^*)}$$

2. Энтальпия воздуха на входе и выходе из градирни

$$i_H = c_{\theta} t_{\theta H} + x_H (r_H + c_n t_{\theta H}),$$

$$i_K = c_{\theta} t_{\theta K} + x_K (r_K + c_n t_{\theta K}).$$

3. Из совместного решения уравнений материального баланса

$$G_{WH} - G_{WK} = G_{\theta} (x_K - x_H)$$

и теплового баланса

$$G_{WH} c_w t_{WH} + G_{\theta} i_H = G_{WK} c_w t_{WK} + G_{\theta} i_K$$

с учетом энтальпии воздуха на выходе из градирни, получим формулы для расчета влагосодержания воздуха на выходе из градирни

$$x_K = \frac{G_{WH} c_w (t_{WH} - t_{WK}) + G_{\theta} (i_H - x_H c_w t_{WK} - c_{\theta} t_{\theta K})}{G_{\theta} (r_H + c_n t_{\theta K} - c_w t_{WK})},$$

удельные производительности по испаряемой воде и по воде на выходе из градирни

$$W = G_{\theta} (x_K - x_H),$$

$$G_{WK} = G_{WH} - W$$

и относительной влажности воздуха на выходе (φ_K должна быть меньше 1)

$$\varphi_K = 1,033 \cdot \frac{x_K}{[(0,622 + x_K) p_K^*]}.$$

4. Плотность потока капель

$$N_K = \frac{(G_{WH} / \rho_w)}{(\frac{\pi d_H^3}{6})}$$

5. Начальная, конечная и средняя удельные поверхности потока капель

$$F_{KH} = \pi d_H^2 N_K, \quad F_{KK} = \pi d_K^2 N_K, \quad F_{KC} = (F_{KH} + F_{KK}) / 2.$$

6. Конечный диаметр капель на выходе из градирни

$$d_K = \sqrt[3]{(G_{WK} / \rho_w) (\pi N_K / 6)}.$$

7. Средняя плотность и фиктивная скорость воздуха

$$\rho_{\theta} = 1,29 \cdot 273 / (273 + \frac{t_{\theta H} + t_{\theta K}}{2}), \quad v_{\theta} = G_{\theta} / \rho_{\theta}.$$

8. Диаметр градирни

$$D_{zp} = \sqrt{4q / \pi G_{wh} \cdot 3,6}.$$

9. Средняя теплоемкость влажного воздуха

$$c_{\theta c} = c_{\theta} + \frac{c_n(x_H + x_K)}{2}.$$

10. Средний удельный расход воды

$$G_{wc} = (G_{wh} + G_{wk}) / 2.$$

11. Средняя движущая сила процесса теплопередачи

$$\Delta t_c = \frac{(t_{wh} - t_{\theta k}) - (t_{wk} - t_{\theta h})}{\ln \left(\frac{t_{wh} - t_{\theta k}}{t_{wk} - t_{\theta h}} \right)}.$$

12. Массовый расход воздуха и тепловая мощность градирни

$$q_{\theta m} = \left(\frac{G_{\theta}}{G_{wc}} \right) q_{wh},$$

$$Q_{zp} = q_{\theta m} (i_K - i_H).$$

13. Необходимая расчетная поверхность капель для обеспечения теплопередачи

$$F_t = \frac{1000 \cdot Q_{zp}}{K_t \Delta t_c}.$$

14. Для определения числа единиц переноса влагосодержание воздуха разбиваем на « m » равных интервалов ($m = 100$)

$$\Delta x = \frac{x_K - x_H}{m}.$$

Тогда текущее значение влагосодержания для середины каждого интервала разбиения описывается формулой

$$x_i = x_H + \Delta x / 2 + \Delta x (i - 1).$$

Соответственно энтальпия для линейной зависимости $i = i(x)$ определяется в виде (см. рисунок)

$$i_i = a + b x_i,$$

где $a = i_{\theta h} - b x_H$, $b = \frac{(i_K - i_H)}{(x_K - x_H)}$.

Из материального баланса расхода воды для i -й точки запишется в виде

$$q_{wi} = q_{wk} + q_{\theta m} (x_i - x_H),$$

а из теплового баланса определяется температура воды по формуле

$$t_{wi} = \frac{[q_{wh} (i_i - i_H) + q_{wk} c_w t_{wk}]}{(q_{wi} c_w)}.$$

Табличную зависимость давления насыщенного водяных паров от температуры можно описать степенным уравнением

$$p_{wi}^* = k t_{wi}^n, \quad k = 3,5 \cdot 10^{-5}, \quad n = 2,086,$$

с относительной ошибкой не превышающей 2,5 %.

Влагосодержание насыщенного воздуха в пограничном слое капли при $\phi = 1$ и $p = p_{wi}$ запишется в виде

$$x_{wi} = 0,622 \frac{p_{wi}^*}{(1,033 - p_{wi}^*)},$$

а число единиц переноса в интегральном и расчетном виде

$$ЧЕП_x = \int_{x_H}^{x_K} \frac{dx}{x_{wi} - x}, \quad S_x = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta x}{x_{wi} - x_i}.$$

15. Средняя движущая сила по влагосодержанию

$$\Delta x_c = (x_K - x_H) / S_x.$$

16. Необходимая расчетная поверхность капель для обеспечения массопередачи

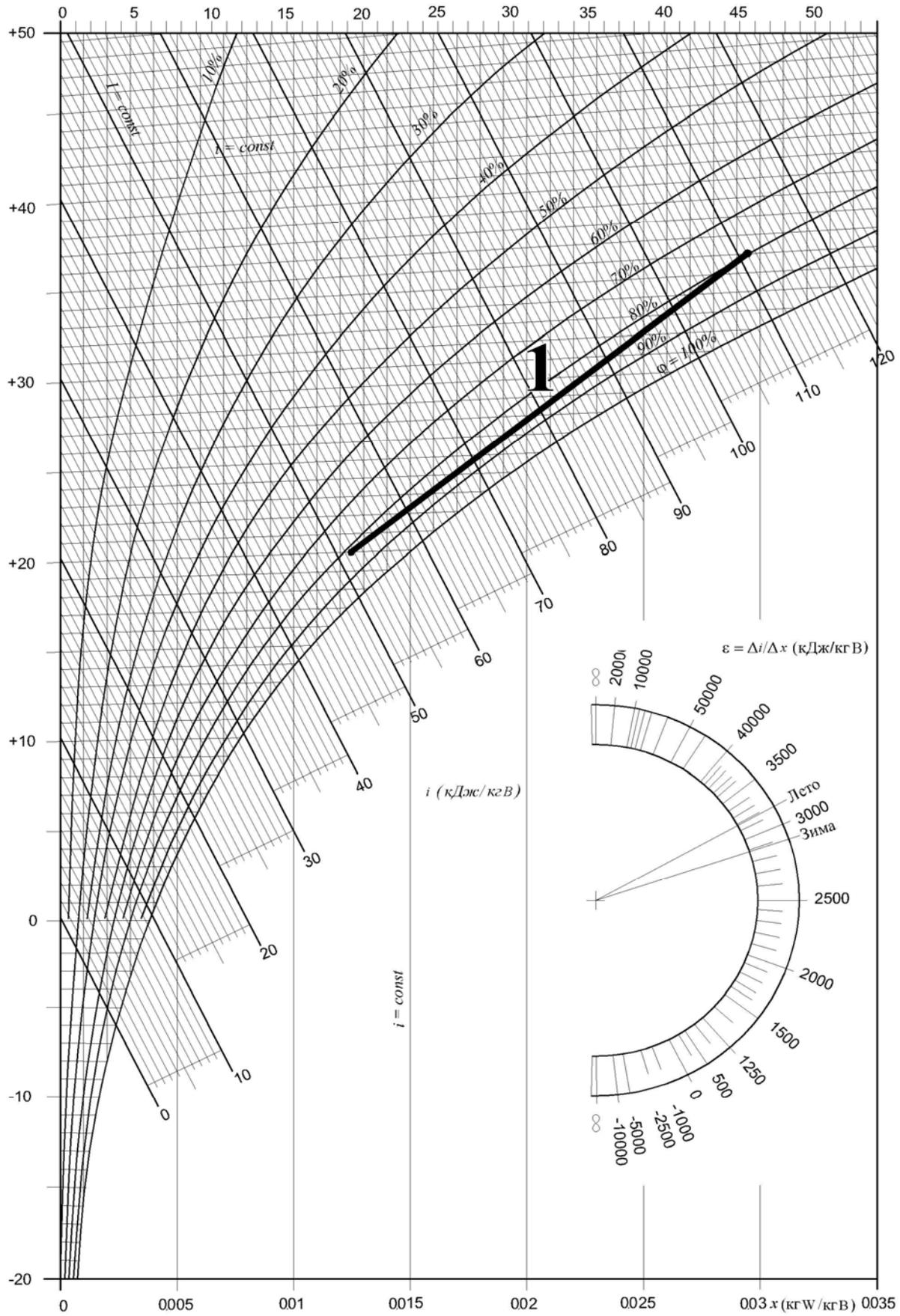
$$F_m = \frac{W \pi \left(\frac{D_{zp}^2}{4} \right)}{\Delta x_c \cdot K_m}.$$

17. Из сравнения поверхностей F_t и F_m выбирается наибольшая и определяется среднее время пребывания капель и рабочая высота насадки в градирне, обеспечивающая эту поверхность капель F_{zp}

$$\tau_{zp} = \frac{F_{zp}}{0,785 D_{zp}^2 F_{kc}}, \quad H_{zp} = \tau_{zp} v_{kc}.$$

Исходные и справочные данные и расчетные параметры проектируемой вентиляторной градирни с капельным орошением и проволочной насадкой приведены в табл. 1.

Расчеты показывают, что предлагаемая проволочная насадка [6] занимает промежуточное значение между листовой и полимерной сетчатой насадкой с пленочным орошением по эффективности тепло- и массопередачи. Так, в работе [1] для пленочной насадки расчетные коэффициенты тепло- и массопередачи имеют величину, равную $K_t = 15,52 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, $K_m = 0,0176 \text{ кгВ/м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кгВ/кгВ})$, а для полимерной сетчатой [2, 3], $K_t = 374 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, $K_m = 0,106 \text{ кгВ/м}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{кгВ/кгВ})$. Это объясняется тем, что капельное орошение на сетчатых и волоконистых насадках идет интенсивней из-за развитой поверхности капель. В то же время регулярность полимерной сетчатой насадки предупреждает образование застойных зон, локальной неравномерности расходов воды и воздуха по сечению градирни, что и объясняет ее преимущество по тепло- и массопередаче по сравнению с проволочной насадкой и ее неупорядоченным расположением по объему.



Рабочая линия (1) зависимости энтальпии от влагосодержания воздуха на i - x диаграмме Рамзина

Таблица 1

**Исходные и справочные данные и расчетные параметры проектируемой вентиляционной градирни
с капельным орошением**

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
<i>Исходные данные</i>			
Производительность по охлаждаемой воде	м ³ /ч	q	180
Начальная температура воды	°С	$t_{вн}$	50
Конечная температура воды	°С	$t_{вк}$	30
Начальная температура воздуха	°С	$t_{вн}$	20
Конечная температура воздуха	°С	$t_{вк}$	35
Относительная влажность воздуха на входе	–	φ_n	0,85
<i>Справочные данные</i>			
Средняя теплоемкость воды	кДж/кг·К	c_w	4,18
Средняя плотность воды	кг/м ³	ρ_w	992
Удельная теплота парообразования при 0 °С	кДж/кг	r_n	2493
Теплоемкость пара	кДж/кг·К	c_n	1,97
Теплоемкость сухого воздуха	кДж/кг·К	$c_в$	1,01
Давление насыщенных паров при начальной температуре воздуха	ат	p_n^*	0,0238
Давление насыщенных паров при конечной температуре воздуха	ат	p_k^*	0,0573
Диаметр капель (2÷5 мм)	м	d_n	$3 \cdot 10^{-3}$
Удельная производительность по воде	кгW/ м ² ·с	$G_{вн}$	2,4
Удельная производительность по воздуху	кгB/ м ² ·с	$G_{вн}$	3,5
Коэффициенты аппроксимирующего степенного уравнения в зависимости давления насыщенных паров воды от температуры $p_w^* = p^*(t_w)$	–	K	$3,5 \cdot 10^{-5}$
	–	n	2,086
Средняя скорость капель d_n (получена экспериментально на лабораторной установке с проволочной насадкой)	м/с	$v_{кк}$	0,25
Коэффициент теплопередачи (получен экспериментально)	Вт/м ² ·К	K_t	147
Коэффициент массопередачи (получен экспериментально)	кгW/ м ² ·с × × (кгW/кгB)	K_m	0,019
<i>Расчетные параметры</i>			
Начальное влагосодержание воздуха	кгW/кгB	x_n	0,0124
Начальная энтальпия воздуха	кДж/кгB	i_n	51,66
Конечное влагосодержание воздуха	кгW/кгB	x_k	$2,96 \cdot 10^{-2}$
Конечная энтальпия воздуха	кДж/кгB	i_k	111,14
Удельная производительность по воде на выходе из градирни	кгW/м ² ·с	$G_{вк}$	2,34
Удельное количество испаряемой воды в воздух	кгW/м ² ·с	W	0,06
Относительная влажность воздуха на выходе (должна быть меньше 1)	–	φ_k	$8,18 \cdot 10^{-1}$
Плотность потока капель	шт/м ² ·с	N_k	171221
Начальная удельная поверхность потока капель	м ² /м ² ·с	$F_{кн}$	4,84
Конечный диаметр капель	м	d_k	$2,976 \cdot 10^{-3}$
Конечная удельная поверхность потока капель	м ² /м ² ·с	$F_{кк}$	4,76
Средняя поверхность потока капель	м ² /м ² ·с	$F_{кс}$	4,8
Скорость воздуха	м/с	$v_в$	2,986
Диаметр градирни	м	D_z	5,15

Окончание табл. 1

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
Средняя теплоемкость влажного воздуха	кДж/кг·К	$c_{вс}$	1,05
Средняя движущая сила процесса теплопередачи	°С	Δt_c	12,33
Массовый расход воздуха	кгВ/с	$q_{вм}$	72,92
Коэффициенты рабочей линии $i=i(x)$ линейной зависимости энтальпии от влагосодержания в виде $i=a+bx$	кДж/кгW кДж/кгВ	A b	8,6 3466,3
Парциальное давление паров воды в воздухе для $t_{вк}=30$ °С ($\varphi=1$)	ат	$p_{вн}^*$	0,0202
Парциальное давление паров воды в воздухе для $t_{вн}=50$ °С ($\varphi=1$)	ат	$p_{вк}^*$	0,0469
Парциальное давление паров воды в воздухе для текущего значения t_w	ат	p_w^*	см. табл. 2
Влагосодержание воздуха вблизи поверхности капли для текущего значения t_w	кгW/кгВ	x_w	см. табл. 2
Число единиц переноса по влагосодержанию паров в воздухе	–	ЧЕП _x	0,643
Средняя движущая сила массообменного процесса испарения воды в воздух	кгW/кгВ	Δx_c	0,0267
Расчетная поверхность капель из условия теплопередачи	м ²	F_t	2392,5
Расчетная поверхность капель из условия массопередачи	м ²	F_m	2467,5
Необходимая расчетная поверхность, обеспечивающая процессы тепло- и массопередачи	м ²	$F_{сп}$	2467,5
Время нахождения капель в градирне для обеспечения расчетной поверхности капель	с	$\tau_{сп}$	24,67
Высота градирни	м	$H_{сп}$	6,16

Таблица 2

Основные расчетные параметры градирни как функция влагосодержания воздуха (для определения числа единиц переноса)

Наименование параметра	Величина										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Влагосодержание воздуха x , кгW/кгВ · 10 ²	1,24	1,41	1,58	1,76	1,93	2,1	2,27	2,44	2,62	2,79	2,96
Влагосодержание воздуха у поверхности капель x_w , кгW/кгВ · 10 ²	2,54	2,99	3,41	3,87	4,35	4,87	5,41	5,99	6,6	7,25	7,93
Энтальпия воздуха i_k , кДж/кгВ	51,66	57,61	63,56	69,5	75,45	81,4	87,35	93,30	99,20	105,2	111,1
Расход воздуха (сухого) $Q_{вс}$, кгВ/с	72,92	–	–	–	–	–	–	–	–	–	72,92
Расход воды Q_w , кгW/с	48,75	48,87	49	49,12	49,25	49,37	49,5	49,62	49,75	49,87	50
Парциальное давление паров воды в воздухе $p_{вс}$, ат · 10 ²	2,02	2,3	2,57	2,84	3,11	3,37	3,64	3,9	4,17	4,43	4,69
Давление паров воды у поверхности капель $p_{вн}$, ат · 10 ²	4,27	4,84	5,51	6,21	6,96	7,7	8,57	9,43	10,3	11,3	12,27
Температура воздуха $t_{вс}$, °С	20	21,54	23,1	24,6	26,1	27,6	29,1	30,6	32,1	33,5	35
Температура капель воды t_w , °С	30	32,05	34,1	36,1	38,12	40,1	42,1	44,1	46,08	48	50

Таким образом, предлагаемая волокнистая насадка из стальной проволоки или полимерных нитей может быть использована в конструкциях испарителей градирен, а предлагаемая

методика инженерного расчета градирен работающих в режиме капельного орошения, может быть использована для проектирования оросителей промышленных градирен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономаренко, В. С. Градири промышленных и энергетических предприятий: справочное пособие / В. С. Пономаренко Ю. И. Арефьев; под ред. В.С. Пономаренко. – М.: Энерготомиздат, 1998. – 376 с.
2. Ваганов, А. А. Теплообменные испытания сетчатой насадки / А. А. Ваганов, А. С. Тимонин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 11. – С. 32–36.
3. Ваганов, А. А. Исследование теплообменных характеристик сетчатой насадки / А. А. Ваганов, А. С. Тимонин // Безопасность в техносфере. – 2010. – № 2. – С. 37–42.
4. Меренцов, Н. А. Экспериментальная установка для исследования теплообменных процессов в насадочных устройствах градири / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков, Я. А. Орлянкина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 5). – С. 78–80.
5. Голованчиков, А. Б. Моделирование гидромеханических и тепло- и массообменных процессов в вентиляционной градири с капельным орошением и проволочной насадкой / А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, Я. А. Орлянкина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 10(97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 14). – С. 22–28.
6. Пат. м. 117317 РФ, МПК В 01 J 19/32. Насадка для массообменного аппарата / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Меренцов, Н. А. Дулькина, О. А. Залипаева, А. П. Шамьянова; ВолгГТУ. – 2012.
7. 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. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 4). – С. 102–104.
8. Меренцов, Н. А. Испарительное охлаждение капель жидкости в воздушном потоке / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков, Я. А. Орлянкина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 5). – С. 62–65.

УДК 621.3

Б. И. Деулин

**УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ
В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ, ВЫПОЛНЕННАЯ НА ИОНООБМЕННЫХ
КОЛОНКАХ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВЫХОДОМ**

Орловский государственный аграрный университет

В статье рассмотрена ионообменная установка для экспресс-анализа концентрации ионов в водных растворах электролитов, в которой используются колонки с дополнительным выходом для ввода электрода рН-метра.

Ключевые слова: катионит, анионит, ионообменная колонка, электролит, дополнительный выход, рН-метр.

B. I. Deulin

**SYSTEM FOR RAPID ANALYSIS CONCENTRATION OF IONS IN AQUEOUS ELECTROLYTE
SOLUTIONS, ADAPTED TO THE ION EXCHANGE COLUMN WITH AN ADDITIONAL OUTPUT**

Orel State Agrarian University

The article considers the ion-exchange system for rapid analysis of the concentration of ions in aqueous solutions of electrolytes, which uses the column with an additional output for input electrode pH-meters.

Keywords: cations, anions, ion-exchange column, the electrolyte, the additional output, a pH-meter.

Применение растворов электролитов в современном машиностроении очень распространено. В процессе производства периодически возникает вопрос экспресс-анализа их химического состава. В работе [1] был представлен способ экспресс-анализа концентрации ионов в водных растворах электролитов с помощью ионообменных смол. Сущность этого способа заключается в следующем: при определении концентрации катионитов в растворе вначале измеряют его водородный показатель с помощью рН-метра, затем его пропускают через сильнокислотный катионит и измеряют водо-

родный показатель элюата. Концентрацию катионов в растворе определяют по формуле:

$$\frac{[K_{\kappa}]}{n} = [H^+]_2 - [H^+]_1,$$

где $[K_{\kappa}]$ – концентрация катионов электролита; n – валентность катионов электролита; $[H^+]_2$ – концентрация ионов водорода в элюате; $[H^+]_1$ – концентрация ионов водорода в исходной пробе.

При определении концентрации анионов в растворе вначале определяют его водородный показатель с помощью рН-метра, затем его пропускают через сильнощелочной анионит и из-

меряют водородный показатель элюата. Концентрацию анионов в растворе определяют по формуле:

$$\frac{[K_a]}{n} = [OH^-]_2 - [OH^-]_1$$

где $[K_a]$ – концентрация анионов; n – валентность аниона; $[OH^-]_2$ – концентрация гидроксил-ионов в элюате; $[OH^-]_1$ – концентрация гидроксил-ионов в исходной пробе.

Для реализации этого способа может быть использована установка ионообменная демонстрационная, изготавливаемая научно-производственным объединением «ELXOLDING», республика Узбекистан [2], которая предназначена для наглядной демонстрации ионного обмена, демонстрации смягчения воды при проведении демонстрационных опытов, по предмету «Химия» (рис. 1).

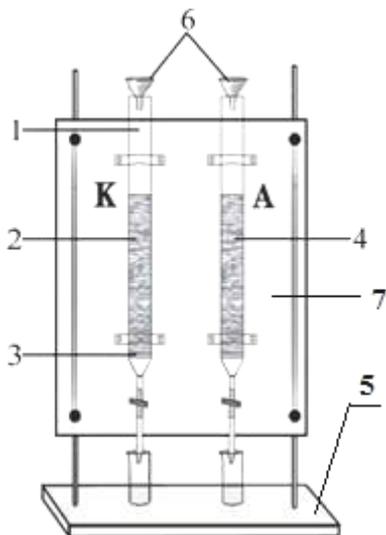


Рис. 1. Установка ионообменная демонстрационная:
1 – ионообменные колонки; 2 – катионит; 3 – пористые перегородки; 4 – анионит; 5 – штатив; 6 – воронки; 7 – панель из оргстекла

В данной установке при определении концентрации ионов в водных растворах электролитов сначала определяют водородный показатель исследуемой пробы, затем ее заливают в колонку с ионитом и ждут, когда образующийся на выходе колонки элюат заполнит стакан. Далее производят определение водородного показателя элюата с помощью рН-метра, на что требуются большие затраты времени.

При промывке колонки с ионитом ее заливают дистиллированной водой. Вначале из колонки в стакан будет поступать кислота (щелочь). Окончанием промывки можно считать момент времени, когда из колонки в стакан со-

скопившейся кислотой (щелочью) начнет поступать дистиллированная вода, реакция которой нейтральна. Поэтому, для определения окончания промывки в известной установке с помощью рН-метра необходимо периодически менять стаканы, что неудобно и приводит к дополнительным затратам времени и перерасходу дистиллированной воды.

При регенерации колонки с ионитом кислотой (щелочью) вначале из нее в стакан будет выходить солевой раствор, реакция которого нейтральна. Окончанием регенерации можно считать момент времени, когда из колонки в стакан со скопившимся соевым раствором начнет поступать кислота (щелочь). Для равномерного распределения кислоты (щелочи) в стакане при определении окончания регенерации в известной установке с помощью рН-метра раствор в нем необходимо периодически перемешивать. Кислота (щелочь) в стакане будут иметь меньшую концентрацию, чем на выходе из колонки из-за скопившегося в нем солевого раствора с нейтральной реакцией и рН-метр покажет наличие в стакане кислоты (щелочи) после того как ее концентрация превысит порог срабатывания прибора.

Таким образом, недостатком известной установки является длительность процесса определения водородного показателя элюата и перерасход кислоты (щелочи) при регенерации ионитов и дистиллированной воды при промывке.

Целью данной работы является сокращение затрат времени на определение концентрации ионов в водных растворах электролитов а также уменьшение расхода регенерирующих растворов при регенерации анионитов и дистиллированной воды при промывке.

В работе [3] была представлена ионообменная установка, изображенная на рис. 2.

Предлагаемая установка содержит лабораторный штатив 1, на котором укреплена панель 2. На панели 2 закреплены две ионообменные колонки 3, одну из которых на 2/3 заполняют катионитом, другую на 2/3 анионитом.

Колонки 3 имеют герметичные пробки и пористые перегородки. Нижняя конусообразная часть колонки 3 выполнена с дополнительным выходом 4 для ввода электрода рН-метра. Кроме того, на панели 2 закреплены емкости 5 для регенерирующих растворов и емкость с дистиллированной водой 6. Эти емкости соединены с колонками через крышку с тройником 7.

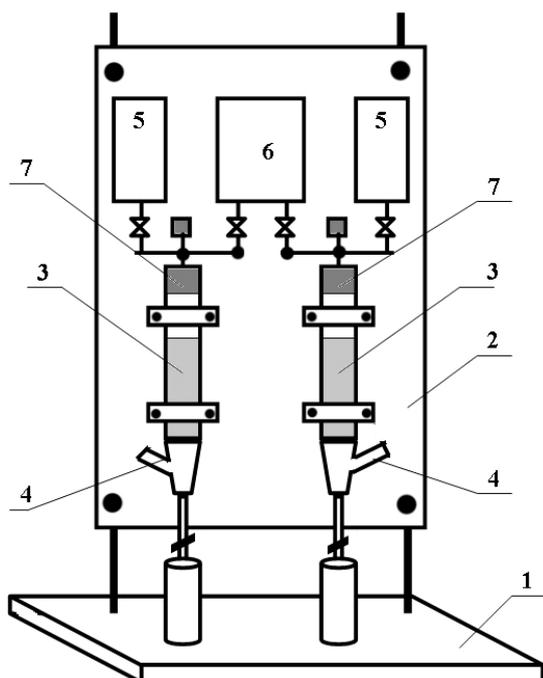


Рис. 2. Установка для экспресс-анализа концентрации ионов в водных растворах электролитов, выполненная с ионообменными колонками с дополнительным выходом:

1 – штатив, 2 – панель, 3 – ионообменная колонка, 4 – дополнительный выход ионообменной колонки, 5 – емкость с регенерирующим раствором, 6 – емкость с дистиллированной водой, 7 – крышка с тройником

Предлагаемая установка работает следующим образом. При определении концентрации катионов в исходном растворе берут пробу и определяют ее водородный показатель с помощью рН-метра, затем эту пробу с помощью воронки наливают через крышку с тройником 7 в колонку 3 с катионитом в Н-форме. В результате реакции ионного обмена ионы водорода в катионите замещаются катионами из пробы. Количество вытеснившихся ионов водорода эквивалентно суммарному эквиваленту катионов осевших в катионите. В дополнительный выход колонки вводят электрод рН-метра, с помощью которого определяют водородный показатель элюата. Выходящий из колонки 3 элюат скапливается в стакане. Концентрацию катионов раствора электролита определяют по разнице концентраций ионов водорода в исходной пробе и в элюате.

При определении концентрации анионов в исходном растворе берут пробу и определяют ее водородный показатель с помощью рН-метра, затем эту пробу с помощью воронки наливают через крышку с тройником 7 в анионообменную колонку 3, с анионитом в ОН-форме. В результате реакции ионного обмена ионы гидроксония в анионите замещаются анионами из пробы. Количество вытеснившихся ионов гидроксония эквивалентно суммарному эквиваленту анионов

осевших в анионите. В дополнительный выход колонки вводят электрод рН-метра, с помощью которого определяют водородный показатель элюата. Выходящий из колонки 3 элюат скапливается в стакане. Концентрацию анионов в растворе определяют по разнице концентраций ионов гидроксония в исходной пробе и элюате.

По окончании проведения опытов ионообменные колонки промывают дистиллированной водой. Для этого вводят в дополнительный выход колонки 4 электрод от рН-метра, открывают кран, соединенный с емкостью для дистиллированной воды 6 и с крышкой с тройником 7. Затем открывают кран на выходе колонки 3 и следят за показаниями рН-метра. После того как рН-метр покажет нейтральную реакцию элюата, промывку можно прекратить.

После промывки ионообменных колонок их оставляют залитыми дистиллированной водой и закрывают пробками до проведения следующих опытов.

При регенерации ионитов в колонках 3 вводят в дополнительный выход колонки 4 электрод от рН-метра, затем открывают кран, соединенный с емкостью 5, заполненной регенерирующим раствором и крышкой с тройником 7. Далее открывают кран на выходе колонки 3. После того как рН-метр покажет, что на выходе колонки образовалась кислота (щелочь) регенерацию можно прекратить.

После процесса регенерации колонки 3 следует промыть дистиллированной водой.

Дополнительный выход в колонке позволяет проводить измерения водородного показателя рН-метром в проточном элюате. Это дает возможность более оперативно определять изменение водородного показателя элюата и уменьшить временные затраты на проведение промывки и регенерации ионитов.

Таким образом, предлагаемая установка позволяет сократить время на определение концентрации ионов в водных растворах электролитов, промывку колонок с ионитами, их регенерацию, уменьшить расход регенерирующих растворов и дистиллированной воды при промывке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2493544 РФ. Способ определения концентрации ионов в растворах электролитов / Ю. А. Седов, Б. И. Деулин. Оpubл. 20.09.2013.
2. Научно-производственное объединение «ELXOLDING» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.el.uz/>
3. П. м. № 131190 РФ. Установка ионообменная для экспресс-анализа концентрации ионов в водных растворах электролитов / Б. И. Деулин, Н. Г. Чехутская, Э. В. Карпович. Оpubл. 10.08.2013.

УДК 621.3

*Б. И. Деулин***ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРА С ИСТОЧНИКОМ СВЕТА В ВИДЕ РОС-ЛАЗЕРА
ДЛЯ ПРОБОПОДГОТОВКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ****Орловский государственный аграрный университет**

Статья посвящена контролю водных растворов электролитов на наличие в них взвешенных частиц и флюоресценции с помощью спектрофотометра с источником света в виде РОС-лазера на органических красителях.

Ключевые слова: спектрофотометр, органические красители, РОС-лазер, взвешенные частицы, растворы электролитов, комбинационное рассеяние света, флюоресценция.

*B. I. Deulin***APPLICATION SPECTROPHOTOMETER LIGHT-SOURCE DFB LASER
FOR SAMPLING AQUEOUS ELECTROLYTE****Orel State Agrarian University**

Article is devoted to control of water solutions of electrolytes on existence in them the weighed particles and fluorescence by means of the spectrophotometer with a light source in the form of DEWS lasers on organic dyes.

Keywords: spectrophotometer, organic dyes, DFB laser, suspended solids, fluids with electrolytes, Raman spectroscopy, fluorescence.

Применение водных растворов электролитов широко используется в современном машино- и приборостроении. Например, они применяются при нанесении защитных покрытий в гальванике, при восстановлении и упрочнении деталей микродуговым оксидированием и т. п. В процессе эксплуатации таких растворов периодически возникает вопрос о проверки содержания их химического состава. В работах [1, 2] для решения этой проблемы было предложено использовать метод комбинационного рассеяния света (КРС). Данным методом за одну пробоподготовку можно определить до пяти составляющих раствора. Однако сечения КРС малы, поэтому необходимо использовать источники света с высокой спектральной яркостью и проба должна соответствовать трем основным требованиям, выполнение которых необходимо для получения спектров пригодных для измерения [2]:

1. Вещество должно быть «оптически пустым», т. е. свободным от взвесей, Чтобы снизить молекулярное рассеяние, которое вызывается взвешенными частицами, диаметры которых сравнимы с диаметрами световой волны и еще большими – видимые глазом. Возникающее при этом нежелательное рассеяние излучения по интенсивности может превзойти комбинационное рассеяние.

2. Вещество по возможности должно быть свободным от флюоресценции, так как ее интенсивность часто превышает интенсивность спектра КРС. В результате чего возникает сильный фон, мешающий наблюдению. В большинстве случаев флюоресценция вызвана присутствием в веществе небольших примесей, которые надо удалить. Существуют различные спо-

собы по гашению флюоресценции нитросоединениями и другими веществами. Однако успех от их применения, может быть, достигнут лишь в случае незначительной интенсивности флюоресценции.

3. Исследуемое вещество должно быть по возможности бесцветным, так как за счет поглощения ослабляется и возбуждающий свет, и излучение рассеяния. В этом случае сильно осложняется количественный анализ особенно при низких концентрациях исследуемого вещества.

В работе [2] был представлен способ обезцвечивания растворов с помощью ионообменных смол на примере гальванического раствора для никелирования. Реализовать этот способ можно на ионообменных установках, представленных в работах [3, 4].

Целью настоящей работы является инструментальное обеспечение контроля наличия взвешенных частиц и флюоресцирующих веществ в водных растворах электролитов.

Наличие взвешенных частиц в пробе можно определять нефелометрическим методом анализа, рис. 1.

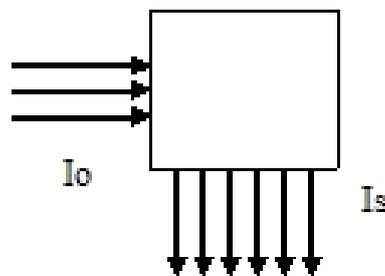


Рис. 1. Схема хода лучей при нефелометрическом методе анализа:

I_0 – интенсивность первоначального светового потока;
 I_s – интенсивность рассеянного светового потока

Интенсивность рассеянного излучения определяется из закона Релея

$$\frac{I_s}{I_o} = \frac{n_1^2 - n^2}{n^2} \cdot \frac{Nv^2}{\lambda^4 r^2} (1 + \cos^2 \beta) \quad (1)$$

где I_o – интенсивность первоначального светового потока; I_s – интенсивность рассеянного светового потока; n – коэффициент преломления среды; n_1 – коэффициент преломления частичек; r – расстояние до наблюдателя; β – угол между падающим и рассеянным световым потоком; N – количество частиц в данном объеме; v – объем, рассеивающих частиц; λ – длина световой волны.

Из выражения (1) видно, что источник света с высокой спектральной яркостью при нефелометрическом методе анализа позволит определить взвешенные частицы малого объема и в меньших количествах по сравнению с обычным источником.

Фотоколориметры и спектрофотометры, которые до недавнего времени серийно выпускала отечественная промышленность, например, ФЭК101, ФЭК54М, ФЭК60, ФЭК56 имеют ламповые источники света, обладающие малой спектральной яркостью. Поэтому значения оптической плотности, измеряемой этими приборами, как правило, не превышает значения «2».

Повышение спектральной яркости спектрофотометров развивается по двум направлениям: создание более ярких ламп и применение лазерных источников света. В настоящее время отечественной промышленностью освоено выпуск спектрофотометров с ламповыми источниками света, которые измеряют оптическую плотность до значения «4», например СФ-56 [5].

При создании спектрофотометров с лазерными источниками света, определенный интерес представляют лазеры со светоиндуцированной распределенной обратной связью, или РОС-лазеры на красителях, так как они миниатюрны из-за отсутствия резонатора и в них возможна плавная перестройка частоты, кроме того, они обладают простотой, удобством и надежностью в эксплуатации, рис. 2. Для своего функционирования РОС-лазер не требует сложных устройств типа интерферометра Фабри–Перо.

При применении миниатюрных лазеров накачки, например, лазера Sprout [6] общие габариты спектрофотометра с источником света в виде РОС-лазера будут весьма компактны, при этом, такой прибор позволит измерять оптическую плотность до значения не менее «4» при уширении линии 0,04 нм.

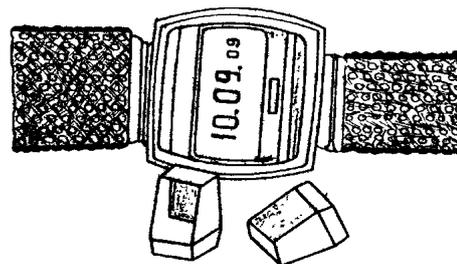


Рис. 2. Общий вид элементов РОС-лазера с «активным катетом»

Для контроля наличия в водных растворах электролитов взвешенных частиц и примесей, способных вызывать флюоресценцию в настоящей статье предлагается использовать спектрофотометр с источником света в виде РОС-лазера на органических красителях [7] доукомплектованный двумя съемными зеркалами.

Сущность предлагаемого спектрофотометра поясняется функциональной схемой, представленной на рис. 3.

На функциональной схеме рис. 3 элементы 2–8 составляют РОС-лазер на органических красителях.

Для проведения контроля взвешенных частиц следует расположить приемник излучения под углом 90° к падающему на кювету с пробой лазерному излучению, рис. 3.

Предложенный спектрофотометр работает следующим образом. Излучение накачки от когерентного источника 1, сформированное в полосу цилиндрической 2 и сферической 3 линзами, с помощью отражательного зеркала 4 сводится на активную среду 7 через гипотенузную грань прямоугольной треугольной призмы 6. Призму 6 следует выполнять из того же материала, что и активную среду, но без красителя. Тогда длина волны генерации лазера не будет зависеть от температуры.

Призма 6 имеет на катете металлическое покрытие 8, которое необходимо для избежания нарушения полного внутреннего отражения на катетной грани. Часть излучения накачки проникает в активную среду 7 непосредственно, другая часть – после отражения от противоположной катетной грани 8.

Интерферируя внутри активной среды 7, пучки накачки создают условия для возникновения генерации. Изменение длины волны генерации твердотельного лазера с распределенной обратной связью внутри диапазона, осуществляется за счет поворота зеркала 4, с помощью поворотного устройства 5 и определяется выражением

$$\lambda_{ген} = \lambda_{нак} / \sin \Theta,$$

где $\lambda_{нак}$ – длина волны лазера накачки; Θ – угол падения излучения.

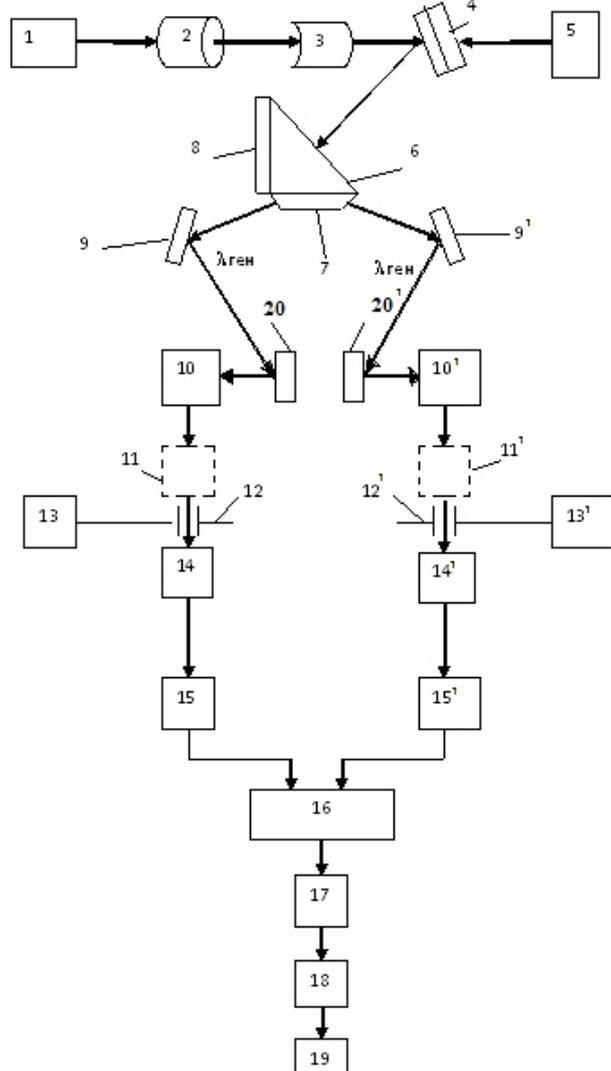


Рис. 3. Спектрофотометр:

1 – источник накачки; 2 – цилиндрическая линза; 3 – сферическая линза; 4 – вращающееся зеркало; 5 – поворотное устройство; 6 – полимерная призма; 7 – активная среда; 8 – металлическое покрытие; 9–9' – отражательные зеркала; 10, 10' – кюветы с исследуемым и эталонным растворами; 11, 11' – съемные матовые стекла; 12, 12' – диафрагмы; 13, 13' – регуляторы размера диафрагм; 14, 14' – конденсоры; 15, 15' – фотоэлементы; 16 – дифференциальный усилитель; 17 – аналого-цифровой преобразователь; 18 – микропроцессор; 19 – цифровой индикатор; 20, 20' – съемные отражательные зеркала

Диапазон генерации лазера определяется типом красителя в активной среде. Для его изменения заменяют генерирующие молекулы красителя.

Для уменьшения потерь на отражение света от гипотенузной грани, угол между гипотенузной и катетной гранями к которой примыкает

активная среда 7, должен соответствовать средней длине волны диапазона перестройки данного красителя. Изменение угла падения излучения накачки осуществляется за счет поворота зеркала 4 с помощью поворотного устройства 5 в пределах от Θ_{min} до Θ_{max} .

Лазер с распределенной обратной связью генерирует два равных световых потока (правый и левый) с длиной волны генерации $\lambda_{ген}$, которые падают на отражательные зеркала 9–9' и 20, 20' а далее на кюветы 10, 10' с исследуемым и эталонным растворами. Съемные матовые стекла 11, 11', которые рассеивают коллимированное лазерное излучение служат для регулирования световых потоков, падающих на фотоэлементы с помощью диафрагм 12, 12'. В данном случае их можно не применять, поэтому на рис. 2. они изображены пунктиром. После выхода из кювет световые потоки падают на конденсоры 14, 14' и фотоэлементы 15, 15'. На пути правого и левого световых потоков находятся диафрагмы 12, 12', связанные с регуляторами их размера 13, 13'. Для повышения чувствительности и для сравнения сигналов. Поступающих от кювет с контролируемым и эталонным растворами фотоэлементы 15, 15' подключены к дифференциальному усилителю 16 на выходе, которого находится аналого-цифровой преобразователь 17, который преобразует аналоговый сигнал с выхода усилителя в цифровой код. Аналого-цифровой преобразователь 17 связан с микропроцессором 18, который производит обработку результатов измерений по определенной программе. Результаты вычислений выводятся на цифровой индикатор 19.

Таким образом, предложенный прибор позволит сравнивать световые потоки, поступающие от эталонного и контролируемого образца и выявлять в нем наличие взвешенных частиц. Применение источника света с высокой спектральной яркостью позволит выявить в растворе пробы наличие взвешенных частиц меньшего размера и в меньших количествах, чем при использовании обычных источников света.

Наличие флюоресценции исследуемом растворе можно определять визуально, в случае необходимости ее измерения следует применить монохроматоры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Деулин, Б. И. Применение метода комбинационного рассеяния в исследовании химического состава гальванических ванн / Б. И. Деулин // Материалы Межрегиональ-

ной выставки-конференции «Энергосберегающие технологии и техника в сфере АПК», 17–19 ноября 2010 г. Орел: ОрелГАУ, 2010. – С. 51–54.

2. Деулин, Б. И. Контроль концентрации анионов в водных растворах электролитов методом комбинационного рассеяния света / Б. И. Деулин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст. № 1(104) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии» ; вып. 6). – С. 25–27.

3. Деулин, Б. И. Установка ионообменная для экспресс-анализа концентрации ионов в растворах электролитов / Б. И. Деулин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст. № 1(104) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Реология,

процессы и аппараты химической технологии» ; вып. 6). – С. 31–33.

4. П. м. № 131190 РФ. Установка ионообменная для экспресс-анализа концентрации ионов в водных растворах электролитов / Б. И. Деулин, Н. Г. Чехутская, Э. В. Карпович. Оpubл. 10.08.2013.

5. ОКБ «Спектр». Спектральные приборы для вашей лаборатории [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.okb-spectr.ru/>

6. Lighthouse Photonics [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lighthousephotonics.com/index.html>

7. П. м. № 37827 РФ. Спектрофотометр / Б. И. Деулин. Бюл. № 13 от 10.05.2004.

УДК 621.646.986

А. В. Олейников, В. В. Иванов

ШИБЕРНАЯ ЗАДВИЖКА ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Волгоградский государственный технический университет

Разработана шиберная задвижка для магистральных трубопроводов. Произведены расчеты и оптимизация основных конструктивных элементов задвижки.

Ключевые слова: запорная арматура; высокая надежность; сварной сильфон; соединение деталей посредством сварки.

A. V. Oleynikov, V. V. Ivanov

GATE VALVE FOR MAIN PIPELINES

Volgograd State Technical University

Gate valve for main pipelines is designed. The calculations and optimization of the valves main structural elements are produced.

Keywords: valves; high reliability; welded bellows; the connection details by welding.

При эксплуатации магистральных трубопроводов, которые проложены в неблагоприятных климатических условиях, на дальнем востоке и в северной части России, где температурный диапазон колеблется от +40 °С до –70 °С, возможны протечки и прорывы трубопровода, из-за сезонного перепада температур, что неблагоприятно сказывается на окружающей среде и экологии. Поэтому необходимо вовремя остановить или перенаправить поток рабочей среды. В таких ситуациях необходима безотказная запорная арматура, которая предотвратит аварию, а с ней утечку и экологическую аварию или даже катастрофу. Но современные задвижки, которые используются в таких экстремальных условиях, не всегда срабатывают, т. е. могут заклинить или не сработать по причинам закоксовывания механизма, расклинивания продуктов коррозии, при которых электропривод не может справиться с возникшими дополнительными усилиями и при этом их невозможно закрыть или открыть ручным способом.

