



Издается
с января 2004 г.

Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт научно-технический журнал

ISSN 2500-0586

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор)
ПИ № ФС77-64543 от 22 января 2016 г.

Главный редактор журнала
В. И. Лысак – академик РАН,
д-р техн. наук, профессор,
ректор университета

Редакционная коллегия:

И. И. **Артюхов** – д.т.н., проф. СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
А. В. Баранов – д.ф-м. н., проф.,
РГУ нефти и газа, г. Москва.
А. Б. Голованчиков – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. Е. Городецкий – д.т.н., проф., ИПМаш
РАН, г. Санкт-Петербург
А. П. Дарманиян – д.т.н., проф. ВГАУ,
г. Волгоград
А. М. Иванов – д. т. н., проф.,
МГТУ (МАДИ), г. Москва
В. В. Кортаев – д.т.н., проф., ИТМО,
г. Санкт-Петербург
О. Г. Котиев – д. т. н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. Львов – д. т. н., проф., СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
Мертен Клеменс – д. т. н., проф.,
университет г. Штутгарт, Германия
В. А. Марков – д. т. н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. В. Навроцкий – д.х.н., проф., ВолгГТУ
Б. В. Скворцов – д.т.н., проф., СГАУ
им. академика С. П. Королева, г. Самара
О. А. Тишин. – д.т.н., проф., ВолгГТУ
Е. А. Федянов – д.т.н., проф., ВолгГТУ
В. М. Шаповалов – д.т.н., проф. ВолгГТУ;
В. М. Шарипов – д.т.н., проф., МГТУ
(МАМИ), г. Москва
А. Н. Шилин – д.т.н., проф., ВолгГТУ

Ответственный секретарь
Ю. В. Аристова – доц., к.т.н.

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала по каталогу
Агентства «Роспечать»
для Российской Федерации –
94193(ОК+ЭК). По вопросам
подписки обращаться
в издательство.

Тел. издательства ВолгГТУ:
+7 (8442) 24-84-06,
fax: +7 (8442) 24-84-06,
e-mail: otr@vstu.ru

№ 1 (22)
Март
2018

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический
университет»
Периодичность: четыре раза в год

Адрес редакции:
РФ, 400005, Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28
Гл. редактор: телефон: – (8442) 23-00-76
e-mail: rector@vstu.ru

Отв. секретарь: телефон: – (8442) 24-84-31
e-mail: pahp@vstu.ru

Официальный сайт Учредителя: www.vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Авторское право на журнал в целом принадлежит
Учредителю, на отдельные статьи – сохраняется за авторами

*Перепечатка из журнала «Энерго- и ресурсосбережение:
промышленность и транспорт» категорически запрещена без
оформления договора в соответствии с действующим
законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Энерго- и
ресурсосбережение: промышленность и транспорт» обязательна*

Статьи печатаются бесплатно



Published since
January 2004 г.

ISSN 2500-0586

Editor-in-chief

V. I. Lysak – Academician of
RAS Academician of RAS,
D. Sc. (Technical), Professor,
Rector of VSTU

Editorial Board:

I. I. Artuchov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
A. V. Baranov – D. Sc. (Physical and Math.),
Prof., Gubkin University, Moscow.
A. B. Golovanchikov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. E. Gorodetskij – D. Sc. (Engineering),
Prof., IPME, St. Petersburg
A. P. Darmanyan – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSAU, Volgograd
A. M. Ivanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
MADI, Moscow
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
ITMO University, St. Petersburg
O. G. Kotiev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
M. Clemens – D. Sc. (Engineering), Prof.,
University of Stuttgart, Germany
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. V. Navrotsky – D. Sc. (Chemistry), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. V. Skvortsov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
Samara University, Samara
O. A. Tishin – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
V. M. Shapovalov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
V. M. Sharipov – D. Sc. (Engineering),
Prof., UMech, Moscow
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd

Executive Secretary
Yu. V. Aristova – PhD, Associate Prof.

The journal is distributed by subscription.
Index of the journal in the catalogue
of the Agency «Rospechat» for the Russian
Federation – 94193(OK+OK).
Concerning subscription turn to the editorial
office.

VSTU Publisher tel.:

+7 (8442) 24-84-06,
fax: +7 (8442) 24-84-06,
e-mail: otr@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,
«Energo- e resursosberezhenie: promyshlennost' i transport », 2018

Energo- i resursosberezhenie: Promyshlennost' i transport

(Energy and Resource Saving:
Industry and Transport)
science-technical journal

Journal is registered in the Federal Service for supervision
of communications, information technology and mass media
(Roscomnadzor) registration certificate:
ПН .N° (ФЦ77-64543, registration date: 22 January 2016

**№ 1 (22)
March
2018**

FOUNDER:

**Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education «Volgograd State Technical University»**

Periodicity: four times per year

Editorial office address:

Russia, 400005, Volgograd, Lenin avenue, 28. Editor-In-Chief:
tel.: +7 (8442) 23-00-76 e-mail: rector @vstu.ru

Executive Secretary: +7 (8442) 24-84-31 e-mail:
pahp@vstu.ru

Official website: www.vstu.ru

Published by the decision of editorial review board of Volgograd State
Technical University

***The copyright for the journal in general belongs to the Founder, for separate
articles – retained by the authors.***

*Reprint from the journal « Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i
transport » is strongly forbidden -without conclusion of an agreement in accordance
with the current legislation of the Russia Federation.*

*When reprint the materials, the citation to the journal «Energo- i
resursosberezhenie: promyshlennost' i transport» is obligatory*

The articles are published for free.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- | | |
|--|---|
| Азарян Д. К. 41 | Мишта Е. А. 45 |
| Балашов В. А. 13 | Попов А. И. 41 |
| Волжская А. В. 25 | Прохоренко Н. А. 21, 25, 27, 33, 41, 45 |
| Голованчиков А. Б. 7, 13, 21, 27, 33, 41, 45 | Романенко М. Д. 41 |
| Дзинеvская Е. В. 38 | Свиридова Т. Д. 13 |
| Доан Минь Кыонг 7 | Смольская Д. О. 21 |
| Дроздова О. Н. 38 | Топилин М. В. 27, 33 |
| Ершова В. О. 18 | Тябин Н. В. 43 |
| Казакова К. Е. 38 | Усков Е. Р. 13 |
| Ковылин А. В. 18 | Филимонов М. И. 7, 38 |
| Лепехин Г. И. 43 | Шагарова А. А. 38 |
| Лепехина Д. А. 43 | Юрин В. П. 25 |
| Меренцов Н. А. 13 | Юрин П. В. 25 |

AUTHOR INDEX

Azaryan D. K. 41	Mishta A. E. 45
Balashov V. A. 13	Popov A. I. 41
Doan Minh Cuong 7	Prohorenko N. A. 21, 25, 28, 33, 43, 45
Drozdova O. N. 38	Romanenko M. D. 41
Dzinevskaja E. V. 38	Shagarova A. A. 38
Ershova V. O. 18	Smolskaya D. O. 21
Filimonov M. I. 7, 38	Sviridova T. D. 13
Golovanchikov A. B. 7, 13, 21, 28, 33, 41, 45	Topilin M. V. 28, 33
Kazakova K. E. 38	Tyabin N. V. 43
Kovylin A. V. 18	Uskov E. R. 13
Lepyokhin G. N. 43	Volzhskaya A. V. 25
Lepyokhina D. A. 43	Yurin V. P. 25
Merentsov N. A. 13	Yurin P. V. 25

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Голованчиков А. Б., Филимонов М. И., Доан Минь Кыонг</i> Моделирование обратноосмотического процесса в фильтрующих сверхцентрифугах с учетом продольной диффузии.....	7
<i>Меренцов Н. А., Свиридова Т. Д., Усков Е. Р., Балашов В. А., Голованчиков А. Б.</i> Исследование гидродинамики регулярной сетчатой насадки с упругим жидкостным распределителем.....	13
<i>Ковылин А. В., Еришова В. О.</i> Влияние теплофизических свойств ограждающих конструкций на энергосбережение в зданиях и сооружениях.....	18
<i>Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Смольская Д. О.</i> Совершенствование конструкции экструдеров.....	21
<i>Юрин В. П., Юрин П. В., Прохоренко Н. А., Волжская А. В.</i> Установка для извлечения ртути из ртутьсодержащих отходов.....	25
<i>Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Топилин М. В.</i> Расчет ректификационной колонны с рециклом паровой фазы.....	27
<i>Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Топилин М. В.</i> Разработка энергоэффективной схемы проведения процесса ректификации.....	33
<i>Шагарова А. А., Филимонов М. И., Дзинеvская Е. В., Казакова К. Е., Дроздова О. Н.</i> Экспериментальные исследования работы напорного гидроциклона.....	38
<i>Романенко М. Д., Азарян Д. К., Голованчиков А. Б., Попов А. И.</i> Установка для массовой переработки кочанов капусты.....	41
<i>Тябин Н. В., Лепёхин Г. И., Лепёхина Д. А., Прохоренко Н. А.</i> Математическое моделирование явлений переноса аномально вязких жидкостей в круглых трубах.....	43
<i>Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Мишита Е. А.</i> Расчет поверхности массопередачи листовой насадки абсорбционной колонны.....	45

CONTENTS

<i>Golovanchikov A. B., Filimonov M. I., Doan Minh Cuong</i> MODELING OF THE REVERSE OSMIC PROCESS IN FILTERING SUPERCENTRIC FUMS WITH THE LONGITUDINAL DIFFUSION.....	7
<i>Merentsov N. A., Sviridova T. D., Uskov E. R., Balashov V. A., Golovanchikov A. B.</i> THE STUDY OF THE HYDRODYNAMICS OF REGULAR STRETCH-MESH NOZZLES LIQUID DISPENSER.....	13
<i>Kovylin A. V., Ershova V. O.</i> INFLUENCE OF THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF FENCING CONSTRUCTIONS ON ENERGY SAVING IN BUILDINGS AND STRUCTURES.....	18
<i>Prokhorenko N. A., Golovanchikov A. B., Smolskaya D. O.</i> IMPROVING THE DESIGN OF EXTRUDERS.....	21
<i>Yurin V. P., Yurin P. V., Prokhorenko N. A., Volzhskaya A. V.</i> INSTALLATION FOR THE EXTRACTION OF MERCURY FROM MERCURY-CONTAINING WASTE.....	25
<i>Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Topilin M. V.</i> CALCULATION OF THE RECTIFICATION COLUMN WITH THE RECOVERY OF STEAM PHASE.....	28
<i>Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Topilin M. V.</i> DEVELOPMENT OF THE ENERGY EFFICIENT SCHEME OF CARRYING OUT THE REVISION PROCESS.....	33
<i>Shagarova A. A., Filimonov M. I., Dzinevskaja E. V., Kazakova K. E., Drozdova O. N.</i> EXPERIMENTAL RESEARCH OF HYDROCYCLONE DISCHARGE WORKS.....	38
<i>Romanenko M. D., Azaryan D. K., Golovanchikov A. B., Popov A. I.</i> THE UNIT FOR MASS PROCESSING OF CABBAGES.....	41
<i>Tyabin N. V., Lepyokhin G. N., Lepyokhina D. A., Prokhorenko N. A.</i> MATHEMATICAL MODELING OF THE TRANSFER OF ANOMALALLY VISCOUS LIQUIDS IN ROUND TUBES.....	43
<i>Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Mishta A. E.</i> THE CALCULATION OF THE MASS TRANSFER SURFACE OF THE SHEET NADCI ABSORPTION COLUMN.....	45

А. Б. Голованчиков, М. И. Филимонов, Доан Минь Кыонг

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ФИЛЬТРУЮЩИХ СВЕРХЦЕНТРИФУГАХ С УЧЕТОМ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФфуЗИИ

Волгоградский государственный технический университет

Рассмотрен обратнoсмoтичecкий процесс, в котором рабочее давление в несколько десятков атмосфер развивается на поверхности полупроницаемой мембраны, установленной в роторе сверхцентрифуги. Проводится сравнение результатов расчета при типовой структуре потока очищаемого раствора, соответствующей идеальному вытеснению, и структуре потока, учитывающей продольную диффузию.

Ключевые слова: обратный осмос, сверхцентрифуга, продольная диффузия, идеальное вытеснение, ретант, пермеат, концентрация, истинная селективность, мембрана, производительность, центробежное давление, скорость вращения ротора.

A. B. Golovanchikov, M. I. Filimonov, Doan Minh Cuong

MODELING OF THE REVERSE OSMIC PROCESS IN FILTERING SUPERCENTRIFUGES WITH THE LONGITUDINAL DIFFUSION

Volgograd State Technical University

A reverse osmosis process is considered in which a working pressure of several tens of atmospheres develops on the surface of a semipermeable membrane installed in a super centrifuge rotor. Comparison of the calculation results is carried out for the typical flow pattern of the solution to be cleaned, corresponding to ideal displacement, and the flow structure taking into account the longitudinal diffusion.

Keywords: reverse osmosis, super centrifuge, longitudinal diffusion, ideal displacement, retentate, permeate, concentration, true selectivity, membrane, productivity, centrifugal pressure, rotor speed.

Как известно, процесс обратного осмоса на полупроницаемых мембранах требует для своей реализации перепада давления в несколько десятков атмосфер, которое создается многоступенчатыми поршневыми насосами сложной конструкции, обладающими высокой стоимостью [1, 2]. Однако такое высокое давление можно создавать на боковой поверхности ротора в сверхцентрифугах, число оборотов в которых достигает 45000 об/мин [3].

Так как давление на стенке ротора определяется по формуле:

$$p = \rho \cdot \omega^2 \cdot (R_n^2 - R_c^2) / 2, \quad (1)$$

то при радиусе ротора $R_n = 0,05$ м и радиусе свободной границы очищаемого раствора ретанта $R_c = 0,04$ м, то есть толщина его слоя $\delta = 10$ мм и плотности воды $\rho = 10^3$ кг/м³ давление может достигать 100 атм.

Для рабочих давлений, при которых идут процессы обратного осмоса $p = 40 \div 60$ атм = $= (4 \div 6)$ МПа угловая скорость вращения ротора сверхцентрифуги должна лежать в пределах:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho \cdot (R_n^2 - R_c^2)}} = (2,9 \div 3,7) \cdot 10^3 \text{ (с}^{-1}\text{)}$$

или $n = (28 \div 35) \cdot 10^3$ об/мин.

Таким образом, сверхцентрифуги могут обеспечить необходимое давление в 40 ÷ 60 атм на стенке ротора, где закрепляется полупроницаемая мембрана.

Целью работы является физическое и математическое моделирование обратнoсмoтичecкого процесса в фильтрующей сверхцентрифуге при типовой структуре потока идеального вытеснения и при структуре потока очищаемого раствора, учитывающей продольное перемешивание, или продольную диффузию.

На рис. 1 представлена схема обратноосмотического процесса в сверхцентрифуге, учитывающего продольную диффузию в очищаемом растворе. Здесь показаны материальные потоки с концентрациями в них молекул и ионов на входе и на выходе.

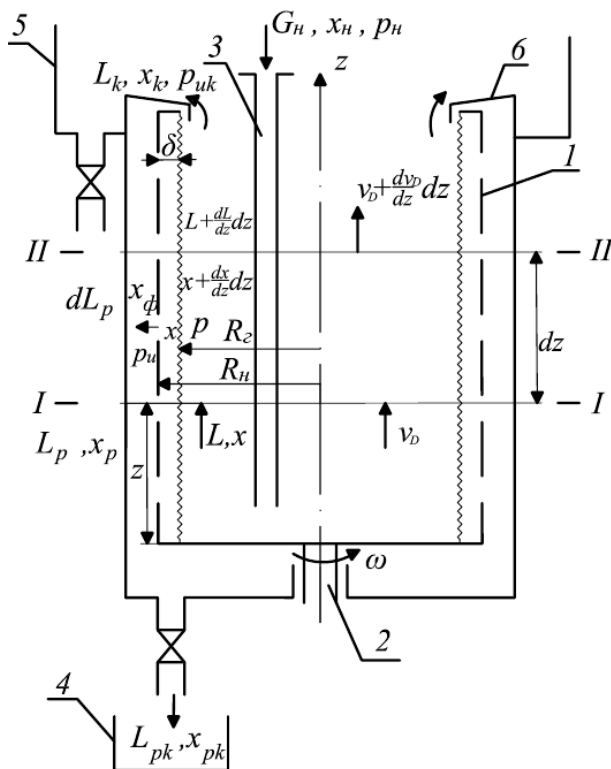


Рис. 1. Схема сверхцентрифуги с полупроницаемой мембраной на роторе для обратноосмотического процесса разделения:

1 – цилиндрическая стенка ротора с мембраной на его боковой поверхности; 2 – вал; 3 – труба для подвода исходного раствора в нижнюю часть ротора; 4 – емкость для сбора пермеата; 5 – емкость для сбора ретанта; 6 – кольцевой козырек над ротором для приема ретанта из ротора

Для математического моделирования обратноосмотического процесса выделим на высоте z два сечения боковой стенки ротора I–I и II–II с расстояниями между ними dz и составим элементарные материальные балансы по основным потокам ретанта и пермеата соли на входе и на выходе этих сечений:

$$L = \left(L + \frac{dL}{dz} \cdot dz \right) + dL_p, \quad (2)$$

где
$$dL_p = G \cdot 2\pi \cdot R_n \cdot dz, \quad (3)$$

а удельная производительность [1]:

$$G = g_0 \cdot (1 - p_u / \Delta p). \quad (4)$$

При небольших изменениях концентрации соли в ретанте зависимость осмотического давления от концентрации, которая задается в виде таблицы [1], можно аппроксимировать МНК линейным уравнением:

$$p_u = a + b \cdot x. \quad (5)$$

Так, для хлорида кальция эта зависимость с относительной ошибкой менее 1 %, коэффициенты a , b имеют численные значения:

$$a = -0,047; \quad b = 0,62; \quad 0,8 \% < x < 3,25 \, \%. \quad (6)$$

После алгебраических образований и интегрирования дифференциальное уравнение (2) с учетом граничного условия:

$$z = 0, L = G_n \quad (7)$$

принимает вид:

$$L = G_n - L_p, \quad (8)$$

и при $z = H, L_k = G_n - L_{pk}$.