В связи с этими недостатками современных магистральных задвижек были проведены раз-

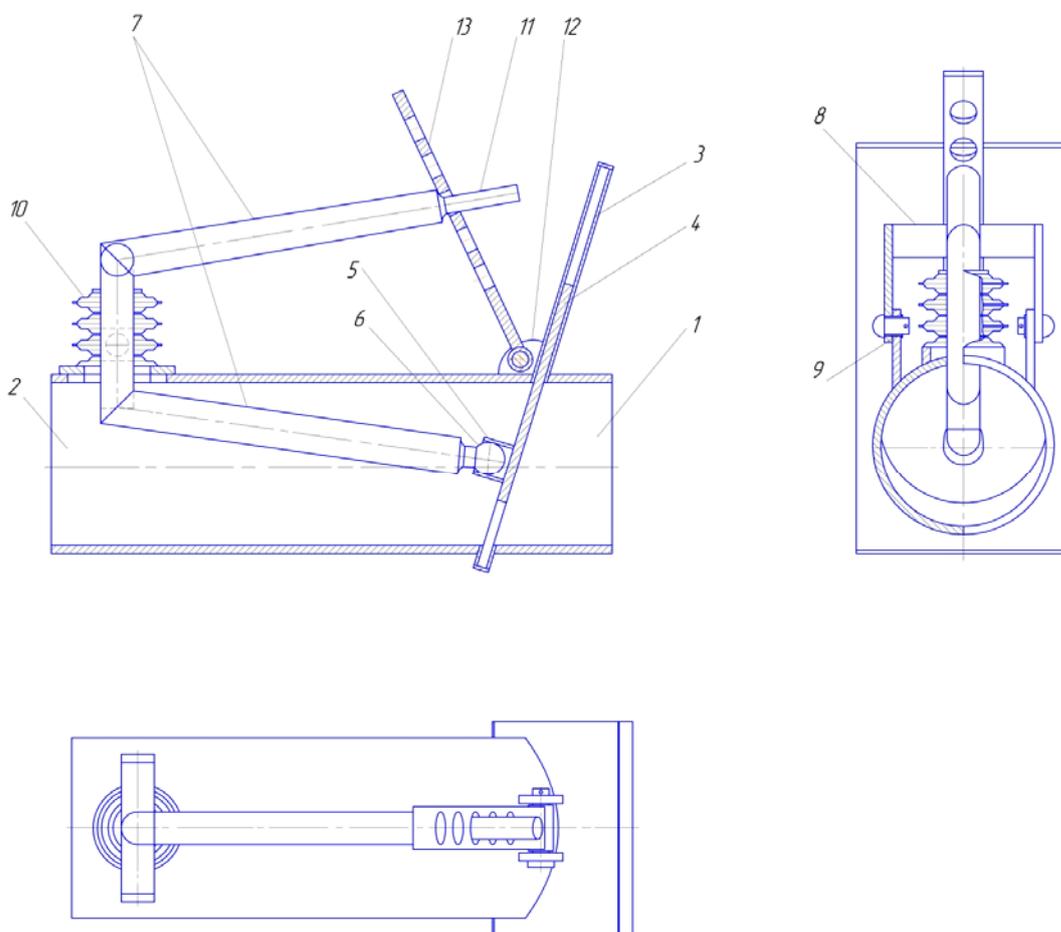
личные расчеты и разработаны новые конструкции магистральных задвижек, новые механизмы для надежной работы и своевременного срабатывания, не требующие больших усилий для закрытия, очень простые в конструкции и максимально надежные по способности работать в агрессивной среде и в широком температурном диапазоне, а также не требующей дополнительного обслуживания и проверок. При этом срок эксплуатации должен достигать 30 и более лет.

Корпус задвижки содержит входной 1 и выходной 2 каналы в виде двух отрезков трубы, между которыми размещена направляющая 3 с ползуном 4 (шибером). На запорной стороне ползуна закреплен стакан 5, обеспечивающий шарнирное соединения ползуна со сферическим оголовком 6 внутреннего конца двуплечего коромысла 7. С внешней стороны корпуса коромысло 7 имеет поперечину 8, шарнирно, со значительным зазором, соединенную с проушинами 9 [1].

Сварной сильфон 10, выполняющий роль уплотнения, периферийной частью приварен к фланцу корпуса, а через его центр, также

сварным соединением, пропущено на внешнюю поверхность задвижки коромысло 7, выполняя роль уплотнения при передаче движения от

внешнего конца 11 коромысла 7 к внутреннему с оголовком 6, а затем ползуна 4, расположенному внутри корпуса задвижки.



Шиберная задвижка [1]

Для фиксации положения ползуна на внешней стороне корпуса, напротив внешнего конца 11 коромысла 7, посредством шарнира 12, закреплена серьга 13 фиксатора в виде планки с рядом отверстий, которыми она может быть наброшена на конец коромысла, обеспечивая стопорение коромысла 7 а, следовательно, регулировку и фиксацию положения ползуна задвижки.

Пример расчета представлен ниже.

Дано: сварной сильфон типа I, состоящий из мембран $n = 7$, $D_H = 2R_H = 100$ мм; $D_B = 2 R_B = 62,5$ мм; $h = 0,8$ мм и $H = 2,6$ мм. Сильфон изготовлен из стали X18H10T, модуль упругости $E = 20300$ кгс/мм², предел прочности $[n] = 1,85$, предел текучести $[\sigma_T] = 70$ кгс/мм². Вычислить наибольшее эквивалентное напряжение при давлении $p = 8$ кгс/см², при работе сильфона по схеме силовой компенсации (имеются ограничения осевого перемещения) [3].

1. Рассчитаем напряжения, возникающие в сильфоне при действии внутреннего давления.

Вначале подсчитываем коэффициент k , учитывающий отношение внешнего к внутреннему радиусам сильфона:

$$k = \frac{R_H}{R_B} = \frac{50}{31,25} = 1,6;$$

Определяем наибольшие эквивалентные напряжения σ_p при нагружении сильфона давлением рабочего тела $p = 8$ кгс/см², если сильфон не совершает осевого перемещения. Для $k = 1,6$ и $H/h = 4$ находим по номограмме величину $\overline{\sigma_p} = 0,0705$ и по формуле [5] рассчитываем наибольшее эквивалентное напряжение:

$$\overline{\sigma_p} = \frac{\sigma_p * h_0}{p * R_H^2}.$$

Преобразуем:

$$\sigma_p = \overline{\sigma_p} \cdot p \frac{R_H^2}{h_0} = 0,0705 \cdot 0,08 \cdot \left(\frac{50}{0,8}\right)^2 = 22,03 \text{ кгс/мм}^2 = 216,1 \text{ МПа};$$

2. Рассчитываем момент M необходимый для изгиба сильфона при заданном угле поворота φ .

Максимальный момент для изгиба сильфона при толщине стенки $h = 0,65$ мм, угле поворота $\varphi = 10$ град $= 0,174$ рад и коэффициент изгиба $A_\varphi = 0,0276$, который выбираем по коэффициенту k из табл. 2, составит:

$$\varphi = 2 \cdot n \cdot A_\varphi \cdot \frac{M}{E \cdot h^3} \text{ преобразуем,}$$

$$M = \frac{\varphi \cdot E \cdot h^3}{2 \cdot n \cdot A_\varphi} = \frac{0,174 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot (0,8 \cdot 10^{-3})^3}{2 \cdot 7 \cdot 0,0276} = 46,11 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где A_φ – коэффициент изгиба.

3. Рассчитаем напряжения, которые возникают при изгибе сильфона по теории круглых пластин [6]

$$\sigma_{(rH)M} = B_{\varphi H} \frac{\varphi \cdot E \cdot h_H}{2n \cdot R_H} = 15,1 \cdot \frac{0,174 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,8}{2 \cdot 7 \cdot 50} = 600,548 \text{ МПа}$$

где $B_{\varphi H}$ – коэффициент напряжений возникающих при изгибе сильфона.

4. Сравниваем напряжения, которые возникают при действии внутреннего давления, по двум теориям [5] и вычислим коэффициент расхождения между двумя вычисленными величинами (с)

$$\sigma_p = \overline{\sigma_p} \cdot p \frac{R_H^2}{h_0} = 0,0705 \cdot 0,08 \cdot \left(\frac{50}{0,8}\right)^2 = 22,03 \text{ кгс/мм}^2 = 216,1 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{(rH)P} = B_P \frac{\lambda \cdot E \cdot h_H}{2n \cdot R_H^2} = 23,7 \cdot \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 0,8}{2 \cdot 7 \cdot 50^2} = 108,3 \text{ МПа}$$

где B_P – коэффициент напряжений возникающих при внутреннем давлении рабочего тела; так как выбраны условия силовой компенсации, то λ будет настолько маленьким, что им можно будет пренебречь (или $\lambda=1$)

$$c = \frac{\sigma_p}{\sigma_{(rH)P}} = \frac{216,1}{108,3} = 1,99$$

5. Рассчитаем напряжения которые возникают при изгибе сильфона

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{(rH)M}}{c} = \frac{600,548}{1,99} = 301,78 \text{ МПа}$$

6. Рассчитаем максимальные напряжения которые возникают в сильфоне при действии внутреннего давления и изгибающего момента

$$\sigma_{MAX} = \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_p^2} = \sqrt{301,78^2 + 216,1^2} = 371,17 \text{ МПа} = 37,84 \text{ кгс/мм}^2;$$

7. Найдем коэффициент запаса прочности

$$[n] = \frac{[\sigma_T]}{\sigma_{MAX}} = \frac{70}{37,84} = 1,85$$

Проведенные расчеты доказали возможность эксплуатации проектируемых магистральных задвижек при высоких давлениях, в разных температурных диапазонах. При этом расчеты были проведены с заложенным коэффициентом прочности равным 1,8–2, т. е. при экстренных ситуациях возможность использовать проектируемые задвижки с небольшим превышением давления.

Преимущество проектируемых задвижек перед используемыми аналогами:

1. Простота конструкции – конструкция заявляемых задвижек представляет собой простой механизм без всяческого рода неметаллических уплотнений и прокладок, между рабочим телом и внешней средой;

2. Все детали конструкции соединены между собой с помощью сварных швов, что обеспечивает большую надежность проектируемых задвижек.

3. Использование сильфона в качестве уплотнительного элемента обеспечивает полную герметизацию, между внутренней частью задвижки и внешней средой.

4. Использование нового, заявляемого, храпового механизма с большим рычагом для приведение храпового механизма в действие обеспечивает незначительное приложение усилий для открытия и закрытия проходного сечения задвижки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П. м. 107836 РФ, МПК F 16 K 3/02, 31/44. Задвижка / В. В. Иванов, А. В. Олейников; ВолгГТУ. – 2011.
2. П. м. 123877 РФ, МПК F 16 K 3/02. Задвижка / В. В. Иванов, А. В. Олейников; ВолгГТУ. – 2013.
3. Олейников, А. В. Задвижка аварийного назначения для магистральных трубопроводов / А. В. Олейников, В. В. Иванов // Технические науки – от теории к практике : матер. XVIII Междунар. заоч. науч.-практ. конф. (г. Новосибирск, 20 февр. 2013 г.) / НП «Сибирская ассоциация консультантов (СибАК)». – Новосибирск, 2013. – С. 39–45.
4. Запорное устройство аварийного назначения для трубопроводов / В. В. Иванов, А. В. Олейников, Д. С. Денисевич, Б. Г. Пектимиров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 6. – С. 30–31.

5. Андреева, Л. Е. Упругие Элементы машин и приборов / Л. Е. Андреева. – М.: Машиностроение, 1962. – 456 с.

6. Woods, C. M., Merten, C. W. STRESS ANALYSIS OF HEADER MATERIAL SETS. (1987) ASME Mater Div Publ MD, 4, pp. 61–67.

7. Доможиров, В. Т. Экспертиза промышленной безопасности трубопроводной арматуры / В. Т. Доможиров, О. А. Токмаков // Арматуростроение. Межотраслевой журнал. – 2010. – № 6(69). – С. 22–26.

УДК 532.5: 621.742.4

А. С. Князева, Н. А. Кидалов, А. Б. Голованчиков

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ГИДРОДИНАМИКА В ТРУБОПРОВОДАХ ВОДНО-ГЛИНИСТЫХ СУСПЕНЗИЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ УГЛЕЩЕЛОЧНОГО РЕАГЕНТА (УЩР) ДЛЯ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

Приведены результаты исследования реологических свойств водно-глинистых суспензий на ротационном вискозиметре Brookfield DV-II+Pro. Методом наименьших квадратов получены параметры уравнений Гершеля–Баркли с относительной ошибкой, не превышающей 4 %. На основании реологических исследований проведены гидродинамические расчеты трубопроводов.

Ключевые слова: водно-глинистые суспензии, формовочная смесь, предельное напряжение сдвига, константа консистенции, индекс течения, расходно-напорная характеристика трубопровода.

A. S. Knyazeva, N. A. Kidalov, A. B. Golovanchikov

RHEOLOGICAL PROPERTIES AND HYDRODYNAMICS IN PIPELINES OF WATER-CLAY SUSPENSIONS WITH ADDITION OF LIGNIN-ALKALINE REAGENT FOR MOLDING MATERIALS

Volgograd State Technical University

The article shows the results of the study of the rheological properties of water-clay suspensions using a rotary viscometer Brookfield DV-II + Pro. The parameters of the Herschel–Bulkley equations with a relative error not exceeding 4 % are obtained by the method of least squares. The hydrodynamic calculations of pipelines are performed based on the rheological studies.

Keywords: water-clay suspension, molding sand, yield value, constant consistency, flow index, head-capacity curve of pipeline.

В литейном производстве в качестве связующего компонента в составах формовочных смесей используют водно-глинистые суспензии. Применение высококонцентрированных суспензий обеспечивает высокие технологические свойства смесей, однако затрудняет их транспортировку к месту смесеприготовления по трубопроводу. Для их разжижения используют химические вещества – понизители вязкости. Одним из наиболее дешевых и доступных веществ является углещелочной реагент (УЩР), который нашел широкое применение в нефтедобывающей промышленности, однако, применительно к литейному производству впервые был использован Т. М. Чапчиковой и А. А. Волкомичем в составах формовочных смесей [1].

Целью исследования являлись реологические свойства бентонитовых водно-глинистых суспензий 10, 12 и 15 мас. % концентрации с добавлением различного количества 15 мас. % водного раствора УЩР. Полученные суспензии исследовались на ротационном вискозиметре

Brookfield DV-II+Pro, с помощью которого получали данные зависимости напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$.

С помощью ЭВМ были вычислены параметры аппроксимирующих уравнений для реологических кривых, которые описываются уравнением Гершеля–Баркли [2]:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n,$$

где τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па; k – константа консистенции; n – индекс течения.

Варьируя τ_0 , выбиралось такое его значение, при котором сумма квадратов отклонений теоретических значений касательных напряжений от экспериментальных была наименьшей, при этом параметры k и n для каждого значения τ_0 определялись методом наименьших квадратов (МНК). Данные представлены в виде табл. 1.

На графиках рис. 1 изображены экспериментально полученные точки, а также аппроксимирующие их реологические кривые наиболее типичных водно-глинистых суспензий, полученные МНК.

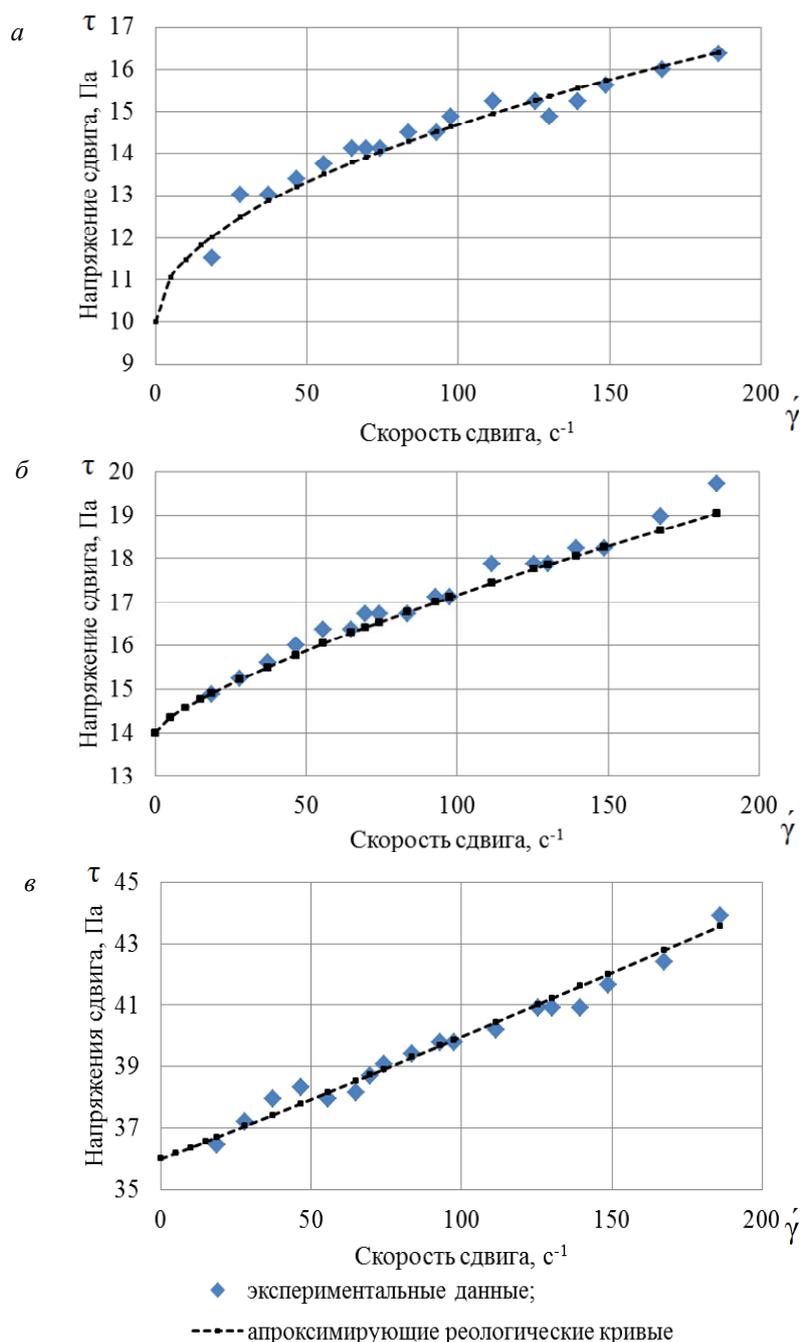
Таблица 1

Параметры аппроксимирующих уравнений

Суспензия	τ_0	k	n	$ \delta_{откл} , \%$	Уравнение
10+2 (а)	10	0,47	0,5	3,9	$\tau = 10 + 0,47\dot{\gamma}^{0,5}$
12+2 (б)	14	0,1	0,75	1,57	$\tau = 14 + 0,1\dot{\gamma}^{0,75}$
15+2 (в)	36	0,033	1,04	1,46	$\tau = 36 + 0,033\dot{\gamma}^{1,04}$

Примечание. В названиях суспензий первое число – массовая концентрация глинистой дисперсной фазы в суспензиях; второе число – количество вводимого раствора УЩР в водно-глинистую суспензию, мас. %.

По полученным реологическим уравнениям были проведены расчеты на ЭВМ, позволяющие определить гидродинамические параметры суспензии при ее течении по трубопроводу заданной приведенной длины. Для вычислений задавались некоторыми параметрами: приведенная длина трубопровода l равнялась 500 м, касательное напряжение на стенке трубопровода t_w , предельное напряжение сдвига τ_0 , а также реологическая константа k и n были для каждой суспензии свои при варьируемом внутреннем радиусе трубопровода r_w .



Реологические кривые для водно-глинистых суспензий с добавлением 2 мас. % УЩР:
 а – 10 мас. % суспензия; б – 12 мас. % суспензия; в – 15 мас. % суспензия

Давление, возникающее в трубопроводе, вычисляется по формуле, атм:

$$p = \frac{2 \cdot l \cdot \tau_w}{r_w \cdot 98100}$$

Для вычисления суммарного расхода неньютоновских жидкостей используется формула [3]:

$$q_v = \sum_{r=0}^m \dot{\gamma} r^2 dr$$

Средняя скорость потока определяется по формуле:

$$V_c = \frac{q_v}{\pi \cdot r_w^2}$$

Учитывая давление и расход жидкости в трубопроводе, рассчитывается необходимая мощность насоса для перекачки суспензии, кВт:

$$N_n = 1,3 \cdot \frac{p \cdot q_v}{1000}$$

где множитель 1,3 – коэффициент запаса мощ-

ности привода, учитывающий пусковой режим и КПД привода.

В табл. 2 представлены результаты вычислений параметров расходно-напорной характеристики для наиболее типичных суспензий при различном диаметре трубопровода. Жирным шрифтом выделены параметры суспензий, которые удовлетворяют условию проектирования трубопроводов, при котором средняя скорость потока должна лежать в пределах (1÷2) м/с [4]. При увеличении внутреннего диаметра трубопровода давление падает, в то время как расход жидкости растет. Суспензия 15 мас. % концентрации при движении по трубопроводу диаметром 6" имеет при расходе 76,6 м³/ч высокое гидравлическое сопротивление, равное 6 атм; 10 мас. % суспензия при течении по трубопроводу диаметром 6" имеет наименьшие потери давления 2,26 атм. при расходе 98 м³/ч.

Таблица 2

Расходно-напорная характеристика суспензий при различном диаметре трубопровода

Суспензия	Характеристики	Трубопровод				
		диаметр, дюймы				
		3"	3,5"	4"	5"	6"
		внутренний радиус r _w , м				
		0,04	0,045	0,05	0,0625	0,075
10+2	Давление, атм	4,2	3,74	3,36	2,69	2,24
	Расход, м ³ /ч	14,87	21,17	29	56	98
	Ср. скорость потока, м/с	0,82	0,92	1,02	1,28	1,5
	Мощность двигателя, кВт	2,2	2,8	3,46	5,4	7
12+2	Давление, атм	5,1	4,5	4,08	3,26	2,7
	Расход, м ³ /ч	18,2	25,9	35,5	69	119,88
	Ср. скорость потока, м/с	1	1,13	1,26	1,57	1,885
	Мощность двигателя, кВт	3,2	4,15	5,13	8	11,5
15+2	Давление, атм	–	–	8,97	7,18	5,98
	Расход, м ³ /ч	–	–	22,7	44,3	76,6
	Ср. скорость потока, м/с	–	–	0,8	1	1,2
	Мощность двигателя, кВт	–	–	7	11,3	16,2

Таким образом, наиболее выгодным является транспортирование водно-глинистых суспензий к месту смесеприготовления по трубопроводу с внутренним диаметром 6", при этом достигается наименьшее давление в трубопроводе, наибольший расход жидкости и выполняется условие, при котором средняя скорость потока лежит в пределах 1÷2 м/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 486846 СССР Смесь для изготовления литей-

ных форм / А. А. Волкомич, А. К. Кисляков, Ю. И. Крупчик, И. Б. Лурье, Т. М. Чапчикова, В. А. Родионов, В. А. Василенко ; заявитель: НИИ технологии автомобильной промышленности. Заявл. 07.05.74; Опубл. 05.10.75, Бюл. № 37.

2. Тябин, Н. В. Реологическая кибернетика. Ч. 1 / Н. В. Тябин; Волгоград: Волгоградская правда, 1978. – 111 с.

3. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. Ч. 2. Моделирование гидромеханических процессов: учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симонов; ВолгГТУ. – Волгоград, 1995. – 122 с.

4. Касаткин, Л. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / Л. Г. Касаткин. – М. : Альянс, 2008. – 753 с.

УДК 532.542

Е. В. Васильева, А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Л. А. Ильина
**СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ДВУХСЛОЙНОМ ТЕЧЕНИИ
«ТЯЖЕЛЫХ» НЕФТЕПРОДУКТОВ В ТРУБОПРОВОДЕ**

Волгоградский государственный технический университет

Рассматривается способ перемещения вязких «тяжелых» нефтепродуктов и жидкостей, заключающийся в формировании коаксиального концентрического слоя жидкости у внутренней поверхности трубы путем образования ее водного раствора, плотность которого равна плотности перекачиваемой нефти или нефтепродукта, при этом для образования водного раствора в воду предварительно добавляют поверхностно-активное вещество (ПАВ) – моноэтаноламин в количестве 0,006–0,014 % массовых и смешивают с хлоридом кальция взятом в количестве 1,1–20 % массовых.

Ключевые слова: нефтетранспорт, устойчивое течение, пристенный кольцевой слой, течение в трубе, эмульсия, двухслойное течение

E. V. Vasileva, A. B. Golovanchikov, N. A. Dulkina, L. A. Iilina
**THE DECREASE POWER INPUTS AT TWO-LAYER CURRENT «HEAVY»
OIL PRODUCTS IN THE PIPELINE**

Volgograd State Technical University

The way of the movements viscous «heavy» oil and liquids, is to form a concentric coaxial liquid layer the inside surface of the pipe by forming an aqueous solution whose density is the density of the pumped oil or petroleum products, and for the formation of an aqueous solution into water previously added surface active agent (surfactant) - monoethanolamine in the amount of 0,006–0,014 % by weight and mixed with calcium chloride taken in quantity 1,1–20 % by weight.

Keywords: oiltransport, stabilityflow, wallannular layer of, pipe flow, emulsion, two-layer flow.

Известен способ снижения гидравлического сопротивления в трубопроводах высоковязких и неньютоновских жидкостей за счет создания пристенного кольцевого слоя маловязкой жидкости. Этот слой постепенно из-за турбулентной и молекулярной диффузии «размывается» с образованием эмульсии.

Анализ зарубежных и отечественных исследований по указанной проблеме показывает основные пути ее решения:

– периодическое восстановление кольцевого слоя жидкости или газа в пристенном слое;

– нагревание основной жидкости у стенки трубы вплоть до образования парового пристенного слоя;

– электролиз в пристенном слое основной электропроводной жидкости с образованием маловязкого слоя из газов электролиза.

Есть и другие способы создания устойчивого пристенного слоя маловязкой жидкости за счет равенства плотностей обеих жидкостей при сохранении неравенства вязкостей. Особое направление может быть связано с подачей в пристенный слой неньютоновской маловязкой жидкости так, чтобы на границе обеих жидкостей обеспечивалось не только равенство касательных напряжений и скоростей, но и градиентов скоростей.

Предварительное насыщение основной жидкости молекулами маловязкой жидкости совместно с обеспечением равенства их плотностей, касательных напряжений, скоростей и градиентов скорости на границе раздела фаз, а также дополнительная периодическая подача маловязкой жидкости в пристенный слой за местными сопротивлениями (поворотами, сужениями, расширениями потока, кранами, вентилями) позволяет значительно увеличить длину устойчивого двухслойного течения, снизить гидравлическое сопротивление, энергозатраты, толщину стенок трубопроводов, аппаратов и реакторов [1].

Другой подход к обеспечению двухслойного течения решен в патенте, для которого характерно применение равенства плотностей перекачиваемых сред и в котором описан способ перемещения, заключается в формировании коаксиального концентрического слоя у внутренней поверхности трубы. Предварительно в воду добавляют метиловый спирт в количестве 17,4÷53 % массовых с образованием спиртового раствора, плотность которого равна плотности перекачиваемой нефти или нефтепродукта. Техническим результатом этого изобретения является создание устойчивого кольцевого слоя маловязкой жидкости за счет нейтрализации

силы тяжести и силы Архимеда, возникающих при разности плотностей нефти или нефтепродукта и маловязкой жидкости, двигающейся в коаксиальном концентрическом слое у внутренней поверхности трубы [2].

Целью работы является разработка способа двухслойного кольцевого течения в трубе для нефтей и нефтепродуктов, плотность которых больше плотности воды. Однако описанный способ можно применять для нефтей и нефтепродуктов плотность которых меньше плотности воды. Для достижения поставленной цели в воду предварительно добавляют поверхностно-активное вещество (ПАВ) – моноэтаноламин в количестве 0,006–0,014 % массовых и смешивают с хлоридом кальция взятом в количестве 1,1–20 % массовых так, чтобы плотность водного раствора равнялась плотности «тяжелой» нефти или нефтепродукта.

Использование в качестве водного раствора ПАВ моноэтаноламина с концентрациями 0,006–0,014 % массовых, обеспечивающего снижение поверхностного натяжения на границе водного раствора и перекачиваемого вязкого нефтепродукта или «тяжелой» жидкости, и хлорида кальция с концентрацией 1,1–20 % массовых, обеспечивающего плотность водного раствора, равную плотности перекачиваемого вязкого нефтепродукта или «тяжелой» жидкости, позволяет после формирования кольцевого концентрического слоя этого раствора у внутренней поверхности трубы, обеспечивать его устойчивость по всей длине трубопровода из-за отсутствия разницы сил тяжести и силы Архимеда, заставляющей этот солевой раствор с ПАВ и вязкий нефтепродукт или жидкость перемешиваться друг с другом, а так как при этом вязкость водного раствора значительно меньше вязкости перекачиваемого вязкого нефтепродукта или жидкости, то гидравлическое сопротивление и энергозатраты уменьшаются.

Растворение в воде ПАВ – моноэтаноламина уменьшает поверхностное натяжение на границе кольцевого слоя «водный раствор – вязкий нефтепродукт или «тяжелая» жидкость» что предотвращает их перемешивание и увеличивает устойчивость этой границы по всей длине трубопровода.

Уменьшение концентрации ПАВ в воде ниже 0,006 % массовых не позволяет увеличить устойчивость границы слоев водного раствора и вязкого нефтепродукта или жидкости, особенно в зоне местных сопротивлений: поворо-

тов, вентилях, задвижек, сужений и расширений трубопровода, что приводит к перемешиванию водного раствора и перекачиваемого вязкого нефтепродукта или жидкости, а значит увеличению гидравлического сопротивления и энергозатрат.

Увеличение концентрации ПАВ в воде выше 0,014 % массовых незначительно понижает поверхностное натяжение водного раствора хлорида кальция и не влияет на повышение устойчивости на границе кольцевого слоя «водный раствор – вязкий нефтепродукт или «тяжелая» жидкость», а значит не приводит к дополнительному уменьшению гидравлического сопротивления и энергозатрат.

В емкости 4 находится вязкий нефтепродукт или жидкость, в нее опущен всасывающий патрубок центробежного насоса 5, а нагнетательный патрубок 6, имеющий наружный диаметр d (меньший внутреннего диаметра D трубопровода 1 на удвоенную величину коаксиального концентрического слоя водного раствора моноэтаноламина и хлорида кальция CaCl_2) и установленный осесимметрично на входе с линейной частью трубопровода 1.

Денсиметр 17 служит для измерения плотности вязкого нефтепродукта или жидкости в емкости 4. Расход моноэтаноламина из бака 13 в смеситель 10 регулируется с помощью вентиля 14, моноэтаноламин в воде перемешивается мешалкой 11, создается раствор заданной концентрации, который контролируется концентратометром 23. Смеситель 9 заполняется полученным водным раствором моноэтаноламина заданной концентрацией из емкости 10 через трубку с вентилем 12. Затем подается из бункера 15 с помощью дозатора 16 соль хлорида кальция в смеситель 9. Включается мешалка смесителя 9 и, создается водный раствор моноэтаноламина и хлорида кальция с плотностью (которая контролируется денсиметром 18) равной плотности вязкого нефтепродукта или «тяжелой» жидкости, которая контролируется денсиметром 17.

После включения центробежного насоса 5 по нагнетательному патрубку 6 подается вязкий нефтепродукт или «тяжелая» жидкость в трубопровод, расход устанавливается вентилем 8 и контролируется ротаметром 7. Одновременно включается насос 19, которым по нагнетательному патрубку с вентилем 20 подается в коаксиальный кольцевой зазор 21 водный раствор моноэтаноламина и хлорида кальция из смесителя 9. Расход этого водного раствора контролируется ротаметром 22.

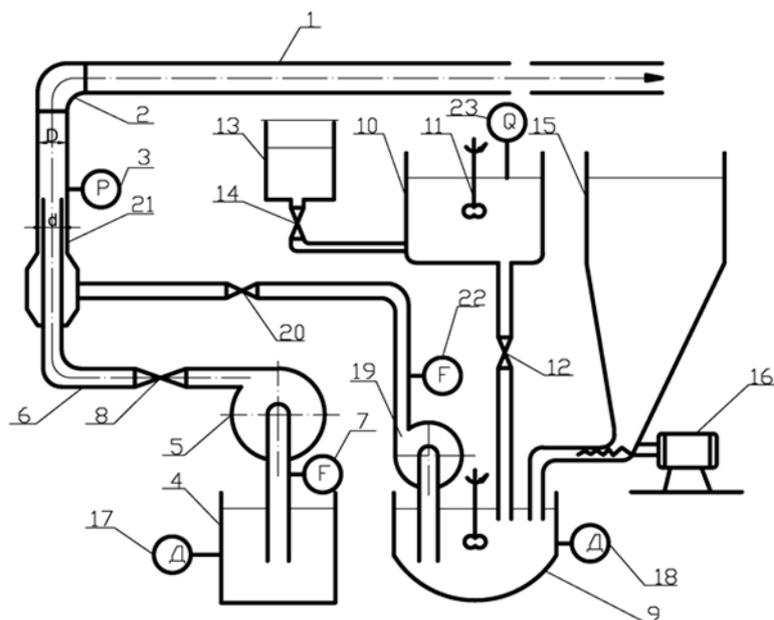


Рис. 1. Схема установки для перемещения вязких нефтепродуктов или «тяжелых» жидкостей:

1 – линейный участок трубопровода, 2 – колено, 3 – дифманометр, 4 – емкость, 5 – центробежный насос, 6 – нагнетательный патрубок, 7, 22 – ротаметры, 8, 12, 14, 20 – вентили, 9, 10 – смесители, 11 – мешалка, 13 – бак, 15 – бункер, 16 – дозатор, 17, 18 – денсиметры, 19 – насос, 21 – коаксиальный кольцевой зазор, 23 – концентратомер

Так как плотности перекачиваемого вязкого нефтепродукта или жидкости, подаваемого по нагнетательному патрубку центробежного насоса 5, и водного раствора моноэтаноламина и хлористого кальция, подаваемого в коаксиальный кольцевой зазор 21, равны, то силы тяжести и Архимеда перекачиваемого вязкого нефтепродукта или жидкости и водного раствора моноэтаноламина и хлористого кальция будут также равны, а значит коаксиальный слой водного раствора моноэтаноламина и хлорида кальция будет устойчиво двигаться вдоль внутренней поверхности трубопровода 1, а перекачиваемый вязкий нефтепродукт или жидкость внутри этого коаксиального концентрического слоя водного раствора моноэтаноламина и хлорида кальция.

Кроме того, так как водный раствор моноэтаноламина и хлорида кальция имеет вязкость значительно меньшую вязкости перекачиваемого вязкого нефтепродукта или жидкости, то гидравлическое сопротивление, измеряемое дифманометром 3, и энергозатраты будут намного меньше на всех участках трубопровода 1, потому что перекачиваемый вязкий нефтепродукт или жидкость не соприкасаются с внутренней поверхностью трубопровода.

Например, необходимо перекачивать мазут М100 при температуре 20 °С плотностью

$\rho = 1015 \text{ кг/м}^3$ и динамической вязкостью $\mu = 81,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ [3] на расстояние $L = 10 \text{ км}$ в трубопроводе диаметром $D = 0,1 \text{ м}$ с расходом $q = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ или $3,6 \text{ м}^3/\text{ч}$. Содержание моноэтаноламина в водном растворе принимаем равное – 0,006 % (массовый).

Выбирается по справочникам водный раствор хлористого кальция, имеющий при $t = 20 \text{ °С}$ и массовой концентрацией $x_1 = 1,6 \text{ %}$ плотность, равную плотности перекачиваемого мазута, при этом динамическая вязкость этого раствора CaCl_2 составляет $\mu_1 = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ [4]. Этот раствор, как и вода плохо растворимы в мазуте и имеет вязкость в 60 тысяч раз меньшую, чем вязкость мазута.

Для формирования коаксиального концентрического слоя у внутренней поверхности трубы из этого водного раствора ПАВ – моноэтаноламина и хлористого кальция толщиной $\delta = 1 \text{ мм}$ его расход должен составлять $q_1 = 5,03 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ или $0,018 \text{ м}^3/\text{ч}$ [1]. Этот расход подают насосом 19 из смесителя 9 в коаксиальный кольцевой зазор 21, регулируют его подачу вентилем 20 и контролируют расход ротаметром 22.

По нагнетательному патрубку 6 диаметром $d = 98 \text{ мм}$ центробежного насоса 5 мазут с плотностью $\rho = 1015 \text{ кг/м}^3$ подается на вход линейной части трубы 1 диаметром $D = 100 \text{ мм}$ с заданным расходом $q = 3,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, который ре-

гулируется вентилем 8 и контролируется ротаметром 7.

Так как плотности перекачиваемого мазута и водного раствора ПАВ и хлорида кальция равны, то обе жидкости, не смешиваясь, движутся вдоль линейной части трубопровода 1. На повороте в колене 2 они также не смешиваются, так как центробежные силы обеих жидкостей из-за равенства плотностей будут равны, а водный раствор ПАВ моноэтаноламина увеличивает устойчивость границы раздела обеих жидкостей за счет снижения поверхностного натяжения.

При этом доля расхода раствора хлорида кальция составляет 0,5 % от расхода перекачи-

ваемого мазута.

Гидравлическое сопротивление на 10 км трубопровода составляет 2,86 ат, а удельные энергозатраты $E = 0,077 \cdot 10^{-2}$ кВт·ч/т.

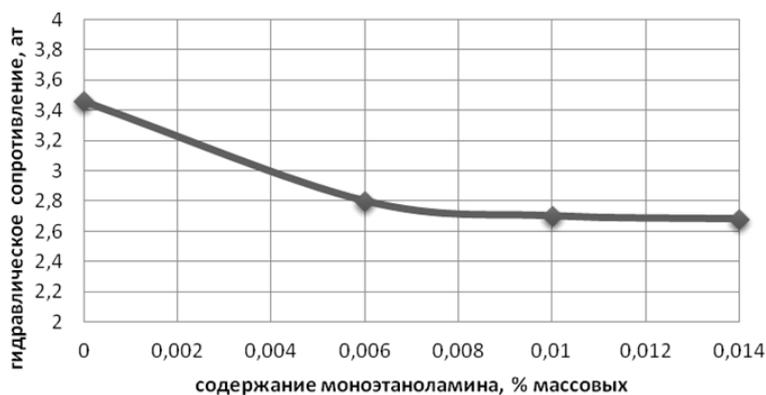
Такие же расчеты были проведены для водного раствора с концентрацией моноэтаноламина 0,01; 0,014 % массовых, а так же при перекачивании мазута без ПАВ.

Результаты расчетов сведены в графики на рис. 2.

Аналогичные расчеты были проведены для перекачивания «тяжелой» кремнийорганической жидкости плотностью $\rho = 1200$ кг /м³. Их результаты приведены на рис. 3.

Мазут М100

а



Мазут М100

б

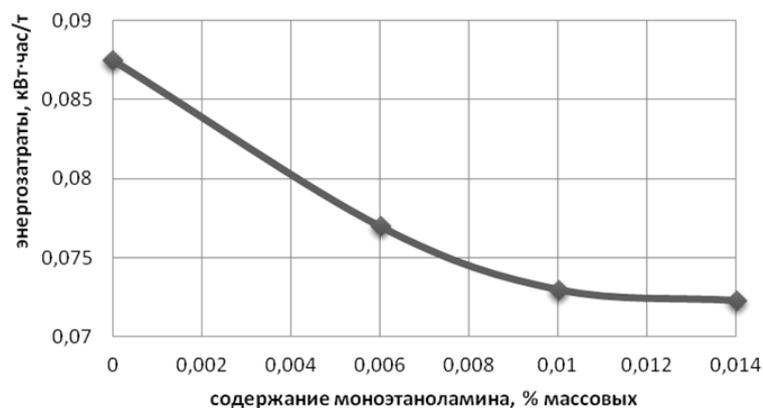
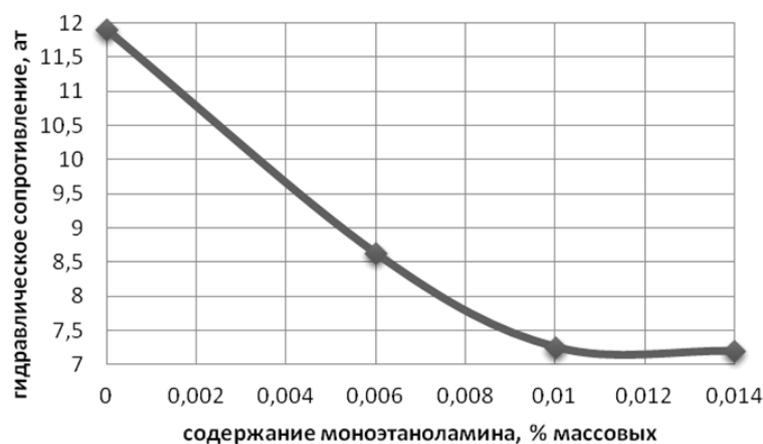


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления (а) и энергозатрат (б) от содержания ПАВ в водном растворе CaCl₂ для мазута М100 (концентрация CaCl₂ в водном растворе 1,6 % массовых)

Кремнийорганическая жидкость

а



Кремнийорганическая жидкость

а

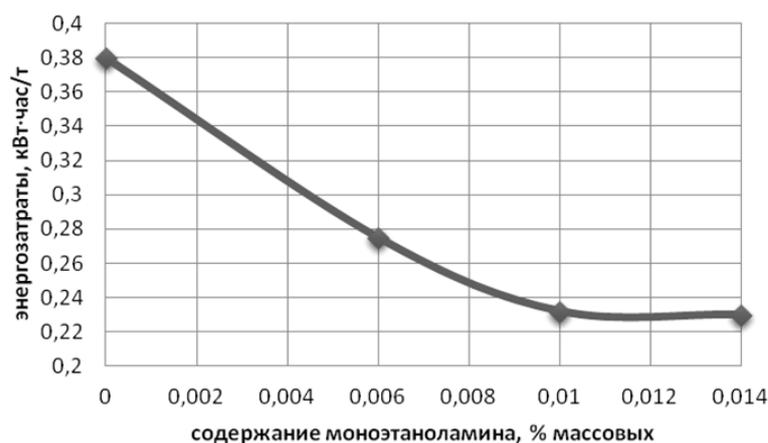


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления (а) и энергозатрат (б) от содержания ПАВ в водном растворе CaCl_2 для кремнийорганической жидкости (концентрация CaCl_2 в водном растворе 20 % массовых)

Таким образом, перемещение вязких нефтепродуктов и жидкостей, с коаксиальным концентрическим слоем водного раствора моноэтаноламина, имеющего концентрацию 0,006–0,014 % массовых, и хлорида кальция с концентрациями 1,1–20 % массовых, обеспечивающих плотность водного раствора, равную плотности перекачиваемого вязкого нефтепродукта или «тяжелой» жидкости, позволяет снизить гидравлическое сопротивление и энергозатраты на 50–100 % за счет устойчивого движения этого слоя у стенки трубопровода без перемешивания с перекачиваемым вязким нефтепродуктом или «тяжелой» жидкостью и предотвращения вихреобразования на кольцевой границе маловязкого водного раствора с высоковязким нефтепродуктом или «тяжелой» жидкостью [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованчиков, А. Б. Моделирование двухслойного течения жидкостей в трубопроводе: учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Е. В. Васильева; ВолгГТУ. – Волгоград : РПК «Политехник», 2011. – 72 с.
2. Пат. 2448283 РФ, МПК F 15 D 1/02. Способ перемещения вязких нефтей и нефтепродуктов / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, А. А. Решетников, И. С. Бацокин, Е. Г. Фетисова, А. М. Михеев; ВолгГТУ. – 2012.
3. Жидкое топливо (котельный мазут) [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : http://www.sergey_osevich.narod.ru/Projects/Boiler/FLUID_FUEL_OR_BOILER_FUEL_OIL.htm
4. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – Л.: Химия, 1976. – 552 с.
5. Заявка на изобретение № 2013135340 приоритет от 26.07.2013 Способ перемещения вязких нефтепродуктов и жидкостей / А. Б. Голованчиков, Е. В. Васильева, Н. А. Дулькина, Д. С. Мурзенков, Н. Н. Польская, Л. А. Ильина.

УДК 541.183:628.515

*М. И. Ламскова, А. Е. Новиков***ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ, ОБОРОТНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫХ ВОД ПРИРОДНЫМИ АЛЮМОСИЛИКАТАМИ****Волгоградский государственный технический университет**

Рассмотрены возможности и перспективы использования природных алюмосиликатов нефелиновых, цеолитовых и глауконитовых пород при очистке оборотных, сточных и хозяйственно-бытовых вод от тяжелых металлов, органических соединений и других загрязняющих веществ.

Ключевые слова: алюмосиликаты, флокулянты, коагулянты, адсорбция, вода, загрязнения, очистка.

*M. I. Lamskova, A. E. Novikov***OPPORTUNITIES AND PROSPECTS OF SEWAGE AND DOMESTIC WASTE WATER WITH NATURAL ALUMINOSILICATES****Volgograd state technical university**

The possibilities and prospects for the use of natural aluminosilicate nepheline, zeolite and glauconite rocks in the purification of circulating, sewage and domestic water from heavy metals, organic compounds and other pollutants.