Для выделенных сечений I–I и II–II составим элементарный материальный баланс по молекулам и ионам соли:

$$L \cdot x + v_D \cdot \rho \cdot \pi \cdot (R_n^2 - R_c^2) = \left(L + \frac{dL}{dz} \cdot dz \right) \cdot \left(x + \frac{dx}{dz} \cdot dz \right) + x_\phi \cdot dL_p + \left(v_D + \frac{dv_D}{dz} \cdot dz \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot (R_n^2 - R_c^2), \quad (9)$$

где x_ϕ – концентрация молекул и ионов, проскакивающих в пермеате на высоте z , которая определяется по формуле:

$$x_\phi = x \cdot (1 - \varphi). \quad (10)$$

Дифференциальное уравнение (9) после алгебраических преобразований с учетом формул (2) и (10) определяется в виде:

$$L \cdot \frac{dx}{dz} + \varphi \cdot x \cdot \frac{dL}{dz} + \rho \cdot \pi \cdot (R_n^2 - R_c^2) \cdot \frac{dv_D}{dz} = 0. \quad (11)$$

По аналогии с первым законом Фика для молекулярной диффузии запишем уравнение скорости для продольной диффузии в виде [1]:

$$v_D = -D_l \cdot \frac{dx}{dz}. \quad (12)$$

Тогда преобразованное дифференциальное уравнение (11) становится дифференциальным уравнением второго порядка:

$$L \cdot \frac{dx}{dz} + \varphi \cdot x \cdot \frac{dL}{dz} - \rho \cdot \pi \cdot (R_n^2 - R_c^2) \cdot D_l \cdot \frac{d^2x}{dz^2} = 0.$$

Разделим и умножим последний член уравнения в левой части на G_n и с учетом того, что число Пекле продольной диффузии $Pe_l = \frac{v_H \cdot H}{D_p}$,

а безразмерная координата высоты $Z = \frac{z}{H}$ получаем:

$$L \cdot \frac{dx}{dZ} + \varphi \cdot x \cdot \frac{dL}{dZ} = \frac{G_n}{Pe_l} \cdot \frac{d^2x}{dZ^2}. \quad (13)$$

Отличие получаемого безразмерного числа Pe_l от известных связано с тем, что оно отнесено к начальной скорости пермеата при его расходе $L = G_n$, то есть для $Z = 0$.

Если обозначить градиент:

$$gr = \frac{dx}{dZ}$$

и перевести уравнение (13) в численный вид, то можно получить расчетное выражение:

$$L_i \cdot gr_i - \varphi \cdot x_i \cdot \frac{\Delta L_i}{\Delta Z} = \frac{G_n}{Pe_l} \cdot \frac{(gr_{i+1} - gr_i)}{\Delta Z}. \quad (14)$$

Тогда градиент последующей итерации:

$$gr_{i+1} = gr_i + \frac{Pe_l}{G_n} \cdot (L_i \cdot gr_i \cdot \Delta Z + \varphi \cdot x_i \cdot \Delta L_i), \quad (15)$$

где $\Delta L_i = -2\pi \cdot R_n \cdot g_0 \cdot \left(1 - \frac{a + b \cdot x_i}{\Delta p}\right) \cdot \Delta Z \cdot H$ – массовый расход фильтрата на безразмерной высоте Z при концентрации молекул и ионов в растворе x_i , соответствующий его уменьшению в растворе над мембраной.

Известное граничное условие диффузионной модели (13) для $Z = 0$ имеет вид [1]:

$$x_n = x_{ex} - \frac{1}{Pe_l} \cdot \left(\frac{dx_{ex}}{dZ}\right). \quad (16)$$

После разделения переменных и интегрирования в пределах от x_{ex} до x_k получаем:

$$\int_{x_{ex}}^{x_k} \frac{dx_{ex}}{x_{ex} - x_n} = \int_0^1 Pe_l \cdot dZ \quad или$$

$$\ln \left(\frac{x_k - x_n}{x_{ex} - x_n} \right) = Pe_l.$$

$$Тогда \quad x_{k3} = x_n + (x_{ex} - x_n) \exp(Pe_l). \quad (17)$$

При $Pe_l \rightarrow \infty$, $D_l \rightarrow 0$, то есть при идеальном вытеснении $x_{ex} = x_n$ – скачка концентраций ионов и молекул на входе нет; при $Pe_l \rightarrow 0$ или $D_l \rightarrow \infty$, то есть при идеальном смешении $x_{ex} = x_k$ – на входе наибольший скачок концентрации в очищаемом растворе и эта концентрация остается постоянной во всей высоте Z ротора сверхцентрифуги.

Алгоритм расчетов по уравнениям (16) и (17) может быть следующим:

1. Разбиваем всю безразмерную высоту $Z = 1$ на n равных интервалов. Тогда $\Delta z = 1/n$ и обозначаем $L_l = G_n$, а $x_l = x_{ex}$, где $x_{ex} > x_n$ – характеризует скачок концентрации молекул и ионов на входе за счет продольного перемешивания.

2. Исходя из известного граничного условия (16) для диффузионной модели структуры потоков [1] определяем градиент на входе: $gr_i = gr_{ex} = (x_l - x_n) Pe_l$; уменьшение расхода раствора за счет фильтрации на первой итерации по уравнению (17):

$$\Delta L_i = -2\pi \cdot R_n \cdot g_0 \cdot \left(1 - \frac{a + b \cdot x_i}{\Delta p}\right) \cdot \Delta Z \cdot H;$$

градиент концентрации на выходе после первой итерации по уравнению (16):

$$gr_2 = gr_i + \frac{Pe_l}{G_n} \cdot (L_i \cdot gr_i \cdot \Delta Z + \varphi \cdot x_i \cdot \Delta L_i);$$

концентрацию и расход раствора на выходе после первой итерации:

$$x_2 = x_1 + gr_1 \cdot \Delta Z;$$

$$L_2 = L_1 - \Delta L_1.$$

3. Делаем переадресовки, заменяя полученные численные параметры на выходе $gr_1 = gr_2$, $x_1 = x_2$, $L_1 = L_2$ и повторяем расчеты по формулам пункта 2 n раз, то есть до $Z = 1$, получаем:

$$x_k = x_2; L_k = L_2; L_{pk} = G_n - L_k;$$

$$x_{pk} = \frac{G_n \cdot x_n - L_k \cdot x_k}{L_{pk}},$$

то есть основные технологические параметры на выходе из ротора сверхцентрифуги.

4. Сравнивает x_{k3} , полученное для заданного числа Pe_l при рассчитанном gr_{ex} , со значением x_{k3} , рассчитанным по уравнению (15). Если они получаются равными с заданной точностью, расчеты прекращаем, если нет увеличивает x_{ex} по сравнению с его предыдущим значением и расчеты по пунктам 2 и 3 повторяем до $x_{ex} \approx x_{k3}$.

Рассмотрим случай идеального вытеснения, когда $Pe_l \rightarrow \infty$ ($D_l \rightarrow 0$).

В этом случае дифференциальное уравнение (13) принимает вид дифференциального уравнения первого порядка:

$$L \cdot \frac{dx}{dz} + \varphi \cdot x \cdot \frac{dL}{dZ} = 0. \quad (18)$$

Так как $\varphi \approx 1$, то последнее дифференциальное уравнение имеет аналитическое решение с учетом граничного условия на входе:

$$L_x = G_n \cdot x_n.$$

В дифференциальном виде $dL = -dL_p$, тогда $dL = -2\pi \cdot R_n \cdot g_0 \cdot \left(1 - \frac{a+b \cdot x}{\Delta p}\right) \cdot dz$, и уравнение (18) с учетом сделанных математических выкладок после разделения переменных приобретает вид:

$$-\frac{1}{\left(1 - \frac{a}{\Delta p}\right)^2} \cdot \left[\frac{1 - \frac{a}{\Delta p} - \frac{b}{\Delta p} \cdot x}{x} + \frac{b}{\Delta p} \cdot \ln \left| \frac{1 - \frac{a}{\Delta p} - \frac{b}{\Delta p} \cdot x}{x} \right| \right] = P + \frac{2\pi \cdot R_n \cdot g_0 \cdot \varphi}{G_n \cdot x_n} \cdot z$$

где P – постоянная интегрирования.

Остальные формулы для режима идеального вытеснения, вытекающие из интегральных уравнений материального баланса, известны [1]:

$$\left. \begin{aligned} L_k &= G_n \cdot \left(\frac{x_n}{x_k} \right)^{1/\varphi}; \\ L_{pk} &= G_n \cdot \left[1 - \left(\frac{x_n}{x_k} \right)^{1/\varphi} \right]; \\ x_{pk} &= (G_n \cdot x_n - L_k \cdot x_k) / L_{pk}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Рассмотрим режим идеального смешения, когда $Pe_l \rightarrow 0$ ($D_l \rightarrow \infty$). В этом случае $x = x_k$ при любой высоте z , $x_{cp} = (1 - \varphi) \cdot x_{ck}$ (индекс s обозначает рассматриваемую модель идеального смешения).

Тогда согласно уравнению (5) осмотическое давление будет постоянно по высоте:

$$p_u = a + b \cdot x_{ck}.$$

Расход пермеата через боковую поверхность ротора

$$G_n \cdot (x_n - x_{ck}) = (2\pi \cdot R_n \cdot H \cdot g_0) \cdot \left(1 - \frac{a}{\Delta p}\right) \cdot \varphi \cdot x_{ck} - (2\pi \cdot R_n \cdot H \cdot g_0) \cdot \varphi \cdot \frac{b}{\Delta p} \cdot x_{ck}^2,$$

решение которого имеет вид:

$$x_{ck} = -\frac{B_c}{2 \cdot A_c} + \sqrt{\left(\frac{B_c}{2 \cdot A_c}\right)^2 + \frac{G_n \cdot x_n}{A_c}}, \quad (20)$$

где

$$A_c = 2\pi \cdot R_n \cdot H \cdot g_0 \cdot \varphi \cdot b / \Delta p;$$

$$B_c = \frac{G_n - 2\pi \cdot R_n \cdot H \cdot g_0 \cdot \varphi \cdot \left(1 - \frac{a}{\Delta p}\right)}{A_c}.$$

$$\frac{dx}{x^2 \cdot \left[\left(1 - \frac{a}{\Delta p}\right) - \frac{b}{\Delta p} x \right]} = \frac{2\pi \cdot R_n \cdot g_0 \cdot \varphi}{G_n \cdot x_n} dz.$$

Последнее дифференциальное уравнение имеет аналитическое решение, которое приводит к зависимости $z = z(x)$ с учетом граничных условий: $z = 0, x = x_n$ и $z = H, x = x_k$.

$$L_{cp} = 2\pi \cdot R_n \cdot H \cdot g_0 \cdot \left(1 - \frac{p_u}{\Delta p}\right) \cdot (1 - \varphi),$$

а ретанта: $L_c = G_n - L_{cp}$.

Из системы уравнений общего материального баланса по молекулам и ионам растворенного вещества, а также по фильтруемому через мембрану ретанту получаем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} G_n &= L_{cp} + L_c; \\ G_n \cdot x_n &= L_{cp} \cdot (1 - \varphi) \cdot x_{ck} + L_c \cdot x_{ck}; \\ L_{cp} &= 2\pi \cdot R_n \cdot H \cdot g_0 \cdot \left(1 - \frac{a + b \cdot x_{ck}}{\Delta p}\right). \end{aligned} \right\}$$

Из первых двух уравнений последней системы получаем с учетом уравнения (19):

$$G_n \cdot (x_n - x_{ck}) = L_{cp} \cdot \varphi \cdot x_{ck}.$$

Подставляя в последнее уравнение значение L_{cp} из третьего уравнения выведенной системы получаем алгебраическое уравнение:

Как видно из результатов расчетов, представленных в таблице, технологические параметры для диффузионной модели структуры потоков занимают промежуточное положение между аналогичными параметрами, рассчитанными для моделей идеального вытеснения и перемешивания.

Малые значения Pe_l (в примере $Pe_l = 0,01$) соответствуют слишком низким производительностям сверхцентрифуги (в тысячу и более раз по сравнению с рулонными мембранами,

у которых соответственно во столько же раз больше площадь поверхности), так как при численных расчетах по уравнению (18) гради-

енты gr_2 , становятся отрицательными, что противоречит модели – концентрации x_2 в ретанте должны монотонно расти.

**Исходные и справочные данные и расчетные параметры
обратноосмотического процесса в сверхцентрифуге**

№	Наименование параметра	Размер- ность	Обозна- чение	Величина параметра		
				Идеальное вытеснение	Продольное пе- ремешивание	Идеальное смешение
1	2	3	4	$Pe \rightarrow \infty$	$Pe=0,01$	$Pe \rightarrow 0$
Исходные данные						
1	Производительность по исходному рас- твору CaCl_2	кг/с	G_n	0,01	0,01	0,01
2	Начальная концентрация на входе CaCl_2	$\frac{\text{кг}}{\text{кг}} A$	x_n	0,8	0,8	0,8
3	Молекулярная масса растворенной соли CaCl_2	$\frac{\text{кг}A}{\text{кмоль}}$	M	111	111	111
4	Плотность раствора	кг/м^3	ρ	1023,7	1023,7	1023,7
5	Теплота гидратации катиона Ca^{++}	$\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	ΔH_1	1616	1616	1616
6	Теплота гидратации аниона Cl^-	$\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	ΔH_2	352	352	352
7	Число ионов кальция в молекуле CaCl_2	—	n_1	1	1	1
8	Число ионов хлора в молекуле CaCl_2	—	n_2	2	2	2
9	Удельная производительность по чистой воде мембраны	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$	g_0	0,0014	0,0014	0,0014
10	Константы селективности мембраны МГА -100	—	a_m	6,7		
		—	b_m	3,215		
10	Константы уравнения зависимости осмотического давления от концентрации	МПа	a	−0,047		
		$\frac{\text{МПа}}{\frac{\text{кг}A}{\text{кг}}}$	b	0,62		
11	Угловая скорость вращения ротора	$1/\text{с}$	ω	3200		
12	Радиус ротора сверхцентрифуги	м	R_n	0,05		
13	Радиус свободной границы раствора внутри ротора	м	R_g	0,04		
14	Высота рабочей части ротора	м	H	1		
Общие расчетные параметры						
1	Перепад давления, под которым идет об- ратноосмотический процесс	МПа	Δp	4,616		
3	Теплота гидратации молекулы CaCl_2	$\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	ΔH	585		
4	Истинная селективность мембраны МГА-100	—	φ	0,994		
Расчетные параметры для структуры потока идеального вытеснения						
1	Коэффициенты интегрального уравнения зависимости высоты от концентрации в ретанте	—	A	1,01		
		—	B	0,134		
		—	C	0,547		
2	Концентрация в ретанте на выходе из ро- тора	$\frac{\text{кг}A}{\text{кг}}, \%$	x_{ke}	1,59		
3	Степень концентрирования	—	K_g	2		

Окончание таблицы

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина параметра		
				Идеальное вытеснение	Продольное перемешивание	Идеальное смешение
1	2	3	4	$Pe \rightarrow \infty$	$Pe=0,01$	$Pe \rightarrow 0$
4	Производительность по пермеату	$кг/с$	L_{pk}	$4,99 \cdot 10^{-4}$		
5	Производительность по ретанту	$кг/с$	L_k	$5,01 \cdot 10^{-4}$		
6	Конечная концентрация в пермеате на выходе	$кгA/кг, \%$	x_{pk}	$6,91 \cdot 10^{-3}$		
Расчетные параметры для диффузионной структуры потоков $Pe_1 = 0,01$						
1	Концентрация исходного раствора на входе	$\frac{кгA}{кг}, \%$	$x_{вх}$	1,264		
2	Градиент концентрации исходного раствора на входе (по безразмерной высоте)	$\frac{кгA}{кг}, \%$	$g_{вх}$	$4,64 \cdot 10^{-3}$		
3	Расход ретанта	$кг/с$	L_k	$6,307 \cdot 10^{-4}$		
4	Степень концентрирования	—	K	1,583		
5	Расход пермеата	$кг/с$	L_{pk}	$3,69 \cdot 10^{-4}$		
6	Концентрация молекул и ионов $CaCl_2$ в пермеате	$\frac{кгA}{кг}, \%$	x_{pk}	$1,765 \cdot 10^{-3}$		
7	Концентрация в ретанте на выходе	$\frac{кгA}{кг}, \%$	x_k	1,267		
Расчетные параметры для структуры потоков идеального смешения						
1	Коэффициенты уравнения материального баланса (18)	—	A_c	$5,88 \cdot 10^{-5}$		
		—	B_c	9,6		
		—	C_c	13,63		
2	Конечная концентрация молекул и ионов $CaCl_2$ в ретанте	$\frac{кгA}{кг}, \%$	x_{ck}	1,256		
3	Расход ретанта	$кг/с$	L_c	$3,7 \cdot 10^{-4}$		
4	Расход пермеата	$кг/с$	L_{cp}	$6,3 \cdot 10^{-4}$		
5	Конечная концентрация молекул и ионов $CaCl_2$ в пермеате	$\frac{кгA}{кг}, \%$	x_{cp}	$7,85 \cdot 10^{-3}$		
6	Степень концентрирования раствора	—	K_c	1,57		