Keywords: aluminosilicates, flocculants, coagulants, adsorption, water, pollution, clean up.

В нефтехимической, металлургической, пищевой, сельскохозяйственной и др. отраслях, в том числе жилищно-коммунальном хозяйстве использование водных ресурсов имеет первостепенное значение. Более того с целью обеспечения геоэкологической безопасности и ресурсосбережения вторичное и последующее использование пресной воды в технологическом процессе является наиболее актуальной задачей [1–4].

Наиболее распространенный метод очистки воды основан на совместном применении коагулянтов и флокулянтов, который обеспечивает достаточно высокую степень удаления взвешенных веществ (ВВ) и бактерий, а также некоторых растворенных примесей. В качестве коагулянта наиболее часто используют хорошо растворимый в воде и относительно недорогой сульфат алюминия (СА). Флокулянты классифицируют на природные (органические и неорганические) и синтетические – полиакриламид (ПАА). Среди неорганических флокулянтов наиболее часто используется кремниевая кислота (АК), которая представляет собой коллоидный раствор поликремневых кислот [5, 6].

Соединения сульфата алюминия и поликремневой кислоты присутствуют в растворах, получаемых в результате вскрытия природных алюмосиликатов. Нефелин $Na(AlSiO_4)$ – главный породообразующий минерал нефелиновых сиенитов. Переработка нефелиновых руд предусматривает получение в качестве товарных продуктов апатитовых, эгириновых и нефелиновых концентратов. При этом остающиеся отходы содержат значительное количество от-

вальных нефелиновых хвостов, характеризующиеся высокими концентрациями алюмосиликатов легко переходящих в раствор при взаимодействии с разбавленной серной кислотой.

Нефелиновые руды в сравнении с бокситами и каолинами, которые также используются для получения алюмосодержащих коагулянтов, имеют ряд преимуществ:

1) легко вскрываются кислотами с выделением значительного количества тепла, что позволяет их разлагать без внешнего подвода энергии;

2) особенности кристаллохимического строения нефелина позволяют перевести в раствор не только соли алюминия, но и коллоидный кремнезем, который, полимеризуясь, исполняет роль как флокулянта, так и коагулянта (алюмокремниевый флокулянт-коагулянт – АКФК).

АКФК получают, обрабатывая нефелиновый концентрат 10–15 % серной кислотой в течение 6–8 минут. Далее раствор АКФК отделяют от небольшого количества нерастворимого остатка отстаиванием или фильтрованием. Этот способ позволяет избежать стадии выпарки, кристаллизации и последующего растворения кристаллического коагулянта на водоочистных установках или станциях. Полученный АКФК на основе нефелиновых руд содержит до 95 % полимерных форм диоксида кремния [7].

Для получения экспериментальных данных о сравнительной эффективности АКФК был выполнен анализ качества очистки воды традиционно используемого СА и предлагаемого реагента. Объектом исследования была вода, используемая в процессе водоподготовки на ТЭЦ [8].

Одной из важнейших характеристик качества воды является перманганатная окисляемость (ПМО). Снижение ПМО до нормативных пределов достигается при использовании АКФК уже при дозе Al_2O_3 11,5 мг/л, тогда как СА при использовании требуется увеличение дозы Al_2O_3 до 16 мг/л (рис. 1).

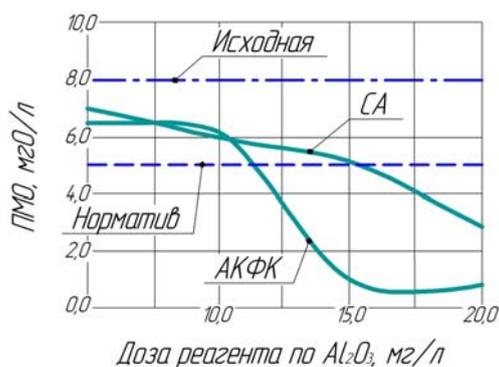


Рис. 1. Динамика показателя ПМО воды в зависимости от дозы вносимых реагентов

Пробы воды, взятые из отстойника-накопителя, содержали высокие концентрации ВВ. Из графиков на рис. 2 следует, что применение АКФК позволяет достичь лучшей степени очистки от ВВ в сравнении с СА. Это обусловлено присутствием в АКФК поликремневой кислоты, увеличивающей флокуляционные свойства раствора реагента.

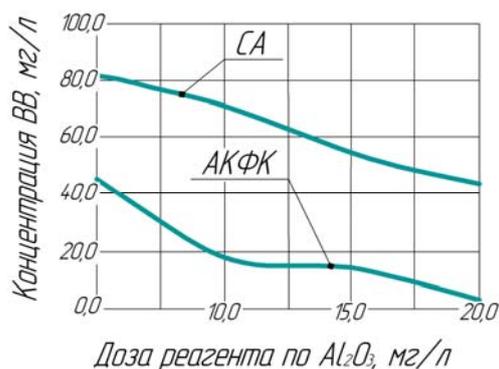


Рис. 2. Динамика показателя концентрации ВВ в зависимости от дозы вносимых реагентов

Поверхностные воды характеризуются наличием железа в виде тонкодисперсной взвеси гидроксида или в составе комплексных органических веществ. Исследования по обезжелезиванию воды реагентами представлены в табл. 1. В анализируемой воде содержание железа составляло 0,3 мг/л, доза реагента – 20 мг на литр очищаемой воды.

Таблица 1

Обезжелезивание воды с применением СА и АКФК

Реагент	Исходное содержание железа, мг/л	Остаточное содержание железа, мг/л	Остаточное содержание алюминия, мг/л
СА	0,3	0,1	0,07
АКФК	0,3	0,001	< 0,01

Поскольку СА и АКФК имеют кислую реакцию среды, был проведен эксперимент зависимости pH очищенной воды от дозы вносимых реагентов. Из приведенных на рис. 3 графиков видно, что оба реагента обеспечивают требуемый уровень pH = 6,5–8,0.

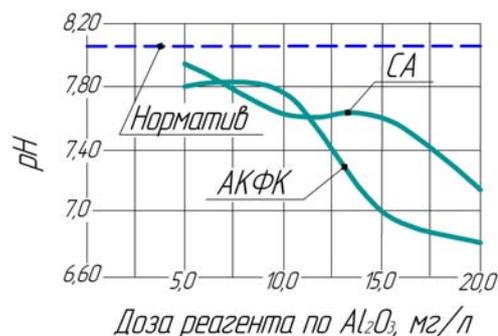


Рис. 3. Динамика показателя pH очищенной воды от дозы вносимых реагентов

Для окончательной доочистки воды возможно применение фильтров с цеолит-глауконитовой (ЦГ) загрузкой. Природные минералы обладают высокими адсорбционными свойствами, при этом их действие распространяется не только на органические вещества, но и на целый ряд тяжелых металлов и радионуклидов [9]. Также положительный эффект отмечается и при очистке, дезактивации и мелиорации вязкоупругих неньютоновских жидкостей (почвогрунтов) [10].

Результаты экспериментальных исследований по фильтрованию через ЦГ загрузку показали высокую ее эффективность. Использование природных адсорбентов вместо традиционного песка позволяет увеличить объем фильтруемой воды в 1,5–2 раза и грязеемкость фильтра – на 20–50 %.

По данным [11] за счет использования природных ЦГ адсорбентов эффективность очистки загрязненных вод по тяжелым металлам достигает 99,7–99,9 %, органическим соединениям – 99,8–99,99 % (табл. 2).

Таблица 2

**Эффективность очистки загрязненной воды от ионов токсичных металлов
и органических соединений природным ЦГ адсорбентом**

Определяемый показатель	Содержание в мг/дм ³		Эффективность очистки, %
	До сорбции	После сорбции	
Тяжелые металлы			
Свинец	10,35±1,05	0,01±0,005	99,9
Кадмий	5,6±0,5	0,006±0,0006	99,9
Цинк	3,3±0,5	0,003±0,0003	99,9
Ртуть	10,1±0,8	0,001±0,00005	99,9
Медь	3,2±0,5	0,003±0,0004	99,9
Кобальт	3,0±0,2	0,003±0,0004	99,9
Хром (III)	2,0±0,2	0,005±0,0005	99,7
Хром (IV)	2,0±0,2	0,005±0,0005	99,7
Органические соединения			
Дизельное топливо	5,0±0,1	0,01±0,005	99,8
Мазут	5,0±0,1	0,01±0,005	99,8
Бензапирен	0,25±0,05	0,00025	99,9
Фенол	1,0±0,01	0,001±0,0005	99,9
o, m, p-Хлорфенолы	1,0±0,01	0,001±0,0005	99,9
2,4-Дихлорфенолы	0,5±0,01	0,0005±0,0001	99,9
2,4-Динитрофенол	0,5±0,01	0,0005±0,0001	99,9
Диоксины	0,0005	Не обнаружено	99,99

Таким образом, очистка и доочистка загрязненных вод алюмосиликатами природного происхождения на основе минералов нефелиновых и цеолит-глауконитовых пород в качестве флокулянтов-коагулянтов и фильтрующих загрузок экологически безопасна и требует значительно меньших затрат энергии и материальных ресурсов. Использование АКФК и ЦГ адсорбентов способствует увеличению объема фильтруемой воды до 2 раз, грязеемкости фильтра – на 20–50 %, при этом эффективность очистки от тяжелых металлов и органических соединений достигает практически 100 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электролизер для очистки сточных вод от примесей / А. Б. Голованчиков, Ю. В. Аристова, С. Б. Воротнева, А. Е. Новиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 5). – С. 91–93.
2. Новиков, А. Е. Разработка и экспериментальное исследование установки для гидромеханической очистки воды / А. Е. Новиков, Г. И. Первакова, Н. А. Безроднов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 5). – С. 65–67.
3. Новиков, А. Е. Проблемы качества поливной воды и водоочистки для систем капельного орошения / А. Е. Новиков, М. И. Ламскова // Актуальные проблемы развития агропромышленного комплекса Прикаспийского региона: матер. междунар. науч.-практ. конф., 22–24 мая 2013 г. / ФГБОУ ВПО «Калмыцкий гос. ун-т» [и др.]. – Элиста, 2013. – С. 132–134.
4. Кузнецов, П. И. Первичная водоочистка на закрытых оросительных системах со стальными трубами / П. И. Кузнецов, А. Е. Новиков, М. И. Ламскова // Водоочистка, Водоподготовка, Водоснабжение. – 2013. – № 6. – С. 44–45.
5. Совместное влияние коагулянта и флокулянта на седиментационные свойства водной суспензии каолина / И. А. Новаков, О. К. Жохова, О. П. Отченашев, С. С. Радченко, Н. У. Быкадоров, И. В. Мирошниченко // Известия ВолгГТУ : сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 1998. – (Серия «Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов»). – С. 184–188.
6. Радченко, С. С. Получение и исследование коагулирующей способности твердых композиций на основе пентагидроксохлорида алюминия / С. С. Радченко, Ле Ван Конг // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов»; вып. 6). – С. 76–80.
7. Пат. 2283286, МПК C02F 1/52, C01F 7/74, C01F 7/56. Нефелиновый коагулянт / Л. М. Делицын, А. С. Власов; заявитель и патентообладатель Л. М. Делицын, А. С. Власов. – № 2005111691/15, заявл. 20.04.2005; опубл. 10.09.2006, Бюл. № 25.
8. Бондарева, М. И. Нефелин – перспективное сырье для получения комплексного реагента водоочистки и во-

доподготовки / М. И. Бондарева, С. М. Москвичев // Экологический навигатор. – 2008. – № 7. – С. 53–56.

9. Использование глауконита и каолина в качестве фильтрующей загрузки в бытовых фильтрах доочистки питьевой воды / Ю. И. Сухарев, Т. Г. Крупнова, Е. А. Григорьева [и др.] // Известия Челябинского научного центра. – 2005. – Вып. 3. – С. 80–84.

10. Новиков, А. Е. Использование адсорбентов природного и техногенного происхождения в качестве почвенных удобрений-мелиорантов / А. Е. Новиков // Проблемы и перспективы развития АПК в работах молодых

ученых: матер. междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвященной 185-летию Сибирской аграрной науки и 80-летию ГНУ СибНИИСХ (г. Омск, 3–4 июля 2013 г.) / РАСХН. Сиб. отд.-ние. СибНИИСХ. – Омск, 2013. – С. 80–85.

11. Якубов, В. В. Технология комплексной очистки поливной воды при ресурсосберегающих способах полива сельскохозяйственных культур / В. В. Якубов, М. П. Мещеряков // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 2. – С. 211–215.

УДК 665.7

Ю. В. Думский, Г. Ф. Чередникова*, С. Ю. Думский***

НОВЫЕ ПРОЦЕССЫ КВАЛИФИЦИРОВАННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКИХ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

***ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование»**

****Волгоградский государственный технический университет**

Приведены данные по новым процессам переработки фракций С5, С8–9 и С9 продуктов пиролиза, а также тяжелой смолы пиролиза с получением нефтеполимерных смол как заменителей продуктов природного происхождения (растительных масел, алкидов, канифоли) и дорогих и дефицитных нефтехимических продуктов (инден-кумароновых, феноло- и карбамидо-формальдегидных смол) в различных отраслях промышленности. При этом новые процессы безотходны и экологически чисты.

Ключевые слова: продукты пиролиза, нефтеполимерные смолы, заменители растительных масел.

YU. V. Dumskiy, G. F. Cherednikova*, S. YU. Dumskiy***

NEW PROCESSES OF THE QUALIFIED USE OF LIQUID BY-PRODUCTS OF THE PYROLYSIS

***JSC Vniktineftekhimoborudovaniye**

****Volgograd State Technical University**

Are cited data on the new processes of processing the fractions C5, C8-9 and C9 of the products of pyrolysis, and also heavy resin of pyrolysis with obtaining of petro-polymer resins as the substitutes of the products of natural origin (vegetable oils, alkyds, resin) and expensive and scarce petrochemical products (coumarone-indene, phenol and carbamide-formaldehyde resins) in different branches of industry. In this case new processes are wasteless and it is ecologically clean.

Keywords: the products of pyrolysis, petro-polymer resins, the substitutes of vegetable oils.

Процесс пиролиза углеводородного сырья на многотоннажных этиленовых производствах ЭП-250, ЭП-300, ЭП-450 с получением низших олефинов играет существенную роль в углублении переработки нефти.

При этом тенденции в отечественной и мировой промышленной практике свидетельствуют о вовлечении в процесс пиролиза не только легкого, но и утяжеленного сырья (дизельного топлива, рафинатов и др.). Наряду с этиленом и пропиленом в процессе пиролиза в значительных объемах, исчисляемых сотнями тысяч тонн в год, получают и жидкие побочные продукты, в основном используемые как топливо. При этом содержащиеся в них непредельные углеводороды, как ценное нефтехимическое сырье, теряются безвозвратно.

Жидкие продукты пиролиза, образующиеся на этиленовых производствах, подразделяют на

пироконденсат (пиробензин или легкая смола пиролиза) и тяжелую смолу пиролиза. Пиро-конденсат выкипает до 200 °С, а тяжелая смола – свыше 200 °С. Пиро-конденсат разделяют на узкие фракции, в которых концентрируются непредельные и ароматические углеводороды. Реализованные в промышленности процессы предусматривают выделение из пиро-конденсата следующих фракций: С5, С6–С7, (бензол-толуол-ксилольной (БТК) или бензол-толуольной (БТ), С8–С9 или С9.

При этом фракция углеводородов С5 содержит значительное количество ценных диеновых мономеров: изопрена 20–25 %, циклопентадиена 20–25 %, пипериленов 10–15 %.

Фракция С6–С7 (70–130 °С) в своем составе преимущественно содержит ароматические углеводороды и небольшое количество диенов, обычно 3–5 %, в основном алифатического характера.

Во фракциях С8–С9, выкипающих при 120–200 °С, концентрируются алкенилароматические углеводороды и дициклопентадиен.

Фракция С9 (150–190 °С) пироконденсата, получаемого при пиролизе бензина на промышленных установках пропиленового режима, содержит 49,4 % реакционноспособных алкенилароматических углеводородов и дициклопентадиена; при более жестких условиях пиролиза содержание этих соединений увеличивается до 60,8 %.

Цель работы – разработать технологию получения и использования побочных продуктов пиролиза жидких углеводородов.

Разработчиком ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование» созданы процессы синтеза на базе жидких продуктов пиролиза нефтеполимерных смол (НПС) как заменителей продуктов природного происхождения и дефицитных дорогостоящих нефтехимических продуктов.

Так, на базе фракции С5 продуктов пиролиза путем инициированной олигомеризации содержащихся в ней циклопентадиена, изопрена, пиперилена и других непредельных углеводородов в «мягких» температурных режимах с последующей дополимеризацией полученных олигомеров предложено получать светлые реакционноспособные НПС. Разработанная технология безотходна и экологически чиста.

Переработку фракций С8–С9 и С9 предложено осуществлять по технологии, не предусматривающей использование дорогостоящих катализаторов и пожаро-взрывоопасных инициаторов, обуславливающих образование загрязненных сточных вод и выбросов в атмосферу. Нашедшая промышленное применение технология радикальной полимеризации содержащихся в указанных фракциях преимущественно арилалкенов и дициклопентадиена обеспечивает получение в мягких технологических параметрах (т. е. порядка 200–250 °С) ненасыщенных светлых НПС типа Пиропласт-2, являющихся прямыми заменителями растительных масел в производстве лакокрасочных материалов, частично канифоли в различных областях. При этом наряду с НПС получают качественный растворитель лакокрасочных материалов и обогороженное котельное топливо.

По экологически чистой технологии, предусматривающей термоинициированную олигомеризацию тяжелой смолы пиролиза, предложено получать темную нефтеполимерную смолу и высококачественное сырье для производ-

ства технического углерода. Темная НПС представляет собой продукт соолигомеризации преимущественно конденсированных алкенилароматических углеводородов и олигомеров арилалкенов. Такая НПС, как установлено результатами испытаний, может быть использована в качестве смоляного агента – заменителя стирольно-инденовой смолы в шинной и резиновой промышленности, в том числе при регенерации резины.

Из разработанных процессов получения НПС, защищенных рядом патентов на изобретения, промышленное внедрение уже получил процесс производства светлой нефтеполимерной смолы на базе фракции С8–С9 продуктов пиролиза, названной Пиропластом-2. При этом все вырабатываемые в России НПС под разными названиями являются смолами типа Пиропласт-2, получаемыми по технологии ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование». Практически все они используются для сокращения расхода растительных масел и частично алкидов в лакокрасочных материалах.

Кроме того институтом синтезирован по безотходной и экологически чистой технологии ряд немодифицированных и модифицированных НПС, являющихся не только заменителями растительных масел и алкидов, но и дорогостоящих эпоксидных смол и акрилатов в лакокрасочных материалах, канифоли и инденкумароновых смол в шинной и резиновой промышленности, феноло- и карбамидо-формальдегидных смол в целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности.

Для организации переработки жидких продуктов пиролиза с получением нефтеполимерных смол по технологии разработанной ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование» может быть использовано типовое отечественное оборудование из обычных «черных» сталей. Как показывают расчеты, окупаемость затрат на создание производства НПС не превышает полугодя.

Наряду с НПС, получают обогороженный, освобожденный от непредельных соединений компонент бензина, растворитель лакокрасочных материалов типа сольвента нефтяного и печное топливо.

При этом внедрение в производство разработанных институтом процессов синтеза НПС не только углубляет переработку нефти, но и обеспечивает квалифицированное использование жидких побочных продуктов пиролиза с получением ликвидной, пользующейся повышенным спросом товарной продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Думский, Ю. В. Нефтеполимерные смолы / Ю. В. Думский. – М. : Химия, 1988. – 168 с.

2. Думский, Ю. В. Лакокрасочные материалы и их применение / Ю. В. Думский, З. С. Цахилова, Г. Ф. Чередникова, А. А. Глуз // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1993. – С. 11–12.

УДК 665.7

*Ю. В. Думский**, *Г. Ф. Чередникова,** *С. Ю. Думский***

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАМЕНИТЕЛЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

***ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование»**

****Волгоградский государственный технический университет**

В производстве лакокрасочных материалов (ЛКМ) в отечественной и зарубежной промышленной практике наряду с растительными маслами и прежде всего подсолнечным, находят все более широкое применение синтетические их заменители. Особое место среди них занимают нефтеполимерные смолы (НПС) как продукты синтеза на базе непереложно содержащего нефтехимического сырья.

Ключевые слова: лакокрасочные материалы, растительные масла, технология переработки.

Yu. V. Dumsky, Dr. Sci. Tech.; G. F. Cherednikova*, **Duma Page Yu*

USE OF SUBSTITUTE OF VEGETABLE OILS

***JSC Vniktineftekhimoborudovaniye**

****Volgograd state technical university**

In production of paintwork materials (LKM) in domestic and foreign industrial practice along with vegetable oils and first of all sunflower, their synthetic substitutes find more and more broad application. The special place among them is taken by petropolymeric pitches (NPS) as synthesis products on the basis of not extremely containing petrochemical raw materials.

Keywords: paintwork materials, vegetable oils, technology of processing.

В России для этих целей в свое время синтезирована и успешно применяется НПС Пиропласт-2, получаемая на базе фракций C_8-C_9 (пределы кипения 130–190 °С) продуктов пиролиза смеси бензина и газа [1].

Вместе с тем, в связи с утяжелением пиролизуемого сырья и использованием в производстве бензола гидродеалкилированием стиролсодержащей фракции, выкипающей до 150 °С, в качестве побочного продукта пиролиза выделяется фракция с пределами кипения 150–190 °С

(фракция C_9). НПС, полученная из такой фракции в условиях синтеза Пиропласта-2, по цвету и другим показателям качества уступает смоле, полученной из фракции C_8-C_9 (табл. 1).

Ниже приводятся результаты исследования по изысканию условий синтеза на базе фракции C_9 продуктов пиролиза бензина новой нефтеполимерной смолы улучшенного цвета, полностью отвечающей требованиям для использования в производстве лакокрасочных материалов.

Таблица 1

Показатели качества НПС, полученных из различных фракций продуктов пиролиза в условиях синтеза Пиропласта-2*

Показатели	Из фр. C_8-C_9	Из фр. C_9
Температура размягчения, °С	85	87
Цвет, мг $I_2/100 \text{ см}^3$	26	80
Молекулярная масса (криоск.)	614	669
Йодное число, г $I_2/100 \text{ г}$	59,1	46,2
Совместимость с окислированным растительным маслом	Полная	Полная
Внешний вид пленки (55 % раствора НПС в уайт-спирите)	Прозрачная	Прозрачная
Время высыхания пленки до степени 3 при (20±2) °С, ч	15	17
Выход НПС, % мас.	44,3	43,8

* Температура полимеризации 250 °С, давление до 1,2 МПа, продолжительность 6 ч.

Таблица 2

Углеводородный состав и физико-химические показатели фракций C₈-C₉ и C₉ продуктов пиролиза бензина

Углеводороды и показатели	Фр. C ₈ -C ₉	Фр. C ₉
Бензол	0,6	0,2
Толуол	1,6	0,5
Этилбензол	3,3	2,3
<i>m</i> -, <i>n</i> -Ксилолы	10,8	4,4
<i>o</i> -Ксилол	5,8	3,2
Стирол	16,3	6,6
Мезитилен	2,0	1,9
α -Метилстирол	7,5	5,5
Дициклопентадиен	14,0	20,6
Винилтолуолы	9,8	15,3
Индан	1,0	2,7
Инден	6,6	14,2
Неидентифицированные углеводороды	20,7	22,6
Всего	100,0	100,0
Плотность, кг/м ³	902	913
Молекулярная масса	114	118
Иодное число, г I ₂ /100 г	50,4	64,2
Фракционный состав, °C:		
н. к.	130	142
50 %	165	161
95 %	190	183

Как видно из приведенных в табл. 2 данных, фракция C₉ в сравнении с фракцией C₈-C₉ характеризуется более низким содержанием стирола и более высоким содержанием дициклопентадиена (ДЦПД) и индена при близком общем содержании непредельных углеводородов во фракциях.

Синтез НПС осуществлялся термической олигомеризацией фракции C₉ под давлением 0,8–1 МПа, обеспечивающем нахождение сырья в жидкой фазе с последующей отгонкой непрореагировавших углеводородов при атмосферном давлении и жидких олигомеров под вакуумом.

При синтезе НПС из фракции C₉ сохраняются те же закономерности, что и при синтезе НПС из фракции C₈-C₉. Однако цвет получаемой НПС составляет 80 мг I₂/100 см³, что находится на пределе требований к этому показателю лакокрасочной промышленности для использования в качестве заменителя растительных масел (не более 100 мг I₂/100 см³).

Поэтому исследовано влияние предварительной полимеризации фракции C₉ при пониженных температурах (130 °C) с последующей ее полимеризацией в оптимальных (250 °C) ус-

ловиях. При этом установлено (табл. 3), что такая ступенчатая полимеризация позволяет улучшить цвет НПС на 26 мг I₂/100 см³. Указанный эффект может быть объяснен вступлением в реакцию прежде всего ответственных за цвет углеводородов – циклопентадиена, метилциклопентадиена, этилиденнорборнена на стадии предварительной полимеризации, протекающей в мягких технологических режимах [2].

Практический интерес представляет возможность улучшения качества НПС и, прежде всего, цвета за счет использования в процессе отгонки жидких олигомеров из полимеризата вместо вакуума водяного пара.

Как видно из табл. 4, использование водяного пара, расход которого составляет 0,5–1 % на полимеризат, улучшает цвет НПС в сравнении со смолой, получаемой с использованием вакуума с 80 до 64 мг I₂/100 см³. При этом время разгонки полимеризата сокращается в 5–6 раз, что позволяет не только сократить расход энергоресурсов на этой стадии получения НПС, но и снизить общий цикл синтеза смолы и увеличить ее выработку.

Использование водяного пара не вызывает каких-либо существенных затруднений, поско-

льку стойких эмульсий воды с жидкими олиго- исходит в течение 2–3 ч, при этом содержание мерами не образуется. Отстаивание воды про- ее в отгоне не превышает 1,5 %.

Таблица 3

Влияние предварительной полимеризации на выход и качество НПС

Режим полимеризации		Выход НПС, %	Температура размягчения, °С	Цвет НПС, мг I ₂ /100 см ³
температура, °С	время, ч			
250	6	43,8	87	20
130	0,5	43,6	89	14
250	5,5			
130	1	43,2	86	15
250	5			
130	2	42,0	87	16
250	4			

С использованием приведенных выше технологических приемов синтезирована НПС, показатели качества которой приведены ниже:

Температура размягчения, °С	88
Цвет, мг I ₂ /100 см ³	14
Молекулярная масса	670
Йодное число, г I ₂ /100 г	40,3
Совместимость с окислированным растительным маслом	Полная
Внешний вид пленки (55 % раствора НПС в уайт-спирите)	Прозрачная
Время высыхания пленки до степени 3 при (20±2) °С, ч	14
Выход НПС, % мас.	43,6

Таблица 4

Показатели качества НПС из фракции С₉ продуктов пиролиза бензина при разных условиях отгонки жидких олигомеров

Показатели	При разгонке под вакуумом	При разгонке с водяным паром
Температура отгонки, °С	420 *	250 **
Остаточное давление, мм рт. ст.	1	–
Продолжительность, ч	3	0,5

* В парах;

** В кубе.

Таблица 5

Показатели качества НПС из фракции С₉ продуктов пиролиза бензина при разных условиях отгонки жидких олигомеров

Температура размягчения, °С	84	86
Цвет НПС мг I ₂ /100 см ³	20	18
Совместимость НПС с окислированным растительным маслом	Полная	Полная
Внешний вид пленки	Прозрачная	Прозрачная
Молекулярная масса	664	666
Йодное число, г I ₂ /100 г	48,2	46,3
Выход НПС, % мас.	43,7	43,6

* В парах;

** В кубе.

Из приведенных данных видно, что полученная таким образом из фракции C_9 продуктов пиролиза бензина нефтеполимерная смола по цвету значительно превосходит НПС, полученную обычной термической полимеризацией (см. табл. 1) и по качеству близка к смоле из фракции C_8-C_9 продуктов пиролиза смеси бензина и газа. Такая смола полностью отвечает требованиям к заменителю растительных масел и может успешно использоваться в производстве высококачественных лакокрасочных материалов.

Как показывают исследования, нефтеполимерные смолы на базе фракции C_9 продуктов пиролиза могут быть также успешно использованы в полимерных композициях для клеев, антикоррозионных покрытий и герметиков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Думский, Ю. В. Лакокрасочные материалы и их применение / Ю. В. Думский, З. С. Цахилов, Г. Ф. Чередникова, А. А. Глуз. – 1993. – № 5. – С. 11–12.
2. Думский, Ю. В. Нефтеполимерные смолы / Ю. В. Думский. – М. : Химия, 1988. – 168 с.

УДК 536.242:532.13

В. В. Шишлянников, Д. А. Павлов, А. А. Каликин

ТЕПЛООБМЕН В ТРУБЧАТЫХ РЕАКТОРАХ ИДЕАЛЬНОГО ВЫТЕСНЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

Рассматривается сопряженная задача теплообмена в круглой трубе реактора идеального вытеснения с постоянной по сечению скоростью течения вязкой жидкости. Получены формулы для расчета температуры жидкости и стенки.

Ключевые слова: реактор, идеальное вытеснение, сопряженный, теплообмен, вязкая жидкость.

V. V. Shishljannikov, D. A. Pavlov, A. A. Kalikin

HEAT TRANSFER IN A TUBULAR PLUG-FLOW REACTOR

Volgograd State Technical University

The paper analyzes the adjoint problem of heat transfer in a circular pipe of plug-flow reactor with sustained on profile the flow velocity of treacle. The formula in valuation the temperature of liquid and wall are derived.

Keywords: reactor, plug-flow, adjoint, heat transfer, treacle.

В трубчатых реакторах идеального вытеснения каждое сечение потока движется строго параллельно самому себе, не смешиваясь с соседними сечениями потока.

Рассмотрим сопряженную задачу теплообмена в реакционной трубе при течении вязкой жидкости с постоянной по сечению скоростью u_0 . При больших давлениях и температурах трубчатый реактор имеет толстые стенки, поэтому теплопроводностью и толщиной стенки пренебрегать нельзя, как было показано в работах [1–2].

Задача сопряженного теплообмена при течении вязкого расплава в круглой толстостенной трубе решается с реологическим уравнением состояния среды – законом Ньютона–Петрова.

Примем следующие допущения: ламинарное течение несжимаемого расплава полимера и процесс теплообмена стационарны; профиль скоростей постоянный по сечению ($u_0 = \text{const}$); температура расплава на входе в трубу реактора постоянна; тепловой поток вдоль радиуса больше, чем вдоль трубы; теплофизические свойства среды не зависят от температуры. С учетом этих допущений уравнение энергии запишется в виде:

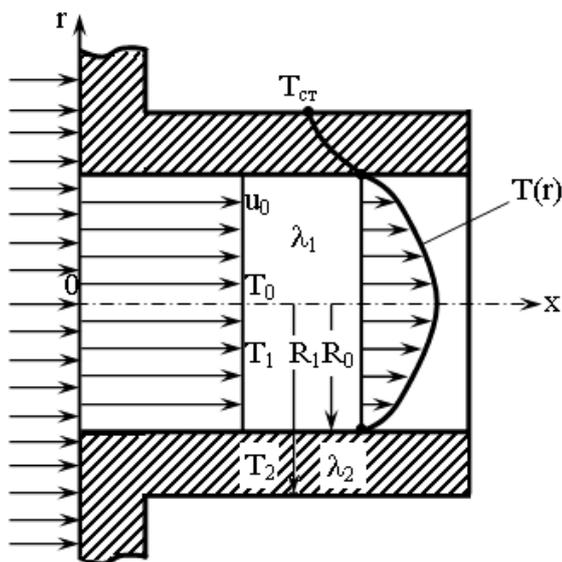


Рис. 1. Картина течения и теплообмена

$$u_0 \frac{\partial T_1}{\partial x} = a \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$0 \leq r \leq R_0, \quad 0 \leq x \leq \infty,$$

где u_0 – скорость течения; T_1 – температура в жидкости; x, r – координаты; R_0 – радиус трубы; $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$ – температуропроводность; λ – теплопроводность; ρ – плотность; C_p – теплоемкость среды.

Граничные условия для жидкости:

$$T_1 = T_2 \quad \text{при } r = R_0, \quad x = x, \quad (2)$$

$$T_1 = T_0 \quad \text{при } r = r, \quad x = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0, \quad x = x, \quad (4)$$

Температурное поле в стенке

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) = 0, \quad (5)$$

$$R_0 \leq r \leq R_1$$

где R_1 – наружный радиус трубы; T_2 – температура в стенке.

Граничные условия

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} = \bar{\lambda} \frac{\partial T_2}{\partial r} \quad \text{при } r = R_0, \quad x = x \quad (6)$$

$$T_2(r, x) = T_c \quad (7)$$

где $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$, λ_2 – теплопроводность стенки, λ_1 – теплопроводность жидкости, T_c – температура стенки снаружи.

В безразмерных координатах вышеперечисленные уравнения запишутся

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial X} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta \frac{\partial \theta_1}{\partial \eta} \right), \quad \begin{array}{l} 0 < \eta < 1 \\ 0 < X < \infty \end{array} \quad (8)$$

$$\theta_1(1, X) = \theta_2(1, X), \quad \theta_1(\eta, 0) = 1,$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \eta}(\theta, X) = 0. \quad (9)$$

$$\frac{1}{\eta} \frac{\partial \theta_2}{\partial \eta} \left(\eta \frac{\partial \theta_2}{\partial \eta} \right) = 0, \quad 1 < \eta < \delta \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_1}{\partial \eta}(\eta, X) \right|_{\eta=1} = \bar{\lambda} \left. \frac{\partial \theta_2}{\partial \eta}(\eta, X) \right|_{\eta=1},$$

$$\theta_2(\delta, X) = 0, \quad \eta = \delta, \quad (11)$$

где $\theta_1 = \frac{T_1 - T_c}{T_0 - T_c}$; $\theta_2 = \frac{T_2 - T_c}{T_0 - T_c}$; $\eta = \frac{r}{r_0}$; $X = \frac{4}{Pe} \frac{x}{d}$;

$Pe = \frac{u_0 d}{a}$; $\delta = \frac{R_1}{R_0}$; d – диаметр трубы.

Представим решение уравнения (8) в виде произведения двух функций

$$\theta_1(X, \eta) = \theta_1(X) \cdot \theta_1(\eta). \quad (12)$$

Подставляя (12) в уравнение (8), получим:

$$\theta_1(X) \cdot \theta_1''(\eta) + \frac{1}{\eta} \cdot \theta_1(X) \cdot \theta_1'(\eta) = \theta_1(\eta) \cdot \theta_1'(X). \quad (13)$$

Разделяя переменные, имеем:

$$\frac{\theta_1'(X)}{\theta_1(X)} = \frac{\theta_1''(\eta)}{\theta_1(\eta)} + \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\theta_1'(\eta)}{\theta_1(\eta)} = -\varepsilon^2. \quad (14)$$

Итак, есть два обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$\frac{d\theta_1(X)}{dX} = -\varepsilon^2 \cdot \theta_1(X). \quad (15)$$

$$\frac{d^2\theta_1(\eta)}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{d\theta_1(\eta)}{d\eta} + \varepsilon^2 \theta_1(\eta) = 0, \quad (16)$$

$$\frac{d}{d\eta} \left(\frac{1}{\eta} \frac{d\theta_1(\eta)}{d\eta} \right) + \varepsilon^2 \theta_1(\eta) = 0, \quad (16a)$$

Опуская промежуточные выкладки решения уравнений (8) и (10) с граничными условиями (9) и (11), получим формулы для θ_1 и θ_2 :

$$\theta_1 = A(\varepsilon) \cdot [I_0(\varepsilon\eta) - I_0(\varepsilon)] \cdot \exp(-\varepsilon^2 x) + \left\{ \frac{1}{\lambda} A(\varepsilon) \cdot [\varepsilon I_1(\varepsilon) \cdot \exp(-\varepsilon^2 x)] \right\} \cdot \ln \delta \quad (17)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{\lambda} A(\varepsilon) \cdot [-\varepsilon I_1(\varepsilon) \cdot \exp(-\varepsilon^2 x)] \cdot (\ln \eta - \ln \delta). \quad (18)$$

Для начального сечения должно выполняться равенство

$$1 = \sum_{i=1}^{i=\infty} A(\varepsilon_n) \cdot I_0(\varepsilon_n \eta). \quad (19)$$

Из этого уравнения определяются постоянные коэффициенты ряда:

$$A(\varepsilon_i) = \frac{2}{\varepsilon_n \cdot I_1(\varepsilon_n)}. \quad (20)$$

Таким образом, получим окончательные выражения для температуры в жидкости и стенке:

$$\theta_1(\rho, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_n I_1(\varepsilon_n)} [I_0(\varepsilon_n \eta) - I_0(\varepsilon_n)] \exp(-\varepsilon_n^2 x) + \left\{ \frac{1}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} A(\varepsilon_n) [\varepsilon_n I_1(\varepsilon_n) \exp(-\varepsilon_n^2 x)] \right\} \cdot \ln \delta. \quad (21)$$

$$\theta_1(\eta, x) = \frac{1}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_n I_1(\varepsilon_n)} [\varepsilon_n I_1(\varepsilon_n) \exp(-\varepsilon_n^2 x)] \times (\ln \delta - \ln \eta). \quad (22)$$

где ε_n – последовательные корни функции Бес-

селя первого рода и нулевого порядка I_0 , которые имеют следующие численные значения:

n	1	2	3	4	5	6
ε_n	2,4048	5,5201	8,6537	11,7915	14,9309	18,0711

I_1 – функция Бесселя первого рода и первого порядка.

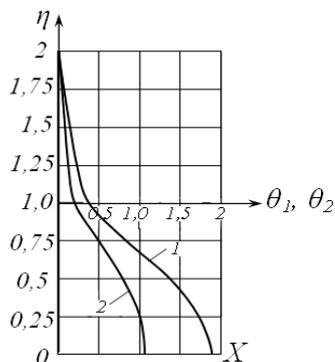


Рис. 2. Изменение температуры в жидкости и стенке реакторной трубы: 1 – $X = 0,01$; 2 – $X = 0,1$

По формулам (21) и (22) были рассчитаны температурные поля в жидкости и стенке трубчатого реактора.

На рис. 2 показана графическая интерпретация уравнений (21–22) для $\theta_1(\eta, x)$ и $\theta_2(\eta, x)$ при $X = 0,1$ и $0,01$, $\bar{\lambda} = 4$, $\delta = 2$, $n = 1$, $\varepsilon_n = 2,4048$.

Таким образом, получены формулы для расчета температуры в жидкости и стенке трубы реактора идеального вытеснения с постоянной скоростью течения жидкости на входе u_0 . Зная распределение температуры в жидкости, легко определить и другие характеристики теплообмена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лыков, А. В. Теплообмен: Справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1971.
2. Тябин, Н. В. Теплообмен при течении расплавов полимеров в круглом канале / Н. В. Тябин, В. В. Шишлянников [и др.] // Теплообмен, советские исследования, 1974. – М. : Наука, 1975.

УДК 532.54'135

А. А. Шагарова, А. П. Шапошников, Л. Е. Тарасенко

РЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ СРЕД В ШНЕКОВЫХ МАШИНАХ ПРИ НАЛИЧИИ ТОНКОГО ПРИСТЕННОГО СЛОЯ

Волгоградский государственный технический университет

Рассмотрены вопросы, связанные с реологическим поведением высоковязких сред в каналах шнековых машин при наличии тонкого пристенного слоя. Разработана методика экспериментальных исследований реологических характеристик перерабатываемых сред в шнековых машинах с учетом пристенного скольжения. В результате обработки данных реометрических исследований получены функциональные зависимости для практических расчетов характеристик перерабатываемых сред.

Ключевые слова: реология, неньютоновские среды, шнековые машины, пристенный слой, ротационный вискозиметр.

A. A. Shagorova, A. P. Shaposhnikov, L. E. Tarasenko

RHEOMETRIC STUDIES OF HIGH-VISCOSITY FLUID FLOW CHARACTERISTICS IN THE SCHNECK MACHINES WITH A THIN WALL LAYER

Volgograd State Technical University

The paper deals with the rheological behavior of high-viscosity media in the schneck machines channels with a thin wall layer. The experimental installation for investigation high-viscosity media rheological characteristics in the schneck machines taking into account the slip near the wall is developed. As a result of rheometric studies data processings the functional dependences for practical processed media design characteristics are obtained.

Keywords: rheology, high-viscosity media, schneck machines, wall layer, rotational viscometer.

Информация о характеристиках течения высоковязких сред в каналах шнековых машин при наличии тонкого пристенного слоя совершенно необходима при анализе и расчете параметров технологического процесса. При постановке гидродинамических задач с учетом «пристенного скольжения» необходимо при форму-

лировке граничных условий задавать «закон скольжения» – функциональную зависимость описывающую взаимодействие жидкости с твердой поверхностью.

В настоящее время существует два подхода к учету эффекта проскальзывания материала [1]. Первый подход заключается в задании в явном

виде скорости скольжения на стенке, которая в общем случае является функцией напряженного состояния, геометрических размеров и температуры. Причем указанная зависимость скорости скольжения от перечисленных факторов находится из вискозиметрических измерений. Особенностью таких исследований является необходимость применения измерительных узлов реометров с различными геометрическими размерами.

Второй подход предполагает существование для конкретного материала некоторого «порогового» напряжения сдвига на стенке, при достижении которого возникает скольжение. Первый подход как показывают реологические исследования, по-видимому, наиболее приемлем для материалов, эффект проскальзывания у которых обусловлен наличием тонких пристеночных слоев маловязкой жидкости, второй – для высоковязких расплавов полимеров [2–3].

Геометрия шнековой машины очень похожа на геометрию коаксиальных цилиндров. Отличие шнековой машины состоит в наличии лопастей в виде винтовой нарезки на сердечнике шнека [4].

Цель работы – изучение реологических характеристик высоковязкой жидкости и определения коэффициента скольжения на ротационном вискозиметре, как наиболее полно отражающем реальную картину течения в канале шнековой машины.

Для получения математических зависимостей, на основании которых производится обработка опытных данных, разработана математическая модель вискозиметра, состоящего из коаксиальных цилиндров, из которых внутренний цилиндр вращается с заданной угловой скоростью ω_0 .

Уравнение движения [1]:

$$\frac{d}{dr}(\tau_{r\varphi}) + 2 \frac{\tau_{r\varphi}}{r} = 0 \quad (1)$$

Реологическое уравнение:

$$\tau_{r\varphi} = \eta_0 \cdot r \frac{d\omega}{dr} \quad (2)$$

Граничные условия:

$$\omega_{(r=kR)} = -\omega_0 + \frac{U_s}{k \cdot R} \quad (3)$$

$$\omega_{(r=R)} = 0$$

где r – радиальная координата, м; $\tau_{r\varphi}$ – компонента касательного напряжения, Па; ω – текущая угловая скорость, с^{-1} ; R – радиус наружно-

го цилиндра, м; k – отношение радиусов внутреннего цилиндра к наружному.

Полагаем, что внутренний цилиндр имеет покрытие, которое обеспечивает «пристенное скольжение» со скоростью U_s , причем зависимость между скоростью скольжения и касательным напряжением на этой поверхности описывается выражением $U_s = \beta_s \cdot \tau_w$, где β_s – коэффициент скольжения [5].

Решая уравнение (1) найдем распределение касательных напряжений в зазоре между цилиндрами:

$$\tau_{r\varphi} = \frac{C_1}{r^2}, \quad (4)$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

Учитывая, что касательное напряжение на внутреннем цилиндре можно определить так же как:

$$\tau_{r\varphi(r=kR)} = \frac{M}{2\pi \cdot L(k \cdot R)^2}, \quad (5)$$

где M – крутящий момент, приложенный к внутреннему цилиндру, н·м; L – длина перекрытия цилиндров, м.

Для нахождения C_1 выведем следующую формулу:

$$C_1 = \frac{M}{2\pi \cdot L} \quad (6)$$

Подставив (2) в (4), получим дифференциальное уравнение описывающее распределение угловых скоростей в зазоре между цилиндрами:

$$\frac{d\omega}{dr} = \frac{C_1}{\eta_0 \cdot r^3} \quad (7)$$

Проинтегрировав (7) при граничных условиях (3), с учетом того, что скорость скольжения на стенке внутреннего цилиндра будет

$U_s = \beta_s \frac{C_1}{(k \cdot R)^2}$, найдем:

$$\Omega = \frac{1 - \frac{1}{\varepsilon^2}}{k_s + \frac{1}{k^2} - 1}, \quad (8)$$

где $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$ – безразмерная угловая скорость;

$\varepsilon = \frac{r}{R}$ – безразмерная радиальная координата;

$$k_s = \frac{2\beta_s \eta_0}{Rk^3}.$$

При этом выражение для C_1 принимает вид:

$$C_1 = \frac{\omega_0 R^2}{\frac{\beta_s}{Rk^3} + \frac{1}{2\eta_0} \left(\frac{1}{k^2} - 1 \right)}. \quad (9)$$

Сопоставив (5) и (9) получим формулу для расчета крутящего момента на внутреннем цилиндре:

$$M = \frac{4\pi\omega_0\eta_0LR^2}{\frac{2\eta_0\beta_s}{Rk^3} + \frac{1}{k^2} - 1}. \quad (10)$$

Используя консистентные переменные:

$$\tau_w = \frac{M}{2\pi L(kR)^2}; \quad \gamma_0 = \frac{2\omega_0}{1-k^2}$$

перепишем уравнение (10) в виде:

$$\tau_w = \frac{\eta_0\gamma}{1 + \frac{2\eta_0\beta_s}{(1-k^2)Rk^3}}. \quad (11)$$

Учитывая, что при отсутствии скольжения, т. е. при $\beta_s = 0$, $\tau_w = \eta_0 \gamma$ и уравнение (11) преобразуется к виду:

$$\tau_{ws} = \frac{\tau_w}{1 + \frac{2\eta_0\beta_s}{(1-k^2)Rk^3}}, \quad (12)$$

где τ_w , τ_{ws} – касательное напряжение на внутреннем цилиндре при отсутствии скольжения и при его наличии, соответственно.

Откуда найдем:

$$\beta_s = \frac{(1-k^2)R \cdot k^3}{2\eta_0} \left(\frac{\tau_w}{\tau_{ws}} - 1 \right) \quad (13)$$

Таким образом, определяя при одинаковых значениях среднего градиента скорости γ_0 значения τ_w и τ_{ws} можно найти коэффициент β_s , соответствующий τ_{ws} .

Экспериментальное изучение реологических характеристик проводилось на ротационном вискозиметре «Reotest RV» с измерительным узлом в виде коаксиальных цилиндров. Измерительный узел был помещен в систему термостатирования, соединенную с внешним термостатом, позволяющим поддерживать заданный температурный режим измерения. В опытах использовались два внутренних цилиндра, один из которых имел тонкопленочное фторопластовое покрытие. Диаметр цилиндров был выбран таким образом, чтобы он обеспечивал самый минимальный зазор между ними.

Методика проведения экспериментальных исследований:

1) устанавливаются измерительные цилиндры с требуемыми поверхностными характеристиками (без покрытия);

2) измерительный узел вискозиметра заполняется исследуемым моторным маслом (M10Г₂);

3) с помощью термостата нагревается измерительный узел с маслом до заданной минимальной температуры;

4) включается привод внутреннего цилиндра и при скоростях вращения, когда отклонения измерителя крутящего момента превышают 10 % от максимально возможных, проводятся замеры его значений;

5) при ступенчатом изменении скорости вращения, производятся измерения при той же температуре (показания прибора записываются при их полной стабилизации);

6) регулирование температуры измерительного узла производится термостатом, при стабилизации температурного режима проводится новая серия опытов согласно пп. 4–5 (показания фиксировались при температурах 80 °С, 90 °С и 96 °С);

7) аналогичные измерения проводятся при установке внутреннего измерительного цилиндра с фторопластовым покрытием, выполняются пп. 2–6.

В результате проведения экспериментов для каждого значения температуры получают два набора данных $\tau_{wi} = f(\gamma_i)$ и $\tau_{wsi} = f(\gamma_i)$.

Обработка опытных данных выполняется следующим образом:

1) по экспериментальным данным, полученным на измерительных узлах со скольжением и без него строятся для каждой температуры две кривые течения;

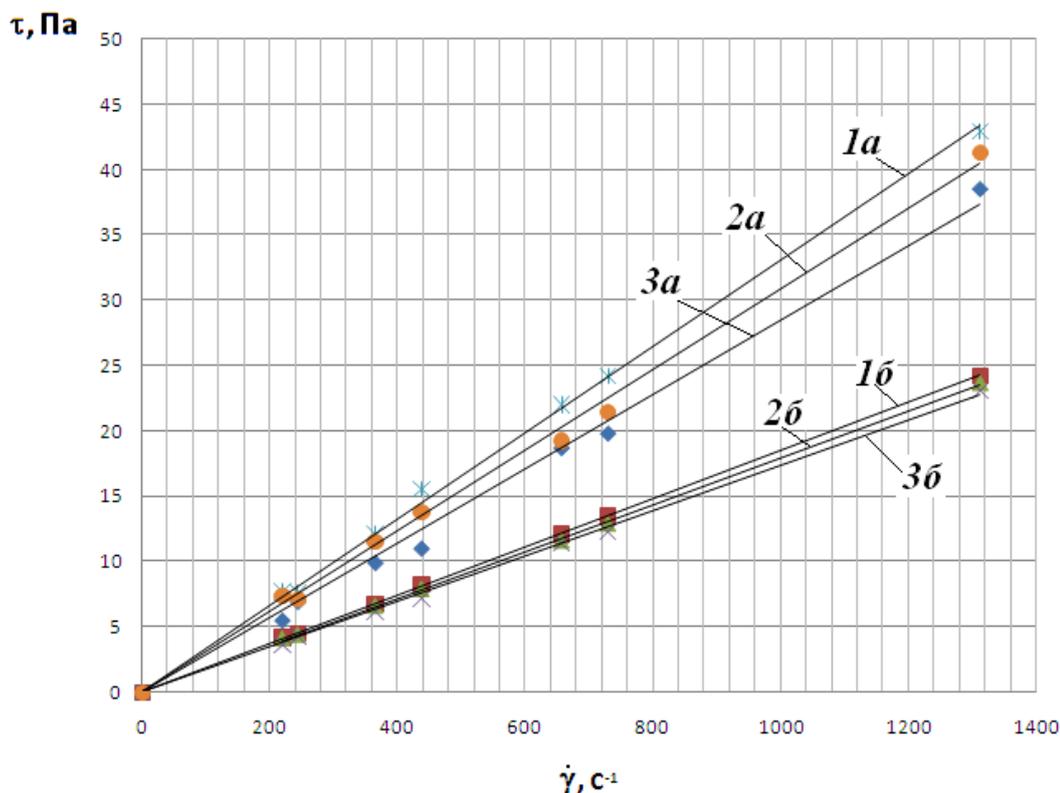
2) по кривой течения для измерительного узла без скольжения по методу наименьших квадратов (МНК) рассчитывается значение ньютоновской вязкости моторного масла;

3) в результате обработки полученных значений ньютоновской вязкости по МНК определяют параметры ее функциональной зависимости от температуры;

4) по парным кривым течения при одинаковых значениях средней скорости сдвига с помощью МНК по формуле (13) находят значения коэффициента скольжения β_s для каждой из температур;

5) в результате обработки полученных значений коэффициента скольжения по МНК находят параметры его функциональной зависимости от температуры.

Результаты вискозиметрических исследований представлены на рисунке.



Кривые течения моторного масла:
a – без скольжения; *б* – со скольжением; 1 – $t = 80$ °C; 2 – $t = 90$ °C; 3 – $t = 96$ °C

Обработка кривых течения по разработанной методике позволила найти значения вязкости масла η_0 и коэффициента скольжения β_s при различных температурах.

Вязкость масла, как и следовало, ожидать, с ростом температуры уменьшается. Аппроксимирующая зависимость, найденная с помощью метода наименьших квадратов представлена в следующем виде:

$$\eta_0 = 0,0575 \cdot \exp[-0,0091(t - 20)]. \quad (14)$$

Значение коэффициента скольжения с ростом температуры также снижается. Аппроксимирующая зависимость для него имеет вид:

$$\beta_s = 0,0113 \cdot \exp[-0,034(t - 20)]. \quad (15)$$

Полученные в результате обработки реометрических исследований функциональные зависимости (14) и (15) могут быть использова-

ны для практических расчетов шнековых машин при наличии смазочного слоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Янков, В. И. Процессы переработки волокнообразующих полимеров (методы расчета) / В. И. Янков, В. П. Первадчук, В. И. Боярченко. – М. : Химия, 1989. – 320 с.
2. Мейз, Дж. Теория и задачи механики сплошных сред / Дж. Мейз ; пер. с англ. под ред. М. Э. Эглит. – М. : Мир, 1974. – 318 с.
3. Хан, Ч. Д. Реология в процессах переработки полимеров / Ч. Д. Хан ; пер. с англ. под ред. Г. В. Виноградова и М. Л. Фридмана. – М. : Химия, 1979. – 368 с.
4. Раувендааль, К. Экструзия полимеров / пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина. – СПб. : Профессия, 2008. – 768 с.
5. Ящук, В. М. Определение параметров пористого проницаемого покрытия рабочих органов червячных пресов / В. М. Ящук, А. А. Шагарова, Э. И. Уютова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 1997. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»). – С. 175–177.

УДК 66.067

С. Б. Воротнева, А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Д. С. Мурзенков

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ РУЛОННЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МОДУЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

Разработан новый метод процесса фильтрации, основанный на проведении фильтрации не поперек поверхности фильтровального материала, а вдоль нее, по каналам, образованным ворсом между слоями фильтрующего материала в рулоне. Разработаны новые конструкции фильтрующих модулей для очистки жидкостей или газов, позволяющие осуществлять фильтрацию вдоль поверхности фильтровального материала.

Ключевые слова: фильтрация, фильтрующий модуль, очистка жидкостей и газов, фильтровальный материал.

S. B. Vorotneva, A. B. Golovanchikov, N. A. Dulkina, D. S. Murzenkov

PERSPECTIVE DESIGNS OF ROLL-FED FILTRATING MODULES

Volgograd State Technical University

New method of the filtering process is based on carrying filtering is not across the surface of the filter material, and along it, through the channels formed between the pile layers of filter material in roll was developed. New designs of filtrating modules for purification of liquids or gases, allowing carrying out filtering along the surface of the filter material were developed.

Keywords: filtering, filtrating module, purification of liquids and gases, filter material.

Фильтрация неоднородных сред часто проводится с помощью различных фильтровальных материалов. Среди них в настоящее время большое распространение получили рулонные фильтрующие элементы (картриджи). С точки зрения оптимального проектирования, модернизации и расширения функциональных возможностей, фильтрующие модули такого типа имеют достаточно высокий ресурс работы.

Однако в таких устройствах фильтрация происходит поперек фильтрующего материала, в результате чего происходит постепенное закупоривание фильтровальной поверхности. Впоследствии этот факт оказывает влияние на значительные затраты времени при регенерации фильтровального материала, что снижает эффективность работы фильтра.

Целью работы является разработка конструкций рулонных фильтрующих модулей, обеспечивающих процесс фильтрации вдоль поверхности фильтровального материала:

- с регулированием числа слоев фильтрующего материала;
- с регулированием размеров сечения фильтрующих каналов;
- с регулирование производительности по фильтрату.

Особенность этих конструкций заключается в том, что процесс фильтрации происходит не поперек фильтровального материала, а вдоль его боковых поверхностей. Это способствует улавливанию частиц поверхностью слоев фильтровального материала, что облегчает их удаление при регенерации, уменьшает само время регенерации и увеличивает производительность процесса фильтрации жидкости или газа.

На рис. 1 представлена новая конструкция фильтрующего модуля рулонного типа [1], позволяющая регулировать число слоев намотки фильтрующего материала. В отличие от известных фильтрующих модулей [2, 3] в этой конструкции поверхность фильтрующего материала 3 имеет ворс 4, а уплотнительные крышки 5 равномерно перфорированы.

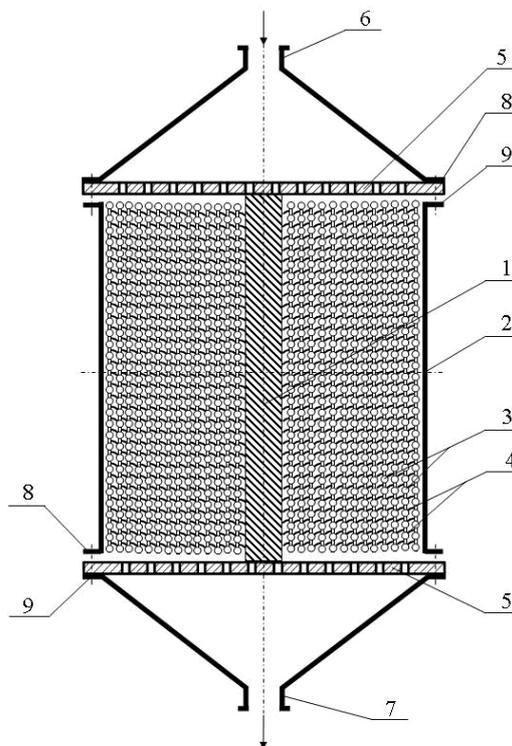


Рис. 1. Фильтрующий модуль с регулируемым числом слоев фильтрующего материала:
 1 – стержень; 2 – наружный каркас; 3 – фильтрующий материал; 4 – ворс; 5 – уплотнительные крышки; 6, 7 – патрубки входа и выхода; 8, 9 – фланцы

Сборку этого фильтрующего модуля осуществляют следующим образом. Фильтрующий материал 3 плотно наматывают слоями на стержень 1 с образованием рулона, который вставляют в наружный каркас 2. Сверху и снизу наружный каркас 2 с рулоном слоев фильтрующего материала 3 закрывают уплотнительными крышками 5 с фланцами 8 и 9 и герметично уплотняют их с помощью крепежных деталей (болты, гайки, прокладки и шайбы).

Принцип работы предлагаемого фильтрующего модуля заключается в следующем. По патрубку 6 подают исходную жидкость или газ, которые равномерно распределяются при течении вдоль поверхности верхней перфорированной крышки 5 и через отверстия в этой крышке фильтруются вдоль слоев фильтрующего материала 3. Частицы дисперсной фазы задерживаются ворсом 4 между слоями фильтрующего материала 3, а очищенные от дисперсной фазы жидкость или газ через отверстия нижней перфорированной уплотнительной крышки 5 по патрубку 7 отводят наружу [1].

После проведения фильтрования крепежные детали отсоединяются, снимаются уплотнительные крышки 5 с наружного каркаса 2 с фланцами 8, 9, вынимают стержень 1 с рулоном фильтрующего материала 3, раскручивают слои фильтрующего материала 3 с рулона, встряхивают, промывают или продувают поверхность фильтрующего материала и в режиме регенерации удаляют уловленные частицы из ворса 4.

Качество очистки в этом фильтрующем модуле можно регулировать, меняя число наматываемых слоев фильтрующего материала 3 в рулон на стержень 1. Так, при увеличении числа слоев фильтрующего материала 3 в рулоне они плотнее прижимаются друг к другу, уменьшая размер каналов между ворсинками ворса 4, что способствует улавливанию более мелких частиц дисперсной фазы. И, наоборот, при уменьшении числа слоев фильтрующего материала 3 в рулоне размер каналов между ворсинками ворса 4 увеличивается, что уменьшает гидравлическое сопротивление, увеличивает производительность, но снижает вероятность улавливания мелких частиц дисперсной фазы [1].

Стоит отметить, что изменение числа слоев намотки фильтрующего материала в этой конструкции требует периодической разборки и сборки фильтрующего модуля. То есть в предлагаемом фильтре невозможно повышение качества очистки жидкостей или газов непосредственно в режиме фильтрования.

В целях усовершенствования этой конструкции разработаны фильтрующие модули [4, 5], позволяющие регулировать размеры сечения фильтрующих каналов в процессе фильтрования.

В патенте [4] предложен рулонный фильтрующий модуль (рис. 2), особенностью которого является выполнение стержня в виде полой трубки из упругого материала, в боковой поверхности которой равномерно расположены четыре продольные прорезы (рис. 2, б). Это позволяет упруго деформировать дугообразные полосы трубки, образуемые между продольными разрезами в радиальном направлении и уплотнять слои фильтрующего материала.

Если уменьшить число продольных прорезей до трех, то это приведет к неравномерности радиального деформирования дугообразных полос трубки, соответственно к неравномерности уплотнения слоев фильтрующего материала и возможному проскоку тонкодисперсных частиц в местах недостаточного уплотнения слоев фильтрующего материала. А увеличение числа продольных прорезей свыше четырех усложнит их изготовление, но не будет способствовать повышению качества очистки в процессе фильтрования. Кроме того, из-за уменьшения сечения упругих полос, образующихся при увеличении их числа, часть упругой деформации может перейти в необратимую, что не позволит регулировать уплотнение слоев фильтрующего материала в режиме фильтрования.

Также эта конструкция фильтрующего модуля отличается тем, что в нижней уплотнительной крышке установлен регулировочный болт, конец которого имеет конусообразную форму и упирается в нижнюю часть трубки (рис. 2, а). Это позволяет передавать осевое усилие от вращения регулировочного болта на конус, а от него радиальное усилие на дугообразные полосы, которые упруго раздвигаются и уплотняют слои фильтрующего материала, уменьшая сечение фильтрующих каналов между слоями, что повышает степень улавливания тонкодисперсных частиц.

Принцип работы, сборка и разборка этого фильтрующего модуля осуществляются аналогично конструкции, рассмотренной ранее [1]. Но необходимо отметить, что для увеличения качества очистки жидкости или газа от тонкодисперсных частиц закручивают регулировочный болт 13. Конец 14 регулировочного болта 13, имеющий конусообразную форму, при этом, поднимаясь вверх вдоль оси, разводит в радиальном направлении дугообразные полосы 12,

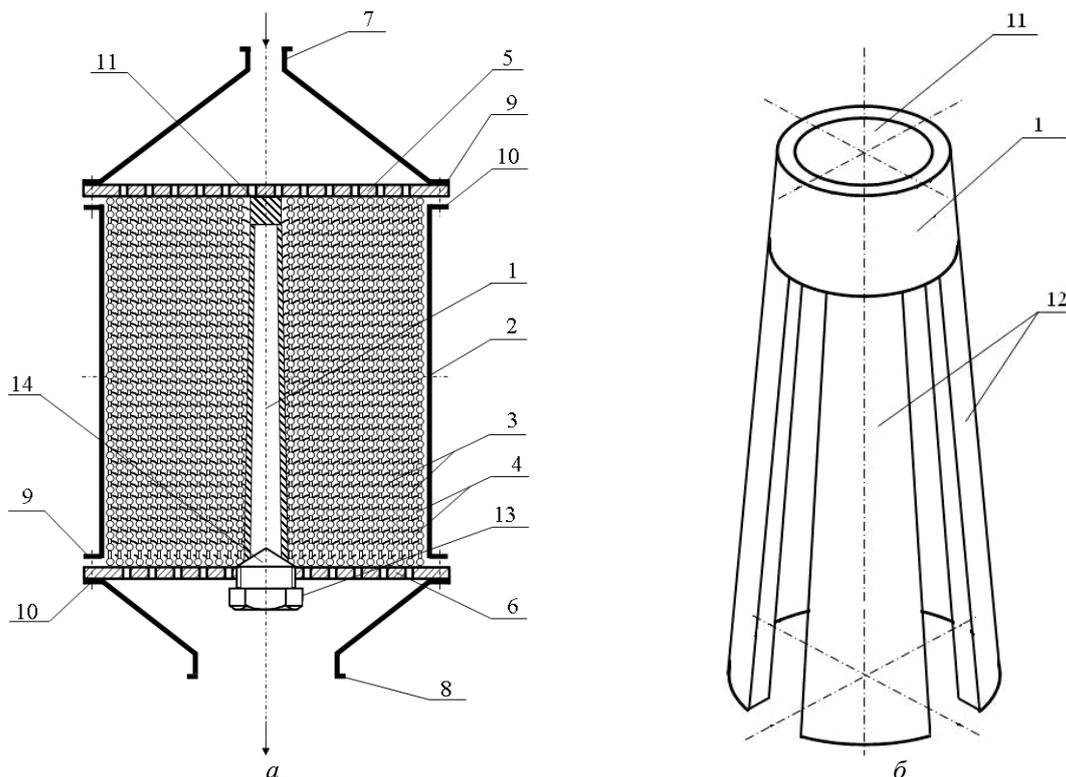


Рис. 2. Схема фильтрующего модуля рулонного типа [4]:

a – общий вид в разрезе; *б* – трубка с прорезями; 1 – стержень; 2 – наружный каркас; 3 – фильтрующий материал; 4 – ворс; 5, 6 – уплотнительные крышки; 7, 8 – патрубki; 9, 10 – фланцы; 11 – пробка; 12 – дугообразные полосы; 13 – регулировочный болт; 14 – конусообразный конец болта

уплотняя слои фильтрующего материала 3 и уменьшая сечения фильтрующих каналов, в которых задерживаются тонкодисперсные частицы. А при откручивании регулировочного болта 13, он, опускаясь вниз, уменьшает радиальные усилия на дугообразные полосы 12, и они, являясь частью стержня 1, выполненного из упругого материала, возвращаются в первоначальное положение, при этом слои фильтрующего материала 3 разуплотняются, а сечение фильтрующих каналов между его слоями увеличивается. Это способствует снижению давления фильтрования и увеличению производительности. Изменяя таким образом положение регулировочного болта 13, можно обеспечивать необходимое качество очистки жидкостей и газов от тонкодисперсных частиц непосредственно в процессе фильтрования [4].

Для облегчения регулирования степени улавливания частиц или производительности в процессе фильтрования эта конструкция была усовершенствована. Новаторство нового фильтрующего модуля [5] заключается в том, что полая трубка выполнена герметичной из эластичного материала (например, резины) в виде надувной камеры и снабжена в нижней части патрубком (рис. 3).

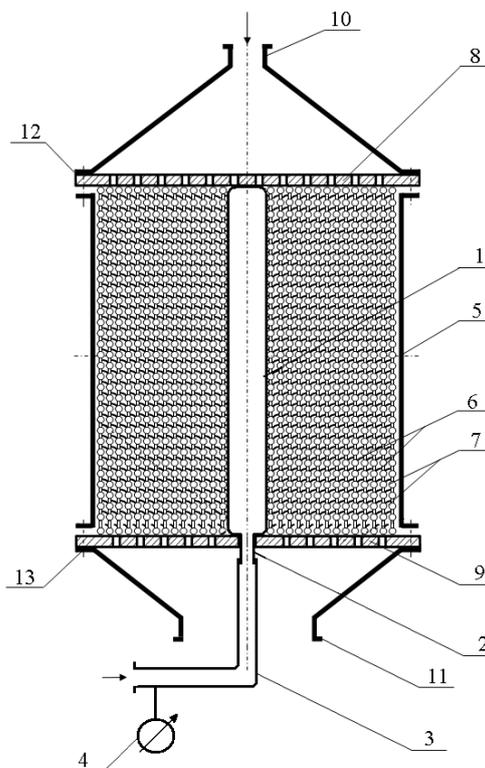


Рис. 3. Схема конструкции фильтрующего модуля рулонного типа с надувной резиновой камерой [5]:

1 – резиновая камера; 2, 10, 11 – патрубki; 3 – шланг; 4 – манометр; 5 – наружный каркас; 6 – фильтрующий материал; 7 – ворс; 8, 9 – уплотнительные крышки; 12, 13 – фланцы

Это позволяет, подавая под давлением жидкость (воду) или газ (воздух) через этот патрубок внутрь герметичной полой трубки, увеличивать ее диаметр, а значит плотнее прижимать слои фильтрующего материала друг к другу, уменьшая при этом размеры фильтрующих каналов между слоями, что приводит к повышению эффективности улавливания частиц тонких фракций.

При уменьшении давления жидкости или газа внутри герметичной полой трубки ее диаметр уменьшается, слои фильтрующего материала слабее прилегают друг к другу, что приводит к увеличению размеров фильтрующих каналов между ними и повышению производительности.

Снабжение патрубком герметичной полой трубки из эластичного материала в нижней части упрощает конструкцию и эксплуатацию фильтрующего модуля, так как соединение этого патрубка с подводящей трубой от насоса или компрессора довольно просто.

Таким образом, рассмотренные конструкции рулонных фильтрующих модулей для очистки жидкостей или газов позволяют проводить процесс фильтрования не поперек поверхности фильтрующего материала, а вдоль нее по каналам, образованным ворсом между слоями фильтрующего материала в рулоне и улавливать частицы дисперсной фазы не порами фильтрующего материала, а ворсинками ворса.

Разработанные фильтрующие модули позволяют:

- значительно облегчить и ускорить удаление уловленных частиц дисперсной фазы;
- уменьшить время регенерации фильтрующего материала;
- увеличить производительность процесса фильтрования;

– легко переназначивать с одной жидкости или газа на другие, обеспечивая необходимую производительность и давление фильтрования при высоком качестве очистки;

– повысить качество очистки жидкостей или газов от тонкодисперсных частиц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П. м. 124178 Российская Федерация, МПК В 01 D 29/00, В 01 D 46/00. Фильтрующий элемент для очистки жидкостей и газов / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Д. С. Мурзенков, М. А. Лыско, А. Д. Никитин, Т. А. Дулькикин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2012120940/05; заявл. 22.05.12; опубл. 20.01.13, Бюл. № 2. – 6 с.: ил.
2. Пат. № 2019291 Российская Федерация, МПК В 01 D 29/48, В 01 D 39/00. Фильтрующий элемент и фильтрующий материал для глубокой очистки воды / В. А. Васильев, В. Н. Клевцов, П. П. Кондратюк, Д. Ю. Пичуев, В. П. Сергеев, И. И. Теленков, М. В. Чаюн; заявитель и патентообладатель Теленков И. И. – № 92006240/26; заявл. 30.11.1992; опубл. 15.09.1994.
3. Пат. № 2112582 Российская Федерация, МПК В 01 D 29/48, В 01 D 39/00, D 01 F 9/22. Фильтрующий материал для очистки жидких и газообразных веществ, способ его получения, изделия из него и устройства с этим фильтрующим материалом / В. А. Васильев, В. Н. Клевцов, П. П. Кондратюк, В. Ф. Литвинов, В. П. Сергеев, И. И. Теленков, С. М. Ткачук, М. В. Чаюн; заявитель и патентообладатель Теленков И. И. – № 95103710/25; заявл. 14.03.1995; опубл. 10.06.1998.
4. П. м. 131638 Российская Федерация, МПК В 01 D 29/00, В 01 D 46/00. Фильтрующий элемент для очистки жидкостей и газов / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Дулькикина, Д. С. Мурзенков, Э. Б. Поляков, Б. А. Дулькикин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2013113012/05; заявл. 22.03.2013; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24. – 6 с.: ил.
5. Заявка на полезную модель. МПК В 01 D 29/00, В 01 D 46/00. Фильтрующий элемент для очистки жидкостей и газов / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Дулькикина, Д. С. Мурзенков, Б. А. Дулькикин, И. В. Парамонов.

УДК 621.92

С. Б. Воротнева, А. Б. Голованчиков, С. Р. Коломиец, Д. Р. Коломиец
АБРАЗИВНАЯ ГРАНУЛА С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ПЛАВУЧЕСТЬЮ
Волгоградский государственный технический университет

Описывается новый абразивный материал в виде гранулы, плотность которой меньше плотности рабочей жидкости. Гранула представляет собой композитный материал, основой которого является монтажная пена с равномерно распределенными по ее объему частицами абразивного материала.

Ключевые слова: монтажная пена, частицы абразивного материала, гранула, положительная плавучесть.

S. B. Vorotneva, A. B. Golovanchikov, S. R. Kolomic, D. R. Kolomic

ABRASIVE GRAIN WITH A BUOYANT
Volgograd State Technical University

The paper describes a new abrasive material in the form of grain, a density less than the hydraulic fluid. The grain is a composite material which is based self supporting foam with uniformly distributed throughout its volume abrasive particles.

Keywords: self supporting foam, abrasive particles, grain, buoyant.

Обычно абразивные материалы имеют плотность большую, чем плотность рабочей жидкости, участвующей в обработке очищаемой поверхности. Однако при обработке вращающихся валов или теплообменных поверхностей труб, котлов, аппаратов и реакторов в центробежном поле целесообразно применять абразивные гранулы, имеющие плотность меньшую, чем плотность рабочей жидкости, которой чаще всего являются вода или растворы и эмульсии на ее основе [1–4].

Целью работы является технология изготовления, а также физическое и математическое моделирование абразивных гранул, плотность которых меньше плотности рабочей жидкости.

Абразивные гранулы с положительной плавучестью изготавливают следующим образом. Массу абразивных частиц засыпают в емкость, затем в эту же емкость добавляют рассчитанную массу монтажной пены так, чтобы плотность композитного материала, образующегося после перемешивания и равномерного распределения частиц в объеме монтажной пены, была меньше плотности рабочей жидкости, для которой приготавливаются абразивные гранулы с положительной плавучестью.

На рис. 1 изображены схематично сферическая и цилиндрическая гранула, возможны и другие формы этих гранул. Но предпочтительнее гранула сферической формы, так как при одинаковой концентрации абразивных час-

тиц и одинаковой массе самих гранул поверхность сферы минимальна, а значит число абразивных частиц, находящихся на поверхности сферической гранулы, будет наибольшим.

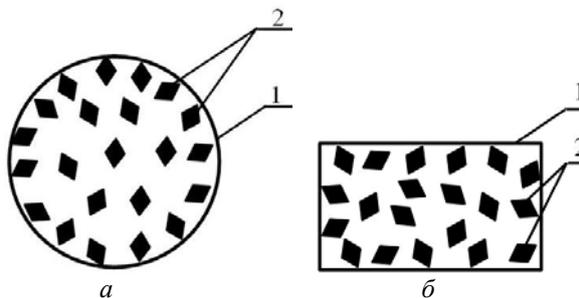


Рис. 1. Абразивные гранулы в разрезе: а – сферическая форма; б – цилиндрическая форма; 1 – монтажная пена; 2 – частицы абразивного материала

Кроме того, сферическая абразивная гранула динамически сбалансирована и в потоке рабочей жидкости будет вращаться с равномерным стиранием за счет трения всей поверхности. Гранулы других форм, отличных от сферической, будут в процессе эксплуатации неравномерно истираться и приближаться при этом к сферической форме.

Рассмотрим алгоритм расчета основных физических параметров абразивных гранул с положительной плавучестью. В таблице приведены исходные, справочные данные и основные расчетные параметры таких гранул, представленные в качестве примера.

Исходные и справочные данные и основные расчетные параметры для абразивных гранул с положительной плавучестью

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
<i>Исходные и справочные данные</i>			
Плотность рабочей жидкости (воды)	кг/м ³	ρ	1000
Плотность монтажной пены [5]	кг/м ³	ρ_n	50
Плотность абразивных частиц (песка) [6]	кг/м ³	ρ_a	2000
Эквивалентный диаметр абразивных частиц	м	d_a	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Эквивалентный диаметр гранулы	м	d_g	$1 \cdot 10^{-2}$
Диаметр очищаемой в центробежном поле поверхности	м	D_i	1
Окружная скорость рабочей жидкости около очищаемой поверхности	м/с	v_ϕ	10
<i>Основные расчетные параметры</i>			
Фактор разделения	–	f_p	20,4
Объем одной абразивной частицы	м ³	V_a	$6,55 \cdot 10^{-11}$
Масса одной абразивной частицы	кг	m_a	$1,31 \cdot 10^{-7}$
Предельная относительная массовая концентрация частиц в пене для гранул с нулевой плавучестью	кг А/кг П	$C_{ам}$	38

Расчеты проводились по ниже приведенным формулам.

Предельная относительная массовая концентрация частиц в пене для гранул с нулевой плавучестью (то есть концентрация, при которой плотность гранул равна плотности рабочей жидкости):

$$C_{am} = \frac{\rho_n - 1}{1 - \frac{\rho}{\rho_a}}$$

Относительная массовая концентрация частиц в пене для гранул с положительной плавучестью:

$$0 \leq C_a \leq C_{am}$$

Плотность абразивной гранулы:

$$\rho_z = \frac{(1 + C_a)}{\left(\frac{1}{\rho_n} + \frac{C_a}{\rho_a}\right)}$$

Объем абразивной гранулы сферической формы:

$$V_z = \frac{\pi \cdot d_z^3}{6}$$

Масса абразивной гранулы:

$$m_z = \rho_z \cdot V_z$$

Масса абразивной частицы:

$$m_a = \rho_a \cdot \frac{\pi \cdot d_a^3}{6}$$

Число абразивных частиц в каждой грануле:

$$n_a = m_z \cdot \left(\frac{C_a}{m_a \cdot (1 + C_a)} \right)$$

Центробежная сила $F_{ц}$, действующая на каждую гранулу:

$$F_{ц} = g \cdot V_z \cdot (\rho - \rho_z) \cdot f_p,$$

где $f_p = \frac{2 \cdot v_{\phi}^2}{D_t \cdot g}$ – фактор разделения.

На рис. 2 представлены графики зависимости плотности гранул ρ_z и числа абразивных частиц n_a в каждой грануле как функции относительной массовой концентрации частиц в пене. На рис. 3 представлены графики зависимости центробежной силы $F_{ц}$, действующей на каждую гранулу, и произведения центробежной силы на число частиц в грануле P_o .

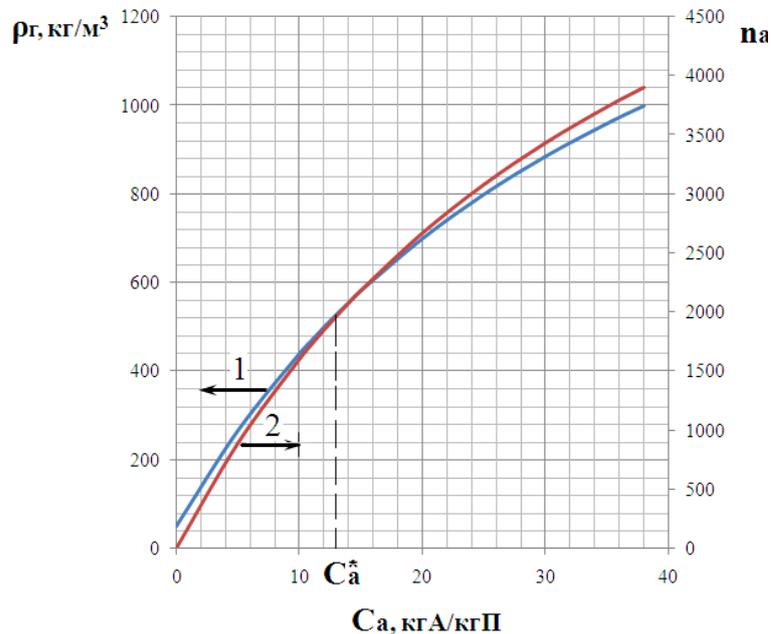


Рис. 2. Графики зависимости плотности гранул ρ_z (1) и числа абразивных частиц n_a (2) от относительной массовой концентрации частиц в пене C_a

Как видно из графиков (рис. 2 и 3) плотность гранул и число частиц в каждой грануле с уменьшением массы частиц по сравнению с массой пены монотонно уменьшается, а центробежная сила, прижимающая гранулы к очищаемой поверхности, наоборот возрастает. Можно пред-

положить, что интенсивность очистки поверхности в центробежном поле гранулами с положительной плавучестью зависит как от числа частиц взаимодействующих с очищаемой поверхностью, так и от центробежной силы, прижимающей каждую частицу к этой поверхности.

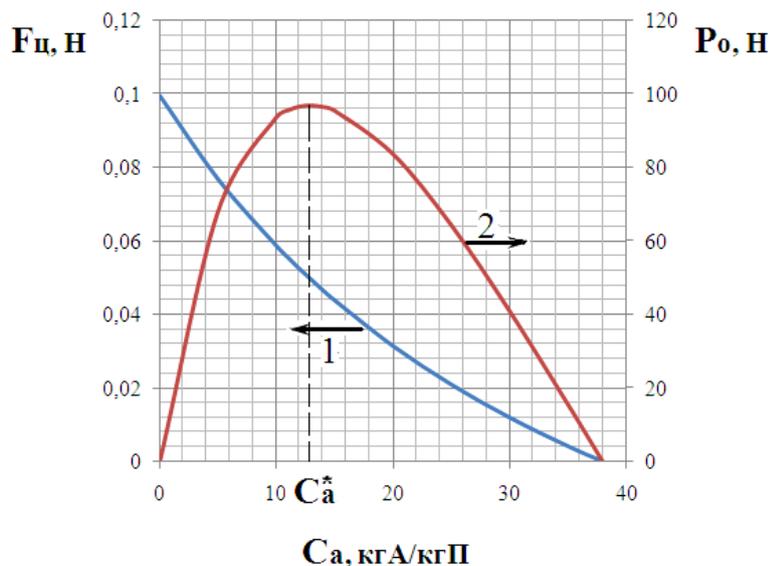


Рис. 3. Графики зависимости центробежной силы $F_{ц}$ (1) и произведения центробежной силы на число частиц в грануле P_o (2) от относительной массовой концентрации частиц в пене C_a

В результате можно считать произведение числа частиц в грануле и центробежной силы параметром оптимизации P_o . Его наибольшие значения (рис. 3) имеют место при относительной массовой концентрации, изменяющейся в пределе $C_a = 7 \div 17$ кг А/кг П, а максимальное $C_a^* = 13$ кг А/кг П.

Таким образом, при заданных исходных физических и геометрических параметрах абразивных частиц, монтажной пены и гранул центробежная сила, прижимающая гранулу к очищаемой поверхности, в $15 \div 25$ раз больше силы тяжести этой гранулы при числе абразивных частиц от 1500 до 2500 в каждой грануле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воротнева, С. Б. Перспективные конструкции тепло-массообменных аппаратов типа «труба в трубе» / С. Б. Воротнева, А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 5). – С. 25–28.
2. 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.

3. 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.

4. П. м. 114889 Российская Федерация, МПК В 08 В 9/00. 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». – № 2011146514/05; заявл. 16.11.11; опубл. 20.04.12.

5. Применение монтажной пены // Физические свойства монтажной пены [Электронный ресурс]. – [2013]. – Режим доступа: http://www.stroyberi.ru/advice/primenenie_montazhnoy_peny

6. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. чл.-кор. АН России П. Г. Романкова. – 12-е изд. стереотипное. – М. : Альянс, 2005. – 576 с.

УДК 66.02.001.57

А. Б. Голованчиков, Ю. В. Аристова, Н. А. Дулькина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА
МЕТОДОМ ДВУХ ИНДИКАТОРОВ

Волгоградский государственный технический университет

Известные методы исследования структуры потока базируются на снятии одной функции отклика на возмущение с последующим синтезом математической модели, что вносит существенные отклонения в расчетах реального процесса. В статье рассмотрен способ определения структуры потоков двумя различными по молекулярной диффузии индикаторами.

Ключевые слова: структура потоков, критерий Пекле, диффузия.

А. В. Golovanchikov, J. V. Aristova, N. A. Dul'kina

EXPERIMENTAL DEFINITION OF STRUCTURE OF THE STREAM
BY THE METHOD OF TWO INDICATORS

Volgograd State Technical University

Different methods of the stream structure research are based on removal of one function of a response to indigation with the subsequent synthesis of mathematical model that brings essential deviations in calculations of real process. In article the way of definition of the stream structure research by two various indicators on molecular diffusion is considered.

Keywords: structure of streams, Peclet's criterion, diffusion.

Для проверки влияния коэффициентов диффузии на структуру потоков были проведены экспериментальные исследования по снятию кривых отклика двумя разными индикаторами в насадочной колонне непрерывного действия, которые были продублированы аналогичными исследованиями в аппарате с двухлопастной пропеллерной мешалкой.

Объем трубки трубчатого реактора в лабораторной установке составлял $V_{тр} = 3,6$ л, диаметр трубки $d_{тр} = 0,08$ м, высота трубки $l = 1$ м.

На рис. 1 представлен лабораторный проточный аппарат с двухлопастной мешалкой непрерывного действия объемом $V_{ап} = 5$ л. Диаметр аппарата составлял $D_{ап} = 0,16$ м, диаметр лопастей пропеллерной мешалки $d_m = 0,032$ м. Геометрический симплекс составлял

$$d_m/D_{ап} = 0,2,$$

где d_m – диаметр мешалки, м; $D_{ап}$ – диаметр аппарата, м.

Аналогичный опыт проводился в проточном аппарате с двухлопастной мешалкой непрерывного действия, но с меньшим объемом $V_{ап} = 0,6$ л. Диаметр аппарата $D_{ап} = 90$ мм, диаметр лопастей пропеллерной мешалки $d_m = 18$ мм (рис. 2).

Для регистрации концентрации индикатора в выходном патрубке аппарата установлены с зазором δ мм два электрода кондуктометрической ячейки WTW inoLab Cond 740, представляющим собой записывающее устройство, которое регистрировало функции распределения частиц индикатора во времени в размерных координатах.

Чувствительным элементом при измерении электропроводности является кондуктометрическая ячейка, свойства которой характеризуются константной или постоянной ячейки. Конструкция классической ячейки представляет собой два параллельных измерительных электрода, погруженных в раствор.

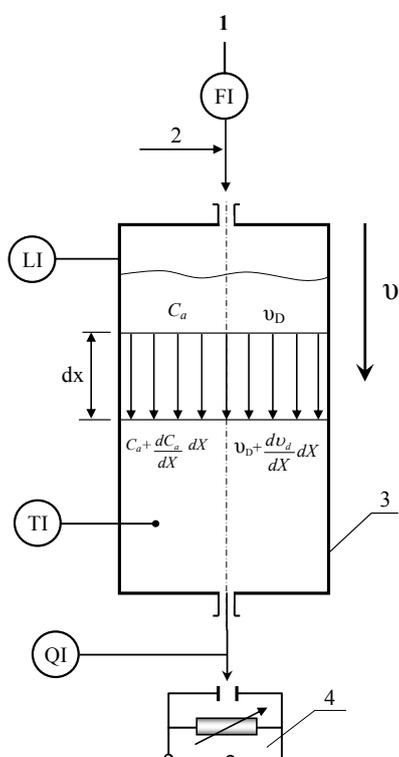


Рис. 1 Схема экспериментальной установки:
1 – вход основного потока жидкости; 2 – импульсный ввод индикатора; 3 – трубчатый аппарат непрерывного действия; 4 – кондуктометрическая ячейка WTW inoLab Cond 740

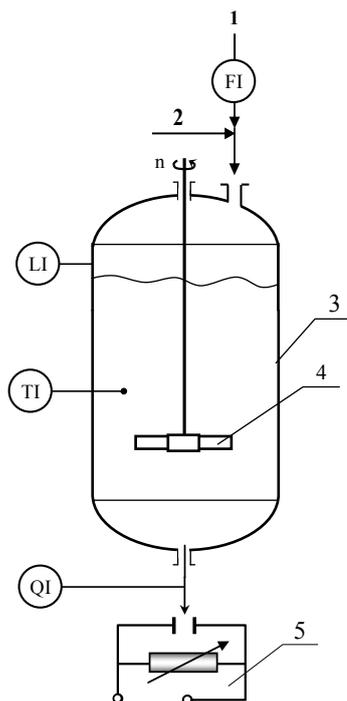


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:
 1 – вход основного потока жидкости; 2 – импульсный ввод индикатора; 3 – проточный аппарат перемешивающего действия; 4 – двухлопастная пропеллерная мешалка; 5 – кондуктометрическая ячейка WTW inoLab Cond 740

Сущность экспериментального метода исследования структуры потоков в реальном аппарате заключается в том, что в поток на входе в аппарат каким-либо способом вводят индикатор, а на выходе потока из аппарата регистрируют изменение концентрации индикатора в зависимости от времени.

Полученную таким образом функцию отклика аппарата на ввод индикатора (типовое возмущение по составу потока) обрабатывают по специальной методике и получают нормированную функцию распределения частиц (элементов, долей) потока по их времени пребывания в технологическом аппарате, которую в дальнейшем используют в расчетах технологических процессов и аппаратов или для построения близкой к реальной гидродинамической модели, составленной из комбинации типовых моделей гидродинамики (идеального смешения и вытеснения, диффузионной модели, ячеечной модели и т. п.).

Если принятая модель соответствует реальной структуре потоков, то экспериментальная функция отклика может рассматриваться как график решения уравнений модели при соответствующих начальных и граничных условиях. Сравнивая решение уравнений модели с экспериментальной функцией отклика на типовые

(например, импульсные) возмущения, можно определить неизвестные параметры модели.

При исследовании структуры потоков к индикатору предъявляются специальные требования: во-первых, его масса (объем) не должны влиять на структуру потока основной жидкости; во-вторых, он должен достаточно просто регистрироваться на выходе основной жидкости; в-третьих, его масса (объем) остаются неизменными в течении всего времени регистрации индикатора на выходе. Эти требования связаны с тем, что структура потока индикатора должна совпадать со структурой потока основной жидкости.

На входе потока вводят по определенному закону (импульсному, ступенчатому и др.) индикатор, а на выходе регистрируют отклик – изменение концентрации индикатора во времени (метод трассера). Обработка отклика методами статистики позволяет оценить закон распределения времени пребывания и найти параметры модели.

В качестве основного и дополнительного индикаторов могут быть использованы органические и неорганические вещества, красители, магнитные частицы и радиоактивные изотопы.

Объект представляет собой «черный ящик», на вход которого для экспериментального определения структуры потока водно-глицеринового раствора подавались в момент времени $\tau_0 = 0$ импульсным методом поочередно индикаторы – растворы солей концентрацией 7 г/л и объемом 1 мл: сначала хлорида калия, у которого коэффициент диффузии ионов калия $D_1 = 19,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, затем хлорида кальция, коэффициент диффузии ионов кальция $D_2 = 7,92 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Водно-глицериновый раствор хлорида кальция той же концентрации и объема, как и основной индикатор, брался для дополнительной регистрации концентрации индикатора. Как видно, коэффициент молекулярной диффузии катионов калия больше коэффициента молекулярной диффузии катионов кальция в 2,5 раза.