Таким образом, учет продольной диффузии, когда $0 < Pe_1 < \infty$ ($\infty > D_1 > 0$) в структуре потока очищаемого раствора позволяет рассчитывать по рассмотренному выше алгоритму технологические параметры обратноосмотического процесса, проходящего в центробежном поле сверхцентрифуги. Однако преимущество проведения обратноосмотического процесса в сверхцентрифугах, связанное с отсутствием насосов высокого давления, нивелируется низкой производительностью и степенью концентрирования из-за малой поверхности мембраны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дытнерский, Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Ю. И. Дытнерский, Г. С. Борисов, В. П. Брыков и др. ; под ред. Ю. И. Дытнерского, 2-е изд., перераб. и дополн. — М.: Химия, 1991. — 496 с.
2. Тимонин, А. С. Машины и аппараты химических производств : учебник для вузов / А. С. Тимонин, Б. Г. Балдин, В. Я. Борщев, Ю. И. Гусев и др. ; под общ. ред. А. С. Тимонина. — Калуга : Ноосфера, 2014. — 856 с.
3. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов / А. Г. Касаткин. — 10-е изд., стереотипное, доработанное. Перепечатано с изд. 1973 г. — М. : ООО ТИД «Альянс», 2004. — 753 с.
4. Баландина, А. Г. Развитие мембранных технологий и возможность их применения для очистки сточных вод предприятий химии и нефтехимии / А. Г. Баландина, Р. И. Хангильдин, И. Г. Ибрагимов, В. А. Мартяшева // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. — 2015. — № 5. — С. 336–375.
5. Свитцов, А. А. Мембранные технологии в России / А. А. Свитцов // Химический журнал. — 2010. — № 10. — С. 22–26.
6. Десятов, А. В. Опыт исследования мембранных технологий для очистки и опреснения воды / А. В. Десятов, А. Е. Баранов, Е. А. Баранов, Н. П. Какуркин, А. В. Асеев. — М. : Химия, 2008. — 240 с.
7. Смолянский, М. Л. Таблицы неопределенных интегралов / М. Л. Смолянский. — 2-е изд., испр. — М. : Гос. изд. физ.-мат. лит., 1963. — 112 с.

УДК 66.045.54

*Н. А. Меренцов, Т. Д. Свиридова, Е. Р. Усков, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков***ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ РЕГУЛЯРНОЙ СЕТЧАТОЙ НАСАДКИ
С УПРУГИМ ЖИДКОСТНЫМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕМ****Волгоградский государственный технический университет**

Приведены данные экспериментального исследования гидродинамики новой регулярной сетчатой насадки с упругим жидкостным распределителем и сравнительная характеристика данного насадочного устройства с насадками, получившими широкое промышленное применение.

Ключевые слова: насадка, гидравлическое сопротивление, удерживающая способность, гидродинамический режим, экспериментальные исследования.

*N. A. Merentsov, T. D. Sviridova, E. R. Uskov, V. A. Balashov, A. B. Golovanchikov***THE STUDY OF THE HYDRODYNAMICS OF REGULAR
STRETCH-MESH NOZZLES LIQUID DISPENSER****Volgograd State Technical University**

Experimental study of the hydrodynamics of a new regular mesh elastic nozzle with a liquid dispenser and comparative characteristics of the packaged device with nozzles is widely used in industry.

Keywords: nozzle, hydraulic resistance, holding power, hydrodynamics regime, experimental studies.

Насадочные теплообменные устройства различной конфигурации получают применение в очень широком спектре технологических процессов, протекающих во многих отраслях промышленности. Так, например, в химической промышленности это процессы абсорбции и ректификации, протекающие в насадочных колонных массообменных аппаратах, в теплоэнергетике это испарительное охлаждение воды в оросителях градирен, в экологических процессах – это очистка газовых выбросов в абсорберах и скрубберах. При всем различии и специфике процессов, протекающих в указанном технологическом оборудовании, общим назначением их контактных устройств является создание таких условий организации взаимодействия газовой и жидкой фаз, когда обеспечивается наибольшая эффективность протекающих в этом оборудовании процессов при наименьших энергетических затратах. При большом разнообразии режимных факторов, химических и теплофизических свойств контактирующих потоков эффективность контактных устройств, как свидетельствует промышленный опыт и экспериментальные исследования, во многом определяется внутренней геометрией и конструктивным исполнением насадки, формирующей гидродинамическую обстановку в двухфазном фильтрационном потоке.

Разработка новых перспективных путей интенсификации тепло-массообменных процессов в насадочных устройствах является в настоящее время актуальной темой.

Данное исследование ориентировано на поиск и экспериментальное подтверждение новых путей совершенствования режимов орошения насадок, то есть равномерного распределения жидкости по насадке с максимально возможным использованием ее рабочего объема и получение экспериментальных данных в области гидродинамики в насадочных контактных устройствах в зависимости от их конфигурации и режима орошения. Наряду с поставленными задачами, основной является проведение сравнительной характеристики разработанной насадки с устройствами, получившими широкое промышленное применение.

Для проведения широкомасштабных экспериментальных исследований была разработана экспериментальная установка, позволяющая исследовать гидродинамику насадочных устройств и теплообмен в условиях противоточного движения воздушно-водяного потока. Установка доступна для визуального наблюдения, развития гидроаэродинамических режимов движения воды и воздуха через насадку, определения удерживающей способности, гидравлического сопротивления сухих и орошаемых насадок, исследования интенсивности тепло- и массообменных процессов, протекающих в насадочных устройствах [1].

На рис. 1 приведена схема, поясняющая устройство и принцип работы установки для проведения указанного комплекса экспериментальных исследований.

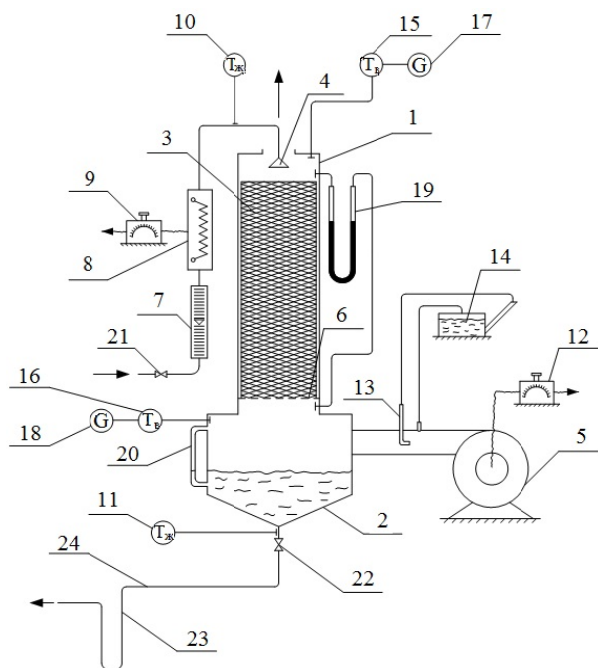


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – корпус; 2 – водосборная емкость; 3 – насадка; 4 – распределитель; 5 – центробежный вентилятор; 6 – опорная решетка; 7 – ротаметр; 8 – водонагреватель; 9 – потенциометр; 12 – частотник; 10, 11, 15, 18 – температурный датчик; 13 – трубка Пито-Прандтля; 14 – микроанометр; 16, 17 – гигрометр; 19 – дифманометр; 20 – указатель уровня жидкости; 21, 22 – вентиль; 23 – изгиб трубы; 24 – труба для слива воды в канализацию

Установка состоит из корпуса колонны 1 в котором размещается насадка 3, орошаемая водой с помощью распределителя 4, насадка противотоком продувается воздушным потоком поступающим из центробежного вентилятора 5.

Стенки корпуса выполнены плоскими и прозрачными, что позволяет без искажения наблюдать и фиксировать с помощью скоростной видеокамеры работу насадки в различных гидродинамических режимах. Визуальная доступность данной установки позволяет оценить соотношение капельного и пленочного движения воды через насадку, что очень важно для математического моделирования процессов тепло-массопереноса.

В установке реализована картриджная система сменных насадок, позволяющая осуществлять быструю смену насадок и обеспечивающая воспроизводимость измеряемых параметров в повторных экспериментах [1].

На рис. 2 представлена экспериментальная установка и регулярная сетчатая насадка с упругим жидкостным распределителем (модификация Свиридова). Упругий жидкостный распределитель представляет собой ряд параллельно расположенных трубок, которые создают сосредоточенную подачу жидкости на поверхности листовых сетчатых насадок. Жидкостный распределитель за счет упругих свойств каналов, под действием напора жидкости расширяется, осуществляет сосредоточенную равномерную подачу жидкости на поверхность листовых насадочных элементов. Такого рода жидкостный распределитель обладает целым рядом весомых преимуществ, подтвержденных экспериментально, которые будут изложены далее.

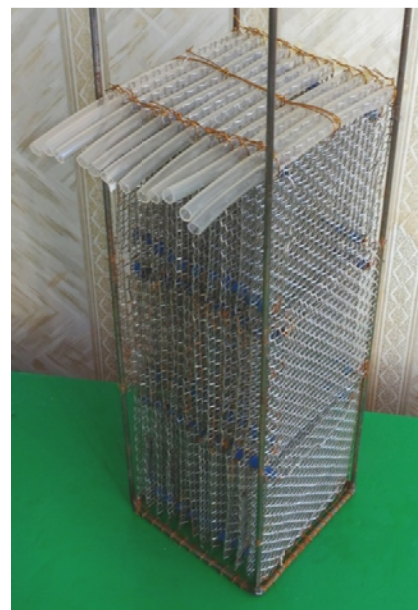


Рис. 2. Регулярная сетчатая насадка с упругим жидкостным распределителем (модификация Свиридова) и фото экспериментальной установки

Одним из важнейших показателей работы насадки, независимо от специфики процесса, является ее гидравлическое сопротивление без орошения, которое дает ориентир на возможный спектр процессов ее промышленного применения.

Гидравлические сопротивления сухих насадок, помимо промышленной ориентации наса-

дочного устройства по видам процессов, являются своеобразным «паспортом» насадочных устройств, и отражением энергетических затрат на протекание технологических процессов.

Результаты исследования гидравлических сопротивлений сухих насадок представлены на рис. 3.

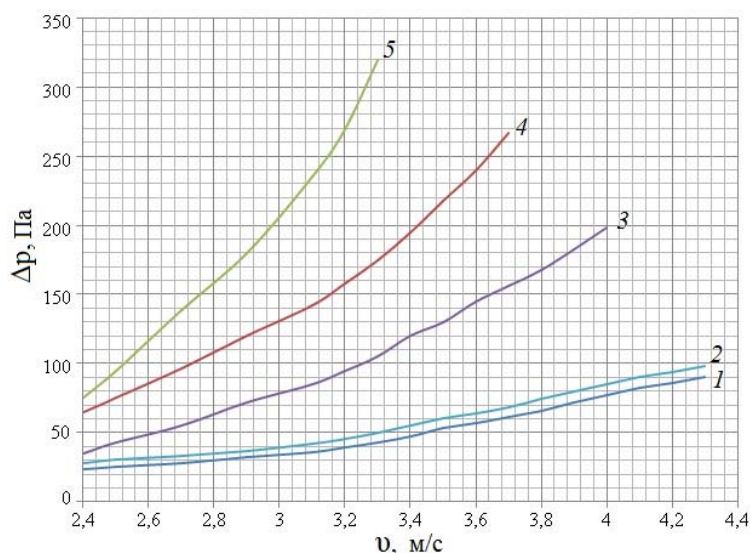


Рис. 3. График зависимости гидравлического сопротивления сухой насадки от скорости воздуха в колонне:

1 – регулярная блочная сетчатая насадка с упругим жидкостным распределителем (модификация Свиридова); 2 – листовая насадка (модификация Усков); 3 – насадка с резонирующим эффектом (модификация Топилин) [8]; 4 – кольца Палля; 5 – кольца Рашига

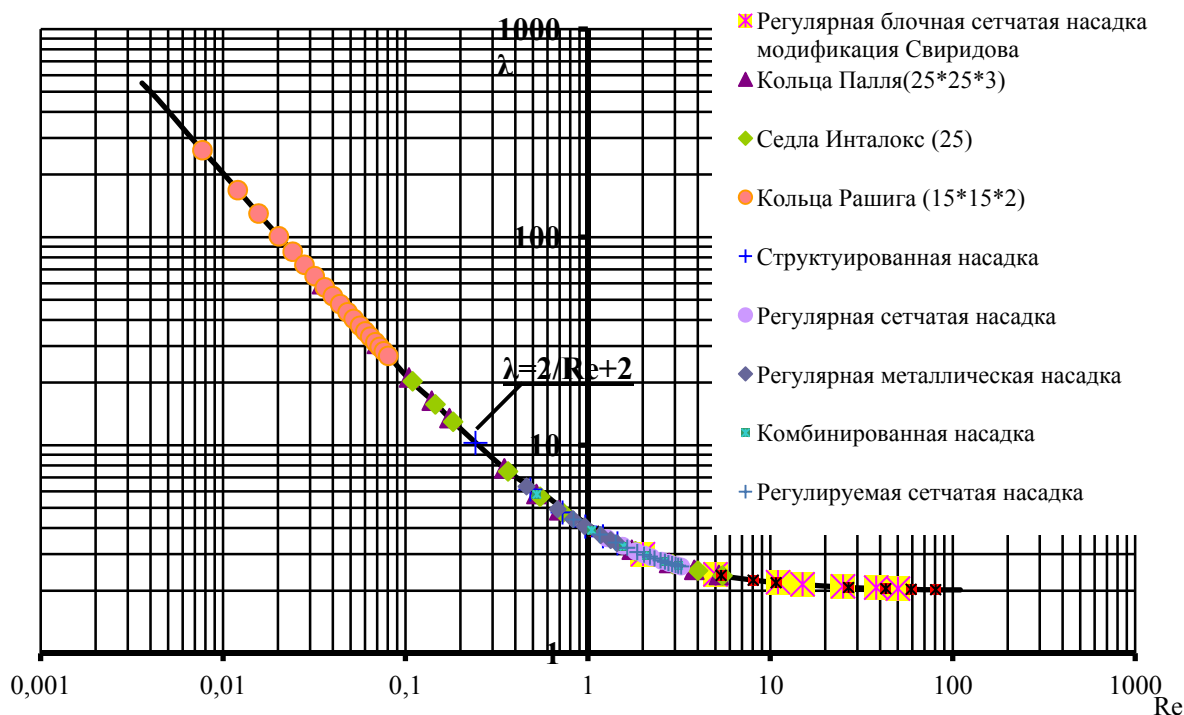


Рис. 4. График зависимости $\lambda = f(Re)$ для различных (по структуре) насадок

Для обобщения экспериментальных данных и для проведения сравнительной характеристики испытуемых насадочных устройств и насадок, получивших широкое промышленное применение, используем критериальное уравнение зависимости $\lambda = \frac{2}{Re_m} + 2$ [2, 7].

На основании сравнительной характеристики видов насадок при помощи обобщенного критериального уравнения зависимости коэффициента сопротивления от модифицированного числа Рейнольдса можем сделать вывод, что регулярная блочная сетчатая насадка с упругим жидкостным распределителем (модификация Свиридова) лежит в диапазоне очень малых гидравлических сопротивлений, по сравнению с известными промышленными насадками, поэтому может быть ориентирована на процессы

испарительного охлаждения и инерционную очистку газов, а также целый ряд энергоэффективных промышленных процессов [2, 7].

Однако следует отметить, что гидравлические сопротивления сухих насадок дают далеко не полную картину по энергоэффективности насадочных устройств. Дело в том, что тепло-массообменные насадки могут иметь абсолютно различные геометрические конфигурации и соответственно будут реализовывать достаточно сложные гидравлические режимы работы. Поэтому необходимо исследовать гидравлические режимы и проводить сравнительные характеристики гидравлических сопротивлений орошаемых насадок.

Результаты исследования гидравлических сопротивлений орошаемых насадок представлены на рис. 5.