Так как время подачи импульсного сигнала стремилось к нулю, то вся масса индикатора была введена в объем основной жидкости на входе в проточный трубчатый аппарат. Частицы индикатора, попадая внутрь аппарата, двигались по нему от входа к выходу в соответствии со структурой потока. Расход водно-глицеринового раствора вязкостью $\mu = 14 \text{ сПз}$ составил $q_v = 20 \text{ мл/с}$, то есть среднее время пребывания частиц потока жидкости $\tau_{cp} = V/q_v = 180 \text{ с}$. Фиктивная скорость течения жидкости $v_{\phi} =$

= 0,01 м/с. Температура раствора была равной температуре окружающей среды и составила 25 °С. Опыт повторяли трижды. Так как электропроводность разбавленного раствора электролита отлична от электропроводности водно-глицеринового раствора с заряженными ионами индикатора, то на выходе из аппарата получали зависимости концентраций ионов индикаторов от времени пребывания их в аппарате.

Увеличив фиктивную скорость течения водно-глицеринового раствора в трубе, когда силы инерции при обтекании поверхности насадки увеличились относительно молекулярной диффузии, регистрировали концентрацию индикаторов на выходе из аппарата с помощью кондуктометрической ячейки WTW inoLab Cond 740 (рис. 2).

Аналогичные исследования провели в лабораторном проточном аппарате с двухлопастной мешалкой непрерывного действия объемом $V_{\text{ап}} = 5$ л. Расход водно-глицеринового раствора $q_v = 10$ мл/с, а среднее время пребывания частиц в потоке жидкости $\tau_{\text{ср}} = V_{\text{ап}}/q_v = 500$ с. Число оборотов мешалки устанавливали равным $n = 1$ об/с (рис. 1).

Импульсно вводили индикаторы: поочередно, сначала хлорид калия, затем хлорид кальция объемом $V_{\text{ин}} = 10$ мл. На выходе из аппарата снимали показания кондуктометрической ячейки для построения кривых отклика: концентрацию ионов соли. Опыт повторили 3 раза при температуре окружающей среды равной 25 °С.

Затем опыты проводили в том же аппарате, при тех же условиях и расходах воды, при тех же индикаторах – основном и дополнительном, но при числе оборотов мешалки в 4 раза больше, то есть при $n = 4$ об/с.

Для подтверждения результатов опыта брали лабораторный проточный аппарат с двухлопастной мешалкой меньшим объемом $V_{\text{ап}} = 0,6$ л. Диаметр аппарата $D_{\text{ап}} = 90$ мм, диаметр лопастей пропеллерной мешалки $d_m = 18$ мм. Объем вводимого индикатора составлял $V_{\text{ин}} = 1$ мл. Динамическая вязкость водно-глицеринового раствора $\mu = 0,014$ Па·с. Расход жидкости в аппарате $q_v = 1$ мл/с.

Сначала опыт проводили при числе оборотов мешалки $n = 0,25$ об/с. Затем при числе оборотов $n = 1$ об/с. Повторив каждый опыт три раза, снимали показания кондуктометрической ячейки для построения кривых отклика на входной импульсный сигнал.

Таким образом, дополнительная функция распределения структуры потока во времени,

полученная путем регистрации концентрации дополнительного индикатора хлорида кальция на выходе из аппарата и имеющего коэффициент диффузии в потоке, значительно больший, чем коэффициент диффузии основного индикатора, позволяет получить дополнительную информацию о влиянии диффузии молекул потока на его структуру, в частности на дисперсию и число Пекле, а значит более точно учитывать влияние коэффициентов диффузии реагирующих молекул в потоке жидкости на степень конверсии, профили температур и концентраций исходных веществ и продуктов реакции.

При высоких скоростях движения реакционной массы разным значениям дисперсии σ_1^2 и σ_2^2 соответствуют разные расчетные критерии Пекле, являющиеся основными параметрами диффузионной модели для расчета химических реакторов и характеризующие в них структуру потоков реакционной массы. Значит, когда мощности мешалки не хватает для интенсивного перемешивания всего объема жидкости в аппарате, собственные коэффициенты диффузии молекул могут существенно влиять на структуру потоков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диффузионная модель структуры потоков для политропных трубчатых реакторов / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова, Н. И. Фотина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(104) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 6). – С. 54–58.
2. Голованчиков, А. Б. Математическое моделирование химического реактора с различными диффузионными структурами потока по реагирующим компонентам / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова // Химическая промышленность сегодня. – 2013. – № 3. – С. 51–55.
3. Голованчиков, А. Б. Моделирование структуры потоков методом двух индикаторов / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова // Энциклопедия инженера-химика. – 2013. – № 9. – С. 33–36.
4. Голованчиков, А. Б. Моделирование химических реакторов с различными структурами потоков и уровнями сегрегации по реализующим компонентам / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 120. – С. 12–15.
5. Голованчиков, А. Б. Расчет химического реактора с диффузионной моделью структуры потоков и разными числами Пекле по реагирующим компонентам / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55, № 8. – С. 111–114.
6. Голованчиков, А. Б. Снижение пиковых температур в политропных трубчатых реакторах / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова // Химическая промышленность. – 2012. – Т. 89, № 4. – С. 181–185.

УДК 66.045.54

Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, Н. А. Дулькина, Я. А. Орлянкина

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ТРУБЧАТОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

Волгоградский государственный технический университет

Предложена методика тестирования работы трубчатого каталитического реактора с целью оценки равномерности распределения расхода по отдельным трубам в период пуско-наладочных работ.

Ключевые слова: трубчатые каталитические реакторы, скорость фильтрации, гидравлическое сопротивление.

N. A. Merentsov, V. A. Balashov, N. A. Dulkina, J. A. Orlyankina,

METHOD OF ASSESSMENT OF TUBE HYDRODYNAMIC CONDITIONS OF THE CATALYTIC REACTOR

Volgograd State Technical University

The methods of testing of tubular catalytic reactor to assess the uniformity of flow distribution on individual tubes during commissioning are proposed.

Keywords: Tubular reactors catalyst, hydraulic resistance, generalized criteria the equation.

Трубчатые каталитические реакторы широко используют в химической промышленности в качестве основного промышленного аппарата. Эффективность проведения химических процессов в трубчатом каталитическом реакторе определяется тем, насколько гидродинамические и тепловые условия в отдельных трубах соответствуют значениям технологических параметров самого реактора [1].

Качество работы трубчатого каталитического реактора работающего по схеме, изображенной на рис. 1, во многом определяется тем, насколько равномерно распределены потоки смеси реагентов по отдельным трубам.

Все трубы обычно заполняются одинаковым количеством катализатора при сохранении одинаковых условиях его засыпки. Считается,

что в этом случае обеспечиваются одинаковые условия для фильтрационного течения потока реакционной смеси в трубах, заполненных катализатором и расход потока смеси реагентов во всех трубах в условиях их параллельной работы будет одинаков. Равномерность заполнения труб катализатором дополнительно контролируется степенью равномерности распределения потока жидкости или газа (воздуха) через слой насадки катализатора [2, 3]. Для этого создается разность давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ для пучка труб и замеряется расход потока на выходе из отдельных труб. По результатам замера оценивается отклонение расхода для отдельных труб от его расчетного значения. В случае допускаемой величины отклонения расхода считают, что и при других значениях перепада давления Δp разброс расходов по трубам остается в тех же пределах. Однако экспериментальные исследования, проводимые в широком диапазоне изменения Δp , показывают, что сравниваемые значения расходов практически одинаковые, например, в области малых расходов реагента, могут существенно отличаться в области больших расходов. Природа такого гидравлического эффекта заключается в следующем.

Уравнением в наибольшей степени адекватно описывающим фильтрационную кривую $\Delta p/H = f(v_\phi)$ является двухчленное уравнение Дюпюи–Форхгеймера [4]:

$$\frac{\Delta p}{H} = \alpha \cdot \mu v_\phi + \beta \rho v_\phi^2, \quad (1)$$

где Δp – разность давлений; H – высота слоя насадки; μ и ρ – вязкость и плотность жидкости; v_ϕ – средняя скорость фильтрационного течения жидкости; α и β коэффициенты, характеризующие влияние структуры пористой среды на гидродинамику фильтрационного течения.

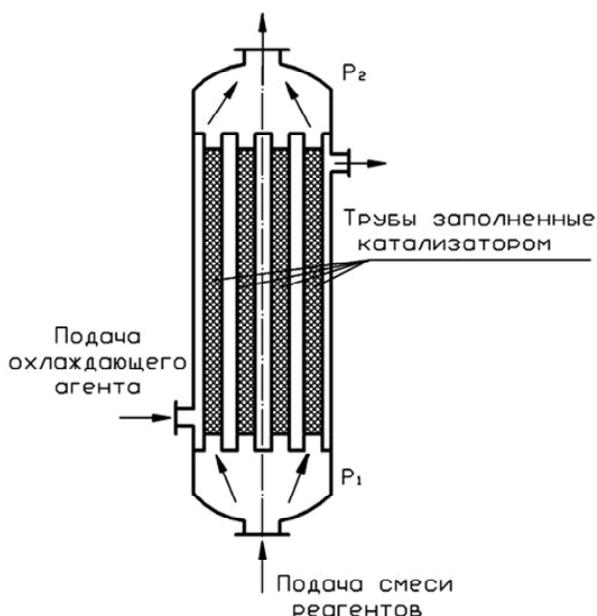


Рис. 1. Трубчатый каталитический реактор

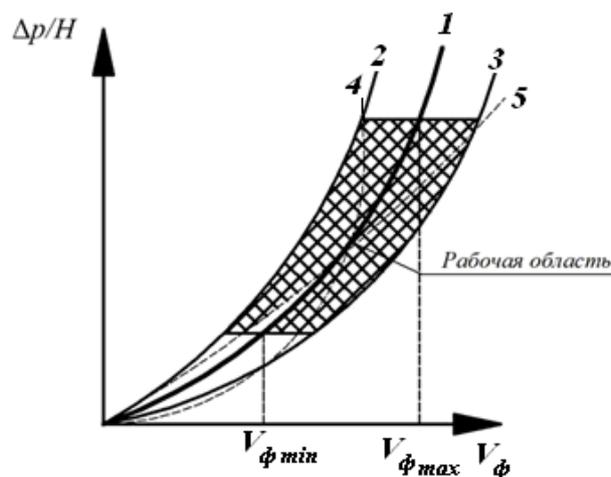


Рис. 2. График зависимости $\Delta p/H = f(v_\phi)$

Значения коэффициентов α и β определяют экспериментально. В основу методики их определения положено представление уравнения (1) в виде зависимости

$$\frac{\Delta p}{H \cdot v_\phi} = \alpha \cdot \mu + \beta \nu_\phi^2, \quad (2)$$

являющейся уравнением прямой в координатах $\Delta p/(H \cdot v_\phi) = f(v_\phi)$.

Аппроксимируя опытные данные по определению гидравлического сопротивления слоя насадки в координатах $\Delta p/(H \cdot v_\phi) = f(v_\phi)$ прямой и определив величину отрезка, отсекаемого ею по оси ординат, и тангенс угла наклона к оси абсцисс, зная вязкость и плотность жидкости, определяют для исследованной насадки значения коэффициентов α и β .

Экспериментальные исследования показывают, что между коэффициентами α и β отсутствует однозначная корреляция [4], поэтому фильтрационные кривые, имея практически одинаковые значения коэффициента α в области ламинарного фильтрационного течения, могут характеризоваться различными значениями коэффициента β в области развитого турбулентного течения. Вследствие чего значения расходов реагента практически одинаковы для всех труб каталитического реактора в области близкой к ламинарному режиму фильтрационного течения реагента, могут существенно отличаться от расходов, предусмотренных режимом работы реактора при повышенных расходах реагента, когда в фильтрационном потоке становятся значимыми силы инерции.

Из вышесказанного следует, что оценка степени равномерности распределения потока реагентов по трубам каталитического реактора

по результатам тестирования в период пусконаладочных работ по данным замеров, полученных при одном значении перепада давлений Δp , не может считаться достоверной, так как при этом не учитывается возможность нарушения равномерности распределения расхода реагента по трубам при изменении его общего расхода для реактора. Поэтому предлагается оценку возможности сохранения степени равномерного распределения расхода реагента по трубам при изменении в широком интервале его общего расхода проводить следующим образом:

- для интервала возможного изменения рабочих значений расхода реагента определяют соответствующие этому интервалу пределы изменения номинальных значений скорости фильтрации для труб реактора $v_{\phi min}$ и $v_{\phi max}$;

- при известных для катализатора значениях коэффициентов α и β , используя уравнение (1), строят фильтрационную кривую $\Delta p/H = f(v_\phi)$, определяющую для труб реактора номинальное соотношение между скоростью фильтрации реагента и гидравлическим сопротивлением катализатора, на рис. 2 это кривая 1;

- назначив допустимые предельные отклонения рабочих скоростей фильтрации от номинальных при одинаковом для всех труб гидравлическом сопротивлении, наносят на поле графика фильтрационные кривые 2 и 3, определяющие предельно допустимые рабочие значения скоростей фильтрации;

- выделяют на графике между фильтрационными кривыми 2 и 3 рабочую область, соответствующую значениям номинальных скоростей $v_{\phi min}$ и $v_{\phi max}$ (на рис. 2 она заштрихована);

- полученные при тестировании труб реактора фильтрационные кривые сопоставляют с изображенным на рис. 2 графиком. Те трубы, для которых фильтрационные кривые пройдут через рабочую область, пересекая при этом ее горизонтальные участки, как, например, проходят кривые 4 и 5, и будут отвечать предъявленным к ним требованиям по расходу реагента.

Данной методикой тестирования гидродинамических условий работы трубчатого каталитического реактора можно воспользоваться только в том случае если известны наиболее достоверные значения коэффициентов α и β для катализатора. При отсутствии таких сведений значения этих коэффициентов следует определять на основании лабораторных гидравлических испытаний элементов труб соответствующего диаметра, заполненных катализато-

ром. Значения коэффициентов α и β при этом могут быть определены с помощью уравнения (2) по изложенной выше методике.

Предложенная методика тестирования гидравлических показателей работы трубчатого каталитического реактора на стадии пусконаладочных работ позволяет оценить возможность обеспечения предусмотренную регламентом степень равномерного распределения реагента по трубам реактора при изменении его производительности.

УДК 541.183+504.3.054

*Л. В. Курьева**, *А. Б. Голованчиков**, *В. Ф. Каблов***, *Н. А. Дулькина**

ОЦЕНКА ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ ПАРОВ ДИОКСИНА ИЗ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ

*Волгоградский государственный технический университет

**Волжский политехнический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета

Проведено физическое и математическое моделирование процесса адсорбции паров диоксида. Из-за сверхвысокой токсичности расчет времени защитного действия приравнивается к времени проскоку сорбтива с фоновой концентрацией за слоем адсорбента. Так как соответствующей фоновой концентрации в атмосфере данные по равновесию паров в воздухе и сорбтива в активном угле отсутствует, то используется теория молекулярной конденсации паров диоксида на поверхности пор микрокапилляров.

Ключевые слова: диоксин, время защитного действия, время проскока сорбтива, молекулярная конденсация.

*L. V. Kuryeva**, *A. B. Golovanchikov**, *V. F. Kablov***, *N. A. Dulkina**

EVALUATION OF THE PROCESS OF ADSORPTION VAPOUR DIOXIN FROM VENTILATION EMISSIONS

*Volgograd State Technical University

**Volzhskiy Polytechnic Institute (branch) of Volgograd state technical University

Conducted physical and mathematical modeling of the process of adsorption vapour dioxin. Because of the super high toxicity of the calculation of the time of protective action is equal to the breakthrough time of the sorbitive with background concentration filtration layer of adsorbent. As relevant background concentration in the atmosphere of data on the equilibrium vapor in the air and sorbitive in active coal is absent, then the theory is used of molecular vapor condensation of dioxin on the surface of pores microcapillaries.

Keywords: dioxin, protective action time, the breakthrough time sorbitive, molecular condensation.

После трагедии в индийском штате Бхопал, где из-за аварии на химическом предприятии при утечке паров диоксида погибло более 1000 человек в научном мире возник повышенный интерес к этому супертоксичному ксенобиотику. Однако из-за той же опасности при работе с диоксином в научной литературе нет данных по адсорбционному равновесию паров диоксида с поглощенным адсорбтивом в активном угле.

Целью работы являлось определение параметров адсорбционного процесса паров диоксида в колоннах периодического и непрерывно-го действия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Борисов, Г. С.* Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский ; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 4-е изд., стереотипное. – М. : Альянс, 2008 – 496 с.
2. *Глосман, Е. З.* Газодинамическое сопротивление катализаторов разложения озона / Е. З. Глосман // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – № 10. – С. 35–39.
3. *Бесков, В. С.* Катализаторы с развитой внешней поверхностью / В. С. Бесков, В. Н. Грунский // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 9. – С. 47–51.
4. *Тябин, Н. В.* Дискретная модель фильтрации вязкой жидкости / Н. В. Тябин, В. А. Балашов, Л. А. Кондакова // Теоретические основы химической технологии. – 1977. – Т. 85. – № 1. – С. 45–48.

Оценим предельную статическую емкость адсорбента, используя теорию мономолекулярного слоя на поверхности микрокапилляров адсорбента. Молекула диоксида изображена на рис. 1.

Геометрические размеры приведены в интернете [1].

Площади граней модельного параллелепипеда молекулы диоксида составляют:

$$s_1 = 74,76 \text{ \AA}^2, \quad s_2 = 52,7 \text{ \AA}^2, \quad s_3 = 35,74 \text{ \AA}^2,$$

а средняя площадь $s = 54,4 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$.

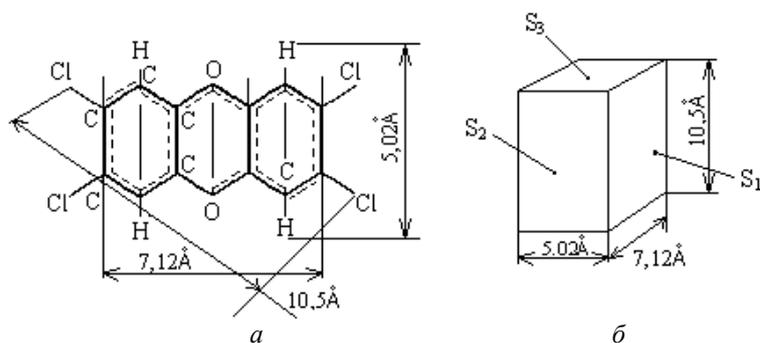


Рис. 1. Химическая структура молекулы диоксина (а) и ее аксонометрический вид (б)

При средней боковой поверхности микрокапилляров в 1 г активного угля марки АГ-5, $S = 500 \text{ м}^2/\text{г}$ среднее число молекул диоксина плотно уложенных на поверхности микрокапилляров в один слой составит [2]

$$N = S / s = \frac{500}{54,4 \cdot 10^{-20}} \approx 10^{21} \text{ шт/г.}$$

Так как в одном моле любого вещества содержится $A = 6,025 \cdot 10^{23}$ молекул (число Авогадро) [3], то в одном грамме адсорбента на поверхности микрокапилляров в один слой может быть уложено

$$\frac{N}{A} = \frac{10^{21}}{6,025 \cdot 10^{23}} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ мол/г.}$$

Молекулярный вес диоксина $\text{C}_{12}\text{O}_2\text{H}_4\text{Cl}_4$ $M=322 \text{ г/моль}$.

Тогда полная статическая емкость 1 г активного угля при укладке молекул диоксина в один слой на поверхности микрокапилляров составит

$$a_{01} = M \frac{N}{A} = 0,515 \text{ г/г.} \quad (1)$$

В случае капиллярной конденсации молекул диоксина в микрокапиллярах активного угля при объеме его микропор составляющем $v_y = 0,3 \text{ см}^3/\text{г}$ и плотности конденсата диоксина $\rho = 1180 \text{ кг/м}^3$ [2] его полная обменная емкость составит

$$a_{02} = v_y \rho = 0,3 \cdot 1,18 = 0,354 \text{ г/г} \quad (2)$$

Такое расхождение расчетных значений полной (статической) обменной емкости по формулам (1) и (2) связано во-первых, с разными физическими моделями процесса адсорбции, а во-вторых, для первой рассмотренной модели мономолекулярной укладки атомов диоксина возможно надо подставлять на средние поверхности каждой грани (рис. 1, б), а наибольшие тогда предельная (статическая) емкость адсорбента будет уменьшена до величин

$$a_{03} = a_{01} \frac{s}{s_1} = 0,515 \cdot \frac{54,4 \cdot 10^{-20}}{74,76 \cdot 10^{-20}} = 0,375 \text{ г/г} \quad (3)$$

Относительные отклонения a_{03} и a_{02} составляет от среднего $a_{0cp} = 0,366 \text{ г/г}$, $\delta = \pm 3 \%$.

Поэтому принимаем значение полной обменной емкости диоксина

$$A_0 = a_{0cp} = 0,366 \text{ г/г} \quad (4)$$

Для определения приближенной температуры кипения диоксина воспользуемся уравнением Мейснера [4]

$$T_{\text{кин}} = \frac{637 R_d^{1,47} + B}{P} \quad (5)$$

Мольная рефракция R_d и парахор P вычисляем путем суммирования аддитивных величин приведенных в табл. 1.1 [4, с. 10]

$$R_d = 2,418 \cdot 12 + 1,1 \cdot 4 + 1,643 \cdot 2 + 1,967 \cdot 4 + 1,733 \cdot 9 = 60,5, \quad (6)$$

где 12 – число атомов углерода в молекуле; 4 – число атомов водорода; 2 – число атомов кислорода; 4 – число атомов хлора; 9 – число двойных связей.

Константа B определяется по табл. 1.2 [4, с. 11] и равна $B = -2500$ (углеводороды ароматического ряда). Составляющая парахора P по Мак-Гоэну определяются по табл. 1.3 [4]

$$P = 47,6 \cdot 12 + 24,7 \cdot 4 + 36,2 \cdot 2 + 62,4 \cdot 4 - 19 \cdot 24 = 534,4,$$

где числа 12, 4, 2, 4 – соответственно число атомов углерода, водорода, кислорода и хлора, а число 24 – соответствует числу двойных связей в молекуле диоксина. Тогда расчетная температура кипения диоксина при атмосферном давлении составит (5)

$$T_{\text{кин}} = 508,3 \text{ К}$$

или

$$t_{\text{кин}} = 235,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

Расчетное критическое давление для диоксина определяем по методу Эдулжи, используя уравнение [4, с. 11]

$$P_{кр} = \frac{10^4 M}{(\sum \Delta p)^2}$$

Результаты расчетов $P_{кр} = 8,38$ ат

Критическую температуру определяем по уравнению Нокэя [4, с. 10]

$$\lg T_{кр} = 1,1836 + 0,2985 \lg \left(\frac{P}{1000} \right) + 0,62124 \lg T_{кип}$$

Получаем для диоксина численное значение

$$T_{кр} = 776\text{К или } t_{кр} = 503 \text{ }^\circ\text{C}$$

Таким образом на линии кипения диоксина имеем две точки:

$$T_{кр} \div P_{кр} \text{ и } T_{кип} \div P_{атм}$$

Принимая коэффициент $C=230$, определяем два коэффициента в уравнении Антуана, связывающего зависимость давление насыщенных паров с абсолютной температурой [4, с. 25]

$$\lg P_o^* = A_o - \frac{B_o}{T + 230}$$

Получаем численные значения коэффициентов $B_o = 2522$ и $A_o = 3,43$. Тогда при $T = 293$ К $P_o^* = 2,86$ мм рт. ст.

Для определения давления и концентрации паров диоксина в воздухе и связанной с ней равновесной концентрации в адсорбенте воспользуемся формулами теории Эйкена и Полани [5, с. 383], согласно которой располагая равновесными параметрами стандартного вещества, например бензола, можно вычислить изотерму адсорбции другого вещества, в нашем случае диоксина.

$$P_o = \left. \begin{array}{l} a_o^* = \frac{a_o^*}{\beta_o} \\ \frac{P_o^*}{\left(\frac{P_o^*}{P_o} \right)^\beta} \end{array} \right\} \quad (7)$$

где a_o^* , a_o^* – соответственно равновесные концентрации в адсорбенте диоксина и бензола, кг/кг; P_o^* , P_o^* – соответственно давления насыщенных паров диоксина и бензола при 20 °С (рабочей температуре абсорбции); P_o , P_o – рабочие концентрации паров диоксина и бензола в воздухе; β – коэффициент аффинности, равный отношению мольных объемов паров диоксина и бензола.

$$\text{Так как } \beta = \frac{\left(\frac{M_o}{\rho_o} \right)}{\left(\frac{M_b}{\rho_b} \right)} = 3,02,$$

то согласно уравнениям (системы (6)) получаем

$$a_o^* = \frac{0,103}{3,02} = 0,0304 \text{ кг/кг,}$$

где концентрация $a_o^* = 0,103$ взята из таблицы [5, с. 395],

$$P_o = \frac{2,86}{\left(\frac{75}{0,105} \right)^{3,02}} = 6,56 \cdot 10^{-9} \text{ мм рт. ст.}$$

где $P_o^* = 75$ мм рт. ст., $p = 0,105$ мм рт. ст. – давление паров бензола в воздухе для $a_o^* = 0,103$ кг/кг.

Полагаем, что равновесие паров диоксина в воздухе и в адсорбенте подчиняется уравнению Ленгмюра

$$a_o^* = \frac{A_o B_o C_o}{1 + B_o C_o} \quad (8)$$

Полная статическая емкость адсорбента нами рассчитана ранее $A_o = 0,364$ кг/кг.

Для определения постоянной B_o переведем парциальное давление $P_o = 6,56 \cdot 10^{-9}$ мм рт. ст. в концентрацию [6]

$$C_o = \frac{13,6 \cdot g \cdot M_o \cdot P_o}{R(273 + t)} = 1,16 \cdot 10^{-10} \text{ кг/кг}$$

Подставляя значения C_o , a_o^* , A_o в уравнение (8) получаем численное значение коэффициента $B_o = 8,88 \cdot 10^8$

Тогда уравнение равновесной линии диоксина, принимает вид

$$a_o^* = \frac{3,23 \cdot 10^8 C_o}{1 + 8,88 \cdot 10^8 C_o} \quad (9)$$

Если методом наименьших квадратов обработать все точки равновесной зависимости $a_o^* = a_o^*(C_o)$, полученной по формулам теории Эйкена и Полани, то уравнение Ленгмюра приобретает вид

$$a_o^* = \frac{2,39 \cdot 10^9 C_o}{1 + 8,98 \cdot 10^9 C_o}, \quad (10)$$

Однако относительная ошибка для ряда табличных и расчетных точек превышает ± 50 % со значением полной статической емкости $A_o = 0,265$ кг/кг. Так как это значение меньше $A_o = 0,364$ кг/кг, полученного ранее при исполь-

зовании теории моноабсорбционного слоя на поверхности микрокапилляров или капиллярной конденсации, то основу дальнейших расчетов будем использовать уравнение Ленгмюра (9, 10).

В таблице приведены исходные и справочные данные и расчетные параметры адсорберов периодического и непрерывного действия.

Исходные и справочные данные и расчетные параметры адсорберов периодического и непрерывного действия

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
<i>Исходные данные</i>			
Производительность по очищаемому воздуху	м ³ /ч	q_v	2000
Начальная концентрация диоксина	кг/м ³	C_0	$1 \cdot 10^{-9}$
Конечная концентрация диоксина	кг/м ³	C_k	$2 \cdot 10^{-13}$
<i>Справочные данные</i>			
Рабочая температура	°С	t	20
Высота слоя адсорбента	м	H	0,5
Эквивалентный диаметр гранул адсорбента	м	d_s	0,004
Насыпная плотность адсорбента	кг/м ³	ρ_n	500
Молекулярная масса воздуха	кг/кмоль	M_a	29
Молекулярная масса извлекаемого компонента – диоксина	кг/кмоль	M_o	322
Молекулярная масса стандартного вещества бензола	кг/кмоль	M_b	78
Плотность конденсата бензола при 20 °С	кг/м ³	ρ_b	879
Плотность конденсата диоксина при 20 °С	кг/м ³	ρ_o	1200
Давление насыщенных паров бензола при 20 °С	мм рт. ст.	P_b^*	75
Давление насыщенных паров диоксина при 20 °С	мм рт. ст.	P_o^*	2,86
Коэффициент молекулярной диффузии диоксина при 0 °С и 1 атмосфере [5]	м ² /с	D_0	$4,01 \cdot 10^{-6}$
<i>Расчетные параметры</i>			
Диаметр стандартного аппарата-адсорбера	м	D_a	1,4
Средняя скорость воздуха	м/с	v	0,361
Внешний коэффициент массоотдачи	м ³ /см ²	β_y	7,59
Коэффициент молекулярной диффузии при 20 °С и рабочем давлении в адсорбере	м ² /с	D_p	$4,46 \cdot 10^{-6}$
Плотность воздуха при рабочем давлении и температуре в адсорбере	кг/м ³	ρ	1,206
Давление паров диоксина, соответствующее его начальной концентрации в воздухе	мм рт. ст.	P_0	$1,13 \cdot 10^{-2}$
Равновесная концентрация диоксина, соответствующая его начальной концентрации в воздухе	кг/кг	a_n^*	0,266
Тангенс угла наклона равновесной линии	кг/м ³	g_r	$6,64 \cdot 10^5$
Масса адсорбента в адсорбере периодического действия	кг	C_{Ty}	538,5
Рабочее время цикла (до проскока фоновой концентрации диоксина на выходе из адсорбера)	ч	τ_o	81,96
Число единиц переноса непрерывного действия		ЧЕП	6,58
Конечная концентрация диоксина в адсорбенте	кг/кг	a_k	0,26

Окончание табл. 1

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
Скорость движения слоя адсорбента в адсорбере непрерывного действия	м/с	u	$5,4 \cdot 10^{-7}$
Высота движущего слоя адсорбента	м	H_y	0,313
Расход адсорбента в адсорбере непрерывного действия	кг/ч	q_y	1,54
Время движения гранул адсорбента	с/ч	τ_y	$\frac{5,76 \cdot 10^5}{160}$
Объем воздуха, очищаемый 1 кг адсорбента в адсорбере периодического действия	кг/м ³	V_n	304,4
Объем воздуха, очищаемый 1 кг адсорбента в адсорбере непрерывного действия	м ³ /кг	V_n	1298,7

Как видно из таблицы, основное преимущество адсорбера непрерывного действия по сравнению с адсорбером периодического действия связано со значительно более эффективным использованием адсорбционной динамической емкости адсорбента (см. последние 2 пункта таблицы).

Так объем воздуха, очищаемого 1 кг адсорбента в адсорбере непрерывного действия, в 4,26 раза больше, чем в адсорбере периодического действия.

Необходимо отметить существенный недостаток интегральной формулы, для расчета рабочего времени цикла τ_0 в адсорбере периодического действия [7]: она не учитывает профили концентраций адсорбируемого компонента в газе и слоях адсорбента по мере движения газа от входа к выходу ни в текущие, ни в конечный моменты времени.

В работе [8, 9] рассмотрена физическая модель процесса адсорбции для элементарного слоя неподвижного слоя адсорбента высотой Δz в момент времени τ . На основании элементарного материального баланса получены уравнения и разработан алгоритм расчета адсорберов периодического действия, позволяющий определять профили концентраций извлекаемого компонента в газе и твердой фазе адсорбента по высоте гранул для любого текущего момента времени и конечного времени цикла, когда концентрация извлекаемого из газа компонента становится на выходе из адсорбера равной допускаемой конечной концентрацией C_k (рис. 2).

Уравнение материального баланса для произвольного момента времени τ за интервал времени $\Delta \tau$ имеет вид

$$q_v(C_n - C_k)\Delta\tau = \Delta C_T(a_k - a_n), \quad (11)$$

а массопереноса

$$q_v(C_n - C_k) = \beta_y \Delta V [C_n - C_n^*(a_n)], \quad (12)$$

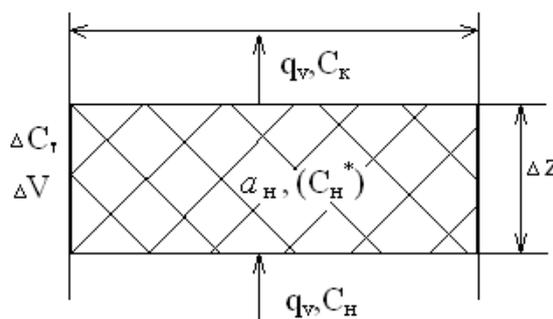


Рис. 2. Схема изменения концентраций извлекаемого компонента в неподвижном слое адсорбента высотой Δz и в очищаемом газе

Тогда основная часть алгоритма расчета для i -й интеграции по времени и j -го элемента высоты слоя адсорбента Δz принимает вид

$$\begin{aligned} C_{n,j} &= \frac{a_{n,j}}{B_0(A_0 - a_{n,j})}; \\ C_{k,j} &= C_{n,j} - \frac{\beta_y \Delta V}{q_v} (C_{n,j} - C_{n,j}^*); \\ a_{k,j} &= a_{n,j} + \frac{q_v (C_{n,j} - C_{k,j}^*) \Delta \tau}{\Delta C_T}. \end{aligned} \quad (13)$$

Так как диоксин относится к суперопасным ксенобиотикам, то его концентрация на выходе из адсорбера должна равняться нулю или, в крайнем случае, опираясь на гипотезу об идеальном экологическом процессе, не должна превышать фоновую концентрацию в атмосфере. Определить эту фоновую концентрацию паров диоксина в воздухе можно следующим образом. Допустим, паров диоксина в атмосфере Земли 1000 т. Если считать, что они равномерно распределены в атмосфере по высоте равной $H = 10$ км, то объем этого 10 км слоя атмосферы у поверхности Земли составляет $V_a = \pi D_3^2 \cdot H = 5,1 \cdot 10^{18} \text{ м}^3$, где диаметр Земли $D_3 = 12742$ км [10].

Тогда фоновая концентрация диоксина в атмосфере составляет

$$C_{\phi} = \frac{10^6}{5,1 \cdot 10^{18}} \approx 2 \cdot 10^{-13} \text{ кг/м}^3.$$

С учетом супертоксичности диоксина принимаем фоновую концентрацию паров диоксина

в атмосфере как конечную для идеального экологического процесса [11, 12].

Графики зависимостей концентрации диоксина в очищаемом воздухе и адсорбенте от высоты слоя адсорбента в конце времени рабочего цикла $\tau = 59,6$ часа, рассчитанные по формулам (10)–(12), приведены на рис. 3.

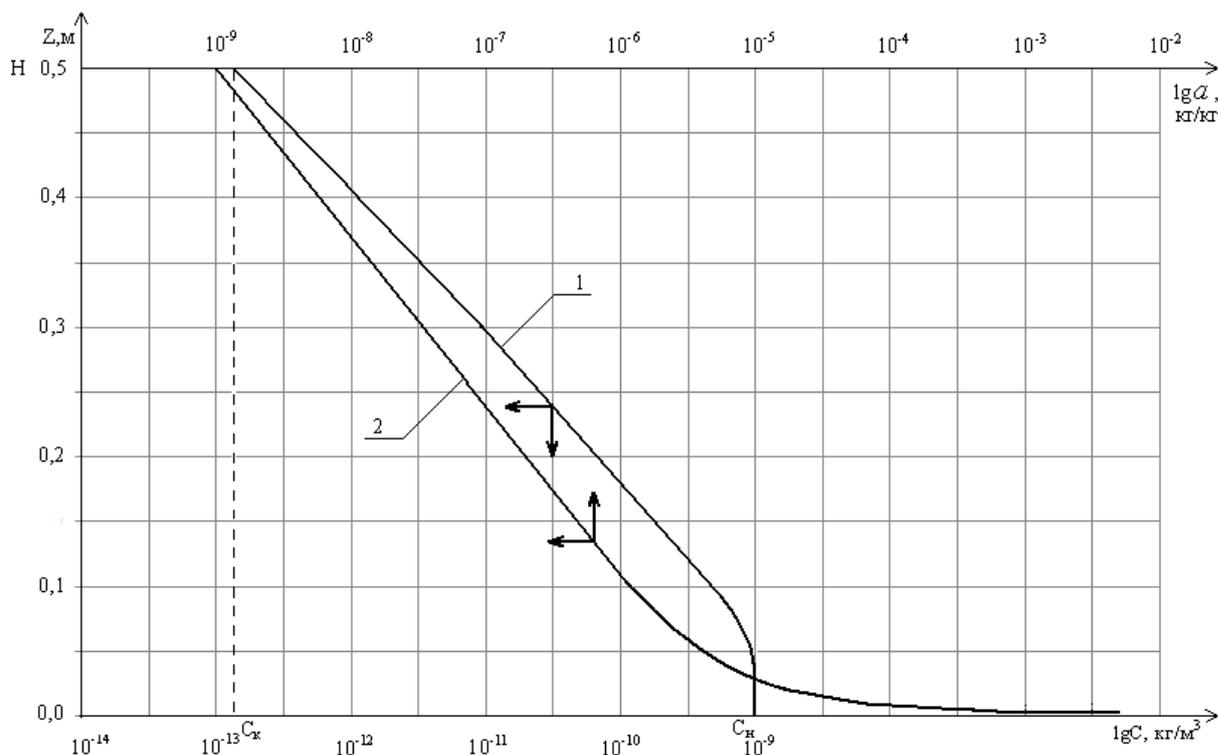


Рис. 3. Профили концентрации паров диоксина в очищаемом воздухе (1) и адсорбенте (2) в конце рабочего цикла $\tau = 59,6$ часа, рассчитанные по формулам (10)–(12)

Сравнение времени рабочего цикла в этом расчете с аналогичным параметром, полученном по известному интегральному алгоритму [5, 6] $\tau_0 = 81,96$ час (см. таблицу) показывает, что интегральный алгоритм завышает время рабочего цикла в 1,5 раза.

Таким образом, проведенное физическое и математическое моделирование процесса адсорбции паров диоксина из газовых выбросов позволяет оценить рабочее время цикла по известному интегральному и предлагаемому алгоритму расчетов и определить физические и геометрические размеры колонн периодического и непрерывного действия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. HyperChem for Windows AC Release 8.0/HyperCube Inc.-2007, S/n 12 – 800 – 15017000060.
2. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник. Т. 1. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – 917 с.

3. Карякин, Н. И. Краткий справочник по физике / Н. И. Карякин, К. Н. Быстров, П. С. Киреев. Изд. 2-е. – М. : Высшая школа, 1964. – 574 с.

4. Дж. Перри. Справочник инженера химика. Т. 1 / Дж. Перри. – Ленинград : Химия, 1969. – 640 с.

5. 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. – Л. : Химия, 1976. – 553 с.

6. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии: учебное пособие. Ч. 4. Массообменные процессы / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симонов. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 1997. – 117 с.

7. Серпионова, Е. Н. Промышленная адсорбция газов и паров / Е. Н. Серпионова. Изд. 2-е. – М. : Высшая школа, 1962. – 414 с.

8. Голованчиков, А. Б. Моделирование процессов адсорбции и электроадсорбции / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, Н. А. Дулькина, А. В. Кузнецов // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 11). – С. 14–18.

9. Голованчиков, А. Б. Влияние давления на процесс осушки воздуха в неподвижном слое силикагеля / А. Б. Голованчиков, А. В. Кузнецов, М. Ю. Ефремов, А. С. Трусов // Известия ВолгГТУ : сб. науч. ст. № 1(88) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 5). – С. 96–100.

10. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Земля>.

11. Об идеальных и реальных экологических процессах и их количественной оценке / А. Б. Голованчиков,

Л. В. Курьлева, Т. А. Голованчикова, В. Л. Гончаренко // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2004. – Вып. 8. – С. 6–10.

12. Голованчиков А. Б. Технологические и экологические аспекты процесса адсорбции винилхлорида из абгазов / А. Б. Голованчиков, Л. В. Курьлева, В. Ф. Каблов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(104) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 6). – С. 76–79.

УДК 621.311.22

М. С. Иваницкий, А. Д. Грига

АЦЕТИЛЕНОВЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ БЕНЗ(А)ПИРЕНА ПРИ СЖИГАНИИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ

«Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал) в г. Волжском

Статья посвящена теоретическому анализу механизмов образования бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива в энергетических установках. Предложена математическая модель для определения содержания бенз(а)пирена в дымовых газах котлов.

Ключевые слова: бенз(а)пирен, эмиссия, продукты горения.

M. S. Ivanitskiy, A. D. Griga

ACETYLENE MECHANISM OF FORMATION OF BENZ(A)PYRENE WHEN BURNING GASEOUS FUEL IN THE FURNACES OF THE POWER BOILERS

Branch of the National Research University «MPEI», Volzhsky

The article is devoted to theoretical analysis of the mechanisms of the formation of benz(a)pyrene in hydrocarbon fuel burning in power plants. A mathematical model is proposed for determining the content of benz(a)pyrene in the flue gas boilers.

Keywords: benz(a)pyrene, emissions, combustion products.

Признано, что эмиссия бенз(а)пирена (БП) в атмосферу при работе энергетических котлов оказывает чрезвычайно вредное воздействие на природу и человека. Бенз(а)пирен – активный канцероген, усиливающий свое негативное воздействие при наличии оксидов серы и азота [1–12].

Целью работы является выявление механизма образования бенз(а)пирена при сжигании природного газа в энергетических котлах.

Теоретические исследования закономерностей образования БП при горении углеводородных топлив в основном проводились по двум направлениям. С одной стороны, на основе отдельных экспериментальных результатов и общих представлений о механизмах протекания химических реакций были предложены гипотетические схемы образования БП [1–5]. С другой стороны, с помощью термодинамического расчета анализировались равновесные значения концентраций отдельных компонентов продуктов сгорания, участие которых в синтезе БП считалось наиболее вероятным [1]. Следует отметить, что наиболее детально рассматривались процессы горения алифатических углеводоро-

дов. Применительно к сжиганию топлив, содержащих ароматические углеводороды, механизмы образования БП рассмотрены только в самом схематичном виде.

Анализ известных механизмов синтеза ПАУ, с учетом принятых допущений, позволил сформулировать дифференциальное уравнение для скорости образования БП [5, 6]:

$$\frac{dc[C_{20}H_{12}]}{d\tau} = k_1 \cdot [C_2H_2]^m - k_2 \cdot [C_2H_2]^n \cdot [C_{20}H_{12}], \quad (1)$$

где первое слагаемое правой части описывает образование БП из ацетилена, второе слагаемое – переход БП в более тяжелые ПАУ, константы k_1 и k_2 определяются из эксперимента, а показатели степени имеют порядок: $m = 5$, $n = 2$ и уточняются на основании опытных данных.

В работе [5] сделана попытка рассмотрения условий образования БП на базе термодинамических расчетов равновесных составов. Во внимание приняты компоненты реакций, участвующие как в механизме Н. В. Лаврова [4], так и Г. М. Беджера [2]. В результате расчетов авторами [1] делается вывод о преобладающей

роли ацетилен и этилена в образовании БП в низкотемпературной области горения в соответствии с реакцией образования дивинила которая может протекать при относительно низких температурах (до 1650 К).

Для высокотемпературной зоны становится вероятным образование БП по механизмам Г. М. Беджера или Н. В. Лаврова. На основании анализа отдельных экспериментальных данных и результатов термодинамических расчетов, в работе [1] предложена схема синтеза БП на примере сжигания метана.

Авторы работы [1] отмечают, что протекающие реакции по данной схеме вероятно лишь в низкотемпературной зоне горения. Не отрицая важности полученных в работе [1] результатов, заметим, что анализ равновесных составов справедлив для условий сжигания топлив в области составов смеси, близких к стехиометрическим ($\alpha=1$), с достаточно большими временами пребывания топлива в зоне горения.

В реальных условиях горения концентрация углеводородных и других соединений существенно отличается от равновесной, поэтому выводы, сделанные на основе термодинамических расчетов, становятся недостаточно корректными.

Таким образом, анализ предлагаемых различными авторами схем и механизмов синтеза БП при горении углеводородных топлив показывает, что образование БП определяется концентрацией продуктов пиролиза исходного топлива, среди которых важную роль играет ацетилен. Вместе с тем, предложенные модели описывают механизмы синтеза БП на качественном уровне, так как не включают в себя константы химических реакций. По-видимому, наиболее реальным шагом в решении проблемы моделирования процессов образования БП является описание кинетики синтеза данных соединений на основе совместного использования детальных кинетических схем горения углеводородов и глобальных реакций, описывающих синтез конкретных ПАУ. Для разработки адекватной структуры кинетических схем и образования бензапирена, определения соответствующих констант химических реакций требуется проведение детальных экспериментальных исследований в модельных условиях.

Рассмотрим дифференциальное уравнение (1), описывающее скорость образования бенз(а)пирена с учетом влияния концентрации ацетилен в газовой смеси и перехода бенз(а)пирена в тяжелые углеводороды.