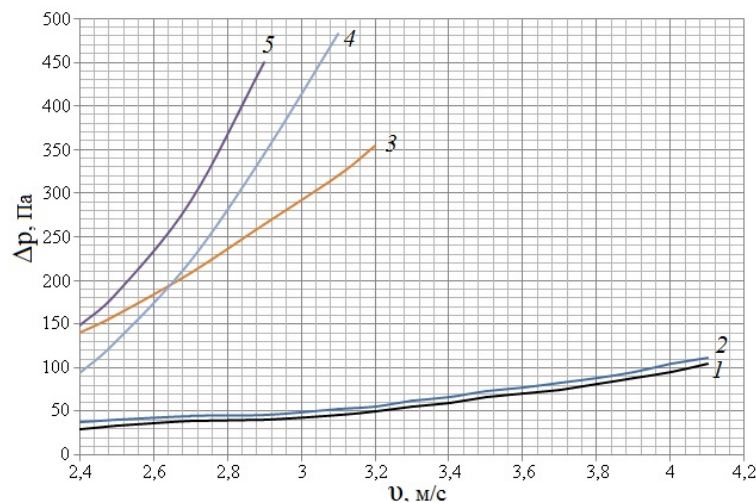


Рис. 5. График зависимости гидравлического сопротивления орошаемой насадки от скорости воздуха в колонне:

1 – регулярная блочная сетчатая насадка; 2 – регулярная блочная сетчатая насадка с упругим жидкостным распределителем (модификация Свиридова); 3 – кольца Палля; 4 – кольца Рашига; 5 – насадка с резонирующим эффектом (модификация Топилин) [8]

На основании полученных данных, очевидно, что самым низким гидравлическим сопротивлением обладает регулярная блочная сетчатая насадка с упругим жидкостным распределителем (модификация Свиридова) и листовая насадка (модификация Усков). При этом главным полученным и экспериментально подтвержденным эффектом явилось то, что разработанный способ орошения и разработанные насадки не чувствительны к режиму орошения и обладают очень низким гидравлическим сопротивлением в широком диапазоне расходов газа и при различных плотностях орошения.

Одной из основных гидравлических харак-

теристик насадочных устройств, которая, на наш взгляд, не получает должного заслуженного внимания, и которую мы считаем за базовую для методик расчета [3, 4] наряду с коэффициентами тепло- и массопередачи, является удерживающая способность, то есть способность насадки аккумулировать определенное количество жидкости в зависимости от режима работы, которая будет являться отражением суммарного времени пребывания жидкости и поверхности массопереноса для целого ряда насадок.

Результаты исследования удерживающих способностей насадочных устройств представлены на рис. 6.

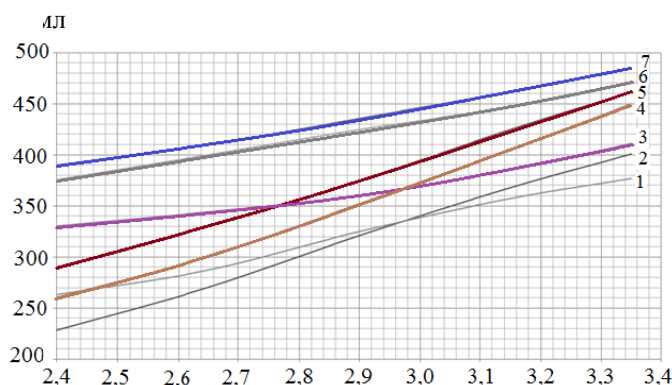


Рис. 6. График зависимости удерживающей способности орошаемой насадки от скорости газа в колонне:

1 – листовая насадка (модификация Усков); 2 – кольца Палля; 3 – регулярная блочная сетчатая насадка; 4 – кольца Рашига; 5 – насадка с резонирующим эффектом (модификация Топилин) [8]; 6 – сетчатая насадка; 7 – регулярная блочная сетчатая насадка с упругим жидкостным распределителем (модификация Свиридова)

По сравнению с целым рядом промышленных насадок, которые в ходе эксперимента были проанализированы, регулярная сетчатая насадка с упругим жидкостным распределителем (модификация Свиридова) обладает очень высокой удерживающей способностью, что видно из рис. 7. На основании полученных данных по энергоэффективности, гидравлическим сопротивлениям орошаемых насадок и особенно не чувствительности к режиму орошения и высокой удерживающей способности по жидкости, можно сделать вывод о перспективности промышленного применения данного насадочного устройства с качественным сосредоточенным режимом орошения, особенно для испарительного охлаждения оборотной воды в градирнях

и аппаратов инерционной мокрой очистки газов. Разработанное распределительное устройство регулярной сетчатой насадки (модификация Свиридова) с упругими каналами, позволяет равномерно распределить жидкость и уменьшить капельный унос из аппарата, что особенно важно и существенно снижает объем выполняемой жидкости для систем оборотного водоснабжения промышленных предприятий.

В ходе исследования проведен полный корреляционный анализ экспериментальных данных для регулярной блочной сетчатой насадки с упругим жидкостным распределителем (модификация Свиридова), результаты которого, с полученными степенными уравнениями, представлены в таблице.

Результаты корреляционного анализа экспериментальных данных для регулярной блочной сетчатой насадки с упругим жидкостным распределителем (модификация Свиридова)

Уравнение		Гидравлическое сопротивление сухой насадки	Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки	Удерживающая способность насадки
		$Eu = A \cdot Re^n$ $y = b + a \cdot x$	$Eu = A \cdot Re^n \left(\frac{L}{G}\right)^m$ $y = b + a \cdot x$	$Y = A \cdot Re^n \left(\frac{L}{G}\right)^m$ $y = b + a \cdot x$
Коэффициенты		$a = 0,37; b = 1,04$	$a = 0,21; b = 0,95$	$a = 5,15; b = 0,24$
Критерий Кохрена	Расчетный	0,2197	0,2074	0,2785
	Табличный	0,222	0,2419	0,544
Выводы		Так как $0,2197 < 0,222$, то воспроизводимость удовлетворяет условию	Так как $0,2074 < 0,2419$, то воспроизводимость удовлетворяет условию	Так как $0,2785 < 0,544$, то воспроизводимость удовлетворяет условию
Критерий Фишера	Расчетный	0,901	1,895	2,11
	Табличный	2,3325	1,902	3,10
Выводы		Так как $0,901 < 2,3325$, то модель адекватна	Так как $1,895 < 1,902$, то модель адекватна	Так как $2,11 < 3,10$, то модель адекватна

Критерий Стьюдента	Расчетный	594,21	1100,84	4637,9
	Табличный	1,97	2,00	2,09
Выводы		Так как $594,21 > 1,97$, то коэффициенты значимы	Так как $1100,84 > 2,00$, то коэффициенты значимы	Так как $4637,9 > 2,09$, то коэффициенты значимы
Коэффициент корреляции		0,995	0,996	0,991
Выводы		Так как $0,995 > 0,95$, то зависимость прямая и сильная	Так как $0,996 > 0,95$, то зависимость прямая и сильная	Так как $0,991 > 0,95$, то зависи- мость прямая и сильная

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меренцов, Н. А. Экспериментальная установка для исследования тепло – массообменных процессов в насадочных устройствах градилен / 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.
2. Golovanchikov, A. B. The filtration equation for packing material / A.B. Golovanchikov, V. A. Balashov, N. A. Merentsov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, No. 1 – 2. – С. 10–13.
3. Голованчиков, А. Б. Modeling and analysis of a mechanical-draft cooling tower with wire packing and drip irrigation / А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, В. А. Балашов // Chemical and Petroleum Engineering. – 2013. – Vol. 48, No. 9 – 10. – С. 595–601.
4. Голованчиков, А. Б. Моделирование гидромеханических и тепло- и массообменных процессов в вентилаторной 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.
5. Хижняков И. А. Экспериментальное исследование гидродинамики тепломассообменных насадочных устройств / И. А. Хижняков, М. Г. Рязанов, Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2016. – № 1 (13). – С. 7–11.
6. Голованчиков, А. Б. Моделирование насадочной экстракционной колонны с диффузионной структурой потока по сплошной фазе / А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов // Химическая технология. – 2016. – Т. 17, № 8. – С. 377–384.
7. Меренцов, Н. А. Критериальное уравнение для расчета гидравлического сопротивления сухой насадки / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, Я. А. Орлянкина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (104) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии» ; вып. 6). – С. 112–114.
8. П. м. 160198 РФ, МПК В01J 19/00. Насадка для тепло- и массообменных процессов / Голованчиков А. Б., Васильев П. С., Ляпков А. В., Черикова К. В., Топилин М. В., Тищенко П. О. ; ВолгГТУ. – 2016.

УДК 692.82

А. В. Ковылин, В. О. Ершова

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ

Волгоградский государственный технический университет

Рассмотрено влияние теплофизических свойств ограждения здания на энергосбережение в зданиях и сооружениях. Рассмотрен пример расчета теплофизических свойств: эквивалентный коэффициент теплопроводности, объемная теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности. Приведен график распределения температур и теплового потока на ограждении здания.

Ключевые слова: энергосбережение в зданиях, теплофизические свойства (ТФС), эквивалентный коэффициент теплопроводности, объемная теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности.

A. V. Kovylin, V. O. Ershova

INFLUENCE OF THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF FENCING CONSTRUCTIONS ON ENERGY SAVING IN BUILDINGS AND STRUCTURES

Volgograd State Technical University

Influence of thermal properties of a protection of the building on energy saving in buildings and constructions is considered. An example of calculation of thermal properties is reviewed: the equivalent thermal conductivity, specific heat per unit volume, the equivalent thermal diffusivity. The schedule of distribution of temperatures and a heat flux is given in a building protection..

Keywords: energy saving in buildings, thermal properties (TFS), the equivalent thermal conductivity, specific heat per unit volume, the equivalent thermal diffusivity.

Энергосбережение в зданиях и сооружениях строится на сбережении теплоты в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: устройств вентилируемых наружных стен, дополнительного утепления наружных ограждений, теплоизоляции стен за отопительным прибором (с внутренней стороны), устройства вентилируемых окон, трехслойного или теплоотражающего (в инфракрасном излучении) остекления, устройств застекленных лоджий, применения воздушного отопления с использованием теплонасосных установок и энергии низкого потенциала (конденсата, воды, воздуха).

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем является поиск и создание энергосберегающих мероприятий и инженерных решений по реализации тепло- и технологических процессов с минимальными тепловыми потерями. Большую роль в этом играет знание теплофизических свойств используемых и вновь разрабатываемых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий. Теплофизические свойства (ТФС) ограждающих конструкций существенно влияют на тепловой и воздушный режим зданий различного назначения, а также работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, потребляющих в настоящее время значительное количество тепловой энергии [1].

Для определения ТФС ограждающих конструкций зданий и сооружений предлагается методом неразрушающего контроля. Для определения ТФС нет необходимости разрушать материал, создавать дополнительный нагрев или охлаждение ограждающей конструкции, создавать специальные условия на поверхности ограждающей конструкции (степень черноты, коэффициент теплоотдачи), что позволяет не использовать электрическую и тепловую энергию и не требует создания экспериментальных установок, требующих энергетических затрат. В предлагаемом методе достаточно естественных условий, в каких находится ограждающая конструкция.

В разные периоды года происходит нагрев или охлаждение ограждающей конструкции здания. Также в течение суток за счет солнечного излучения температура ограждающей конструкции здания меняется. В результате этого через ограждающую конструкцию здания проходят тепловые потоки, которые меняются в течение суток (а также в течение года): зимой

тепловой поток направлен от внутренней стенки к наружной, а в летний период – наоборот. В результате, в ограждающей конструкции возникают температурные волны.

В этом случае для определения комплекса теплофизических характеристик (коэффициентов теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности) достаточно естественных условий: охлаждение наружной ограждающей конструкции в холодный период года или нагрев наружной стенки в теплый период года.

Рассмотрим пример распределения температур внутренней и наружной стенки и теплового потока на ограждении здания. Максимальная плотность теплового потока наблюдается в ночные часы, а минимальная плотность теплового потока – в дневные. Пример приведен на рисунке.

Используя методику, разработанную на кафедре «Энергоснабжение и теплотехника» [2, 3], можно рассчитать эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, Вт/(м·К), объемную теплоемкость (c_p), кДж/(м³·К), эквивалентный коэффициент температуропроводности $a_{\text{экв}}$, м²/с.

Комплексный способ определения теплофизических свойств ограждающей конструкции методом неразрушающего контроля заключается в том, что вначале определяется эквивалентный коэффициент теплопроводности по формуле:

$$\lambda_{\text{экв}} = (q_{\text{п}}^{\text{max}} \delta) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}). \quad (1)$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной волны на наружной поверхности ограждения определяется по формуле:

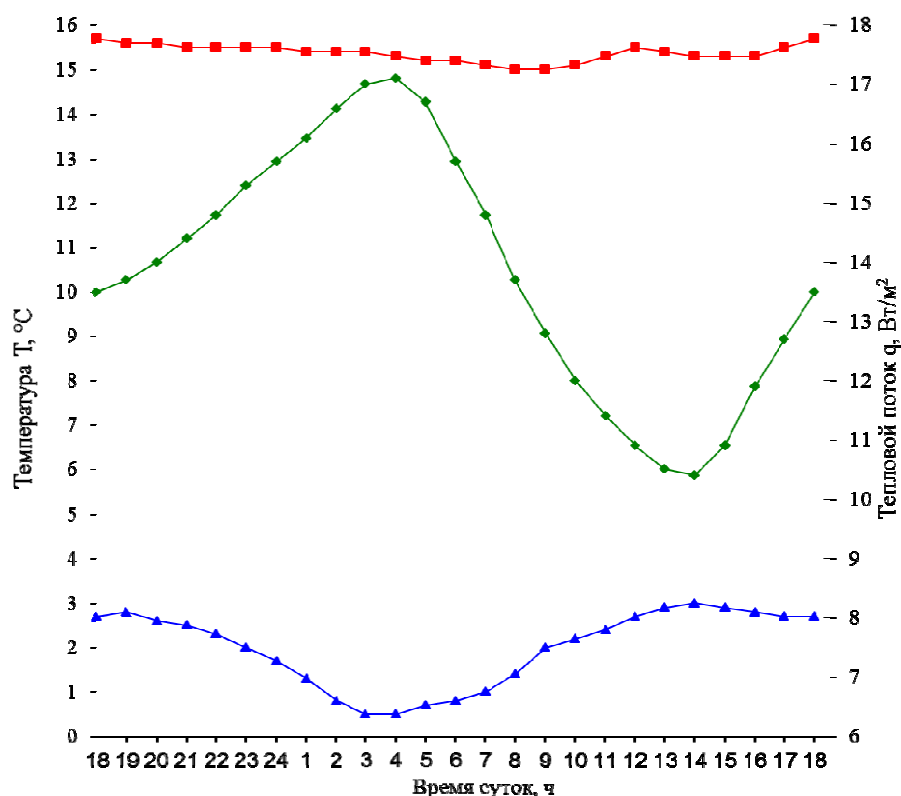
$$q_{\text{п}}^{\text{max}} = 0,5(t_1 - t_2). \quad (2)$$

Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле:

$$B = q_{\text{п}}^{\text{max}} / q_{\text{п}}^{\text{max}}. \quad (3)$$

Коэффициент теплоусвоения B характеризует аккумулирующую способность массива. В количественном смысле коэффициент теплоусвоения массива при термической релаксации – это отношение теплового потока на поверхности в данный момент времени к постоянной максимальной разности температур системе [4, 5].

Для определения объемной теплоемкости использовался коэффициент теплопроводности рассчитанный по формуле (1) и максимальная амплитуда колебаний температурной волны, рассчитанная по формуле (2).



Пример распределения температур и теплового потока на ограждении здания

Объемная теплоемкость ограждения определяется по формуле:

$$(c\rho) = (B^2 z) / (\lambda_{\text{экв}} \cdot 2\pi). \quad (4)$$

Эквивалентный коэффициент температуропроводности ограждения здания определяется по формуле (5):

$$a_{\text{экв}} = \lambda_{\text{экв}} / (c\rho). \quad (5)$$

Предложенная методика определения ТФС свойств ограждающих конструкций зданий позволяет достаточно точно определить эквивалентный коэффициент теплопроводности, объемную теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фокин, В. М. Научно-методологические основы определения теплофизических свойств материалов методом неразрушающего контроля. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2003. – 140 с.

2. Пат. № 2421711 Российская Федерация, МПК⁸ G 01 N 25/00 Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов / Фокин В. М., Ковылин А. В.; заявитель и патентообладатель ВолгГАСУ. – № 2009129316/28; заявл. 29.07.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 9 с.

3. Фокин, В. М. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов / В. М. Фокин, А. В. Ковылин, В. Н. Чернышов. – М.: Спектр, 2011. – 155 с.

4. Фокин, В. М. Теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля / В. М. Фокин, А. В. Ковылин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета / ВолгГАСУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Строительство и архитектура»; вып. 14 (33)). – С. 123–127.

5. Ковылин, А. В. Исследование коэффициента теплопроводности ограждения здания / А. В. Ковылин // Успехи современной науки и образования. – 2016. – Т. 2, № 11. – С. 137–138.

УДК 66-963

*А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Д. О. Смольская***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРУДЕРОВ****Волгоградский государственный технический университет**

Разработана конструкция экструдера для получения гранул с использованием резонансных колебаний. Для данной конструкции проводится расчет упругости каждой пружины и собственная частота колебаний физического пружинного маятника. Также была разработана конструкция пресс-экструдера для переработки нагретого материала с использованием памяти формы.

Ключевые слова: пресс-экструдер, экструдер, резонансные колебания, упругость пружины, частота колебаний, резонанс, пружинный маятник, память формы, экструзионная головка.

*N. A. Prohorenko, A. B. Golovanchikov, D. O. Smolskaya***IMPROVING THE DESIGN OF EXTRUDERS****Volgograd State Technical University**

Designed extruder to produce pellets using resonant oscillations. For the design calculation of elasticity of each spring and the natural frequency of oscillations of a spring pendulum. Also the design of the press - extruder for processing of the heated material, using the method of magnetic memory.

Keywords: press extruder, extruder, resonant vibrations, the elasticity of the springs, the oscillation frequency, a resonance spring pendulum, the method of magnetic memory, extrusion head.

Экструдер представляет из себя агрегат, предназначенный для формования пластичных материалов посредством продавливания сквозь формующий инструмент.

Экструдер является основным оборудованием, входящим в состав комплексных экструзионных линий, которые предназначены для изготовления широкого спектра изделий или продуктов. Сырьем для использования на экструзионных линиях служат гранулы, дробленка или агломерат. Исходный материал расплавляется, после чего выдавливается сквозь формующий инструмент.

В соответствии с типом рабочего органа, экструзионные машины могут быть одношне-

ковыми, многошнековыми, дисковыми или поршневыми [1].

Основная область применения пресс-экструдера – химическая, нефтехимическая, микробиологическая, сельскохозяйственная и других отрасли промышленности при проведении гидромеханических, массообменных и реакционных процессов, особенно с высоковязкими и неньютоновскими жидкостями. Применение экструдера позволяет снизить расход продукта [2].

Предлагается следующая конструкция пресс-экструдера, использующего память формы материала (рис. 1), целью которой является увеличение производительности.

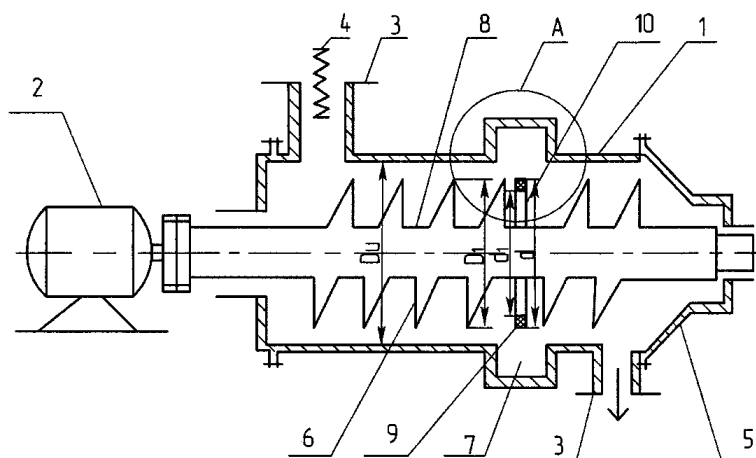


Рис. 1. Пресс-экструдер:

1 – цилиндрический корпус; 2 – привод; 3 – загрузочный бункер; 4 – питатель; 5 – экструзионная головка; 6 – шнек; 7 – кольцевая проточка; 8 – вал; 9 – кольцо; 10 – ребра

Технический результат достигается тем, что в пресс-экструдере, содержащем корпус с приводом, загрузочным бункером, питателем и кольцевой проточкой, экструзионную головку и шнек, расположенный в цилиндрическом корпусе, кольцо, жестко закрепленное на валу шнека посредством ребер с возможностью вращения вместе с валом и с образованием между валом и кольцом кольцевого зазора, расщеченного ребрами, при этом кольцо установлено напротив кольцевой проточки, а наружный диаметр кольца d равен наружному диаметру витков шнека D_1 , при этом само кольцо выполнено из материала, обладающего памятью формы [3].

Установка кольца напротив кольцевой проточки позволяет при увеличении размеров наружного диаметра кольца d свободно размещаться ему в этой кольцевой проточке и вращаться в ней без трения и заклинивания боковых и торцевой поверхностей с образованием кольцевого лабиринтного (ступенчатого) гидрозатвора, предотвращающего обратный поток перерабатываемой среды, а значит, увеличивать производительность пресс-экструдера. Выполнение наружного диаметра кольца d равным наружному диаметру витков шнека D_1 позволяет быстро и свободно устанавливать шнек вместе с кольцом внутри цилиндрического корпуса, что уменьшает затраты времени на ремонт, сборку и разборку пресс-экструдера и увеличивает его производительность. Кольцо из материала, обладающего памятью формы, позволяет в холодном состоянии при обычной температуре обеспечивать наружный диаметр кольца d , равный наружному диаметру витков шнека D_1 , а в рабочем состоянии при рабочих повышенных температурах увеличивать этот диаметр d за счет эффекта памяти до диаметра d_0 , перекрывающего кольцевой канал между цилиндрическим корпусом и гребнями шнека с образованием в кольцевом зазоре гидрозатвора, предотвращающего обратный поток перерабатываемой горячей среды, что приводит к увеличению производительности.

При остановке работы пресс-экструдера и его охлаждении до обычной температуры кольцо, выполненное из материала, обладающего памятью формы, охлаждается и его наружный диаметр d_0 уменьшается до диаметра d , равного диаметру гребней шнека D_1 . Это позволяет быстро и легко демонтировать шнек с кольцом из цилиндрического корпуса, а после

их ремонта также быстро осуществлять их сборку и подготовку к работе, что способствует увеличению рабочего времени и производительности.

Пресс-экструдер для переработки нагретого материала работает следующим образом. Нагретый перерабатываемый материал подают через загрузочный бункер 3 питателем 4 на вход цилиндрического корпуса 1. Включают привод 2, который вращает вал 8 со шнеком 6, гребни которого перемещают перерабатываемый материал в экструзионную головку 5. Нагретый перерабатываемый материал нагревает кольцо 9, а так как оно выполнено из материала, обладающего памятью формы, то его наружный диаметр возрастает до $d_0 > d$. Кольцо 9 установлено напротив кольцевой проточки 7, поэтому нагретое кольцо 9 с увеличенным диаметром d_0 свободно без трения устанавливается внутри кольцевой проточки 7, образуя кольцевое лабиринтное уплотнение, препятствующее образованию обратного потока перерабатываемого материала в кольцевой проточке 7 между гребнями шнека 6 и цилиндрическим корпусом 1 (рис. 2). Это способствует увеличению расхода перерабатываемого материала через экструзионную головку 5 и увеличению производительности.

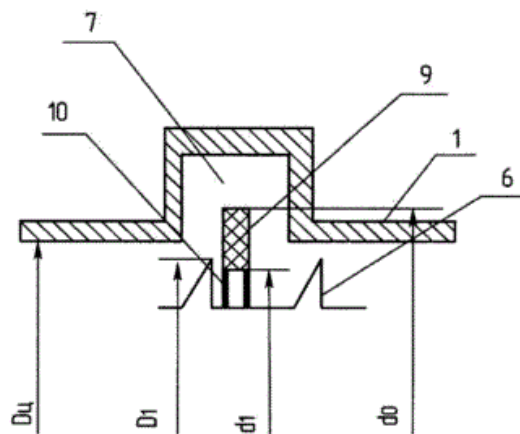


Рис. 2. Увеличенный фрагмент А: разрез в зоне установки кольца из материала обладающего памятью формы напротив кольцевой выточки, при повышенной рабочей температуре

При остановке работы пресс-экструдера прекращают подачу перерабатываемого материала питателем 4 через загрузочный бункер 3. Работающий привод 2 выдавливает вращающимся шнеком 6 оставшийся в цилиндрическом корпусе 1 перерабатываемый материал в экструзионную головку 5. Цилиндрический

корпус 1 с валом 8, шнеком 6 и кольцом 9 остывают до обычной температуры, а так как кольцо 9 выполнено из материала, обладающего памятью формы, то его наружный диаметр d_o уменьшается до первоначального диаметра d . Затем снимают экструзионную головку 5, отсоединяют вал 8 от привода 2 и вынимают шнек 6 с валом 8 и кольцом 9 из цилиндрического корпуса 1 [4].

Также была разработана конструкция экструдера для получения гранул, состоящего из цилиндрического корпуса, расположенного в корпусе червяка и прерывателя овальной формы, формующей головки с выпускными отверстиями, имеющей поперечное сечение внутренней поверхности в форме эллипса, привода вращения червяка и пружины, причем выпускные отверстия расположены симметрично на малой оси эллипса формующей головки, прерыватель закреплен посредством пружины на конце червяка и снабжен валиком, установленным в подшипнике, расположенном в съемной крышке, а размер большой оси овала прерывателя равен внутреннему размеру малой оси эллипса формующей головки, при этом корпус установлен на цилиндрических пружинах, упругость каждой из которых определяется выражением:

$$a = (2\pi\omega)^2 \frac{m}{n}, \quad (1)$$

где a – упругость пружин, Н/м; m – масса цилиндрического корпуса с червяком, прерывателем, формующей головкой, подшипником, пружиной, валиком съемной крышки и перерабатываемым материалом, кг; ω – скорость вращения червяка, об/с; n – число цилиндрических пружин. [5]

Установка каждой пружины с упругостью, определяемой выражением (1), позволяет перевести вертикальные колебания корпуса с червяком, прерывателем, формующей головкой, подшипником, пружиной, валиком, съемной крышкой и перерабатываемым материалом в резонансный режим вертикальных колебаний перерабатываемый материал внутри корпуса и формующей головки. Резонансный режим колебаний соответствует резкому возрастанию амплитуды вертикальных колебаний, что в большей степени способствует уменьшению эффективной вязкости пластичной, пастообразной, структурированной перерабатываемой среды, обладающей неньютоновскими свойствами, а значит, способствует увеличению скорости ее

движения в корпусе и формующей головке и росту производительности. Корпус с расположенными в нем червяком, прерывателем, формующей головкой, подшипником, пружиной, валиком, съемной крышкой и перерабатываемым материалом, имеющих массу m вместе с цилиндрическими пружинами образуют пружинный маятник, обладающий собственной частотой колебаний:

$$\nu_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{m/n}}, \quad (2)$$

где m/n – масса, приходящая на одну пружинку.

При скорости вращения червяка ω прерыватель вращается с той же скоростью, а гидроклин, образующий при каждом обороте прерывателя, когда большая ось овала прерывателя пересекает малую ось эллипса формующей головки, приводит к гидроудару, частота которого совпадает со скоростью вращения червяка:

$$\nu = \omega. \quad (3)$$

Приравнивая правые части уравнений (2) и (3) после алгебраических преобразований, получаем выражение (1) для упругости каждой цилиндрической пружины, обеспечивающей резонансный режим колебаний корпуса с червяком, прерывателем, формующей головкой, подшипником, пружиной, валиком, съемной крышкой и перерабатываемым материалом, с большой амплитудой.

Таким образом, установка корпуса на цилиндрических пружинах, каждая из которых обладает упругостью, описываемой выражением (1), позволяет перевести режим работы экструдера для получения гранул в резонансный режим колебаний перерабатываемой среды, находящейся внутри корпуса, и в формующей головке, что позволяет значительно снизить эффективную вязкость пластичных, пастообразных, структурированных перерабатываемых сред, обладающих неньютоновскими свойствами, увеличить скорость их переработки, а значит повысить производительность.

На рис. 3 изображен общий вид в разрезе предлагаемой конструкции экструдера.

Установка корпуса на цилиндрических пружинах обеспечивает вертикальные колебания корпуса с червяком, прерывателем, формующей головкой, подшипником, пружиной, валиком и съемной крышкой, которые передаются на перерабатываемый материал, перемещаемый червяком внутри корпуса, и на этот же материал в формующей головке. Под действием этих вертикальных колебаний пластичная

тый, пастообразный, структурированный перерабатываемый материал, обладающий неньютоновскими свойствами, снижает эффективную вязкость, что способствует увеличению скоро-

сти перемещения перерабатываемой среды червяком внутри корпуса и подачи ее к выпускным отверстиям в формующей головке, а значит, способствует увеличению производительности.

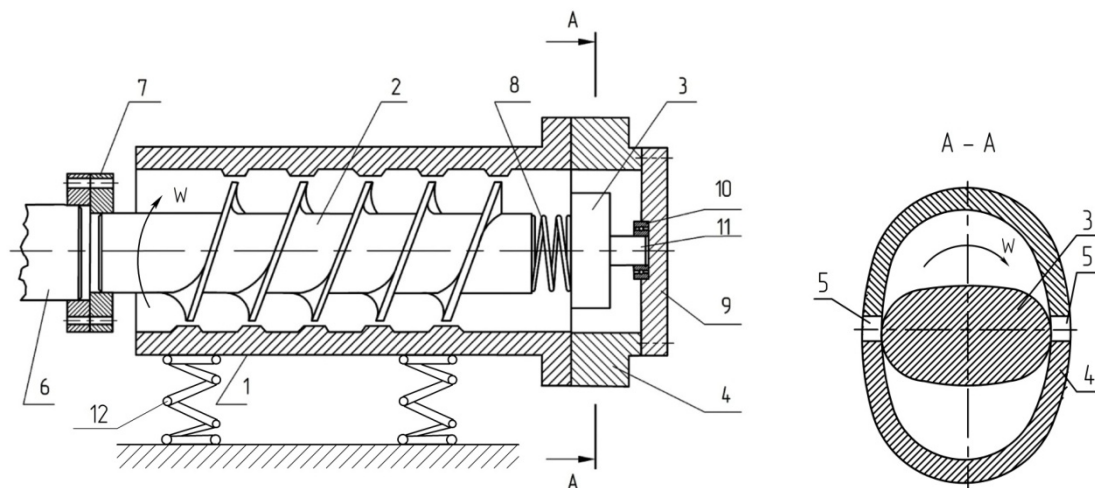


Рис. 3. Экструдер для получения гранул

Масса цилиндрического корпуса 1 с червяком 2, прерывателем 3, формующей головкой 4, подшипником 10, пружиной 8, валиком 11, съемной крышкой 9 и перерабатываемым материалом составляет $m = 560$ кг. Число пружин 12 $n = 4$, скорость вращения червяка 2 составляет $\omega = 12$ об/с. Согласно выражению (1) упругость каждой из четырех пружин 12 должна быть:

$$a = (2 \cdot 3,14 \cdot 12)^2 \cdot \frac{560}{4} = 7,96 \cdot 10^5 \text{ Н/м.}$$

Это значит, что под действием силы 81 Н, каждая из пружин 12 деформируется в статическом состоянии на 1 мм.

Согласно уравнению (2) собственная частота колебаний пружинного маятника:

$$\nu_n = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{7,95 \cdot 10^5 \cdot 4}{560}} = 12 \text{ Гц,}$$

то есть собственная частота вертикальных колебаний корпуса 1 с червяком 2, прерывателем 3, формующей головкой 4, подшипником 10, пружиной 8, валиком 11, съемной крышкой 9 и перерабатываемым материалом, находящимся внутри корпуса 1 и формующей головкой 4 совпадает с частотой гидроударов, в гидроклине, образующемся при каждом обороте червяка 2 и валика 11, то есть совпадает со скоростью вращения ω червяка 2 и валика 11. Это совпадение частот вызывает резонансные вер-

тикальные колебания с большой амплитудой перерабатываемого материала, находящегося внутри корпуса 1 и формующей головки 4, разрушающих структуру структурированных материалов и уменьшающих эффективную вязкость пластичных, пастообразных высоковязких сред, обладающих неньютоновскими свойствами, это приводит к увеличению скорости движения таких сред внутри корпуса 1 и формующей головки 4 и возрастанию производительности при получении гранул [6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физические эффекты в машиностроении: Справочник / В. А. Лукьянец, З. И. Алмазова, Н. П. Бурмистрова и др. ; под общ. ред. В. А. Лукьянца. – М. : Машиностроение, 1993. – С. 149–152.
2. Герман, Х. Шнековые машины в технологии / Х. Герман. – Л. : Химия, 1975. – С. 71–72.
3. Пат. РФ № 2314865, В01J 19/18, Реактор смешения / Голованчиков А. Б., Шагарова А. А., Дулькина Н. А., Могилевская И. В. ; ВолгГТУ. – 2008.
4. Пат. на полезную модель РФ № 171784, В30В11/24, В29С47/38, В29В7/42 Пресс-экструдер для переработки нагретого материала / Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А. и др.; ВолгГТУ. – 2017.
5. Мясников, С. П. Пособие по физике / С. П. Мясников, Т. Н. Осанова. – М. : Высшая школа, 1988. – С. 339.
6. П. м. 167122 Российская Федерация, МПК В01J2/20. Экструдер для получения гранул / Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Черикова К. В., Васильев П. С., Саблина А. М., Романенко М. Д. ; ВолгГТУ. – 2016.

УДК 66.02:658.567.5

В. П. Юрин¹, П. В. Юрин¹, Н. А. Прохоренко², А. В. Волжская²**УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РТУТИ
ИЗ РТУТЬСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**¹ ОАО «Каустик»² Волгоградский государственный технический университет

Предложен способ и описана комбинированная установка для демеркуризации ртути и ее паров из отработанных люминесцентных ламп и других утилизируемых приборов и технических устройств, а также солей ртути из отработанного катализатора и других ее содержащих веществ. Проводится сравнение с известными способами и устройствами, позволяющими очищать вышеперечисленные материалы либо от ртути и ее паров, либо от ртутьсодержащих солей.