Решение уравнения (1) при граничном условии $c[C_{20}H_{12}](0)=0$ и постоянной концентрации ацетилен имеет вид

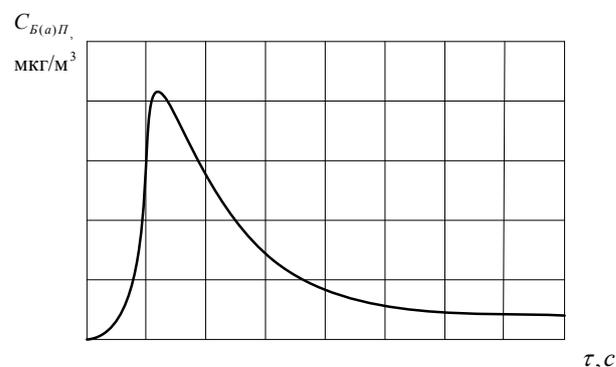
$$c[C_{20}H_{12}] = \frac{k_1}{k_2} \cdot [C_2H_2]^{m-1} \times \left[1 - \exp(k_2 \cdot [C_2H_2]^{n-1} \cdot \tau) \right]. \quad (2)$$

В процессах горения промежуточными продуктами реакций являются радикалы или свободные атомы. Их активность позволяет им реагировать с большой скоростью. Поэтому практический интерес представляет случай, когда $k_2 \gg k_1$. Взяв производную формулы (2) по времени можно определить максимальное время реакции

$$\tau_{\max} = \ln \left[\frac{(n-1)k_2}{(m-1)k_1} \right] \times \left[\frac{(m-1)k_1}{(n-1)k_2} \right]^{-1}. \quad (3)$$

В частном случае, возможно определить время образования бенз(а)пирена в условиях гомогенной фазы горения топлива; при сжигании природного газа с долей метана 97,8 % в энергетическом котле ТГМ-84 при расположении горелок в форме треугольника и наличии двухцветного экрана и значении коэффициента избытка воздуха равном 1,05 время генерации достигает уровня 500–700 мс (см. рисунок) с начала процесса горения, что удовлетворительно согласовывается с известными экспериментальными данными [8].

В общем случае исходные компоненты участвуют в разных реакциях, представляющих стадии цепного механизма. При этом можно разделить реакции на быстрые и медленные, сравнивая их удельные скорости, но непосредственно из уравнений, без привлечения опытных данных, нельзя заключить, как быстро изменяется концентрация какого-либо компонента.



Зависимость образования бенз(а)пирена от начала времени горения газообразного топлива по ацетиленовому механизму

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет определять концентрацию бенз(а)пирена при сжигании газообразного топлива с учетом концентрации ацетилена и времени реакции.

Физико-химическая модель для исследований особенностей образования бенз(а)пирена, опытной проверки результатов численного эксперимента может быть построена с учетом наиболее вероятных химических реакций и кинетики процессов при сгорании углеводородных топлив.

Определено время образования бенз(а)пирена в условиях гомогенной фазы горения; результат показал, что основное количество бенз(а)пирена образуется в диапазоне времени 500–700 мс от начала процесса горения и составляет $4,2 \text{ мкг/м}^3$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ахмедов, Р. Б.* Технология сжигания горючих газов и жидких топлив / Р. Б. Ахмедов, Л. М. Цирульников. – Л.: Недра, 1984. – 283 с.
2. *Беджер, Г. М.* Химические основы канцерогенной активности / Г. М. Беджер. – М.: Медицина, 1966. – 124 с.
3. *Лавров, Н. В.* Процессы горения топлива и защита окружающей среды / Н. В. Лавров, Э. И. Розенфельд, Г. П. Хаустович; под ред. Н. В. Лаврова. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
4. *Лавров, Н. В.* О механизме образования бенз(а)пирена / Н. В. Лавров, Н. Л. Стасевич, Г. М. Комина // Докл. АН СССР. – 1972. – Т. 206, № 6. – С. 1363–1366.
5. *Матвеев, С. Г.* Обоснование модели синтеза ПАУ на основе карбеного механизма пиролиза ацетилена / С. Г. Матвеев, И. В. Чечет // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе: докл. Междунар. научн.-техн. конференции. – Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 1997. – Т. 2. – С. 218–224.
6. *Лукачев, С. В.* О моделировании процесса образования бенз(а)пирена на основе глобальных реакций / С. В. Лукачев, С. Г. Матвеев, А. Ф. Урывский // Изв. вузов. Сер. Авиационная техника. – 1996. – № 1. – С. 62–64.
7. *Frenklach, M.* Mechanism of soot formation in acetylene-oxygen mixtures / M. Frenklach, D. W. Clary, T. Yuan et al. // Combustion Science and Technology. – 1986. – V.50, № 1–3. – P.79–115.
8. *Росляков, П. В.* Методы защиты окружающей среды: учебник для вузов / П. В. Росляков. – М.: ИД МЭИ, 2007. – 336 с., ил.
9. *Иваницкий, М. С.* Физико-химические процессы механизмов образования бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива / А. Д. Грига, В. М. Фокин, С. А. Грига // Вестник ВолгГАСУ. – 2012. – № 27(46). – С. 28–33.
10. *Иваницкий, М. С.* Построение модели для определения концентрации бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива в котельных установках систем теплоснабжения / А. Д. Грига, В. М. Фокин, С. А. Грига // Вестник ВолгГАСУ. – 2012. – № 28(47). – С. 143–150.
11. *Иваницкий, М. С.* Определение концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок и способ автоматического регулирования процесса горения / М. С. Иваницкий, А. Д. Грига // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 3(83). – С. 52–56.
12. *Иваницкий, М. С.* Суммарное негативное воздействие вредных выбросов оксидов азота и бенз(а)пирена на окружающую среду / М. С. Иваницкий, А. Д. Грига // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий». – Томск. – 2012. – С. 112–114.

УДК 536.423.1

П. С. Васильев, С. Л. Рева, Л. С. Рева, В. В. Савин, А. Б. Голованчиков
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ПАДЕНИЯ КАПЛИ,
ПРИ КОТОРОЙ НЕ ПРОИСХОДИТ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ
ОБЪЕМА ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

Приведено описание методики определения предельной высоты падения капли, при которой не происходит нарушение сплошности объема жидкости на поверхности нагрева, а также сравнение экспериментальных и расчетных значений предельных высот падения.

Ключевые слова: капля, кипение, поверхность нагрева, предельная высота падения, поверхностное натяжение, критическая температура, металл.

P. S. Vasiliev, S. L. Reva, L. S. Reva, V. V. Savin, A. B. Golovanchikov

DETERMINATION OF LIMIT HEIGHT FALL DROP, AT WHICH THERE
ISN'T VOLUME DISCONTINUITY OF LIQUID ON THE SURFACE

Volgograd State Technical University

The description of the methodology for determining of limit height drop fall, at which there isn't volume discontinuity of liquid heating surface, and a comparison of the experimental and calculated limit height fall values are observed.

Keywords: drop, boiling, heating surface, limit height fall, surface tension, critical temperature, metal.

Процесс испарения капли на поверхности нагрева – капельное кипение – всегда представ-

лял значительный интерес для целого ряда исследователей [1–5].

Собственный опыт экспериментальных исследований с использованием высокоскоростной видеосъемки и дальнейшей компьютерной обработки наблюдаемого явления показал, что падающая с некоторой высоты капля жидкости претерпевает ряд трансформаций на поверхности нагрева, а образующееся пятно контакта определяет эффективность процесса кипения [6–12]. Причем до определенной высоты, с которой падает капля, не происходит разрыва сплошности объема трансформирующейся на поверхности нагрева капли. С увеличением высоты, с которой падает капля, пленка жидкости на поверхности нагрева разрывается. Визуальное наблюдение позволяет предположить, что суммарная площадь поверхности «разорванной» пленки жидкости примерно равна площади пятна контакта при падении капли с предельной высоты, при которой не происходит разрушения целостности объема капли. Знание этой высоты позволяет более полно выявить физическую картину поведения падающей на поверхность нагрева капли жидкости и процесса ее испарения.

Целью данной работы является создание методики теоретического расчета предельной высоты падения капли.

Для определения этой предельной высоты было составлено уравнение баланса сил, действующих на каплю в момент ее растекания на поверхности нагрева

$$\frac{m_k \cdot w_k^2}{2} = \frac{\pi \cdot d_k^2}{2} \cdot \sigma_{ж-т} \quad (1)$$

или

$$\rho_{ж} \cdot d_k \cdot w_k^2 = 6 \cdot \sigma_{ж-т}, \quad (2)$$

где m_k – масса капли, кг; w_k – скорость падения капли в момент ее соударения с поверхностью нагрева (предельная), м/с; d_k – диаметр капли, м; $\sigma_{ж-т}$ – поверхностное натяжение на границе капля жидкости – поверхность нагрева, Дж/м²; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; $(\pi \cdot d_k^2)/2$ – площадь поверхности полусферы, так как находящаяся на поверхности нагрева капля имеет форму, приближенную именно к полусфере.

Поверхностное натяжение $\sigma_{ж-т}$ можно определить из уравнения Юнга-Лапласа [13]

$$\sigma_{ж-т} = \sigma_{г-т} - \sigma_{г-ж} \cdot \cos \theta, \quad (3)$$

где $\sigma_{г-т}$ – поверхностное натяжение на границе воздух – поверхность нагрева, Дж/м²; $\sigma_{г-ж}$ – поверхностное натяжение на границе воздух – капля жидкости, Дж/м²; θ – краевой угол смачивания, град.

В уравнении (3) величина $\sigma_{г-ж}$ является справочной, а величина θ – определяемой экспериментально. Величина же $\sigma_{г-т}$ является расчетным параметром, значение которого для твердых тел, имеющих кристаллическую природу, например металлов, считается по методике Скапского, представляющую собой эмпирический метод, дающий достаточную для практических расчетов точность. Суть этого метода состоит в предположении о простой пропорциональности между поверхностной энергией и энергией испарения. При этом учитывается соотношение между числом ближайших соседей атома в объеме и на поверхности кристалла. Этот способ позволяет обойти теоретически сложный вопрос точного расчета когезионных сил в металле, но он не учитывает деформации поверхности, т. е. ее шероховатость [14].

Для тел, имеющих кристаллическую природу, изменение плотности и молярного объема с изменением температуры очень малы. Поэтому уравнение температурной зависимости поверхностного натяжения имеет вид

$$\sigma = E^S \cdot \left(1 - \frac{T}{T_{кр}}\right), \quad (4)$$

где E^S – полная поверхностная энергия, Дж/м²; $T_{кр}$ – критическая температура, К.

Однако в формуле (4) более целесообразно использовать величину полной поверхностной энергии E^{SA} , рассчитанной в единицах энергии на моль. Площадь поверхности одного моля сферических молекул радиуса r равна

$$A = 4 \cdot \pi \cdot N_0 \cdot \left(\frac{3 \cdot M}{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot N_0}\right)^{2/3}, \quad (5)$$

где N_0 – число Авогадро, моль⁻¹; M – молярная масса, кг/кмоль; ρ – плотность, кг/м³. Поскольку на поверхности находится только около одной четверти площади сферических молекул, выражение (5) примет вид

$$A = f \cdot N_0^{1/3} \cdot V_m^{2/3}, \quad (6)$$

где $V_m = M/\rho$ – молярный объем, м³/кмоль; f – стериический фактор, величина которого близка к единице. Тогда

$$E^{SA} = A \cdot E^S. \quad (7)$$

Состояние молекулы, находящейся в поверхностном слое, можно рассматривать как промежуточное между состояниями в паровой фазе и в объеме жидкости. Согласно Скапскому, если рассматривать взаимодействие молекулы только с ближайшими соседями, то ее энергия определяется выражением

$$E^{SA} = \frac{N_0 \cdot \varepsilon}{2} \cdot (n_i - n_s), \quad (8)$$

где ε – энергия взаимодействия, Дж; n_i и n_s – число соседних молекул в объеме и на поверхности жидкости соответственно. Исходя из этого, энергия испарения должна быть равна $(\varepsilon \cdot n_i)/2$. Для плотноупакованных сфер $n_i=12$ и $n_s=9$, поэтому E^{SA} должна составлять одну четвертую энергии испарения [14]

$$E^{SA} = \frac{r}{4}, \quad (9)$$

где r – удельная теплота испарения (парообразования), Дж/моль. Однако при этом не учитывается стерический фактор f , что приводит к некоторому занижению полученного значения полной поверхностной энергии E^S .

В ходе выполнения практических расчетов обычно возникает трудность определения критической температуры для металлов. В этом случае сначала для нахождения $T_{кр}$ в уравнение (4) подставляют значения параметров σ и T , соответствующие состоянию плавления того или иного металла, а уже затем по уравнениям (7) и (9) рассчитывают значение E^S . В результате получают температурную зависимость поверхностного натяжения для нужного металла или сплава с незначительным содержанием примесей.

Для определение предельной высоты падения капли перепишем уравнение (2) в виде

$$w_k = \sqrt{\frac{6 \cdot \sigma_{ж-м}}{\rho_{жс} \cdot d_k}} \quad (10)$$

и воспользуемся алгоритмом [15] для нахождения скорости нестационарного осаждения сферической капли в поле сил тяжести, согласно которому при начальных условиях

$$\tau_k = 0, \quad w_k = 0, \quad z = 0, \quad (11)$$

где τ_k – время процесса, с; z – вертикальная координата, направленная в сторону осаждения капли, м, дифференциальное уравнение баланса сил или уравнение движения для рассматриваемой внешней задачи гидродинамики имеет вид

$$\rho_{жс} \cdot \frac{\pi \cdot d_k^3}{6} \cdot \frac{dw_k}{d\tau} + \zeta \cdot \frac{\rho_a \cdot w_k^2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} = g \cdot \rho_{жс} \cdot \frac{\pi \cdot d_k^3}{6}, \quad (12)$$

где ρ_a – плотность воздуха, кг/м³; ζ – коэффициент гидравлического сопротивления среды; g – ускорение свободного падения, м/с².

Величина коэффициента сопротивления среды зависит от режима осаждения капли и определяется для ламинарного, переходного и турбулентного режимов осаждения соответственно как

$$\zeta = \frac{24}{Re} \quad \text{при } Re < 2, \quad (13)$$

$$\zeta = \frac{18,5}{Re^{0,6}} \quad \text{при } 2 < Re < 500, \quad (14)$$

$$\zeta = 0,44 \quad \text{при } Re > 500, \quad (15)$$

где $Re = \frac{w_k \cdot d_k \cdot \rho_a}{\mu_a}$ – число подобия Рейнольдса; μ_a – динамический коэффициент вязкости воздуха, Па·с.

Согласно алгоритму [15] скорость того или иного стационарного режима осаждения теоретически достигается при $\tau_k \rightarrow \infty$. Временем же наступления того или иного стационарного режима осаждения считается время достижения скорости, составляющей 99 % от скорости стационарного режима. Решая последовательно совместно уравнения (12) и (13), (12) и (14), (12) и (15) численным методом с числом итераций $n = 10000$, получим выражения для расчета предельных времени $\tau_{к,пр}$ и скорости $w_{к,пр}$ осаждения, а также предельной высоты падения $h_{к,пр}$ капли для соответствующих режимов осаждения. Причем предельная высота падения $h_{к,пр}$ капли достигается при условии $w_k = w_{к,пр}$, где w_k определяется по уравнению (10).

В таблице приведено сравнение экспериментальных и расчетных значений предельных высот падения капель дистиллированной воды в воздухе на обогреваемую стальную пластину, изготовленную из низкоуглеродистой стали с содержанием углерода не более 1 %.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений предельных высот падения капель дистиллированной воды в воздухе: температура окружающей среды $t_{окр} = 20$ °С. Параметры поверхности нагрева: температура $t_{ст} = 120$ °С; среднее арифметическое отклонение профиля $R_a = 1,99$ мкм (параметр шероховатости); $\theta = 58,92^\circ$; $T_{кр} = 4069$ °С; $E^S = 2,8022$ Дж/м²; $\sigma_{ж-м} = 2,518$ Дж/м²

d_k	$w_{к,пр}$	$h_{к,пр}$ (эксперимент)	$h_{к,пр}$ (расчет)
мм	м/с	мм	мм
2,333	2,6000	340÷360	374
2,567	2,4787	300÷320	334
3,783	2,0418	180÷200	222

Как видно из таблицы, экспериментальные данные по предельным высотам падения капли достаточно хорошо коррелируются с соответствующими им расчетными значениями по предложенной методике, так как относительная ошибка не превышает 10 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кутателадзе, С. С. Теплообмен и волны в газодинамических системах / С. С. Кутателадзе, В. Е. Накоряков. – Новосибирск : Наука, 1984. – 301 с.
2. Скрипов, В. П. Капля на горячей плите: появление 1/ф-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.
3. Анохина, Е. В. Исследование процессов испарения и кипения жидкостей / Е. В. Анохина // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, вып. 8. – С. 32–37.
4. Abou, M. M. A numerical study of the effect of turbulence on mass transfer from a single fuel droplet evaporation in a hot convective flow / M. M. Abou, A. Sood, M. Birouk // International Journal of Thermal Sciences. – 2007. – № 46. – P. 779–789.
5. Mezhericher, M. Heat and mass transfer of single droplet/wet particle drying / M. Mezhericher, A. Levy, I. Borde // Chemical Engineering Science. – 2008. – № 63. – P. 12–23.
6. 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.-практ. конференции / Под общ. ред. чл.-кор. РАН В. П. Мешалкина. – М.; Тула : ТулГУ, 2010. – 103 с.
7. 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. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 4). – С. 40–43.
8. Интенсификация тепло- и массообмена при капельном кипении жидкости / С. Л. Рева, П. С. Васильев, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков // XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (Волгоград, 25–30 сентября 2011 г.). В 4 т. Т. 3 / РАН, РХО им. Д. И. Менделеева, Администрация Волгоградской обл. [и др.]. – Волгоград, 2011. – С. 500.
9. Методика обработки экспериментальных исследований капельного кипения / С. Л. Рева, П. С. Васильев, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. тр. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 5). – С. 42–45.
10. Рева, С. Л. Экспериментальное исследование процесса капельного кипения жидкостей / С. Л. Рева, П. С. Васильев // Всероссийский конкурс науч.-исслед. работ студентов и аспирантов в области химических наук и наук о материалах: сб. аннотаций науч. работ финалистов конкурса. Ч. 1 / ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический ун-т (КНИТУ)». – Казань, 2012. – С. 48–50.
11. Критериальная зависимость для испарения одиночной капли жидкости на поверхности нагрева / П. С. Васильев, С. Л. Рева, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. тр. № 10 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 14). – С. 13–18.
12. Васильев, П. С. Экспериментальная установка для исследования капельного кипения растворов и суспензий на обогреваемом вращающемся диске / П. С. Васильев, С. Л. Рева, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (104) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 6). – С. 22–24.
13. Сумм, Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. Р. Горюнов. – М. : Химия, 1976. – 231 с.
14. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. – М. : Мир, 1979. – 568 с.
15. Голованчиков, А. Б. Моделирование нестационарного падения сферической капли в поле сил тяжести / А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов, Н. А. Меренцов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. тр. № 4 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 13). – С. 8–12.

УДК 532.542

Л. А. Ильина, А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Е. В. Васильева

СНИЖЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ДВУХСЛОЙНОМ КОЛЬЦЕВОМ ТЕЧЕНИИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

Волгоградский государственный технический университет

Рассмотрены энергетические характеристики кольцевого вращательно-осевого течения двух несмешивающихся жидкостей в трубе. Проведен сравнительный анализ двухслойного кольцевого течения и промышленной перекачки нефти экспериментальным и расчетным методом.

Ключевые слова: маловязкий пристенный слой, нефтетранспорт, устойчивое течение, пристенный кольцевой слой, течение в трубе, эмульсия, двухслойное течение

L. A. Iilina, A. B. Golovanchicov, A. V. Ilin, E. V. Vasileva

REDUCED HYDRAULIC RESISTANCE IN TWO-LAYER FLUID VISCOUS FLOW IN THE PIPELINE

Volgograd State Technical University

The energy characteristics of axial Rotary-ring of two immiscible liquids in pipe. Comparative analysis of two-layered ring currents and industrial pumping oil to experimental and calculation method.

Keywords: low-viscosity wall layer, oiltransport, stability flow, wall annular layer of, pipe flow, emulsion, two-layer flow.

Цель работы: разработка способа снижения гидравлического сопротивления и оценка эффективности предложенного способа расчетным и экспериментальными методами.

В настоящее время добываются значительные объемы нефтей, обладающих высокой вязкостью при обычных температурах или содержащие большое количество парафина и вследствие этого застывающие при высоких температурах. Перекачка таких нефтей по трубопроводам обычным способом затруднена. Поэтому для их транспортировки в настоящее время, применяют специальные методы:

- перекачку с разбавителями;
- перекачку термообработанных нефтей;
- перекачку нефтей с присадками;
- перекачку предварительно подогретых нефтей;
- гидротранспорт высоковязких нефтей.

На конференции Канадской нефтяной ассоциации в Калгари в 1988 году компанией «Кэнэдиэн Оксидентал Петролеум» были показаны преимущества гидротранспорта по сравнению с другими способами транспортирования высоковязких нефтей, предусматривающими использование углеродистых разбавителей, ПАВ или необходимость нагревания всего объема для уменьшения вязкости перекачиваемых сред [1].

В нашей стране и за рубежом предложен ряд способов и устройств снижения гидравлического сопротивления трубопроводов, среди которых одним из наиболее эффективных является перекачка высоковязких жидкостей в кольце маловязкой жидкости [2].

Основной проблемой такого кольцевого течения двух несмешивающихся жидкостей является неустойчивость границы раздела фаз, перемешивание между собой обеих жидкостей, превращающееся со временем в однослойное осевое течение эмульсии или пены, что приводит к значительному возрастанию гидравлического сопротивления.

Чтобы создать устойчивое кольцевое течение маловязкой жидкости в пристенном слое, можно поступить следующим образом: выбрать в качестве маловязкой среды жидкость, плотность которой выше плотности основной перекачиваемой жидкости.

В частности, для нефтей, высоковязких масел и нефтепродуктов такой жидкостью может быть вода, которая имеет плотность большую, чем плотность нефти или жидких продуктов ее переработки, а также практически в ней нерас-

Было предложено техническое решение, позволяющее создать устойчивый коаксиальный концентрический слой воды у внутренней поверхности трубы за участками, где происходит изменение скоростей потоков по величине или направлению [3].

Техническим результатом является уменьшение гидравлического сопротивления и энергозатрат при перемещении вязких нефтей и нефтепродуктов по трубопроводу за счет создания вращательного движения потоков за участками, где происходит изменение их скоростей по величине или направлению.

Технический результат достигается тем, что в способе перемещения вязких нефтей и нефтепродуктов формирование коаксиального концентрического слоя воды у внутренней поверхности трубы происходит путем добавления в нефть воды и придания потокам нефти и воды вращательного движения, при этом вращательное движение осуществляют лопастными мешалками, установленными за участками, где происходит изменение скоростей потоков по величине или направлению с угловой скоростью, определяемой по формуле:

$$\omega = \sqrt{(1,4 \div 2,6) \frac{g}{R}}, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения лопастной мешалки, рад/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; R – радиус трубопровода, м.

Величина угловой скорости определялась с помощью программы численных расчетов *труба.for* для расчета на ЭВМ, в дальнейшем расчетные величины были проверены экспериментально. Расход нефти во всех опытах был 4 л/с, расход воды 1,1 л/с.

Приведение потоков воды и нефти или нефтепродуктов во вращательное движение лопастными мешалками за участками, где происходит изменение скоростей потоков по величине или направлению (за так называемыми местными сопротивлениями) позволяет восстановить коаксиальный концентрический слой воды у внутренней поверхности трубы, который разрушается на поворотах, в компенсаторах, вентиллях, кранах, задвижках и других местных сопротивлениях. В центробежном поле при вращении потока тяжелые капли и слои воды, оказавшиеся за местными сопротивлениями внутри потока, отбрасываются к внутренней поверхности трубы, создавая устойчивый коаксиальный концентрический слой воды.

Применение лопастных мешалок позволяет помимо создания вращательного движения потока сообщать ему дополнительное давление для осевого движения по трубопроводу. Были проведены экспериментальные исследования по перемещению нефти в трубопроводе с внутренним диаметром 100 мм на участке длиной $l = 10$ м с коленом на входе под углом 90° , в котором была установлена лопастная мешалка с двумя лопатками диаметром 80 мм и шириной лопастей 14 мм. Вал лопастной мешалки был соединен с приводом, позволяющим варьировать число оборотов мешалки.

На рис. 1 представлена схема установки по предложенному способу перемещения вязких нефтей и нефтепродуктов.

Как видно из таблицы, предложенный способ перемещения нефти в трубе позволяет, по сравнению с промышленным способом (когда нефть заполняет весь трубопровод и не вращается), уменьшать гидравлическое сопротивление в 1,78–2,33 раза. Энергозатраты на вращение мешалки составляют не более 10 % от энергозатрат на перемещение жидкости по трубопроводу. Общие энергозатраты, по сравнению с промышленным способом, перекачки снизились в 1,4–1,53 раза.

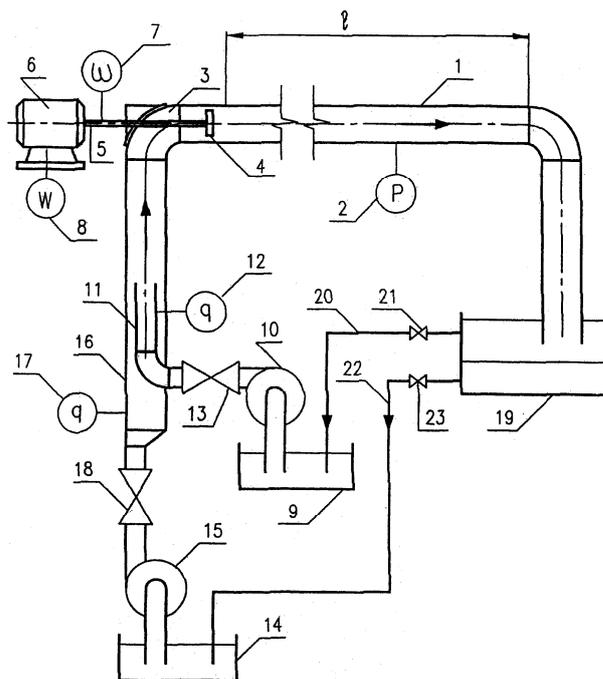


Рис. 1. Способ перемещения вязких нефтей и нефтепродуктов с пристенным слоем воды:

1 – трубопровод; 2 – U-образный дифманометр; 3 – колено; 4 – лопастная мешалка; 5 – вал; 6 – привод; 7 – строботахометр; 8 – ваттметр; 9 – емкость для нефти; 10 – всасывающий патрубок центробежного насоса; 11 – нагнетательный патрубок; 12 – ротаметр; 13 – вентиль; 14 – емкость для воды; 15 – всасывающий патрубок центробежного насоса; 16 – нагнетательный патрубок; 17 – ротаметр; 18 – вентиль; 19 – емкость-отстойник; 20, 22 – трубопровод; 21, 23 – вентили

Результаты экспериментальных исследований по перемещению нефти в трубопроводе

№ опыта	Способ перемещения	Гидравлическое сопротивление, Н/м ²	Энергозатраты, Вт		
			линейные	на вращение мешалки	общие
Предлагаемый при числе оборотов лопастной мешалки, рад/с					
1	$\omega = 15,3$ (меньше нижнего предела, рассчитываемого по формуле 1)	1024	5,24	0,13	5,37
2	$\omega = 16,6$ (равна нижнему пределу, рассчитываемому по формуле 1)	656	3,44	0,15	3,59
3	$\omega = 19,8$ (среднее значение между верхним и нижним значениями угловой скорости, рассчитываемых по формуле 1)	504	2,56	0,22	2,78
4	$\omega = 22,6$ (равна верхнему пределу, рассчитываемому по формуле 1)	608	3,1	0,28	3,38
5	$\omega = 23,4$ (выше верхнего предела, рассчитываемого по формуле 1)	988	5,04	0,31	5,35
6	Промышленный (нефть заполняет весь трубопровод)	1174	6,0	–	6,0

Применение лопастных мешалок позволяет создавать вращательное движение потока, в отличие от пропеллерных и турбинных мешалок, которые создают соответственно осевое и радиальное течение потока и способствуют перемешиванию воды и нефти.

Таким образом, предложенный способ перемещения вязких жидкостей и нефтей позволяет за счет создания центробежной силы при вращении потоков нефти и воды лопастными мешалками за участками, где происходит изменение скоростей потоков по величине или на-

правлению, восстановить разрушенное коаксиальное концентрическое кольцо воды у внутренней поверхности трубы, снизить гидравлическое сопротивление трубопровода и уменьшить энергозатраты.

Результаты полученных расчетов представлены на рис. 2 и 3 в виде диаграмм изменения гидравлического сопротивления и энергозатрат при транспортировании 1 тонны нефти с маловязким пограничным слоем.

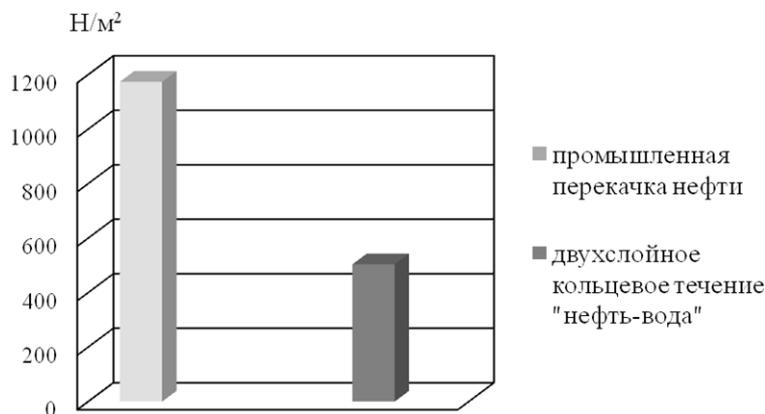


Рис. 2. Изменение гидравлического сопротивления при транспортировке 1 т нефти с маловязким пограничным слоем

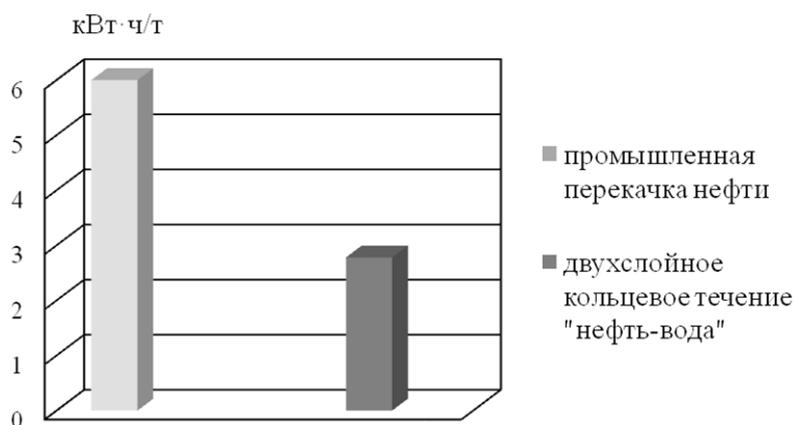


Рис. 3. Изменение энергозатрат при транспортировке 1 т нефти с маловязким пограничным слоем кВт·ч/т

Полученные расчетные и экспериментальные данные, позволяют сделать вывод о преимуществах транспортирования высоковязких нефтей в кольце маловязкой жидкости (воды), так как применение в качестве пристенной жидкости воды позволяет не только снизить гидравлическое сопротивление в 3-5 раз, но и значительно снизить энергозатраты, в том числе необходимые для создания и поддержания кольцевого пристенного слоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мастобаев, Б. Н.* Химические средства и технологии в трубопроводном транспорте нефти / Б. Н. Мастобаев, А. М. Шаммазов, Э. М. Мовсумзаде. – М. : Химия, 2002. – 296 с.
2. *Голованчиков, А. Б.* Теоретические основы течения жидкостей в трубопроводе с маловязким пограничным слоем / А. Б. Голованчиков, А. В. Ильин, Л. А. Ильина / Волгоград. гос. техн. ун-т, – Волгоград, 2007. – 108 с.
3. Пат. 2262035 Российская Федерация, МПК7 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; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. – 2004109505/06; заявл. 29.03.04; опубл. 10.10.05, Бюл. № 28.

УДК 531.391.1:532.5.011

С. В. Лапшина, Н. Ю. Бердникова

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

В работе рассматриваются методы неразрушающего контроля насосно-компрессорного оборудования.

Ключевые слова: неразрушающие методы контроля, мониторинг оборудования, виды износа, состояние оборудования, вибродиагностика, вибрация.

S. V. Lapshina, N. Y. Berdnikova

METHODS OF VIBRATION DIAGNOSIS FOR CONTROL OF THE STATE OF CHEMICAL INDUSTRY EQUIPMENT

Volzhsy polytechnic institute (branch) VolgSTU

In this article examines methods of nondestructive testing of the compressor equipment.

Keywords: non-destructive testing, monitoring equipment, types of wear and tear, condition of equipment, vibration analysis, vibration.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что внедрение средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования оборудования в промышленности. Назначение диагностики – выявление и предупреждение отказов и неисправностей, поддержание эксплуатационных показателей в установленных пределах, прогнозирование состояния в целях полного использования доремонтного и межремонтного ресурса [1].

Эффективность эксплуатации машин и механизмов во многом определяется совершенством методов технического обслуживания и ремонта.

Традиционный планово-предупредительный метод обслуживания и ремонта оборудования не обеспечивает эффективное поддержание оборудования в исправном состоянии в период эксплуатации. Использование диагностических методов контроля обеспечивает соответствие между техническим состоянием и объемом работ по техническому обслуживанию и ремонту.

Основным принципом технического обслуживания и ремонта, основанном на техническом диагностировании, является принцип предупреждения отказов в работе оборудования при условии обеспечения максимально возможной его наработки.

Развитие дефекта в работающей машине с вращающимися частями определяется методами виброакустической диагностики.

Работы по проведению вибромониторинга оборудования, позволяют отслеживать широкий спектр механических (дефекты деталей и узлов агрегатов) электрических (дефекты

электрических узлов и деталей двигателей), аэродинамических и гидравлических (кавитация) дефектов диагностируемого оборудования, в процессе эксплуатации, а также выявлять дефекты при проведении ремонтных работ.

Неразрушающий контроль (НК) – контроль надежности и основных рабочих свойств и параметров объекта или отдельных его элементов/узлов, не требующий выведение объекта из работы либо его демонтажа.

Для бесперебойной работы насосно-компрессорного оборудования занимающего весомую долю из общего числа аппаратов химической и нефтяной промышленности. Требуется регулярное проведение мониторинга оборудования [2].

Из всеобщего многообразия методов диагностики и неразрушающего контроля применяемых для мониторинга насосно-компрессорного оборудования используется вибродиагностика.

Вибродиагностика – это способ исследования роторного оборудования и механизмов (генераторы, турбины, насосы, вентиляторы, двигатели и т. д.) на предмет выявления повреждений, вызывающих вибрацию.

Практически мгновенная реакция вибросигнала на изменение состояния оборудования является незаменимым качеством в аварийных ситуациях, когда определяющим фактором является скорость постановки диагноза и принятия решения.

Методы виброакустической диагностики позволяют не только выявить уже развившуюся неисправность и предотвратить катастрофические разрушения, но и обнаружить развиваю-

щийся дефект на очень ранней стадии, что дает возможность прогнозировать аварийную ситуацию и обоснованно планировать сроки и объем ремонта оборудования.

Поиск диагностических признаков технического состояния эксплуатируемого оборудования – важнейшая задача вибромониторинга и вибродиагностики. От способа построения системы диагностических признаков и конкретизации перечня этих признаков существенно зависит успех последующей классификации технических состояний объекта [3].

В большинстве ситуаций распознавание технического состояния оборудования осуществляется в условиях ограниченной информации при большом уровне помех, источником которых являются: несоблюдение постоянства внешних условий, неполнота описания классов состояний, неопределенность границ между классами состояний и соответствующих им классов диагностических признаков.

Совокупность последовательных действий при постановке диагноза называется алгоритмом диагностирования. Алгоритм диагностирования опирается на диагностическую модель, которая устанавливает связь между состояниями агрегата и их отображениями в пространстве диагностических признаков. Диагностическая модель процессов возбуждения и распространения колебаний в агрегате в ряде случаев помогает сформировать систему характерных диагностических признаков [3, 4].

Если к дефекту агрегата отнесена его выходящая за допустимые пределы виброактивность, то необходимым этапом диагностического исследования является локализация источников повышенного уровня колебательной энергии.

При этом различаются два возможных варианта: либо источники вибрации независимы, либо статистически связаны. Необходимость разделения влияния коррелированных источников намного усложняет процедуру диагностирования.

Существуют два вида систем диагностирования: тестовая и функциональная. Тестовое диагностирование заключается в подаче на механизм специально организуемых тестовых воздействий. Функциональное диагностирование в качестве входных воздействий использует рабочие воздействия, предусмотренные алгоритмом функционирования механизма [5].

Особенность методов диагностирования дефектов, особенно на ранней стадии развития,

заключается в использовании разнообразных приемов повышения чувствительности компонентов вибросигнала к изменению технического состояния механизма, поскольку на стадии зарождения дефектов «о многих случаях помеха значительно превышает уровень полезного сигнала, содержащего информацию об изменении технического состояния».

Методы и приемы, облегчающие процесс диагностирования сложных систем, сводятся к следующим операциям: агрегат разбивается на подсистемы, которые в свою очередь разбиваются на узлы, связанные между собой иерархической структурой. Разбиение агрегата на узлы способствует упрощению процедуры поиска возможных неисправностей, приводящих к отказу. Для получения достоверной информации о состоянии оборудования используются различные виды диагностических обследований механизма.

Статистический анализ показателей надежности и затрат на восстановление узлов позволяет получить характеристику и адрес наиболее слабого звена. Кроме указанных выше затрат, объект диагностирования характеризуется непрерывными затратами на поддержание его работоспособности.

Вибродиагностика оборудования есть не что иное, как распознавание классов технических состояний агрегата по совокупности его вибрационных характеристик. Эта проблема может быть решена как методами статистической теории распознавания при наличии большого объема информации, так и детерминистскими методами, более кратко описывающими наиболее существенные стороны явления [4].

Рациональный выбор диагностических признаков, т. е. соответствующим образом представленных характеристик колебательных процессов, чувствительных к изменению технического состояния машин и механизмов, в значительной мере определяет успех диагностирования. Казалось бы, чем больше число признаков, тем полнее они характеризуют объект диагностирования и тем надежнее распознавание. Но это справедливо лишь в том случае, когда признаки независимы. Очевидно, что наиболее полезными признаками являются те, которые инвариантны (нечувствительны) к изменению внутри класса и резко меняются при переходе от одного класса к другому. Каждый из признаков, характеризующих состояние механизма, при измерении может получать случайные значения как в результате погрешностей измере-

ния, так и в результате разброса параметров состояний, принадлежащих одному классу.

Наиболее информативными являются такие характеристики виброакустического сигнала, которые мало меняются от эксперимента к эксперименту при задании одних и тех же параметров технического состояния, т. е. имеют наименьшую дисперсию при условии, что средние значения этих признаков для разных дефектных состояний достаточно отличаются друг от друга, иначе говоря, дисперсия по всей совокупности состояний велика.

При выборе диагностических признаков необходимо учитывать ряд требований, вытекающих из задачи оптимизации диагностической системы. Прежде всего, признаки должны быть однозначно связаны с состоянием объекта и образовывать достаточную систему для обеспечения достоверного диагноза. Предпочтительны признаки, которые позволяют обнаружить дефекты на возможно более ранних стадиях их развития. Признаки должны обеспечивать требуемую глубину диагноза, не усложняя процедуры и не увеличивая стоимости средств диагностирования.

В виброакустической диагностике часто прибегают к выбору таких признаков состояний, каждый из которых характеризует свой образ (характерные признаки), а минимизация описания объекта производится, исходя из физических соображений.

Выбор информативных диагностических признаков тесно связан со структурой виброакустического сигнала агрегата. Именно поэтому в вибродиагностике важнейшая роль отводится модели формированию и изменения виброакустического сигнала при появлении и развитии дефектов.

Больше других разработаны детерминированные модели, в которых колебательные процессы представляются периодическими функциями, связанными с вращением или периодическим соударением элементов узлов механизма. Информативными диагностическими признаками здесь являются амплитуда, продолжительность и момент появления импульса, а также частота, амплитуда и фаза гармонического сигнала. Модели с детерминированными сигналами оправдали себя и дают хорошие практические результаты для сравнительно низкооборотных (1500÷15000 об/мин) агрегатов с малым количеством источников возбуждения колебаний.

Наиболее употребительной характеристикой виброакустического сигнала является энергетический спектр – поставщик информации об амплитудно-частотных изменениях в сигнале при появлении неисправности.

Намного сложнее обнаружить зарождающийся дефект высокооборотного (более 15000 об/мин) агрегата с большим числом взаимосвязанных источников возбуждения. Виброакустические сигналы в таких объектах, как правило, являются случайными процессами, а информативными признаками служат довольно сложные характеристики сигналов (корреляционные функции, функции распределения вероятностей, моментные характеристики и др.), получение которых доступно иногда только при использовании многоканальных виброанализаторов.

Для выявления характерных диагностических признаков виброакустический процесс подвергается предварительной спектральной обработке, позволяющей выявить зоны и характер наибольших изменений сигнала в частотной области. На основании спектрального анализа выбирается способ извлечения из сигнала информативного компонента путем подавления помехи за счет фильтрации, интегрирования, детектирования, усреднения и т. п.

В настоящее время большинство предприятий переходит на ремонт по техническому состоянию, что в свою очередь позволяет увеличить межремонтные пробеги и сократить время простоев в ремонте. В связи с этим в техническом обслуживании на первое место выходит регулярный мониторинг оборудования. Проведения вибродиагностики позволяет контролировать состояние оборудования, своевременно отмечать возникшие неполадки и оперативно устранять дефекты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль / В. В. Клюев // Вибродиагностика. Т. 7, кн. 2. – 2005. – 656 с.
2. Балицкий, Ф. Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф. Я. Балицкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова, Е. И. Хомяков. – М. : Наука. 1994. – 119 с.
3. Генкин, М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.
4. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – М. : Наука. 1996. – 306 с.
5. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – СПб., 2000. – 158 с.

УДК 661.183.2

А. В. Кузнецов, А. С. Трусов, В. В. Антонов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДсорбЦИОННОЙ ЕМКОСТИ АДсорбЕНТА АР-В

Волгоградский государственный технический университет

Приведены результаты экспериментальных исследований по адсорбции активным углем метилоранжа из водного раствора. Описаны методика эксперимента, особенностью которого является использование фотокolorиметра для определения концентраций метилоранжа в воде. Показано, что при его малых концентрациях равновесная зависимость не прямолинейна и изотерма равновесия описывается уравнением Ленгмюра с относительными ошибками до 10 %.

Ключевые слова: адсорбция, метилоранж, активный уголь, изотерма равновесия, уравнение Ленгмюра.

А. V. Kuznetsov, A. S. Trusov, V. V. Antonov

EXPERIMENTAL STUDY ADSORPTION CAPACITY OF THE ADSORBENT AR-V

Volgograd State Technical University

The results of experimental studies on the adsorption of activated carbon from an aqueous solution of methyl orange. Describes the experimental procedure, a feature of which is the use of photocolormeter to determine the concentrations of methyl orange in water. It is shown that at low concentrations, it is not linear dependence of the equilibrium isotherm and the equilibrium is described by the Langmuir equation with relative errors up to 10 %.

Keywords: adsorption, methyl orange, active carbon, equilibrium isotherm, Langmuir equation.

Известны методы определения равновесных зависимостей процессов адсорбции для различных компонентов при их поглощении из газов и жидкостей и методы интенсификации этого массообменного процесса [1–6]. Проблемой этих исследований особенно при адсорбции молекул растворенных веществ из жидкостей является определение равновесных концентраций перераспределяемого компонента в адсорбенте и растворе.

Поэтому в данной работе для упрощения измерения концентраций растворенных молекул в растворе, использованы молекулы метилоранжа, изменяющие окраску раствора, концентрация которых влияет на его светопропускание.

Целью экспериментальных исследований являлось определение изотермы адсорбции метилоранжа из водного раствора на активном угле марки АР-В.

Использованное оборудование и реактивы:

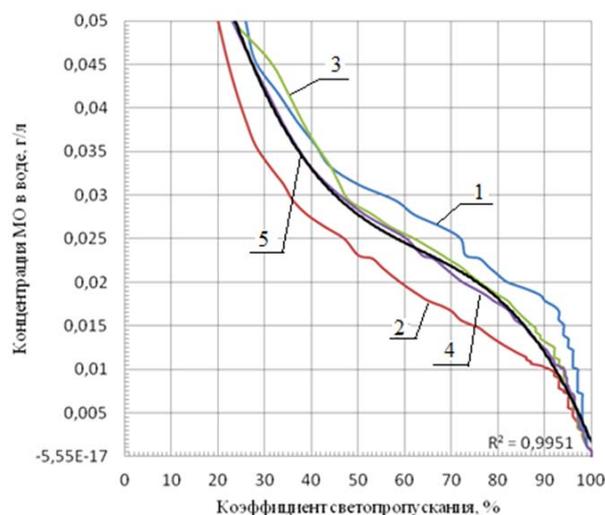
1. Электрофотокolorиметр КФК-2.
2. Весы аналитические ВЛР-200.
3. Активированный уголь марки АР-В.
4. Метилоранжевый.
5. Вода дистиллированная.

Методика проведения эксперимента:

1. Приготавливались в мерных колбах водные растворы МО разбавлением исходного раствора объемами от 10 мл. На основании степени разбавления рассчитывались концентрации МО в приготовленных растворах.

2. Для самого концентрированного раствора выбирались условия фотометрирования: светофильтр 670 нм; типа кюветы (ее ширины) – 50; чувствительность – 2. При выбранных условиях фотометрирования определялись оптические плотности стандартных водных растворов МО и строился калибровочный график (D от C (МО)). Опыты повторялись три раза и рассчитывалось среднее значение светопропускания.