Ключевые слова: ртуть, ртутьсодержащие отходы, демеркуризация.

V. P. Yurin¹, P. V. Yurin¹, N. A. Prokhorenko², A. V. Volzhskaya²**INSTALLATION FOR THE EXTRACTION OF MERCURY
FROM MERCURY-CONTAINING WASTE**¹ PLC «Kaustik»² Volgograd State Technical University

The proposed method and describes the combination installation for demercurization of mercury and mercury vapor from used fluorescent lamps and other recyclable appliances and technical devices, as well as salts of mercury from spent catalyst and other containing substances. A comparison with the known methods and devices, allowing to clean the aforementioned materials or of mercury and mercury vapor or mercury salts.

Keywords: mercury, mercury-containing waste, decontamination.

Процессы демеркуризации ртути, связанные с ее извлечением из промышленных и бытовых отходов, являются технологически сложными, энерго- и ресурсозатратными, требующими высокой подготовки рабочего персонала из-за повышенных требований к технике безопасности и охране труда.

За последнее время разработаны и внедрены в производство разные методы и способы улавливания капель и паров ртути, основанные на химических и физических (механических, гидромеханических, тепловых и массообменных) процессах или модернизированы известные схемы переработки ртутьсодержащих вторичных материалов.

Например, известен способ демеркуризации изделий, содержащих ртуть или ее пары, например, из люминесцентных ламп, которая включает демеркуризатор, заполненный водным раствором полисульфидов кальция с содержанием серы 50 ÷ 90 г/л при температуре 20 ÷ 45 °С. Демеркуризатор является одновременно измельчителем ртутных ламп и аппаратом для обработки их промываемой жидкостью и сушилкой. Для регенерации отработанного промывного раствора он подается на фильтровальное устройство, а затем в накопительную емкость [1].

Недостатком известного способа и самой установки является невозможность одновременной переработки отходов, содержащих металлическую ртуть или ее пары и ртутные соединения, например, хлориды.

То же касается и известного устройства для осуществления термической демеркуризации загрязненных ртутью материалов, включающего вакуум-нагревательную камеру и низкотемпературную ловушку паров ртути [2].

В патенте [3] наоборот описан способ и установка для извлечения ртути из отработанного катализатора гидрохлорирования ацетилена, которая включает в себя увлажнитель воздуха, реактор (шахтную печь), колонну щелочной промывки и угольный абсорбер [3].

Однако по этому способу невозможно одновременно извлекать металлическую ртуть или ее пары и соли ртути.

Целью настоящей работы является разработка новой комбинированной установки для одновременного извлечения солей ртути из отработанного катализатора, например, сулемы на активированном угле, применяемом в реакторе гидрохлорирования ацетилена, и утилизируемых ртутных люминесцентных ламп.

Для достижения поставленной цели используется способ, включающий комбинированную

установку для извлечения солей ртути из отработанного катализатора гидрохлорирования ацетилена с дополнительным устройством для переработки и утилизации металлической ртути и ртутных паров.

На рисунке предоставлена схема комбинированной установки для извлечения ртути из ртутьсодержащих отходов. Она состоит из дробилки 1 со шлюзовым питателем 2 для загрузки ртутьсодержащих люминесцентных ламп или других изделий, содержащих ртуть или ее пары, которые

предназначены для утилизации. В верхней части дробилки 1 имеется патрубок для забора атмосферного воздуха, необходимого для сжигания отработанного катализатора гидрохлорирования ацетилена. Количество забираемого воздуха регулируется вентилем, установленным на патрубке. В нижней части дробилки 1 расположен патрубок с шлюзовым затвором 3 для выгрузки стеклобоя и других отходов, остающихся после разрушения люминесцентных ламп. Твердые отходы выгружаются в емкость 4.

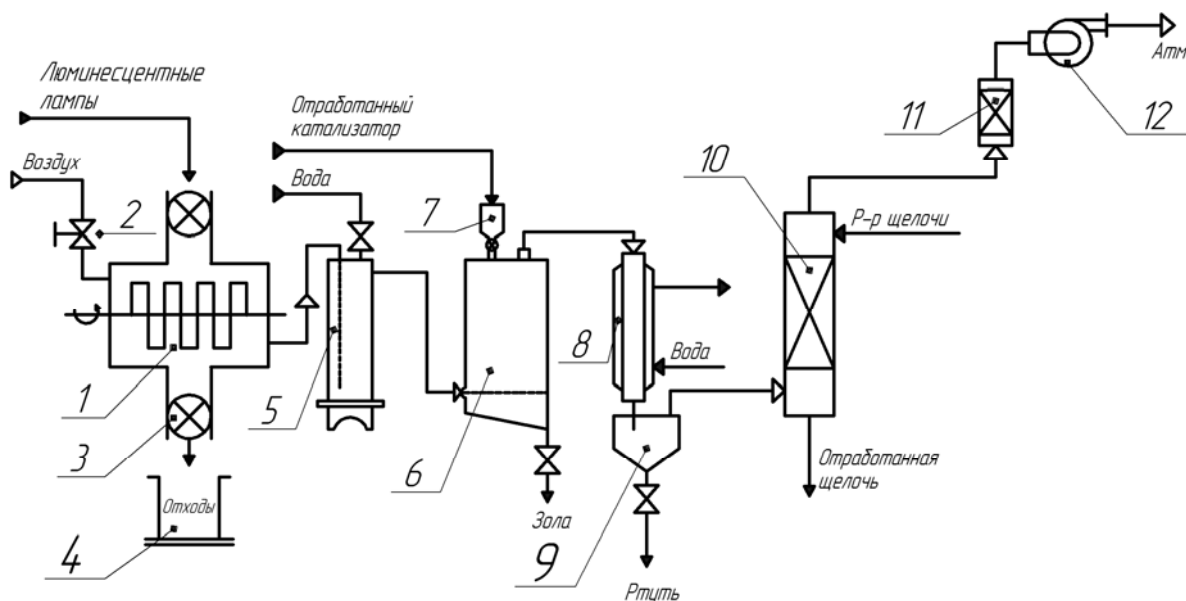
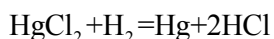
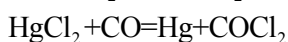
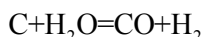
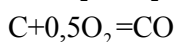
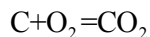


Схема комбинированной установки для извлечения ртути и ее паров из ртутьсодержащих отходов и демеркуризации соединений ртути

Воздух, проходя дробилку 1, поступает в увлажнитель 5 и далее в реактор 6, где производится сжигание отработанного катализатора гидрохлорирования ацетилена.

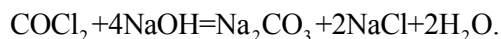
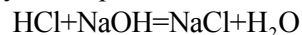
Отработанный катализатор гидрохлорирования ацетилена представляет собой гранулы активного угля с остаточным содержанием хлоридов ртути до 4 % и хлористого водорода до 7 %. При сгорании углеродной основы катализатора в токе влажного воздуха реализуются следующие реакции:



Отработанный катализатор загружается в реактор 6 из бункера 7. Продукты сгорания углеродной основы катализатора вместе с па-

рами ртути из ртутьсодержащих ламп поступают в конденсатор 8, где ртуть конденсируется и накапливается в сборнике 9. Зола от сгорания отработанного катализатора выводится с нижней части реактора 6.

Выходящие из аппарата 9 газы направляются в колонну щелочной отмылки 10, где реализуются следующие реакции:



Прошедшие колонну 10 газы поступают в угольный адсорбер 11 для финишной очистки от следов ртути и ртутьсодержащих веществ, не выделенных в конденсаторе 8 и не поглощенных в колонне 10.

Для создания разрежения во всех аппаратах и трубопроводах установки и обеспечения подачи воздуха на сгорание отработанного катализатора на выходе из адсорбера 11 установлен вакуум-насос 12. Разрежение во всех аппаратах

установки исключает выход паров ртути и ртутьсодержащих веществ через возможные неплотности. Весь воздух, необходимый для работы установки забирается из атмосферы через патрубок, установленный на дробилке 1, насыщается парами ртути и ее соединений в аппаратах 1 и 6, освобождается от этих продуктов в аппаратах 8, 9, 10 и 11 и после вакуум-насоса 12 сбрасывается в атмосферу.

Порядок пуска и работы установки (алгоритм извлечения ртути из ртутьсодержащих отходов на предлагаемой установке).

Через шлюзовой питатель 2 утилизируемые ртутные лампы загружают в дробилку 1. Отработанный катализатор гидрохлорирования ацетилена подают в бункер 7. Далее отработанный катализатор загружают в реактор 6. Колонну 10 заполняют раствором щелочи, а адсорбер 11 чистым активным углем. Включают вакуум-насос 12 и вентилем на патрубке забора воздуха устанавливают расход воздуха, необходимый для сжигания отработанного катализатора. Через устройство для розжига отработанный катализатор в реакторе 6 поджигают. После создания режима стабильного горения в дробилке 1 включают дробящее устройство (ротатор), лампы и разрушаются и содержащиеся в них пары ртути вместе с потоком воздуха поступают в аппарат 5, где воздух насыщается парами воды и далее в реактор 6 для сжигания отработанного катализатора. Продукты сгорания, входящие из реактора 6, охлаждают в конденсаторе 8, выделившуюся металлическую ртуть собирают в сборнике 9. Охлажденные продукты сгорания подают на нейтрализацию кислых компонентов (хлористого водорода и других) в щелочную колонну 10. Финишная санитарная

очистка продуктов сгорания перед выбросом в атмосферу проводят активным углем в адсорбере 11. Отработанный активный уголь из адсорбера 11 утилизируют на этой же установке совместно с отработанным катализатором.

Твердые демекуризованные отходы (стеклобой и другие отходы, остающиеся после разрушения ртутных ламп) и золу от сжигания отработанного катализатора вывозят на полигон захоронения твердых промышленных отходов.

Таким образом, на предлагаемой установке для извлечения ртути из ртутьсодержащих отходов одновременно проводится утилизация ртутных люминесцентных ламп, содержащих металлическую ртуть и ее пары, и ртутьсодержащих соединений (хлоридов ртути), находящихся в гранулах отработанного катализатора гидрохлорирования ацетилена, что расширяет диапазон ртутьсодержащих материалов, из которых необходимо извлекать ртуть с соблюдением требований техники безопасности и охраны окружающей среды.

Небольшие энергетические затраты на эксплуатацию, простота конструкции и доступность материалов делает предлагаемую установку привлекательной для практической реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. РФ № 2083709, B09B3/00, C22B43/00, Способ обезвреживания ртутьсодержащих отходов / Окаты В. Г., Спирьков В. С. – 1977.
2. Пат. РФ № 1838440, C2, Способ утилизации ртутьсодержащих люминесцентных ламп / Трунин Е. Б., Родионов С. В., Мамушкин А. А. – 1993.
3. Пат. РФ № 2320737, C22B43/00, Способ извлечения ртути из отработанного катализатора гидрохлорирования ацетилена / Юрин В. П., Гринина Т. В., Бацинин М. В., Храмова Е. Ю., Юрин П. В. – 2008.

УДК 66.048.3.069.833

А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, М. В. Топилин

РАСЧЕТ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ С РЕЦИКЛОМ ПАРОВОЙ ФАЗЫ

Волгоградский государственный технический университет

Расчеты ведутся в соответствии с модернизированными уравнениями материального, теплового балансов и уравнениями истощающей и укрепляющей частей колонны. Проводится моделирование работы ректификационной колонны с рециклом по паровой фазе смеси: бензол–толуол; хлороформ–бензол; сероуглерод–бензол, сероуглерод–хлороформ. Для каждого значения рецикла находится оптимальное флегмовое число и соответствующий ему минимальный объем колонны.

Ключевые слова: рецикл, паровая фаза, диффузионная структура потока, истощающая часть ректификационной насадочной колонны, линейное уравнение равновесия бинарной смеси.

A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko, M. V. Topilin

CALCULATION OF THE RECTIFICATION COLUMN WITH THE RECOVERY OF STEAM PHASE

Volgograd State Technical University

Calculations are carried out in accordance with the modernized equations of material, thermal balances and equations of the exhaustive and reinforcing parts of the column. Modeling of the operation of the distillation column with recycle in the vapor phase of the mixture is carried out: benzene–toluene; chloroform–benzene; carbon disulfide–benzene, carbon disulfide–chloroform. For each recycle value, there is an optimum reflux ratio and the corresponding minimum volume of the column.

Keywords: recycle, vapor phase, diffusion flow structure, exhaustive part of the rectification packing column, linear equation of equilibrium of the binary mixture.

Для начала расчетов необходимо составить материальный и тепловой балансы с учетом рецикла (рис. 1).

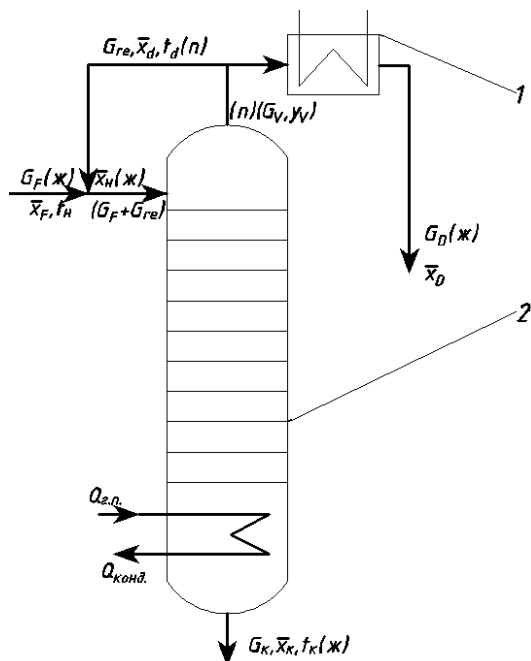


Рис. 1. Схема материальных потоков ректификационной колонны с рециклом паровой фазы:
1 – дефлегматор; 2 – ректификационная колонна

Составим материальный баланс исходной смеси:

$$(G_F + G_{re} + G_R) \cdot x + (G_R + G_D + G_{re}) \cdot \bar{x}_k = G_k \cdot \bar{x}_k + (G_R + G_D + G_{re}) \cdot y;$$

$$y = \frac{(G_R + G_D + G_{re} - G_k)x - (G_F + G_{re} + G_F)x}{G_R + G_D + G_{re}} = \frac{(G_D - G_F)x_k + (G_F + G_{re} + G_R)x}{G_R + G_D + G_{re}}$$

Разделим выражение на G_D , получим уравнение рабочей линии:

$$y = \frac{(1-f)x_k + (f+re+R) \cdot x}{R+1+re}$$

При рецикле равном нулю, это уравнение преобразуется в известное уравнение рабочей

$$\begin{cases} G_h = G_F + G_{re} \\ G_h \cdot \bar{x}_h = G_F \cdot \bar{x}_F + G_{re} \cdot \bar{x}_D \end{cases},$$

где G_h , G_F , G_{re} – расход потока, входящего в колонну после смешения колонны, расход питания колонны, расход рецикла паровой фазы соответственно; $\bar{x}_h$, $\bar{x}_F$, $\bar{x}_D$ – концентрация легколетучего компонента в исходной смеси после смешения с паром рецикла, концентрация легколетучего компонента в исходной смеси, концентрация легколетучего компонента в дистилляте.

Преобразуем эту систему и выделим $\bar{x}_h$:

$$\bar{x}_h = \frac{G_F \bar{x}_F + G_{re} \bar{x}_D}{G_F + G_{re}}$$

или, разделив на G_D , получим

$$\bar{x}_h = \frac{f \cdot x_F + re \cdot x_D}{f + re},$$

где $f = G_F / G_D$ – число питания; $re = G_{re} / G_D$ – число рецикла.