3. На основании полученных данных строился график зависимости концентрации МО в воде от среднего значения коэффициента светопропускания (рис. 1).



1 - опыт 1; 2 - опыт 2; 3 - опыт 3; 4 - среднее значение; 5 - кривая по методу наименьших квадратов.

Рис. 1. Зависимость концентрации МО в воде от коэффициента светопропускания

4. Исследовалась адсорбция МО из стандартных водных растворов на активированном угле (объем растворов – 25 мл, масса активированного угля – 100 мг, время адсорбции – 90 мин). Растворы фотометрировались и определялась концентрация МО в растворе после адсорбции по калибровочному графику.

5. Рассчитывалась удельная адсорбция, строилась изотерма адсорбции, определялась на ее основе полная обменная емкость МО на активированном угле.

6. Для построения изотермы адсорбции метилоранжа (МО) на активном угле марки AP-B, применялись водные растворы МО с концентраций: 0,05; 0,045; 0,04; 0,035; 0,03; 0,025;

0,02; 0,015; 0,01 и 0,005 г/л.

7. Навески угля AP-B массой 0,1 г помещались на 1,5 ч в растворы МО разной концентрации объемом 25 мл.

8. После установления равновесия определялись конечные концентрации растворов по рис. 1. Адсорбционная емкость угля рассчитывалась по формуле (1)

$$a^* = \frac{c_0 - c_p}{m} \quad (1)$$

где c_0 – начальная концентрация МО в воде, г/л; c_p – равновесная концентрация МО в воде, г/л; m – масса активного угля, г.

Полученные данные представлены в таблице.

Результаты эксперимента по зависимости светопропускания от концентрации МО в растворе

Начальная концентрация раствора, г/л	Коэффициент светопропускания после адсорбции, %	Конечная концентрация раствора, г/л	Количество МО поглощенного углем, кг/кг
0,05	25	0,0475	0,025
0,045	29	0,043	0,020
0,04	33	0,0385	0,015
0,035	39	0,0335	0,015
0,03	47	0,029	0,010
0,025	62	0,024	0,010
0,02	78	0,019	0,010
0,015	87	0,0143	0,007
0,01	93	0,0092	0,007
0,005	97	0,0045	0,005
0,002	99	0,002	0

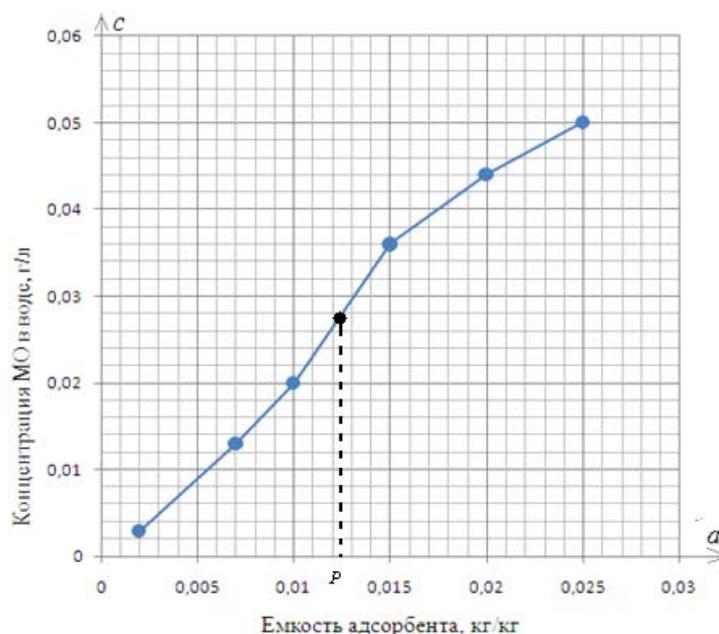


Рис. 2. График экспериментальной кривой равновесия при малых концентрациях МО в растворе

По результатам экспериментов построен график зависимости начальной концентрации МО в воде от адсорбционной емкости (рис. 2).

При обработке экспериментальных данных методом наименьших относительных квадратов получено уравнение Ленгмюра [7].

$$a = \frac{0,67 \cdot c}{1 + 8,81 \cdot c'} \quad (2)$$

При этом значение полной обменной емкости $A_0 = 0,0762$ кг/кг.

График уравнения Ленгмюра (2) приведен на рис. 3.

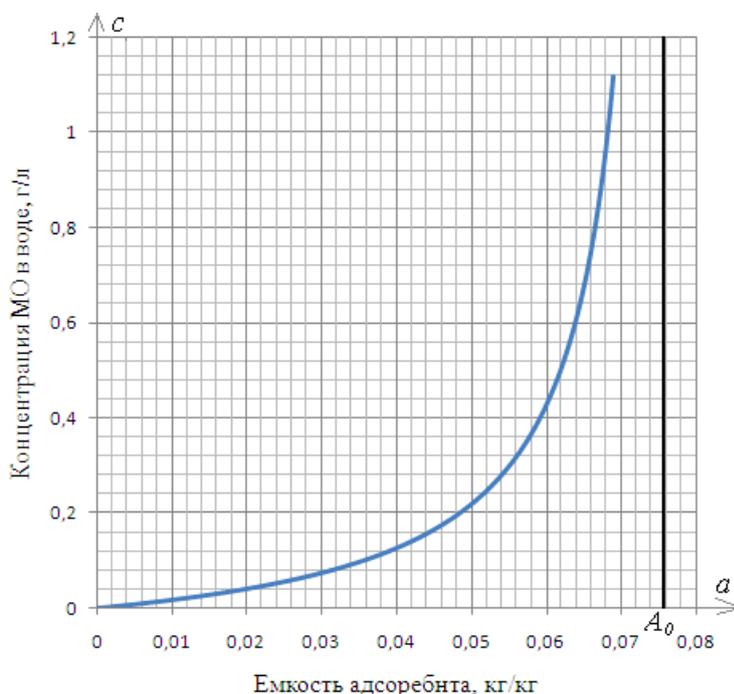


Рис. 3. Изотерма адсорбции МО на активном угле марки АР-В, соответствующая уравнению Ленгмюра

Выводы по эксперименту: график изотермы (рис. 3) соответствует уравнению Ленгмюра (2) [7]. При малых концентрациях метилоранжа в воде, ее особенностью является выпуклые линии на начальном участке, хотя обычно при малых концентрациях графики изотерм адсорбции представляют либо прямые либо вогнутые линии. Можно предположить, что при средних концентрациях метилоранжа в воде после точки перегиба P (рис. 2) изотерма адсорбции изображается кривой с величиной полной обменной емкости A_0 (рис. 3).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние давления на электроадсорбцию / А. Б. Голованчиков, А. В. Кузнецов, М. Ю. Ефремов, Н. А. Дулькина // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2011. – № 24. – С. 81–90.
2. Интенсификация процесса адсорбции при ионизации газового потока / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, Н. А. Дулькина, А. В. Кузнецов // Экологические системы и приборы. – 2011. – № 11. – С. 12–16.

3. Моделирование процессов адсорбции и электроадсорбции / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, Н. А. Дулькина, А. В. Кузнецов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 11). – С. 14–18.

4. Влияние давления на процесс осушки воздуха в неподвижном слое силикагеля / А. Б. Голованчиков, А. В. Кузнецов, М. Ю. Ефремов, А. С. Трусов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 5). – С. 96–100.

5. Моделирование двухкомпонентного процесса адсорбции в колонне непрерывного действия / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, Н. А. Дулькина, А. В. Кузнецов // Химическая промышленность сегодня. – 2012. – № 5. – С. 34–39.

6. Голованчиков, А. Б. Интенсификация массообменных процессов в электрическом поле : монография / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, Н. А. Дулькина / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 154 с.

7. Серпионова, Е. Н. Промышленная адсорбция газов и паров : учеб. пособие / Е. Н. Серпионова. – М. : Высшая школа, 1969. – 416 с.

УДК 622.279.5:66.078

*О. А. Залипаева**, *А. А. Коберник**, *Д. А. Коберник***

МОБИЛЬНАЯ МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ НА РОССИЙСКОМ АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

**Волгоградский государственный технический университет*

*** ООО «ЮгЭнергоИнжиниринг»*

Рассмотрены проблемы разработки месторождений природного газа на российском арктическом шельфе. Описаны новые мобильные модульные устройства для сжижения природного газа, проведен анализ устройств и перспективы их применения на морских платформах.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, смешанный хладагент, одноконтурное охлаждение, клапан Джоуля–Томсона.

*O. A. Zalipaeva**, *A. A. Kobernik**, *D. A. Kobernik***

MOBILE MODULAR SYSTEM LIQUEFYING NATURAL GAS AND PROSPECTS OF THE RUSSIAN ARCTIC SHELF

**Volgograd State Technical University*

*** “SouthEnergyEngineering” LLC*

Considered problems of the development of natural gas fields on the Russian Arctic shelf. Describes the new mobile modular apparatus for liquefying natural gas analysis devices for application prospects on the offshore platforms.

Keywords: liquefied natural gas, mixed refrigerant, single-loop cooling, Joule–Thomson valve.

Мировой спрос на сжиженный природный газ (СПГ) за период последних сорок лет увеличился более чем в сто раз. Предложение СПГ увеличивается вследствие развития производства сжиженного природного газа в таких странах, как Соединенные Штаты Америки и Австралия. В России же по-прежнему сжижение природного газа в крупных масштабах производится лишь в рамках СПГ-проекта «Сахалин-2», мощности которого недостаточны.

Запасы природного газа на арктическом шельфе России составляют более десяти триллионов кубометров. Для разработки месторождений в регионе со слабо развитой инфраструктурой и суровыми климатическими условиями требуется применять недорогие, надежные и компактные технологии, такие как модульные системы сжижения природного газа.

Целью работы является предложение применения конкретной мобильной модульной системы сжижения природного газа концерна «SHELL» с системой одноконтурного охлаждения смешанным хладагентом (SMR), идеально подходящей для использования на российском арктическом шельфе.

Основные проблемы, возникающие при размещении небольших заводов по сжижению природного газа на морских платформах, заключаются в стоимости всей системы и занимаемой ее площади. Для подготовки природного газа к транспортировке морскими газовозами

в настоящее время применяют следующие методы:

- одноконтурное охлаждение смешанным хладагентом (SMR);
- двухконтурное охлаждение смешанным хладагентом (DMR);
- охлаждение смешанным хладагентом с предохлаждением пропаном;
- каскадное охлаждение;
- охлаждение с использованием азота.

Последние четыре метода имеют ряд недостатков, не позволяющих их применять на морских платформах: высокая стоимость и сложность реализации на ограниченной площади при лимитированном весе системы, излишняя производительность. Небольшие системы сжижения природного газа, построенные по модульному принципу, возможно создать с применением процесса одноконтурного охлаждения смешанным хладагентом.

В настоящее время процесс SMR считается одним из самых простых и основных в отрасли. Смешанный хладагент, используемый в этом процессе, содержит метан, этан, пропан, пентан и азот. Смешанный хладагент сжимается и проходит через основной теплообменник, где он конденсируется. Затем он расширяется при прохождении через клапан Джоуля–Томсона и испаряется при возвращении в противотоке через теплообменник обратно в компрессор. Простейшая схема SMR приведена на рис. 1.

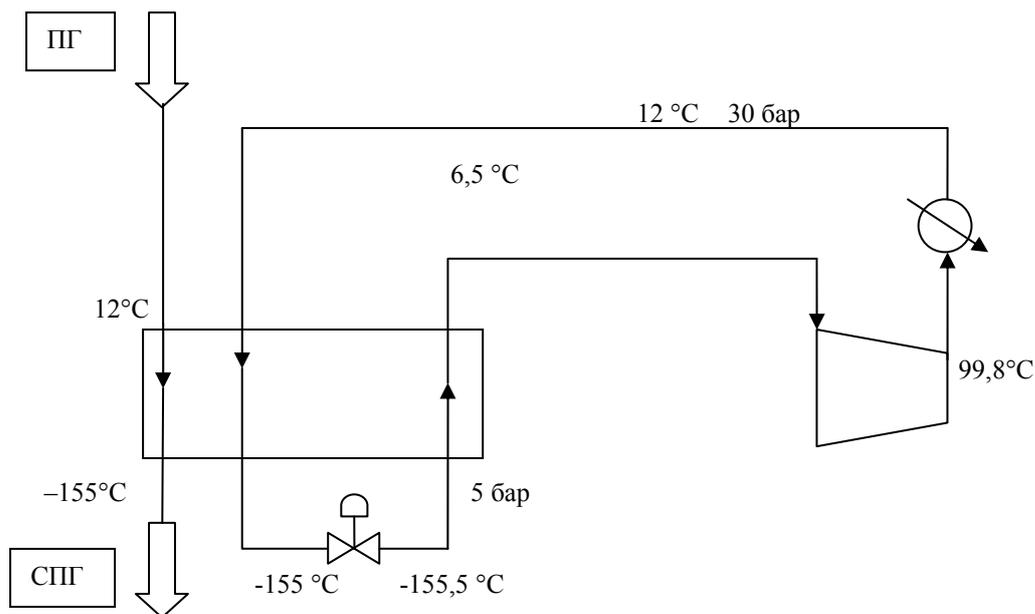


Рис. 1. Схема одноконтурного охлаждения смешанным хладагентом (SMR)

Процесс SMR очень прост и требует небольшого количества оборудования, его возможности ограничены до 1,2 млн тонн в год, но процесс позволяет значительно экономить капитальные затраты.

На рис. 2 показаны графики, описывающие влияние температуры природного газа на входе для процесса SMR при различных давлениях (20, 40, 60, 80, 100, 120 и 140 бар) на потребление энергии. Из графиков видно, что, когда температура природного газа при различных значе-

ниях давления его подачи уменьшается от $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, то потребляемая мощность уменьшается, и, когда она увеличивается от $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, то увеличивается и энергопотребление. На графиках показано, что, когда природный газ подается при более высоких давлениях, энергопотребление ниже, независимо от температуры подачи. Например, природный газ, подаваемый на (15 $^{\circ}\text{C}$, 90 бар) и (15 $^{\circ}\text{C}$, 60 бар) приводит к потреблению энергии соответственно в 41,40 и 46,42 МВт, что составляет разницу 10,81 %.

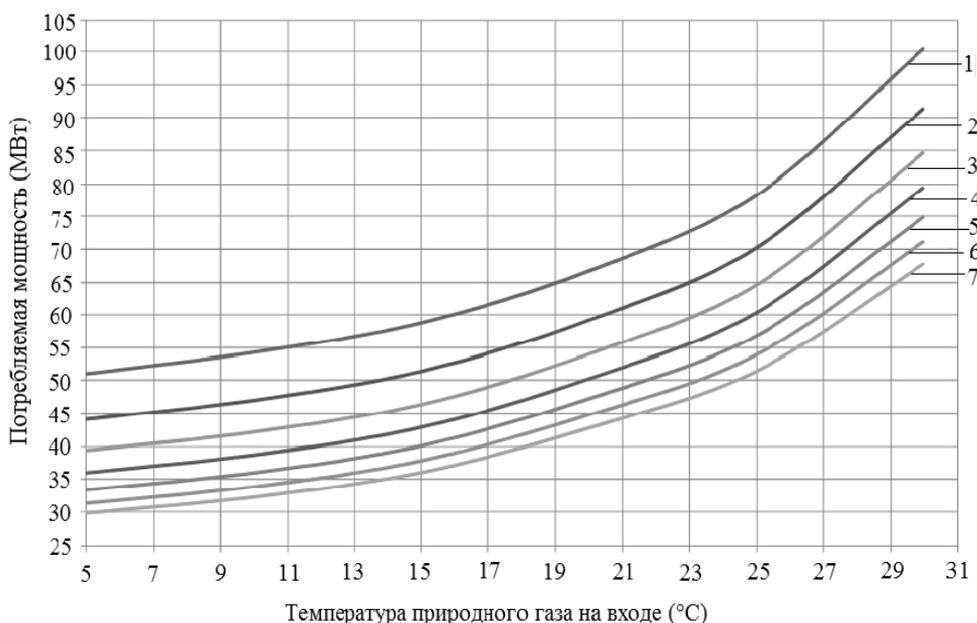


Рис. 2. Зависимость температуры природного газа на входе от потребляемой мощности при различных давлениях природного газа (Процесс SMR):
 1 – 20 бар, 2 – 40 бар, 3 – 60 бар, 4 – 80 бар, 5 – 100 бар, 6 – 120 бар, 7 – 140 бар

На рис. 3 представлен график влияния давления природного газа на удельную мощность при подаче природного газа в процессе SMR при температуре 15 °С. Как видно из графика, уменьшение давления природного газа от 60 до 30 бар увеличивает потребляемую мощность от 0,387 до 0,452 кВт/кг-СПГ что составляет 16,80 %.

При увеличении давления природного газа от 60 до 90 бар удельная мощность уменьшается от 0,387 до 0,348 кВтч /кг-СПГ, что составляет 10,08 %. Удельная мощность увеличивается, когда давление в сети уменьшается, следовательно по мере увеличения давления подачи удельная мощность будет уменьшаться.

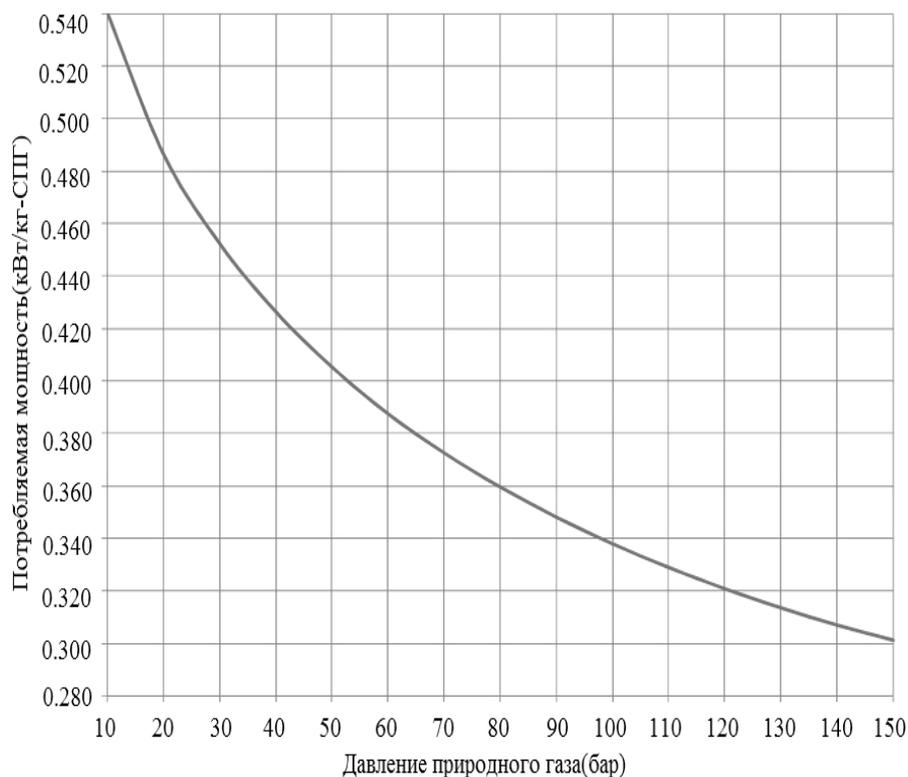


Рис. 3. Зависимость давления природного газа от потребляемой мощности при температуре 15 °С (Процесс SMR)

Концерном SHELL на принципе одноконтурного охлаждения смешанным хладагентом разработана и успешно применяется на мировых рынках мобильная модульная система

сжижения природного газа «SHELL MMLS». В таблице приведены краткие характеристики системы «SHELL MMLS».

Характеристики системы «SHELL MMLS»

Производство сжиженного природного газа (СПГ)	0,10–0,25 млн т год (сырьевой газ 424 800–1 133 000 м ³ /сут)
Качество газа	Меняется от сухого угольного метана до жирного попутного газа
Технология сжижения	Одноконтурное охлаждение смешанным хладагентом (SMR)
Эксплуатационное давление	40–60 бар
Конструкция	Заводская подготовка эксплуатации; модульное исполнение с возможностью контейнерной транспортировки; транспортировка автомобильным, железнодорожным или водным транспортом
Строительство	100 % надземная установка; минимум фундаментных работ
Срок от окончательного решения об инвестировании до производства сжиженного природного газа (СПГ)	18–24 месяца

Основные параметры системы концерна SHELL удовлетворяют основным требованиям для производственного оборудования морских добывающих платформ:

- небольшие габариты;
- низкое потребление электроэнергии;
- достаточная производительность;
- быстрое развертывание морским транспортом.

Доступны версии системы для эксплуатации в арктическом и морском климате.

На основании проведенного анализа можно утверждать, что модульность и быстрота развертывания системы MMLS и уже сегодня доступные мобильные генерирующие мощности ОАО «Передвижная электроэнергетика» позволяют в кратчайшие сроки создать базу для производства в России СПГ экономически выгодного для экспорта в страны Азии и Европы.

УДК 621.928.37

В. О. Яблонский

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ГИДРОЦИКЛОНА НА ГИДРОДИНАМИКУ ТЕЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНО-ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

На основании результатов численного моделирования гидродинамики нелинейно-вязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне установлено влияние режимных параметров аппарата на гидродинамику течения. Проведен сравнительный анализ влияния фактора разделения на гидродинамику сред, обладающих предельным напряжением сдвига и псевдопластических жидкостей.

Ключевые слова: нелинейно-вязкопластическая жидкость, псевдопластическая жидкость, гидродинамика, цилиндрический гидроциклон, фактор разделения.

V. O. Yablonskii

INFLUENCE OF REGIME PARAMETERS OF CYLINDRICAL HYDROCYCLONE ON THE HYDRODYNAMICS OF NONLINEAR VISCOPLASTIC FLUID

Volgograd State Technical University

On the base of the analysis of results of numerical modelling of hydrodynamics of nonlinear viscoplastic fluid in cylindrical hydrocyclone the influence of the regime parameters of hydrocyclone on the hydrodynamics is established. The comparative analysis of the influence of separation factor on the hydrodynamics of the fluids with the bound shear stress and pseudoplastic fluids is carried out.

Keywords: nonlinear viscoplastic fluid, pseudoplastic fluid, hydrodynamics, cylindrical hydrocyclone, separation factor.

Широкое применение гидроциклонов в горнообогатительной и минералогической промышленности, а также в системах очистки буровых растворов от выбуренной породы при добыче нефти и газа вызывает необходимость прогнозирования их разделительной способности на стадии проектирования. В качестве буровых растворов обычно используются суспензии, обладающие нелинейно-вязкопластическими свойствами, в частности, водные растворы

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мобильная модульная система сжижения природного газа концерна «ШЕЛЛ» (SHELL MMLS). [Электронный ресурс]. – [2013]. Режим доступа: <http://shell.com>.
2. James Burns. NATURAL GAS IN TRANSPORT: TOMORROW'S FUEL TODAY.
3. Rodum, Kristian; master thesis titled as «Development of small scale LNG plants»; NTNU; submitted July 2009.
4. Mark Julian and Rakesh Agrawal «dual mixed refrigerant cycle for gas liquefaction»; patent, filed December 9, 1998 with application No.09/208,562
5. «Развитие мирового рынка СПГ: вызовы и возможности для России». Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО. [Электронный ресурс]. – [май 2013].
6. Министерство природных ресурсов Российской Федерации. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2011 году» [Электронный ресурс]. – [2013].

бентонита. Ввиду того, что буровые растворы и многие другие очищаемые в гидроциклонах жидкости обладают нелинейно-вязкопластическими свойствами, представляет интерес выявление оптимальных гидродинамических режимов работы гидроциклонов, предназначенных для разделения таких сред.

В работах [1, 2] была исследована гидродинамика закрученных потоков псевдопластической жидкости, течение которой описывается

реологическим законом Оствальда де Вилия применительно к закрученному течению нефтяного битума в цилиндрическом канале и очистке загрязненной нефтью почвы в гидроциклоне.

В работе [3] выполнено математическое исследование течения в гидроциклоне вязкопластических буровых растворов, реологические свойства которых представлены линейной моделью Шведова–Бингама.

В работах [1–3] не учтены действующие на разделяемую в гидроциклоне среду силы гравитации, поэтому неясно, для каких значений фактора разделения применимы указанные модели.

Работы [4, 5] посвящены исследованию численным методом развития вращательного течения пленки неньютоновской жидкости в цилиндрическом прямооточном гидроциклоне. Реологические свойства разделяемой среды описываются степенной моделью Оствальда де Вилия.

В публикациях [6, 7] представлены результаты численного моделирования и экспериментальные исследования течения неньютоновских жидкостей в гидроциклоне. Полученные результаты показывают явное отличие распределения скоростей в гидроциклоне при течении псевдопластических жидкостей по сравнению с ньютоновскими.

Недостаточное соответствие указанных математических моделей реальной гидродинамической обстановке, а также отсутствие реше-

ний для разделения в гидроциклонах сред, обладающих одновременно нелинейновязкими и пластическими реологическими свойствами, примером которых являются буровые растворы, сужают область применения результатов моделирования. Поэтому рассмотрение течения нелинейно-вязкопластической жидкости в гидроциклоне с привлечением полной системы уравнений реодинамики является теоретически важной и практически полезной задачей в области моделирования разделительных процессов.

Полагаем, что течение является осесимметричным и распределение скоростей не зависит от угловой координаты. В цилиндрических центробежных аппаратах согласно [8] это допущение хорошо реализуется на практике, когда центробежное ускорение значительно превосходит гравитационное, что является характерным для гидроциклонов, осуществляющих очистку буровых растворов. Полагаем, что реологические свойства нелинейно-вязкопластической жидкости описываются законом Гершеля–Балкли. Ввиду того, что вязкопластические жидкости обладают, как правило, значительной эффективной вязкостью, полагаем также, что режим течения ламинарный [6].

Система уравнений реодинамики и неразрывности в компонентах скорости в цилиндрической системе координат (r, φ, z) для рассматриваемого течения в безразмерной форме будет иметь следующий вид:

$$f \frac{\partial f}{\partial r} + H \frac{\partial f}{\partial z} - \frac{\Theta^2}{r} = -\frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{Re_n} \left[2 \frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial r} \frac{\partial f}{\partial r} + 2 A_0^{n-1} \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial z} \right) + A_0^{n-1} \frac{\partial^2 H}{\partial z \partial r} + A_0^{n-1} \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} + 2 A_0^{n-1} \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial r} - 2 A_0^{n-1} \frac{f}{r^2} \right], \quad (1)$$

$$f \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{\Theta f}{r} + H \frac{\partial \Theta}{\partial z} = 2Pl + \frac{1}{Re_n} \left[\frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial r} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial r} - \frac{\Theta}{r} \right) + A_0^{n-1} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} - \frac{\Theta}{r^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} \right) + \frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial z} \frac{\partial \Theta}{\partial z} + A_0^{n-1} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right], \quad (2)$$

$$f \frac{\partial H}{\partial r} + H \frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{\partial F}{\partial z} + Pl + \frac{1}{Re_n} \left[\frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial r} \left(\frac{\partial H}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial z} \right) + A_0^{n-1} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial r \partial z} \right) + 2 A_0^{n-1} \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + 2 \frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial z} \frac{\partial H}{\partial z} \right] + \frac{1}{Fr}, \quad (3)$$

где $P_1 = \frac{\tau_0}{\rho U_0^2}$ – число пластичности, характеризующее отношение сил пластичности к силам инерции, τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па. $U_0 = \frac{Q}{bh}$ – скорость во входном патрубке

гидроциклона, м/с, h, Q – расход жидкости, м³/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³, h и b – высота и ширина входного патрубка, м.

Граничные условия после преобразования в безразмерную форму принимают вид

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \bar{R}, \quad f = 0, \quad \Theta = 0, \quad H = 0, \\ \bar{r} &= \bar{R} - \bar{\delta}, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial \bar{r}} - \frac{\Theta}{\bar{r}} = 0, \quad \frac{\partial H}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = 0, \\ f &= H \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial \bar{z}}, \quad F = -\frac{2kU_0^{n-2} A_0^{n-1} \partial f}{\rho R^n \partial \bar{r}}, \\ \bar{z} &= 0, \quad \Theta = \frac{2}{b}(1 - \bar{r}), \quad H = \frac{2h(1 - \bar{r})}{\pi b(2 - b)}, \quad f = 0, \quad F = F_H(\bar{r}), \\ \bar{z} &= \bar{z}_e, \quad \frac{\partial H}{\partial \bar{z}} = \frac{\partial \Theta}{\partial \bar{z}} = \frac{\partial f}{\partial \bar{z}}. \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь $Fr = \frac{U_0^2}{gR}$, $Re_n = \frac{\rho R^n U_0^{2-n}}{k}$, Fr – число Фруда (фактор разделения), Re_n – аналог числа Рейнольдса для степенных жидкостей,

$$A_0 = \sqrt{2\left(\frac{\partial f}{\partial \bar{r}}\right)^2 + 2\left(\frac{f}{\bar{r}}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial H}{\partial \bar{z}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial \bar{r}} - \frac{\Theta}{\bar{r}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial \bar{z}}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial f}{\partial \bar{z}}\right)^2},$$

A_0 – безразмерная интенсивность скоростей деформаций.

Соотношения между безразмерными и размерными переменными следующие:

$$\begin{aligned} \bar{z} &= \frac{z}{R}, \quad \bar{r} = \frac{r}{R}, \quad H(\bar{r}, \bar{z}) = \frac{V_z}{U_0}, \quad f(\bar{r}, \bar{z}) = \frac{V_r}{U_0}, \quad \Theta(\bar{r}, \bar{z}) = \frac{V_\varphi}{U_0}, \quad F(\bar{r}, \bar{z}) = \frac{P - P_0}{\rho U_0^2}, \\ \bar{\delta} &= \frac{\delta}{R}, \quad \bar{h} = \frac{h}{R}, \quad \bar{b} = \frac{b}{R}, \end{aligned}$$

R – радиус корпуса, м, V_r, V_φ и V_z – радиальная, окружная и осевая составляющие скорости соответственно, r, φ, z – радиальная, окружная и осевая координаты, м, k – индекс консистенции, Па·с ^{n} , n – показатель нелинейности.

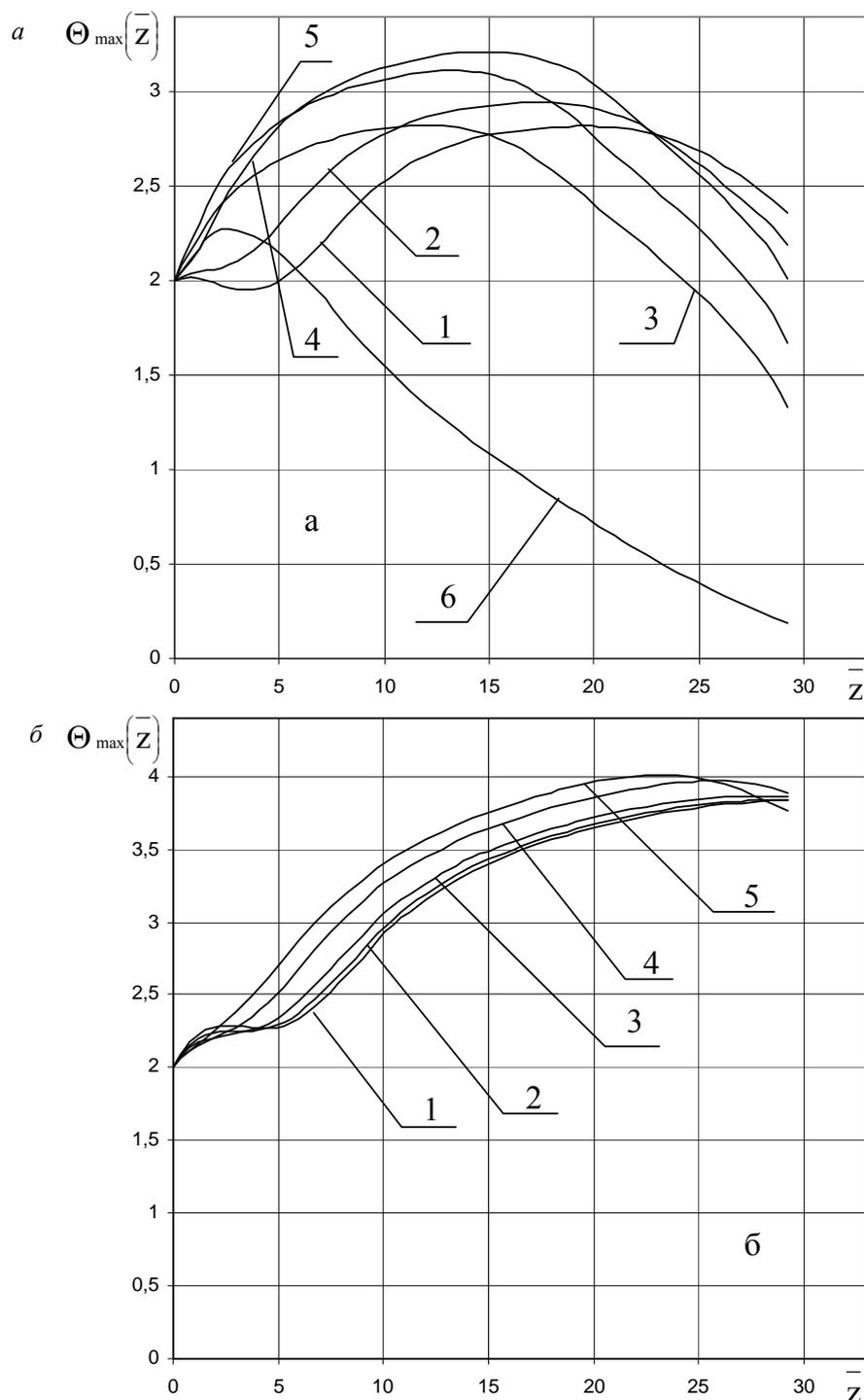
Интегрирование системы дифференциальных уравнений в частных производных осуществлялось по методу конечных разностей. Толщина пленки жидкости определялась из интегрального уравнения неразрывности, выражающего условие постоянства расхода жидкости в осевом направлении.

Результаты моделирования представлены на рисунке.

На рис. *a* представлены зависимости окружной составляющей скорости $\Theta_{\max}(\bar{z})$ от осевой координаты \bar{z} на поверхности пленки

жидкости в цилиндрическом гидроциклоне для $n = 0,6$ и $\tau_0 = 0$ Па ($P_1 = 0$) для различных значений числа Fr (фактора разделения).

Из анализа приведенных на рис., *a* зависимостей следует, что значения $\Theta_{\max}(\bar{z})$ сначала возрастают с увеличением осевой координаты вследствие утоньшения пленки жидкости и сохранения первоначального момента количества движения, а затем падают вследствие потерь энергии на трение о стенки корпуса гидроциклона. С увеличением числа Fr значения $\Theta_{\max}(\bar{z})$ возрастают на начальном участке до достижения максимума по оси \bar{z} вследствие возрастания скорости жидкости во входном патрубке U_0 и момента количества движения, а затем падают при приближении к выходному отверстию вследствие увеличения толщины пленки жидкости.



Зависимость максимальной окружной составляющей скорости на поверхности пленки Θ_{\max} в цилиндрическом гидроциклоне от осевой координаты \bar{z} ;
 $Re_n = 4 \cdot 10^3$; $Q = 0,04$; $n = 0,6$; $h = 0,05$; $b = 0,1$; $a - \tau_0 = 0,6$; 1 – Fr = 30; 2 – Fr = 50;
 3 – Fr = 70; 4 – Fr = 100; 5 – Fr = 150; 6 – Fr = 200; $\delta - \tau_0 = 1,0$; 1 – Fr = 50; 2 – Fr = 70;
 3 – Fr = 100; 4 – Fr = 150; 5 – Fr = 200

На рис. б представлены зависимости окружной составляющей скорости $\Theta_{\max}(\bar{z})$ от осевой координаты \bar{z} на поверхности пленки жидкости для $n = 0,6$ и $\tau_0 = 4 \cdot 10^3$ Па ($Pl = 0,0453$) для

различных значений числа Fr (фактора разделения).

Из сопоставления рис. а и б, следует, что при наличии у разделяемой среды предельного напряжения сдвига τ_0 затухание окружной состав-

ляющей скорости с увеличением осевой координаты \bar{z} уменьшается, что вызвано перестройкой профилей радиального распределения окружной составляющей скорости, обусловленной возрастанием аномалии неньютоновских свойств разделяемой среды и образованием зон квазитвердого ядра вблизи свободной поверхности.

С увеличением числа Fg при наличии у разделяемой жидкости предельного напряжения сдвига τ_0 (рис. б) наблюдается возрастание значений $\Theta_{\max}(\bar{z})$ вследствие повышения скорости жидкости во входном патрубке гидроциклона U_0 и момента количества движения пленки. Падения значений $\Theta_{\max}(\bar{z})$ в этом случае не происходит, так как толщина пленки разделяемой среды уменьшается с увеличением τ_0 , что вызвано перестройкой профиля радиального распределения осевой составляющей скорости и ведет к росту окружной составляющей скорости при сохранении первоначального момента количества движения.

Полученные расчетные данные для коэффициента наполненности [9, 10] радиального распределения окружной составляющей скорости для сред, имеющих предельное напряжение сдвига, подтверждают его более интенсивный рост по всей высоте рабочего пространства гидроциклона при увеличении числа Fg по сравнению со средами, обладающими только псевдопластическими свойствами.

Как следует из анализа представленных зависимостей, при разделении в цилиндрическом гидроциклоне сред, обладающих предельным напряжением сдвига, значения окружной составляющей скорости возрастают с увеличением числа Fg по всей высоте рабочего пространства и превышают соответствующие значения

для сред, не обладающих пластическими свойствами, что дает основание ожидать более высоких показателей разделения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвиенко, О. В. Теоретическое исследование процесса очистки загрязненной нефтью почвы в гидроциклонных аппаратах / О. В. Матвиенко, Е. В. Евтюшкин // Инж.-физ. журн. 2007. – Т. 80, № 3. – С. 72–80.
2. Матвиенко, О. В. Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале / О. В. Матвиенко, В. П. Базуев, Н. К. Южанова // Инж.-физ. журн. – 2011. – Т. 84, № 3. – С. 544–547.
3. Матвиенко, О. В. Математическое исследование сепарации дисперсной фазы в гидроциклоне при очистке вязкопластических буровых растворов / О. В. Матвиенко, Е. В. Евтюшкин // Инж.-физ. журн. – 2011. – Т. 84, № 2. – С. 230–238.
4. Яблонский, В. О. Гидродинамика течения неньютоновской жидкости в гидроциклоне / В. О. Яблонский // Журн. прикл. химии. – 2000. – Т. 73, вып. 1. – С. 95–99.
5. Яблонский, В. О. Развитие вращательного течения пленки неньютоновской жидкости в цилиндрической трубе конечной длины / В. О. Яблонский, Г. В. Рябчук // Теорет. основы хим. технол. – 2001. – Т. 35, № 5. – С. 479–484.
6. Dyakowski, T. Simulation of non – newtonian flow in a hydrocyclone / T. Dyakowski, G. Hornung // Chem. Eng. Res. and Des. A. – 1994. – V. 72. – No 4. – P. 513–520.
7. Tavares, L. M. Modelling classification in small – diameter hydrocyclones under variable rheological conditions / L. M. Tavares, L. L. G. Sousa, J. R. B. Lime [et. al] // Minerals Engineering. – 2002. – V. 15. – No 8. – P. 613–622.
8. Радин, С. И. Анализ распределения тангенциальных скоростей жидкостного потока в осадительных центрифугах / С. И. Радин, В. В. Будкин, Г. С. Черкез // Теорет. основы хим. технол. – 1978. – Т. 12, № 4. – С. 571–575.
9. Яблонский, В. О. Исследование распределения скоростей при тении неньютоновской жидкости в гидроциклоне / В. О. Яблонский // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 1). – С. 89–92.
10. Яблонский, В. О. Аппроксимация гидродинамических характеристик течения неньютоновской жидкости в гидроциклоне / В. О. Яблонский, Г. В. Рябчук // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 1). – С. 93–96.

УДК 532.135

В. М. Ящук

ТЕЧЕНИЕ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ СУСПЕНЗИИ В ДЛИННОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Волгоградский государственный технический университет

Выполнено математическое моделирование течения концентрированной суспензии в бесконечном трубопроводе. Найдены формулы для расчета профиля скоростей и расхода.

Показано, что характеристики течения зависят как от вязкости дисперсионной среды, так и от пространственной структуры суспензии, размера и формы ее частиц.

Ключевые слова: концентрированная суспензия, трубопровод, профиль скоростей, расход.

V. M. Yashchuk

FLOW OF CONCENTRADED SLURRY IN LONG PIPELINE

Volgograd State Technical University

Mathematical modeling of pipelines flow of concentrated slurry is carry out. Formulas for velocities and flow rate are defined.

Shown the parameters of flow are depended as from viscosity of dispersion phase as space structure, dimensions and particles shape of slurry.

Keywords: concentrated slurry, pipeline, velocities profile, flow rate.

При течении концентрированных суспензий происходит не только движение слоев жидкости относительно друг друга, но и вращательное движение частиц внутри слоев. Чем более высокая концентрация частиц, тем большее влияние на характеристики течения оказывает пространственная структура суспензии и взаимодействие частиц твердой между собой.

Для расчета транспортирования концентрированных суспензий в трубопроводах и обработки данных капиллярных вискозиметров необходимы формулы связывающие основные параметры их течения.

В работе [1] было рассмотрено течение асимметричной жидкости, примером которой может являться концентрированная суспензия. Получены формулы для расчета профилей скорости и расхода в цилиндрической трубе.

Рассмотрим течение в трубопроводе суспензии, реологические свойства которой в цилиндрической системе координат описываются уравнением (1).

$$\tau_{xr} = \mu \left[\frac{\partial U_x}{\partial r} - \frac{1}{a^2 \cdot r} \cdot \frac{\int_0^R U_x r dr}{\int_0^R r dr} \right], \quad (1)$$

Здесь x и r – осевая и радиальная координаты соответственно, μ – вязкость сплошной фазы суспензии, R – радиус трубы, a – параметр, учитывающий внутреннее вращение частиц твердой фазы, и зависящий от пространственной структуры суспензии, концентрации твердой фазы, размера и формы ее частиц.

При необходимости более точного учета структуры суспензии область течения разбивается на несколько зон, для каждой из которой вводится свой параметр a .

Значение параметра a (одного или нескольких) определяется путем обработки вискозиметрических данных.

Течение будем считать изотермическим, установившимся. Расслоением суспензии будем пренебрегать. Разность плотностей дисперсной фазы и дисперсионной среды учитывать не будем. Пространственная структура суспензии в пределах области определения параметра a считается однородной.

Уравнение движения в цилиндрической системе координат для данных условий течения запишется в виде [2]

$$\frac{dP}{dx} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \tau_{xr}), \quad (2)$$

где r и x – радиальная и осевая координаты, соответственно.

Распределение касательных напряжений описывается выражением

$$\tau_{xr} = -\frac{Ar}{2}, \quad (3)$$

где $\dot{\lambda} = \frac{P_L - P_0}{L} = \frac{\Delta P}{L}$; P_0 и P_L – давление на входе и выходе рассматриваемого участка трубопровода; L – длина трубопровода.

Подстановка распределения напряжений (3) в реологическое уравнение (1) приводит к дифференциальному уравнению

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_x}{dr} - \frac{2}{a^2 R^2} \cdot \int_0^R U_x r dr \right) = -\frac{Ar}{\mu}, \quad (4)$$

которое после дифференцирования запишется как

$$\frac{d^2 U_x}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_x}{dr} - \frac{U_x}{a^2} = -\frac{A}{\mu}, \quad (5)$$

где U_x – текущее значение осевой скорости.

Введем безразмерные переменные:

$W = \frac{\mu \cdot U_x \cdot L}{\Delta P \cdot R^2}$ – скорость, $\varepsilon = \frac{r}{R}$ – радиус. Тогда уравнение (5) преобразуется к виду (6)

$$\frac{d^2 W}{d\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{dW}{d\varepsilon} - \left(\frac{1}{a} \right)^2 W = -1. \quad (6)$$

Уравнение (6) является уравнением Бесселя и имеет решение:

$$W(\varepsilon) = a \cdot \left[1 - \frac{I_0 \left(\sqrt{-\left(\frac{1}{a} \right)} \varepsilon \right)}{I_0 \left(\sqrt{-\frac{1}{a}} \right)} \right]. \quad (7)$$

Здесь I_0 – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Для определения расхода суспензии через трубопровод необходимо проинтегрировать профиль скоростей

$$Q = \frac{2\pi R^4}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \int_0^1 W \varepsilon d\varepsilon. \quad (8)$$

Подставив (7) в (8) и выполнив интегрирование, получим

$$Q = \frac{2\pi \cdot a \cdot R^4}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \int_0^1 \left[1 - \frac{I_0 \left(\sqrt{-\frac{1}{a}} \varepsilon \right)}{I_0 \left(\sqrt{-\frac{1}{a}} \right)} \right] \varepsilon d\varepsilon,$$

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\mu L} \cdot f \left(\frac{1}{a} \right). \quad (9)$$

Функция $f \left(\frac{1}{a} \right)$ рассчитывается по формуле

$$f \left(\frac{1}{a} \right) = 8 \cdot a \cdot \left[1 - \frac{\text{hypergeom} \left([], [2], \frac{1}{4 \cdot a} \right)}{I_0 \sqrt{-\frac{1}{a}}} \right], \quad (10)$$

где $\text{hypergeom}(\)$ – гипергеометрическая функция.