Составим уравнение материального баланса для исчерпывающей части колонны:

приход:

$$(G_F + G_{re} + G_R) \cdot x + (G_R + G_D + G_{re}) \cdot \bar{x}_k;$$

расход:

$$G_k \cdot \bar{x}_k + (G_R + G_D + G_{re}) \cdot y.$$

Приравняем приход и расход и выделим y :

линии для исчерпывающей части:

$$y = \frac{(1-f)x_k + (f+R) \cdot x}{R+1}$$

Составим уравнение материального баланса для укрепляющей части колонны:

приход:

$$G_R \cdot \bar{x}_D + (G_R + G_D + G_{re}) \cdot y;$$

расход:

$$G_R \cdot x + (G_R + G_D + G_{re}) \cdot \bar{x}_D.$$

Приравняем приход и расход и выделим y :

$$G_R \cdot x_D + (G_R + G_D + G_{re}) \cdot y = G_R \cdot x + (G_R + G_D + G_{re}) \cdot x_D;$$

$$y = \frac{(G_D + G_{re})x_D + G_R \cdot x}{G_R + G_D + G_{re}}.$$

Разделим выражение на G_d , получим уравнение рабочей линии:

$$y = \frac{(1+re)x_D + R \cdot x}{R+1+re}.$$

При рецикле равно нулю, это уравнение преобразуется в известное уравнение рабочей линии для укрепляющей части:

$$y = \frac{x_D + R \cdot x}{R+1}.$$

Составим уравнение теплового баланса для колонны:

Приравняем приход и расход:

$$G_F \cdot c_F \cdot t_n + Q_\kappa = G_D \cdot c_D \cdot t_D + G_\kappa \cdot c_\kappa \cdot t_\kappa + r_D \cdot (G_R + G_D).$$

Выделим из уравнения формулу для расчета тепловой мощности кипятильника, и заменим $G_R = G_D \cdot R$.

$$Q_\kappa = G_D \cdot c_D \cdot t_D + G_\kappa \cdot c_\kappa \cdot t_\kappa + G_D \cdot r_D \cdot (R+1) - G_F \cdot c_F \cdot t_n.$$

Таким образом, применение рецикла снижает тепловую мощность кипятильника на величину:

$$G_F \cdot c_F \cdot (t_n - t_F).$$

Для моделирования работы ректификационной колонны с рециклом по паровой фазе

В колонну приходит тепло:

1) с исходной смесью:

$$G_F \cdot c_F \cdot t_n;$$

2) подводится через кипятильник куба:

$$Q_\kappa.$$

уходит:

1) с дистиллятом: $G_D \cdot c_D \cdot t_D$;

2) с кубовой жидкостью: $G_\kappa \cdot c_\kappa \cdot t_\kappa$;

3) на испарение дистиллята и флегмы: $r_D(G_R + G_D)$;

были выбраны три смеси: (бензол–толуол; хлороформ–бензол; сероуглерод–бензол, сероуглерод–хлороформ). Выбранные смеси имеют следующие параметры, представленные в табл. 1, 2 [1; 2].

Таблица 1

Равновесные составы бинарных смесей

Бензол–толуол												
x	0	8,8	20	30	39,7	48,9	59,2	70	80,3	90,3	95	100
y	0	21,2	37	50	61,8	71	78,9	85,3	91,4	95,7	97,9	100
Хлороформ–бензол												
x	0	8	15	22	29	36	44	54	66	79	100	–
y	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	–
Сероуглерод–хлороформ												
x	0	18,2	30	48	59,2	75,5	89,2	100	–	–	–	–
y	0	34	47,8	63	70,4	82	91	100	–	–	–	–

Расчеты ведутся так, что для каждого значения рецикла находится оптимальное флегмовое число и соответствующий ему минимальный объем колонны. Оптимальный рецикл выбирается для минимальной тепловой мощности. Расчеты

ведутся в соответствии с модернизированными уравнениями материального, теплового балансов и уравнениями исчерпывающей и укрепляющей частей колонны. Данные для расчетов взяты из справочной и учебной литературы [3].

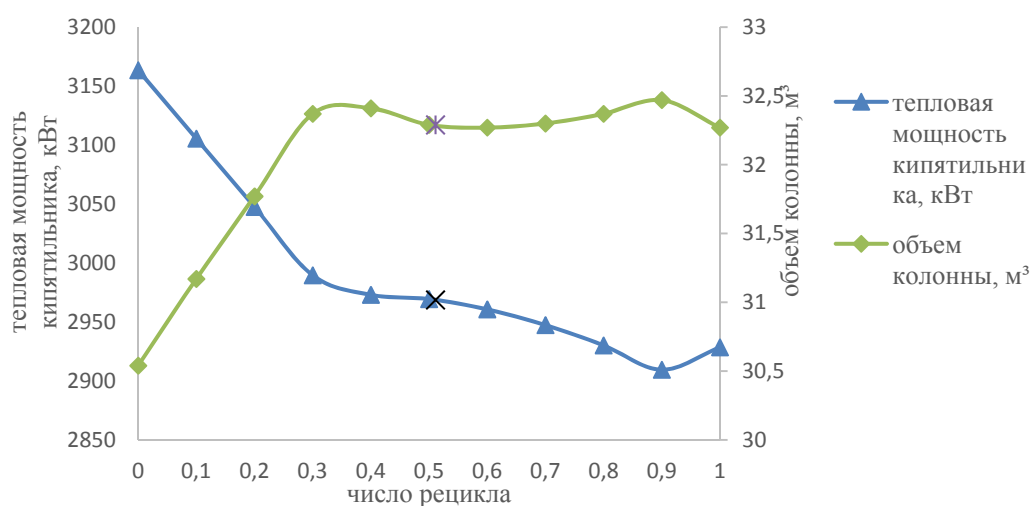


Рис. 2. График зависимости тепловой мощности кипятильника и объема колонны от числа рецикла для смеси хлороформ–бензол

Таблица 2

Исходные и справочные данные для бинарных смесей
1 – бензол–толуол; 2 – хлороформ–бензол; 3 – сероуглерод–хлороформ

Наименование параметра	обозначение		величина		
	в формуле	в программе	1	2	3
Производительность по исходной смеси, кг/ч	G_f	gf	10000		
Концентрация легколетучего, кг А/кг А+В					
в исходной смеси	x_f	xf1	0,4		
в дистилляте	x_d	xd1	0,95		
в кубе	x_k	xk1	0,05		
Молекулярная масса, кг/кмоль					
легколетучего	M_a	ma	78	119	76
труднолетучего	M_b	mb	92	78	119
Начальная температура, °С	t_H	tH	20	20	20
Температура кипения легколетучего компонента	t_{kb}	tkb	80,1	61,2	46
Температура кипения труднолетучего компонента	t_{kt}	tkt	110,6	80,1	61,2
Удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/кг·К					
исходной смеси	c_f	cf	2,087	1,722	1,077
дистиллята	c_d	cd	1,996	1,108	1,098
куба	c_k	ck	2,102	1,939	1,089
Удельная теплота парообразования легколетучего компонента кДж/кг	r_d	rd	369	363	351
Давление в колонне, ата	P_a	pa	1,033	1,033	1,033
Порозность насадки, м³/м³	ε	vc	0,7	0,7	0,7
Удельная поверхность насадки, м²/м³	σ	sig	330	330	330
Вязкость паровой фазы, Па·с					
в укрепляющей части	μ_y	viy	$3,163 \cdot 10^{-4}$	$3,43 \cdot 10^{-4}$	$4,26 \cdot 10^{-4}$
в исчерпывающей части	μ_u	viu	$2,534 \cdot 10^{-4}$	$3,83 \cdot 10^{-4}$	$3,89 \cdot 10^{-4}$
Вязкость жидкой фазы, Па·с	$\mu_{жс}$	vil	$5,987 \cdot 10^{-4}$	$6,32 \cdot 10^{-4}$	$6,15 \cdot 10^{-4}$
Плотность жидкой фазы, кг/м³	$\rho_{жс}$	rol	817	857	1122
Коэффициент теплопроводности	λ	lam	0,135	0,100	0,900

Таблица 3

Расчетные данные для бинарных смесей 1 – бензол–толуол; 2 – хлороформ–бензол;
3 – сероуглерод–хлороформ (I – стандартная колонна, II – колонна с рециклом)

Наименование параметра	размер- ность	Величина					
		I			II		
		1	2	3	1	2	3
Минимальное флегмовое число (минимальный рецикл)	–	1,340	4,374	2,272	0,75	0,3	0,12
Число питания	–	2,355	3,302	2,051	2,355	3,302	2,05
Оптимальное флегмовое число (оптимальный рецикл)	–	1,979	6,460	3,356	0,89	0,511	0,202
Общее число теоретических тарелок	–						
в укрепляющей	–	5,87	6,97	54,27	5,44	6,31	5,9
исчерпывающей частях		6,48	28,77	5,82	6,96	31,72	48,9
Тепловая мощность колонны экономию тепловой энергии, %	<i>кВт</i>	1634	3163	1815	1832,68 12,17	2368,7 –25,2	1913 5,4
Диаметр колонны укрепляющей части исчерпывающей части	<i>м</i>	1,836	2,87	2,1	2,16	2,81	2,27
		2,173	3,29	2,21	2,57	3,27	2,41
Общая высота насадки в колонне в укрепляющей части в исчерпывающей части	<i>м</i>	0,94	0,863	8,15	0,927	0,812	7,33
		0,727	2,94	0,7	0,822	3,24	0,724
Общий объем колонны	<i>м³</i>	5,182	30,53	29,65	9,66	35,29	34,1

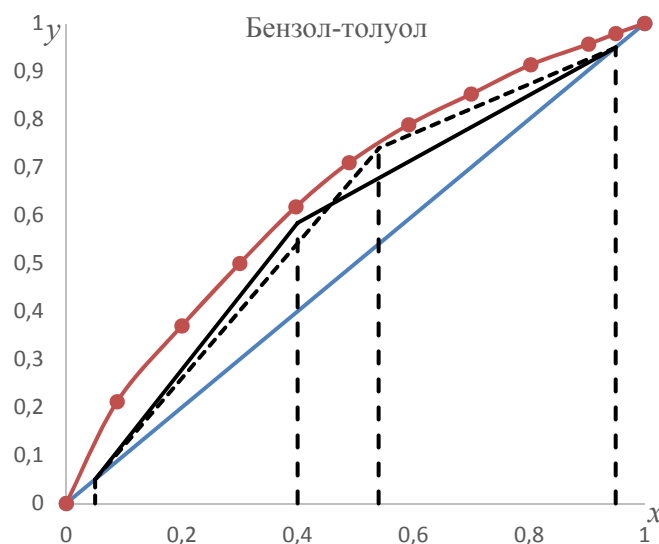


Рис. 3. Положение рабочих линий для типовой колонны (сплошная линия) и для колонны с рециклом (пунктир) паровой фазы

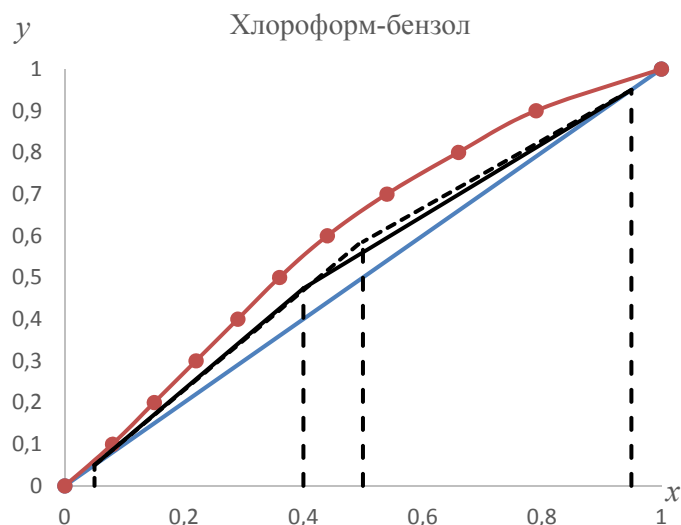


Рис. 4. Положение рабочих линий для типовой колонны (сплошная линия) и для колонны с рециклом (пунктир) паровой фазы

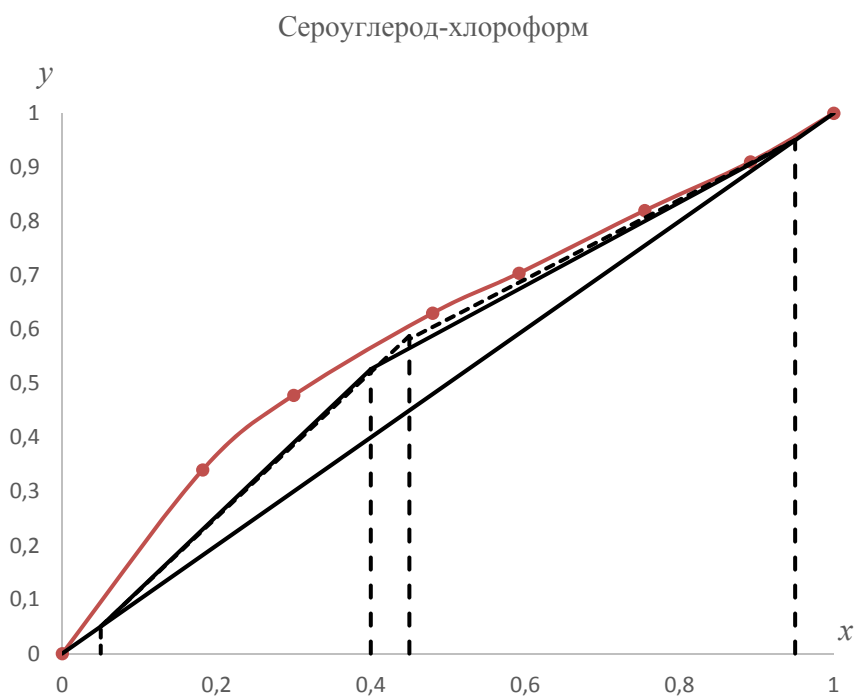


Рис. 5. Положение рабочих линий для типовой колонны (сплошная линия) и для колонны с рециклом (пунктир) паровой фазы

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование работы ректификационной колонны с рециклом по низкокипящему продукту / А. Б. Голованчиков, П. В. Юрин, Н. А. Дулькина, А. Б. Дулькин // *Химическая технология*. – 2004. – № 10. – С. 41–44.

2. Голованчиков, А. Б. Моделирование процессов усреднения концентраций в аппаратах с комбинированной струк-

турой потоков / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, В. В. Миняйло // *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. 19–22.

3. Багатуров, С. А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации; под ред. С. А. Багатурова. – изд. 3-е, перераб. – М. : Химия, 1974. – 440 с.

УДК 66.048.3.069.833

*А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, М. В. Топилин***РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СХЕМЫ
ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ****Волгоградский государственный технический университет**

Разработанная конструкция встроенного дефлегматора использует тепло паров верха колонны для конденсации паров дистиллята, а выполнение конструкции в форме обратного усеченного конуса увеличивает площадь орошения колонны.

Ключевые слова: дефлегматор, диффузионная структура потока, истощающая часть ректификационной насадочной колонны, линейное уравнение равновесия бинарной смеси, энергоэффективная схема.

*A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko, M. V. Topilin***DEVELOPMENT OF THE ENERGY EFFICIENT SCHEME
OF CARRYING OUT THE REVISION PROCESS****Volgograd State Technical University**

The developed design of the built-in reflux condenser utilizes the heat of vapor from the top of the column to condense the distillate vapors, and the construction in the form of an inverted truncated cone increases the area of the column's irrigation.

Keywords: reflux condenser, diffusion flow structure, exhaustive part of the rectification column, linear equation of equilibrium of the binary mixture, energy efficient scheme.

Результаты моделирования работы ректификационной колонны с рециклом по паровой фазе показывают, что применение рецикла позволяет экономить тепловую энергию не во всех случаях. Для устранения выявленного недостатка разработана схема проведения ректификации, включающая встроенный в ректификационную колонну дефлегматор и использование тепла холодильника кубовой жидкости.

Встроенный дефлегматор состоит из спиралевидной гибкой трубы 1 с периодически расположенными на ее внутренней поверхности турбулизаторами 2 в виде кольцевых выступов (рис. 1), причем труба 1 образует обратный усеченный конус, а наружный диаметр d_n последующего витка трубы 1 равен внутреннему

диаметру d_v предыдущего витка, при этом на нижнем витке закреплен перфорированный диск 3. Концы трубы 1, снабжены фланцами 4, 5 для соединения с трубопроводом подачи и для отвода сырья. Распределительное устройство для ректификационных колонн устанавливается внутри корпуса 6 ректификационной колонны (рис. 2).

Выполнение встроенного дефлегматора для ректификационных колонн в виде трубы 1, образующей обратный усеченный конус, позволяет добиться равномерного орошения всего сечения колонны, причем расположение витков трубы 1 таким образом, что наружный диаметр d_n последующего витка трубы 1 равен внутреннему диаметру d_v предыдущего витка приводит

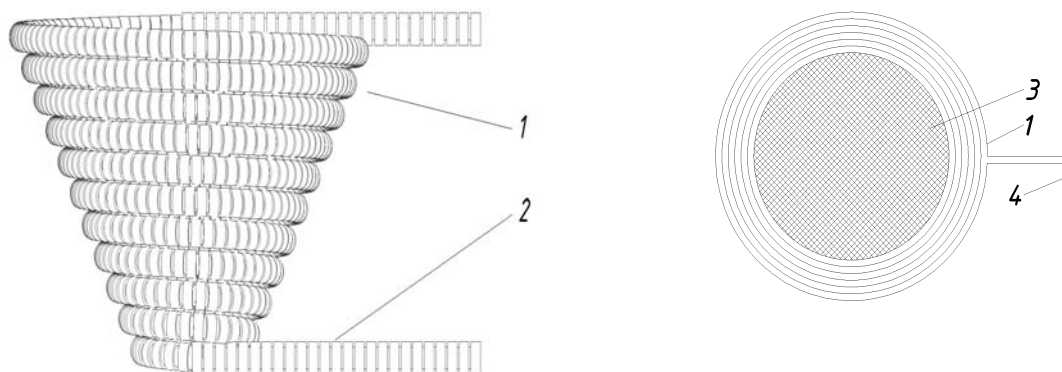


Рис. 1. Конструкция внутреннего дефлегматора ректификационной колонны:
1 – труба; 2 – турбулизаторы; 3 – перфорированный диск; 4 – фланец для подачи сырья

к повышению плотности орошения колонны, а закрепление на нижнем витке перфорированного диска 3 позволяет создать дополнительную массообменную поверхность между конденсатом, стекающим по внутренней части обратного усеченного конуса, образованного трубой 1, и паром, что насыщает дистиллят легколетучим компонентом и повышает площадь орошения колонны, что в целом приводит к повышению производительности [1].