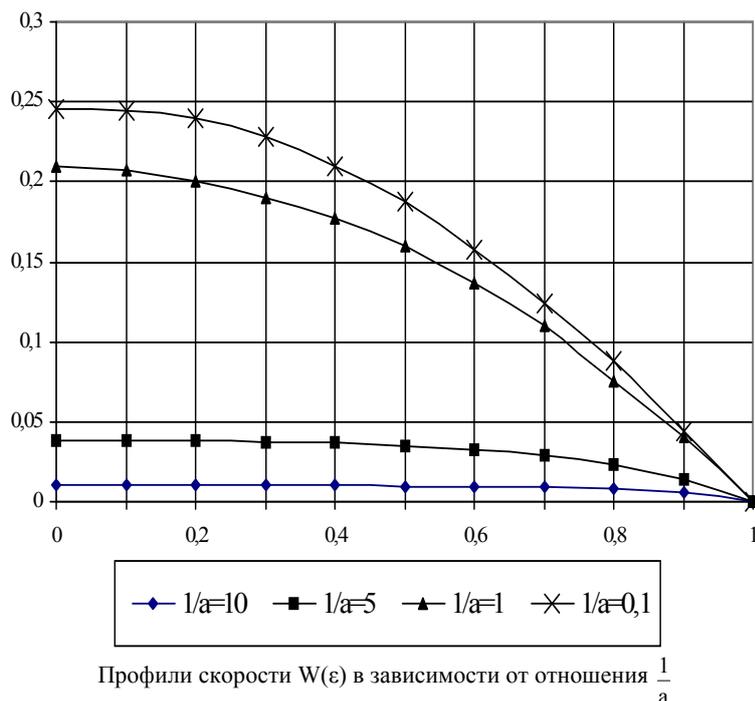
Из формулы (9) можно найти эффективную вязкость высоконцентрированной суспензии

$$\mu_{\text{эфф}} = \frac{\mu}{f\left(\frac{1}{a}\right)} \quad (11)$$

На рисунке представлены безразмерные профили скоростей $W(\epsilon)$ рассчитанные по формуле

(7) при различных значениях отношения $\frac{1}{a}$.

Из анализа профилей скоростей течения суспензии видно, что с ростом отношения $\frac{1}{a}$ скорость течения суспензии уменьшается, т. е. ее расход снижается. Это может быть обусловлено повышением концентрации твердой фазы в суспензии, наличием поверхностно-активных веществ, обработкой суспензии в физических полях.



Расчет трубопроводов, предназначенных для транспортировки концентрированных суспензий, реологические свойства которых описываются уравнением (1), можно производить по формуле Пуазейля [1], подставляя в нее значение эффективной вязкости, рассчитанное с помощью формул (10) и (11).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аэро, Э. Л. Асимметричная гидромеханика / Э. Л. Аэро, А. Н. Бульгин, Е. В. Кувшинский // Прикл. мат. и мех. – 1964. – Т. 29. – С. 297–308.
2. Романков, П. Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. – Л. : Химия, 1974. – 288 с.

УДК 621.577

В. М. Ящук, О. А. Залипаева, Д. С. Филимонова

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В РЕКТИФИКАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ
Волгоградский государственный технический университет**

Описаны различные варианты технологических схем ректификационных установок, в которых с целью повышения эффективности использования энергоресурсов применены тепловые насосы.

Ключевые слова: ректификационная установка, тепловой насос.

V. M. Yashchuk, O. A. Zalipaeva, D. S. Filimonova

**APPLICATION OF HEAT PUMPS IN DISTILLATION PLANTS
Volgograd State Technical University**

Various variants of technological schemes distillation plants with heat pumps increasing efficiency of using of power resources are described.

Keywords: distillation plant, heat pump.

Тепловые насосы используют для преобразования низкопотенциального тепла в высокопотенциальное, что позволяет повысить эффективность использования энергоресурсов в различных технологических процессах [1, 2].

Ректификационные установки являются существенно энергоемкими, поэтому повышение их энергоэффективности обеспечивает значительное снижение себестоимости процесса разделения.

В работе [3] выполнено сравнение различных ректификационных установок, использующих тепловой насос.

С целью разработки рекомендаций по проектированию энергоэффективных ректификационных установок рассмотрим различные варианты использования в них тепловых насосов.

Наиболее простой является установка, представленная на рис. 1. Тепловой насос обеспечивает нагрев куба колонны за счет повышения теплового потенциала паров дистиллята. Особенностью данного варианта является отсутствие промежуточного теплоносителя и возможность использования только при незначительной разности температур низа и верха ректификационной колонны, (не более 15–20 °С).

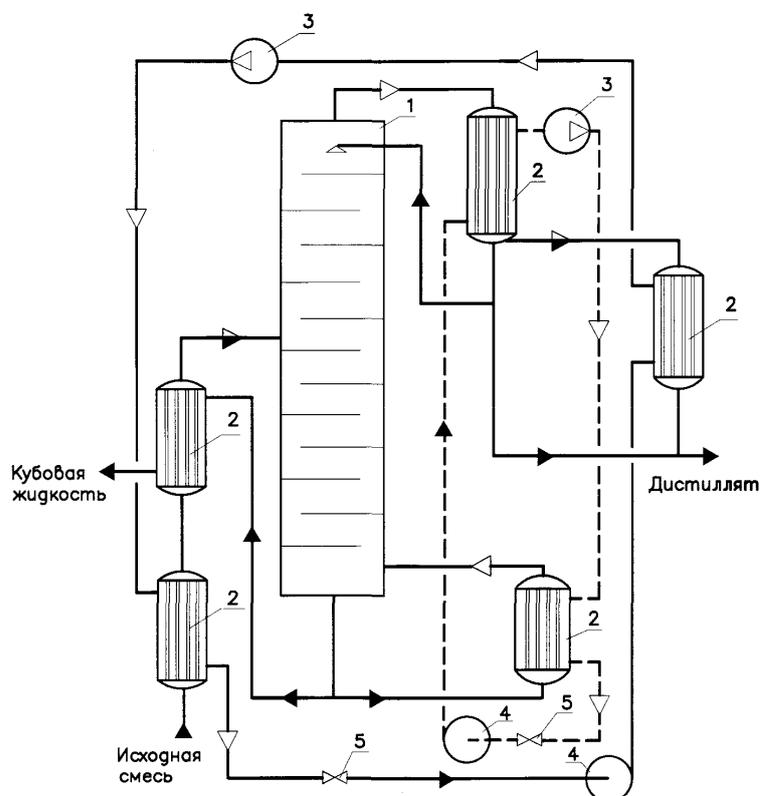


Рис. 1. Ректификационная установка с тепловым насосом без промежуточного теплоносителя:
1 – ректификационная колонна, 2 – теплообменник, 3 – компрессор, 4 – насос, 5 – дроссель

На рис. 2 приведена схема установки с применением двух тепловых насосов, позволяющая более полно утилизировать тепловую энергию дистиллята, используя ее для нагрева куба ректификационной колонны и разделяемой исходной смеси. Применение 2-х промежуточных теплоносителей усложняет аппаратное оформление установки, повышая капитальные затраты, но существенно снижает энергопотребление.

Обеспечить более высокую разность температур между низом и верхом колонны позволяет повышение теплового потенциала теплоносителя последовательным включением тепловых насосов.

Вариант ректификационной установки, использующей два промежуточных теплоносителя, представлен на рис. 3. На установке возможно получение разности температур между низом и верхом колонны в 25–35 °С при высоком термическом КПД тепловых насосов. Основная проблема при ее проектировании состоит в правильном подборе промежуточных теплоносителей.

Применение жидкостно-газового (парового) эжектора в качестве компрессора для повышения теплового потенциала паров дистиллята позволяет упростить аппаратное оформление ректификационной установки, снизить капитальные затраты на установку, повысить ее надежность.

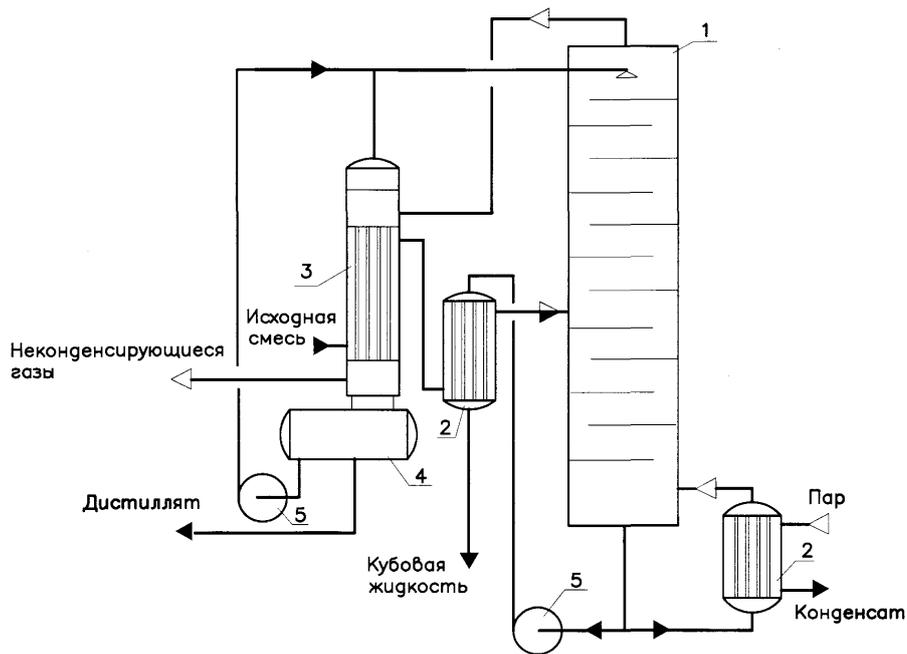


Рис. 2. Ректификационная установка с применением промежуточного теплоносителя:
1 – ректификационная колонна, 2 – теплообменник, 3 – компрессор, 4 – насос, 5 – дроссель

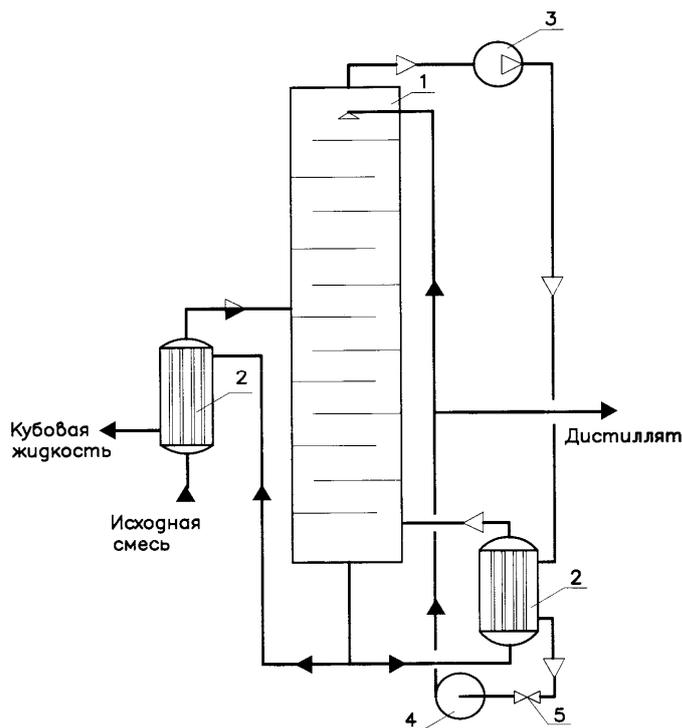


Рис. 3. Ректификационная установка с последовательным включением тепловых насосов:
1 – ректификационная колонна, 2 – теплообменник, 3 – компрессор, 4 – насос, 5 – дроссель

На рис. 4 приведена схема установки, в которой многословый жидкостно-газовый эжектор используется как компрессор для сжатия паров дистиллята. При этом эжектор одновременно является дефлегматором паров дистиллята и подогревателем исходной смеси.

Применение эжектора позволяет упростить систему управления установкой.

Нагрев кубовой жидкости в данной схеме также может осуществляться с помощью трубчатой печи, что позволяет использовать данную схему в высокотемпературных процессах разделения применяемых в нефтепереработке.

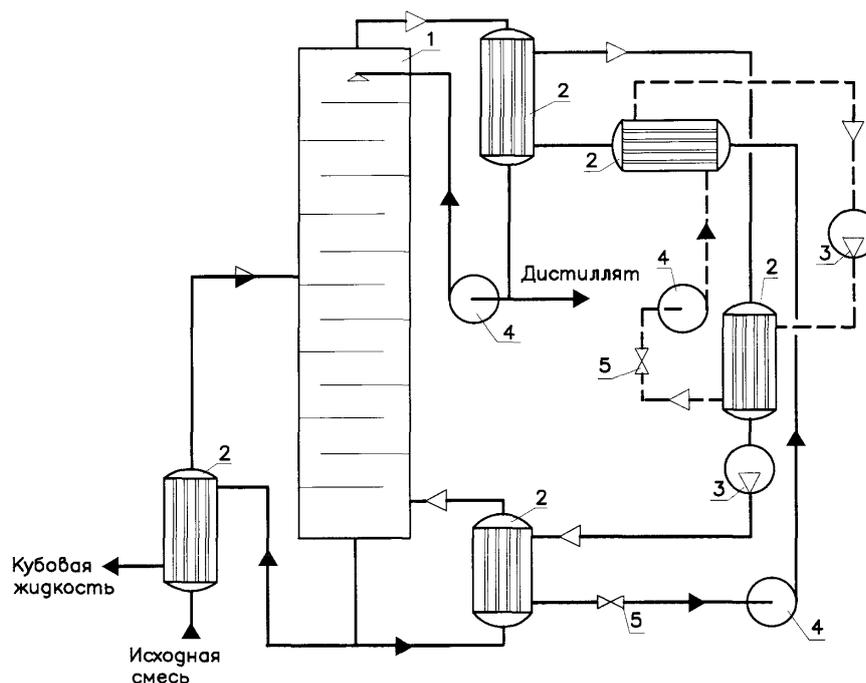


Рис. 4. Ректификационная установка использующая жидкостно-газовый эжектор:
1 – ректификационная колонна, 2 – теплообменник, 3 – многосопловый эжектор, 4 – сепаратор, 5 – насос

Промышленностью выпускается широкая номенклатура тепловых насосов и современный уровень производства обеспечивает их высокую надежность, поэтому необходимо расширять их применение при реализации технологических процессов, в частности, связанных с разделением жидких смесей в ректификационных установках химической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Комплексное использование рассмотренных схем ректификационных установок при разработке технологических процессов разде-

ления позволит существенно повысить их энергоэффективность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рей, Д. Тепловые насосы / Д. Рей, Д. Маккмайкл. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 224 с.
2. Утилизация низкопотенциальных тепловых вторичных энергоресурсов на химических предприятиях / В. Г. Григоров, В. К. Нейман, С. Д. Сураков и др. – М. : Химия, 1987. – 240 с.
3. Fonyo, Z. Comparison of Various Heat Pumps Assisted Distillation Configurations / Fonyo Z., Benko N. – Trans. Ind. Chem.Eng. – 1998. – 76. Part A. – P. 348–360.

УДК 66.063.8

О. А. Тишин, В. Н. Харитонов

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Волжский политехнический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета

Работа является продолжением исследований, проводимых по изучению влияния перемешивания на интегральные характеристики химического процесса. Осуществлена оценка влияния скоростей диффузии и массоотдачи на скорость протекания химического процесса и его селективность. Показано, что в определенных условиях химический процесс осуществляется на поверхности в результате образующихся глобул.

Ключевые слова: перемешивание, диффузия, массоотдача, химическая реакция, селективность.

O. A. Tishin, V. N. Harritonov

INFLUENCE OF MIXING CONDITIONS ON INTEGRAL CHARACTERISTICS OF CHEMICAL PROCESS

Volzhsy Polytechnical Institute (Branch)
Volgograd State Technical University

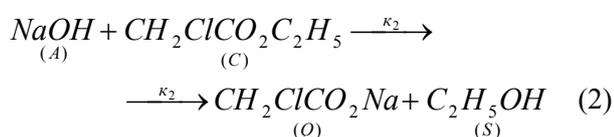
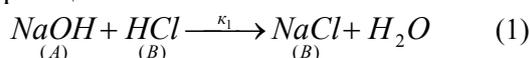
Work is the continuation of studies of those conducted on the study of the mixing influence on the integral characteristics of chemical process. The evaluation of diffusion and mass transfer rates influence on the flow rate of the of chemical process and its selectivity is realized. It is shown that under certain conditions the chemical process is achieved on the surface, that are formed with dosing reagent, globules.

Keywords: mixing, diffusion, mass transfer, chemical reaction, selectivity.

Целью работы является изучение влияния условий перемешивания на интегральные характеристики химического процесса и является продолжением исследований проводимых на кафедре «Технологические машины и оборудование» [1–7].

Объект исследования реактор полупериодического действия, в котором протекают параллельные реакции, сильно отличающиеся по кинетическим показателям. В аппарате предварительно растворены соляная кислота (кислота) и этилхлорацетат (ЭХА). Концентрации обоих реагентов одинаковы. В реактор постепенно, с постоянной объемной скоростью, дозируется раствор едкого натра (щелочь). Концентрация раствора щелочи примерно в двадцать раз выше, чем концентрация растворов, загруженных в реактор предварительно. Количество раствора щелочи в двадцать раз меньше количества растворов кислоты и ЭХА. Изучается влияние скорости вращения мешалки, точки подачи реагентов, продолжительности дозирования раствора щелочи.

Для проверки адекватности предложенной модели использовались экспериментальные данные из работы Верхурен [8]. Кинетическая схема реакций:



Константы скоростей реакции нейтрализации: $k_1 = 1 \cdot 10^8$, м³/моль с, и реакции омыления ЭХА: $k_2 = 3,5 \cdot 10^{-2}$, м³/моль с.

Экспериментальные исследования показывают [8] что, несмотря на значительную разницу в кинетических коэффициентах реакций, существенная часть дозируемой в реактор щелочи реагирует по реакции омыления. В условиях совершенного перемешивания (чисто химическая реакция) процесс завершится до степени превращения 0,999 за 0,015 с. Щелочь будет израсходована в реакции нейтрализации. Этот расчет позволяет предположить, что существенное влияние медленной реакции (омыление ЭХА) обусловлено значительным влиянием процессов массопереноса на интегральные характеристики химического процесса (степень превращения реагентов и селективность).

Предварительные исследования [4, 5], позволили определить условия, при которых в ре-

акторе с перемешиванием можно создать условия близкие к идеальному перемешиванию:

$$k_m \cdot \bar{\tau} \geq 30, \quad (3)$$

и условия обеспечения предварительного перемешивания реагентов:

$$\frac{k_m}{k \cdot C_0} \geq 30. \quad (4)$$

Проверка по условиям, позволяющим обеспечить в реакторе получение предварительно перемешанных потоков, показала, что для обеих реакций такие условия создать невозможно с технической точки зрения.

Одним из показателей позволяющих оценить влияние процессов переноса на химическую реакцию является модуль Тиле [10]. Для реакции нейтрализации (начальная концентрация $C_0 = 100$ моль/м³, размер вихря $\delta = 10^{-5}$ м, коэффициент диффузии $D = 10^{-9}$) $Ti = 10^9$, для медленной реакции $Ti = 0,35$ при протекании реакции в сплошной фазе, и $Ti = 6,3$ при протекании реакции внутри глобул. По значениям модуля Тиле обе реакции могут быть отнесены к химическим процессам, скорость протекания которых контролируется явлениями транспорта распределенных веществ, либо диффузией, либо массоотдачей.

Основным фактором, определяющим реакцию нейтрализации как быструю, является константа скорости. Ее значение настолько велико, что при любых условиях перемешивания, скорость протекания процесса будет определяться явлениями транспорта веществ. Для реакции омыления ЭХА влияние оказывают и условия перемешивания (размер агрегатов, концентрация реагента и условия переноса массы). Это позволяет, меняя условия перемешивания, создавать ситуацию, в которой доля щелочи израсходованной в реакции омыления будет незначительной.

Результаты исследований свидетельствуют о протекании химических реакций в зоне располагающейся вблизи поверхности агрегатов дозируемого раствора щелочи. Исследования показали [7] что в случае проведения быстрой реакции (близкой по своим характеристикам к реакции нейтрализации) химическое превращение происходит в зоне близкой к точке подачи реагента в реактор. Объем этой зоны зависит от условий перемешивания, но не бывает более 2–3 % от общего объема реактора. Подаваемый в реактор поток реагента быстро распадается под действием турбулентных напряжений на глобулы, размер которых можно определить используя теорию Колмогорова или Бетчелора [8]:

$$\delta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon_m} \right)^{0.25}, \quad \delta = \left(\frac{v^2 D}{\varepsilon_m} \right)^{0.25}. \quad (5)$$

Время распада струи вытекающей из трубки подачи до вихрей конечных можно оценить по уравнению:

$$\frac{\delta_{\text{вих}}}{\delta_0} = \exp(-a \cdot \dot{\gamma} \cdot \tau). \quad (6)$$

Значение коэффициента a определяется по экспериментальным данным. Средний градиент скорости сдвига для перемешиваемой жидкости равен:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{\varepsilon_m}{\nu}}. \quad (7)$$

Быстрая реакция превращает агрегаты дозируемого реагента в сегрегированные частицы. Система становится «квазигетерогенной». Растворенный в агрегатах реагент диффундирует из центра к наружной поверхности агрегатов. На этой поверхности он вступает в мгновенную реакцию с находящимся в сплошной фазе вторым реагентом. В зависимости от соотношения скоростей поступления реагента А из глобулы к поверхности и скорости его отвода с внешней стороны могут существовать различные варианты. Скорость отвода с внешней поверхности равна сумме скорости химической реакции и скорости массоотдачи с поверхности. В том случае, когда скорости подвода щелочи из глобулы к внешней поверхности равна скорости поступления кислоты из окружающей глобулу среды второго реагента (кислоты), концентрация щелочи на поверхности будет равна нулю или очень близкой к нулю. ЭХА подводится к внешней поверхности глобул за счет массоотдачи и затем диффундирует внутрь глобулы, где вступает в реакцию со щелочью. Обе реакции протекают в разных пространствах медленная – внутри глобулы, а быстрая – на внешней поверхности глобулы.

Для медленной реакции, которая протекает внутри глобулы, расход ЭХА определяется по уравнению:

$$\frac{\partial C_C}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 C_C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C_C}{\partial r} - k_2 C_A C_C. \quad (8)$$

Изменение концентрации щелочи в глобуле:

$$\frac{\partial C_A}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 C_A}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial r} - k_2 C_A C_C \quad (9)$$

Начальные и граничные условия:

$$\text{при } \tau = 0 \quad C_A = C_{A_0}, \quad C_C = 0$$

$$\text{при } r = 0 \quad \frac{\partial C_A}{\partial r} = \frac{\partial C_C}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

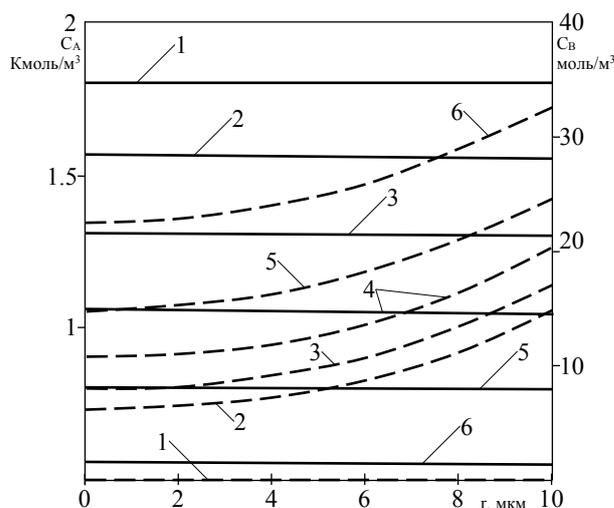
$$\text{при } r_{\text{вих}} = r, \quad D_A \frac{\partial C_A}{\partial r} = \beta_{yFA} C_A,$$

$$D_C \frac{\partial C_C}{\partial r} = \beta_{yFC} C_{\text{ср}}.$$

Коэффициент массоотдачи с или к поверхности мелкой частицы может быть определен по уравнению [9]:

$$\beta_{yF} = 0,267(\varepsilon_m \cdot \nu)^{0,25} Sc^{-0,75}. \quad (11)$$

Процесс осуществляется в изотермических условиях. Результаты моделирования по системе уравнений (8–11) представлены на рисунке и в таблице. Реакция омыления протекает в зоне расположенной вблизи поверхности контакта с окружающей средой, а концентрация щелочи в глобуле меняется по радиусу весьма незначительно (см. рисунок). Результаты расчетов свидетельствуют о том, что результатам экспериментов [8] соответствуют граничные условия 3 для глобул малого размера. Время полного расходования щелочи составляет 0,89 с. Это время практически равно времени пребывания глобул в зоне дозирования щелочи в реактор. Для частиц большего размера время полного опорожнения глобулы составляет 8–9 секунд, а в реакции омыления израсходуется до 20–25 % щелочи.



Распределение концентрации компонента А (сплошная) и В (пунктирная) по радиусу глобулы в зависимости от времени: 1 – $t = 0$ с; 2 – 0,17; 3 – 0,34; 4 – 0,52; 5 – 0,69; 6 – 0,86

Результаты расчетов

п/п	Граничное условие	Глобулы диаметром, 10 ⁻⁵ м		Глобулы диаметром, 10 ⁻⁴ м	
		время расходования A, с	доля A, на образование спирта	время расходования A, с	доля A, на образование спирта
1	$BiO = \infty$	0,01	1,0	1,0	2–3
2	$\beta_{y_{F_A}} (C_{A_{пр}} - C_{A_{сн}})$	0,03	2–3	3,1	4–6
3	$\beta_{y_{F_C}} (C_{C_{сп}} - C_{C_{сп}})$	0,17	10–12	8,9	25–30

Для того чтобы получить глобулы требуемого размера необходимо затратить некоторое количество энергии. Если для расчета диаметра глобулы использовать уравнение Колмогорова, то требуемые для достижения результата затраты энергии оказываются неоправданно высокими. В экспериментах использовалось оборудование с электродвигателем не позволяющим обеспечить такие результаты. Поэтому для расчета размеров образующихся глобул использовалось уравнение Бэтчелора.

Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают возможность протекания реакций: медленной внутри глобулы дозируемого реагента, а быстрой на внешней ее поверхности. Для этого необходимо в реакторе обеспечить условия позволяющие создать глобулы дозируемого реагента размером не более 10 микрон.

Список условных обозначений

A, B, P, R – общее обозначение вещества; A – дозируемый в реактор реагент; B, C – реагент, предварительно загруженный в реактор, полупериодический процесс; a – коэффициент в уравнении для определения объема зоны дозирования; C, C₀ – концентрация вещества, начальная, моль·м⁻³; D – коэффициент диффузии, м²·с⁻¹; k – константа скорости химической реакции, м³·моль⁻¹·с⁻¹; k_m – объемный коэффициент массопереноса, с⁻¹; l – характерный линейный размер, м; $m^* = \frac{k_m}{kC_0}$ – параметр перемешивания;

x_A – степень превращения; Δ – разность или движущая сила; δ – размер вихря; ε_m – затраты мощности на перемешивание единицы массы жидкости, м²·с⁻³; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²·с⁻¹; τ, τ̄ – время и среднее время пребывания, соответственно, с; τ_ц – время циркуляции жидкости в аппарате, с;

числа подобия: $Sc = \frac{\nu}{D}$ – число Шмидта,

$Ti = \frac{kC_0\delta_{вих}^2}{D}$ – модуль Тиле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тишин, О. А. К вопросу об изучении кинетики химических реакций в проточных аппаратах / О. А. Тишин, Н. В. Тябин, А. П. Дарманян // Журнал прикладной химии. – 1985. – VIII, № 9. – С. 2046–2050.
2. Тишин, О. А. Исследование качества перемешивания жидких сред в статических смесителях / О. А. Тишин, Н. В. Тябин, А. П. Дарманян, С. Н. Романов // Журнал прикладной химии. – 1988. – Т. 61, № 9. – С. 2028–2032.
3. Экспериментальное исследование микроперемешивания в центробежных статических смесителях и интенсификация перемешивания с их помощью / О. А. Тишин, Н. В. Тябин, А. П. Дарманян, С. Н. Романов // 6-я Европейская конференция по перемешиванию; Павия, Италия. – 1988. – С. 183–190.
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. – Т. 45, вып. 5. – С. 70–73.
6. Тишин, О. А. Выбор числа оборотов перемешивающего устройства в аппарате с мешалкой / О. А. Тишин, А. В. Девкин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(61) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химических технологий»). – С. 89–92.
7. Тишин, О. А. Экспериментальное исследование процесса перемешивания в аппарате с мешалкой / О. А. Тишин, Т. В. Островская, А. В. Девкин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химических технологий» ; вып. 5). – С. 88–90.
8. Verschuren, I. L. M, J. G. Wijers, and J. T. F. Keurentjes «Effect of mixing on the product quality in semi-batch stirred tank reactors», A.I.Ch.E. J. (2001), v47, (6). – P. 661–665.
9. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, М. В. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.
10. Данквертс, П. В. Газожидкостные реакции / П. В. Данквертс; пер. с англ. – М. : Химия, 1973. – 296 с.

КРАТКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 536.242:532.132

В. В. Шишлянников

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ НА ЭКСТРУДЕРЕ С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ОБОГРЕВОМ

Волгоградский государственный технический университет

Рассматривается задача сопряженного теплообмена в экструдере с несимметричным обогревом при переработке вязкопластических химических продуктов. Используется модель Шведова–Бингама.

Ключевые слова: сопряженный, обогрев, несимметричный, химические, продукты, экструдер.

V. V. Shishljannikov

HEAT EXCHANGE AT PROCESSING OF CHEMICAL PRODUCTS ON EXTRUDER WITH ASYMMETRICAL HEATING

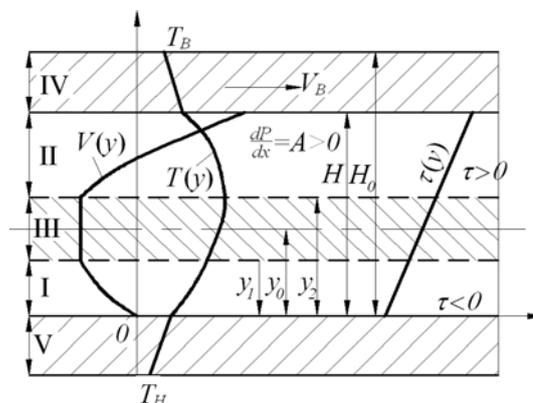
Volgograd state technical university

The problem of the interfaced heat exchange in экструдере with asymmetrical heating at processing вязкопластических chemical products is considered. The model of Shvedova–Bingama is used.

Keywords: interfaced, heating, asymmetrical, chemical, products, extruder.

Рассматривается сопряженная задача теплообмена при течении вязкопластических химических продуктов в прямом канале винта экструдера.

В соответствии с расчетной схемой (см. рисунок) для установившегося стабилизированного течения с независимыми от температуры свойствами для плоской модели экструдера математическая задача по зонам записывается



К постановке задачи

$$\text{I} \quad \frac{d^2\theta_1}{d\eta^2} - B \left\{ \beta_0 [\eta + (\beta_0 - \eta_0)] - [\eta + (\beta_0 - \eta_0)]^2 \right\} = 0 \quad 0 \leq \eta \leq \eta_1 \quad (1)$$

$$\text{II} \quad \frac{d^2\theta_2}{d\eta^2} + B \left\{ [\eta - (\eta_0 + \beta_0)] \beta_0 - [\eta - (\beta_0 + \eta_0)]^2 \right\} = 0 \quad \eta_2 \leq \eta \leq \eta_1 \quad (2)$$

$$\text{III} \quad \frac{d^2\theta_3}{d\eta^2} = 0 \quad \eta_1 \leq \eta \leq \eta_2 \quad (3)$$

$$\text{IV} \quad \frac{d^2\theta_4}{d\eta^2} = 0 \quad 1 \leq \eta \leq \delta \quad (4)$$

$$\text{V} \quad \frac{d^2\theta_5}{d\eta^2} = 0 \quad 0 \geq \eta \geq 1 - \delta \quad (5)$$

С граничными условиями

$$\begin{array}{l}
 \text{I} \quad \left. \begin{array}{l} \text{при } \eta = 0 \\ \text{при } \eta = \eta_1 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \theta_1 = \theta_5 \\ \frac{d\theta_1}{d\eta} = \frac{d\theta_3}{d\eta} \end{array} \right\} \quad (6)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{II} \quad \left. \begin{array}{l} \text{при } \eta = \eta_2 \\ \text{при } \eta = 1 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \theta_2 = \theta_3 \\ \theta_2 = \theta_4 \end{array} \right\} \quad (7)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{III} \quad \left. \begin{array}{l} \text{при } \eta = \eta_1 \\ \text{при } \eta = \eta_2 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \theta_1 = \theta_3 \\ \frac{d\theta_2}{d\eta} = \frac{d\theta_3}{d\eta} \end{array} \right\} \quad (8)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{IV} \quad \left. \begin{array}{l} \text{при } \eta = 1 \\ \text{при } \eta = \delta \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \frac{d\theta_2}{d\eta} = \bar{\lambda} \frac{d\theta_4}{d\eta} \\ \theta_4 = 1 \end{array} \right\} \quad (9)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{V} \quad \left. \begin{array}{l} \text{при } \eta = 0 \\ \text{при } \eta = 1 - \delta \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \frac{d\theta_1}{d\eta} = \bar{\lambda} \frac{d\theta_5}{d\eta} \\ \theta_5 = 0 \end{array} \right\} \quad (10)
 \end{array}$$

Учитывая, что $\eta_2 - \eta_0 = \eta_0 - \eta_1 = \beta_0$, а $\eta_2 - \eta_1 = 2\beta_0$ [1], после ряда преобразований получим решение поставленной задачи в виде

$$\begin{aligned}
 \theta_1 = \frac{B}{6} & \left[(\eta^3 - 3\eta^2\eta_1)\beta_0 - (0,5\eta^4 - 2\eta^3\eta_1 + 3\eta^2\eta_1^2) \right] + [a_1(1 - \eta_2) + \\
 & + a_2(1 - \eta_2) - a_3 + a_4 - a_5 + \theta_4|_{\eta=1}] \cdot \left(\frac{\eta + k}{1 + k} \right) \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \theta_2 = -\frac{B}{6} & \left[(\eta^3 - 3\eta^2\eta_2)\beta_0 + (0,5\eta^4 - 2\eta^3\eta_2 + 3\eta^2\eta_2^2) \right] - \frac{\eta - 1}{1 + k} [a_1(\eta_1 + k) + \\
 & + a_2(\eta_2 + k) + a_3 + a_5] + \frac{\eta + k}{1 + k} (a_4 - \theta_4|_{\eta=1}) \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\theta_3 = \frac{1 - \eta}{1 + k} [a_1(\eta_1 + k) + a_3] + \frac{\eta + k}{1 + k} [a_2(1 - \eta_2) + (a_4 - a_2) + \theta_4|_{\eta=1}] \quad (13)$$

$$\theta_4 = 1 - \frac{\eta - \delta}{\bar{\lambda}(1 + k)} [a_1(\eta_1 + k) + a_2(\eta_2 + k) + a_3 - a_4 + a_5 - a_6(1 + k) - \theta_4|_{\eta=1}] \quad (14)$$

$$\theta_5 = \frac{\eta + \delta - 1}{\bar{\lambda}(1 + k)} [a_1(1 - \eta_1) + a_2(1 - \eta_2) - (a_3 - a_4 + a_5) + \theta_4|_{\eta=1}] \quad (15)$$

где $\theta_i = \frac{T_i - T_H}{T_B - T_H}$, $\eta = \frac{y}{H}$, $k = \frac{\delta - 1}{\bar{\lambda}}$, $\delta = \frac{H_0}{H}$, $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{m\theta}}{\lambda_{\text{жс}}}$, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_{\text{жс}}$, $B = \frac{\aleph}{\alpha} = \frac{A^2 H^4}{\lambda_{\text{жс}} \mu_P (T_B - T_H)}$;

$$\begin{aligned}
 a_1 &= B \left(\beta_0 \frac{\eta_1^2}{2} + \frac{\eta_1^3}{3} \right), \quad a_2 = B \left(\beta_0 \frac{\eta_2^2}{2} - \frac{\eta_2^3}{3} \right), \quad a_3 = -B \left(\frac{\eta_1^4}{48} + \frac{\eta_1^3}{3} \beta_0 \right), \\
 a_4 &= B \left[\left(\frac{1}{6} - \frac{1}{2} \eta_2 \right) \beta_0 + \left(\frac{1}{12} - \frac{1}{3} \eta_2 + \frac{1}{2} \eta_2^2 \right) \right], \quad a_5 = B \left(\frac{1}{4} \eta_2^4 - \frac{1}{3} \eta_2^3 \beta_0 \right), \\
 a_6 &= -B \left[\left(\frac{1}{2} - \eta_2 \right) \beta_0 + \left(\frac{1}{3} - \eta_2 + \eta_2^2 \right) \right].
 \end{aligned}$$

Из уравнений (11)–(15) видно, что изменение температуры в жидкости и стенке зависит от значений параметров α , β , $\bar{\lambda}$, δ , то есть от относительной скорости перемещения верхней пластины, ширины квазитвердого ядра, относительной теплопроводности стенки и жидкости и толщины стенки. Зная распределение температуры в потоке, нетрудно определить значения среднемассовой температуры и критерия Нуссельта.

На основании приведенных расчетов изменения температуры и критерия Нуссельта можно сделать выводы, что течение сильно вязких химических продуктов в условиях значительных давлений в толстостенном оборудовании

необходимо учитывать как диссипативный теплообмен, так и влияние толщины и теплопроводности стенки, особенно для материалов с плохой теплопроводностью. Схожие результаты обсуждались нами в работе [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шульман, З. П. Обобщенное Куэттовское течение нелинейно-вязкопластичной жидкости / З. П. Шульман, В. Ф. Волченко // ИФЖ – 1977. – Т. 33, № 4. – 880 с.
2. Шишлянников, В. В. Теплообмен при ламинарном течении вязкопластических химических продуктов в экс-трудере / В. В. Шишлянников, Н. В. Тябин // Изв. вузов, Химия и химическая технология. – 1985. – Т. 28, вып. 4.

УДК 676.026.14

В. В. Шишлянников, А. А. Каликин Д. А. Павлов, А. Б. Голованчиков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПОРОШКОВО-ВОЛОКНИСТЫХ СУСПЕНЗИЙ

Волгоградский государственный технический университет

Представлена экспериментальная установка для исследования перемешивания порошково-волокнистых суспензий. Приводятся экспериментальные данные по изменению мощности при перемешивании бумаги, асбеста и песка.

Ключевые слова: эксперимент, установка, исследование, перемешивание, суспензия.

V. V. Shishliannikov, T. A. Kalikin, D. A. Pavlov, A. B. Golovanchikov

EXPERIMENTAL STUDIES DISPERSING THE POWDER- FIBROUS SUPENZY

Volgograd State Technical University

Shows the experimental setup for studying the mixing of powder-fiber suspensions. The experimental data on the change in the power of stirring the paper fibers, asbestos and sand.

Keywords: experiment, installation, research, mixing the slurry.

Процессы перемешивания в жидких средах механическими мешалками являются широко распространенными в химической, нефтеперерабатывающей, микробиологической и смежных отраслях промышленности [1].

Перемешивание механическими мешалками обеспечивает гомогенизацию гетерогенных систем. В данной работе для исследования процесса диспергирования исследовалась комбинированная мешалка-диспергатор, на которую получен патент [2].

Установка для исследования диспергирования суспензий изображена на рис. 1.

Установка состоит из сосуда 3 с мешалками: лопастной 4, фрезерной 5 и пропеллерной 6, укрепленной на фрезерной мешалке с помощью валика 7.

Вал с мешалками приводится во вращение с помощью электродвигателя. Изменение числа оборотов осуществляется с помощью латра. А изменение числа оборотов проводится тахо-

метром. Для измерения мощности перемешивания применяется мультиметр.

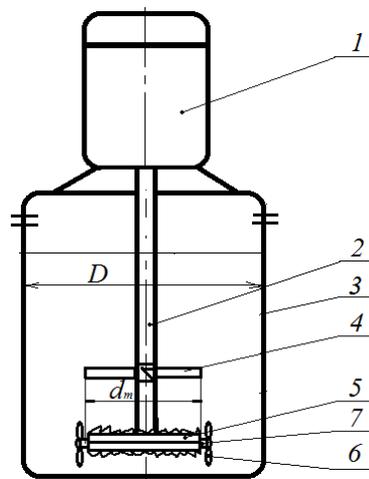


Рис. 1. Установка для исследования перемешивания суспензий:

1 – электродвигатель; 2 – вал; 3 – сосуд; 4 – лопастная мешалка; 5 – фрезерная мешалка; 6 – пропеллерная мешалка; 7 – валики

Методика проведения эксперимента. В сосуде 3 приготавливается суспензия определенной концентрации. Для исследования применяются наполнители песок, асбест, бумага 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 % концентрации.

Включается электродвигатель 4 при разных

числах оборотов и различных концентрациях, измеряется мультиметром мощность перемешивания. Эксперименты проводились также на опытной установке только с лопастной мешалкой. Все экспериментальные данные представлены в виде таблицы.

Экспериментальные данные по диспергированию гетерогенных систем (суспензия) комбинированной и лопастной мешалками

Суспензия	Концентрация, %	Мощность при 660 об/мин, Вт	Мощность при 1270 об/мин, Вт	Мощность при 1900 об/мин, Вт	Мощность при 2500 об/мин, Вт*
Песок	0,5	58,99/61,49	60,77/63,59	87,55/89,39	98,52/98,03
Песок	2	57,34/59,42	66,94/68,46	90,61/92,18	104,1/108,35
Бумага	0,125	65,56/66,56	70,96/71,11	90,82/91,59	100,1/100,39
Смесь:					
бумага	0,125	68,6/77,1	72,13/73,7	90,29/92,67	100,8/103,87
асбест	0,5				
песок	0,5				

Примечание: в числителе параметры относящиеся к лопастной мешалке, в знаменателе – к комбинированной.

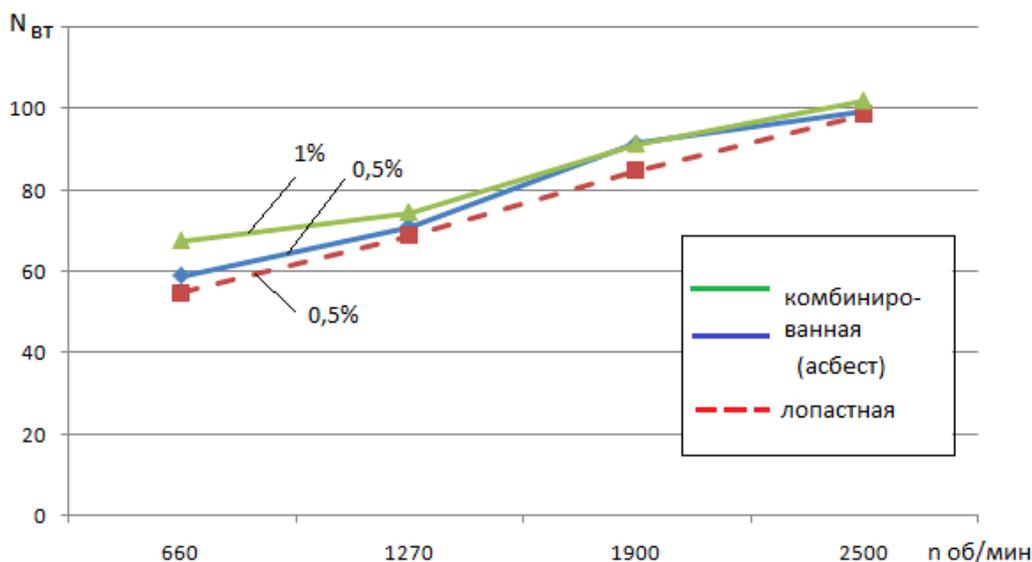


Рис. 2. Изменение мощности при перемешивании суспензий асбест + вода (для других суспензий графики подобные и поэтому не приводятся)

На основании опытных данных были построены графики изменения мощности перемешивания для разных систем и с разными мешалками, которые представлены на рис. 2.

Выводы. При перемешивании различных суспензий разной концентрации комбинированной и лопастной мешалками видно, что для лопастной мешалки мощность перемешивания на 4–5 % меньше, чем для комбинированной. Однако качество диспергирования оценивалось визуально. Для комбинированной мешалки оно значительно выше, чем для лопастной, хотя время выхода на уровень стабильного распре-

деления частиц у последней значительно выше. Поэтому, оценивая оба фактора, характеризующие качество перемешивания, оно предпочтительнее с комбинированной мешалкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жерновая, И. М. Процессы перемешивания в жидких средах / И. М. Жерновая, В. В. Кафаров. – М.: МХТИ, 1976.
2. Пат. 116785 Российская Федерация, МПК В01F7/16. Диспергатор / А. Б. Голованчиков, Т. А. Осетрова, В. В. Шишлянников, В. В. Миняйло, Т. А. Кузнецова; заявитель и патентообладатель федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Волгоградский государственный технический университет № 2011152333 ; заявл. 21.12.11; опубл. 10.06.12.

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.