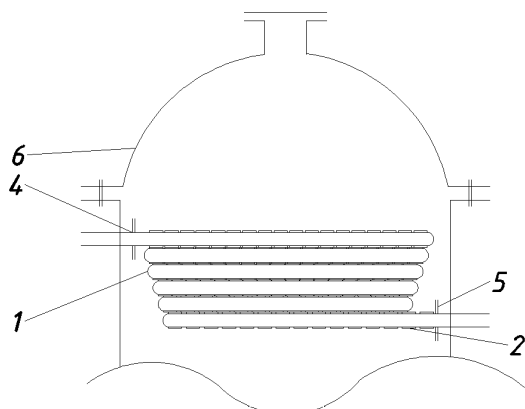


Рис. 2. Встроенный дефлегматор, установленный в ректификационную колонну:
1 – труба; 2 – турбулизатор; 4, 5 – фланцы для подачи и отвода сырья; 6 – корпус ректификационной колонны

Встроенный дефлегматор размещается в верхней части ректификационной колонны, сырье подается через фланец подачи сырья, где, используя энергию паров верха колонны, нагревается, а пары конденсируются на поверхности дефлегматора и стекают в виде жидкости вниз, орошая колонну. После прохождения распределительного устройства сырье поступает в межтрубное пространство холодильника кубовой жидкости 6, где нагревается до температуры кипения легколетучего компонента. Установка дефлегматора требует увеличения диаметра верхней части колонны, в зависимости от производительности колонны. При малой производительности колонны, применение встроенного дефлегматора позволяет исключить подогреватель сырья из технологической схемы, уменьшить нагрузку, следовательно, и габариты дефлегматора.

Расчет ректификационной колонны со встроенным дефлегматором ведется по стандартной схеме, дополненной расчетом параметров встроенного дефлегматора. Для расчета колонны со встроенным дефлегматором была разработана программа на языке Fortran.

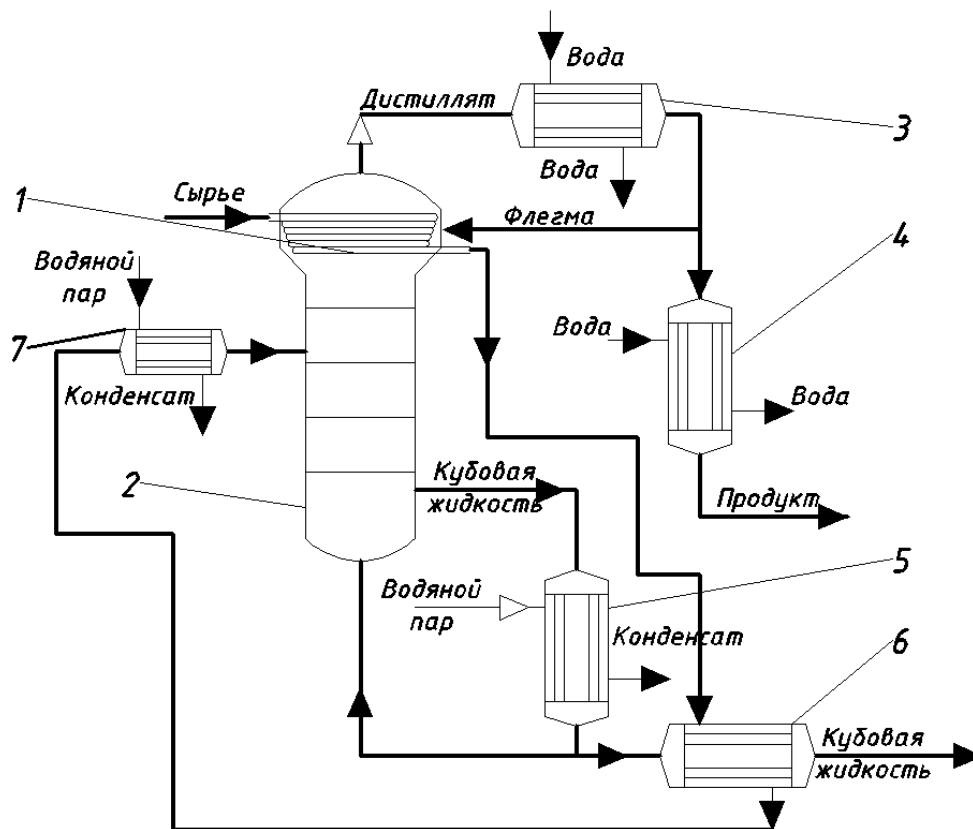


Рис. 3. Схема ректификации с применением встроенного в колонну дефлегматора:
1 – распределительное устройство; 2 – ректификационная колонна; 3 – дефлегматор; 4 – холодильник дистиллята; 5 – кипятильник; 6 – холодильник кубовой жидкости; 7 – подогреватель сырья

Конечная температура исходной смеси при конденсации всей флегмы [2–3]:

$$t_{2k} = t_H + \frac{G_d \cdot R \cdot r_d}{G_f c_f}.$$

Расход флегмы:

$$G_{флег} = G_d \cdot R.$$

Количество возможной сконденсированной флегмы:

$$G_{флег'} = \frac{G_f \cdot c_f (t_d - t_H)}{r_d}.$$

Средняя температура в змеевике:

$$t_{2cp} = t_d - t_H.$$

Тепловая нагрузка:

$$Q = t_{2cp} \cdot r_d.$$

Критерии Рейнольдса и Прантля:

$$Re_2 = \frac{4 \cdot G_f / 3600}{\pi \cdot d_{вн} \cdot \mu},$$

$$Pr_2 = \frac{c_f \cdot 1000 \cdot \mu}{\lambda}.$$

Коэффициенты теплоотдачи:

$$\alpha_2 = \frac{\lambda}{d_{вн} \cdot 0,023 \cdot Re_2^{0,8} \cdot Pr_2^{0,4}},$$

$$\alpha_1 = 3,78 \cdot \lambda_3 \sqrt{\frac{\rho^2 \cdot d_{вн}}{\mu \cdot G_f / 3600}}.$$

Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_1}}.$$

Поверхность теплообмена:

$$F_{зм} = \frac{G_f c_f (t_d - 10 - t_H)}{K \cdot t_{2cp}}.$$

Параметры ректификационной колонны были рассчитаны для бинарных смесей: бензол-толуол; хлороформ-бензол; сероуглерод-хлороформ (табл. 1). Справочные и исходные данные представлены в табл. 2.

Таблица 1

Расчетные данные для бинарных смесей 1 – бензол–толуол; 2 – хлороформ–бензол; 3 – сероуглерод–хлороформ (I – колонна с рециклом, II – колонна со встроенным дефлегматором)

Наименование параметра	Размерность	Величина					
		I			II		
		1	2	3	1	2	3
Минимальное флегмовое число (минимальный рецикл)	—	1,677	4,04	2,77	1,340	4,374	2,27
Число питания	—	2,355	3,302		2,355	3,302	2,05
Оптимальное флегмовое число (оптимальный рецикл)	—	0,89	0,511	0,202	1,979	6,460	3,36
Общее число теоретических тарелок в укрепляющей и исчерпывающей частях	—	5,44	6,31	5,9	5,868	6,97	54,2
		6,96	31,72	48,9	6,478	28,77	5,8
Тепловая мощность колонны экономию тепловой энергии, %	кВт	1833	2369	1913	1180,4	2882	1685
		-12,17	25,2	-5,4	27,75	8,9	7,1
Диаметр колонны укрепляющей части исчерпывающей части	м	2,16	2,81	2,27	1,836	2,87	2,05
		2,57	3,27	2,41	2,173	3,29	2,2
Общая высота насадки в колонне в укрепляющей части в исчерпывающей части	м	0,927	0,812	7,33	0,94	0,863	8,1
		0,822	3,24	0,724	0,727	2,94	0,69
Общий объем колонны	м ³	9,66	35,29	34,1	7,152	33,53	31,6

Также были рассчитаны конструктивные параметры встроенного дефлегматора (табл. 3) и построен график зависимости тепловой мощности (рис. 4).

Таблица 2

Исходные и справочные данные для бинарных смесей
1 – бензол–толуол; 2 – хлороформ–бензол; 3 – сероуглерод–хлороформ

Наименование параметра	Обозначение		Величин		
	в формуле	в программе	1	2	3
Производительность по исходной смеси, кг/ч	G_f	gf	10000		
Концентрация легколетучего, кг А/кг А+В					
в исходной смеси	x_f	xf1	0,4		
в дистилляте	x_d	xd1	0,95		
в кубе	x_k	xk1	0,05		
Молекулярная масса, кг/кмоль					
легколетучего	M_a	ma	78	119	76
труднолетучего	M_b	mb	92	78	119
Начальная температура, °С	t_H	tH	20	20	20
Температура кипения легколетучего компонента	t_{kb}	tkb	80,1	61,2	46
Температура кипения труднолетучего компонента	t_{kt}	tkt	110,6	80,1	61,2
Удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/кг·К					
исходной смеси	c_f	cf	2,087	1,722	1,077
дистиллята	c_d	cd	1,996	1,108	1,098
куба	c_k	ck	2,102	1,939	1,089
Удельная теплота парообразования легколетучего компонента кДж/кг	r_d	rd	369	363	351
Давление в колонне, ата	P_a	pa	1,033	1,033	1,033
Порозность насадки, м ³ /м ³	ε	vc	0,7	0,7	0,7
Удельная поверхность насадки, м ² /м ³	σ	sig	330	330	330
Вязкость паровой фазы, Па·с					
в укрепляющей части	μ_y	viy	$3,163 \cdot 10^{-4}$	$3,43 \cdot 10^{-4}$	$4,26 \cdot 10^{-4}$
в исчерпывающей части	μ_u	viu	$2,534 \cdot 10^{-4}$	$3,83 \cdot 10^{-4}$	$3,89 \cdot 10^{-4}$
Вязкость жидкой фазы, Па·с	$\mu_{жс}$	vil	$5,987 \cdot 10^{-4}$	$6,32 \cdot 10^{-4}$	$6,15 \cdot 10^{-4}$
Плотность жидкой фазы, кг/м ³	$\rho_{жс}$	rol	817	857	1122
Коэффициент теплопроводности	λ	lam	0,135	0,100	0,900

Таблица 3

Расчетные параметры встроенного дефлегматора

Наименование	Размерность	Величина		
		1	2	3
Конечная температура исходной смеси при конденсации всей флегмы	°С	156,065	549,598	460
Количество возможной сконденсированной флегмы	кг/ч	2896,9	1514,726	491,8
Средняя температура в змеевике	°С	28,27	22,276	30
Тепловая нагрузка	кВт	296,933	152,735	49,6
Коэффициент теплопередачи	Вт	174,926	116,396	120,6
Поверхность теплообмена	м ²	60,048	58,908	24,3
Длина змеевика	м	318,695	312,643	128,7
Диаметр змеевика	мм	80	80	80
Диаметр верхней части колонны для установки распределительного устройства	м	3	3,5	2,4
Число витков змеевика распределительного устройства	—	25	19	15

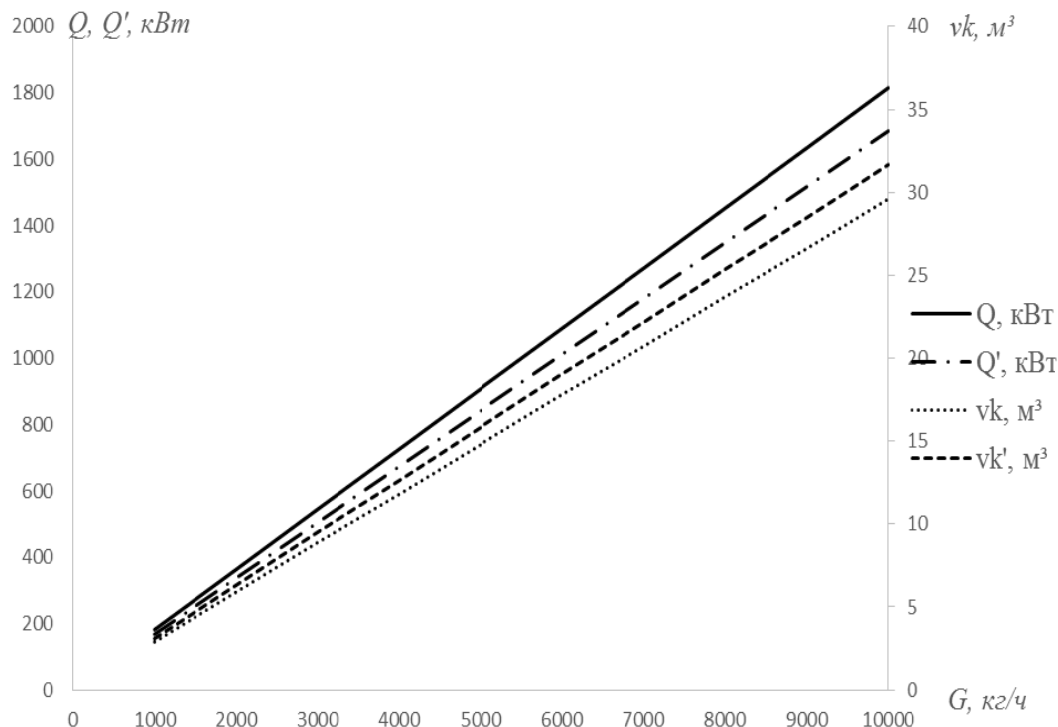


Рис. 4. График сравнения тепловой мощности стандартной колонны с колонной со встроенным дефлегматором:
 Q – тепловая мощность стандартной колонны; Q' – тепловая мощность колонны со встроенным дефлегматором;
 vk – объем стандартной колонны; vk' – объем колонны со встроенным дефлегматором

Разработана энергоэффективная схема процесса ректификации, заключающаяся в установке встроенного дефлегматора в колонну и последующей подаче сырья в холодильник кубовой жидкости.

Разработанная конструкция встроенного дефлегматора использует тепло паров верха колонны для конденсации паров дистиллята, а выполнение конструкции в форме обратного усеченного конуса увеличивает площадь орошения колонны.

Встроенный дефлегматор позволяет снизить тепловую нагрузку на дефлегматор и подогреватель исходной смеси, а при малотоннажных производствах исключить подогреватель исходной смеси из технологической схемы, так как исходное сырье нагреется до температуры

кипения низкокипящего компонента во встроенном дефлегматоре и в холодильнике кубовой жидкости.

Проведенные расчеты показали возможность экономии от 7 до 28 % тепловой энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П. м. 171761 Российская Федерация, МПК В01D53/18, В01D3/32 Распределительное устройство для ректификационных колонн / А. Б. Голованчиков, П. С. Васильев, М. В. Топилин, Г. Ю. Хурдина, С. А. Фоменков, Д. М. Коробкин; ВолгГТУ. – 2017.
2. Багатуров С. А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации ; под ред. С. А. Багатурова. – 3-е изд., перераб. – М. : Химия, 1974. – 440 с.
3. Процессы и аппараты нефте- газопереработки и нефтехимии : учебник для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. / А. И. Скобло [и др.]. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 677 с.

УДК 66.02(075.8):621.928.37

*А. А. Шагарова, М. И. Филимонов, Е. В. Дзинеvская, К. Е. Казакова, О. Н. Дроздова***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ
НАПОРНОГО ГИДРОЦИКЛОНА****Волгоградский государственный технический университет**

Экспериментальные исследования направлены на изучение влияния содержания твердой фазы в питании на разделительные свойства напорного гидроциклона. Разработана методика экспериментальных исследований и схема экспериментальной установки для исследования работы напорного гидроциклона для извлечения взвешенных частиц ПВХ из промывочных вод технологического оборудования производства суспензионного ПВХ. Получена обобщенная зависимость степени извлечения частиц твердой фазы от концентрации дисперсной фазы в суспензии.

Ключевые слова: гидроциклон, дисперсная фаза, поливинилхлорид, степень извлечения частиц твердой фазы.

*A. A. Shagorova, M. I. Filimonov, E. V. Dzinevskaja, K. E. Kazakova, O. N. Drozdova***EXPERIMENTAL RESEARCH OF HYDROCYCLONE DISCHARGE WORKS****Volgograd State Technical University**

Experimental research aimed at studying the influence of solid phase content in the diet on separation properties of hydrocyclone discharge. Methodology of experimental research and scheme of the experimental setup for the research work of hydraulic pressure to extract particles settling PVC water process equipment manufacture suspension PVC. Received generalized dependence removal index of hard phase particles on disperse phase concentration in suspension.

Keywords: hydrocyclone, polyvinylchloride, disperse phase, removal index of hard phase particles.

В производстве суспензионного ПВХ обрабатывается вода, отработанная в процессе полимеризации винилхлорида, различные виды конденсатов, образующихся на стадиях дегазации ПВХ и улавливания незаполимеризовавшегося винилхлорида, а также вода после промывки технологического оборудования на всех стадиях производства.

Замкнутый цикл оборотного водоснабжения значительно снижает потребление чистой воды, снижает нагрузку на общезаводские производственные очистные сооружения.

Для разделения разбавленных суспензий может использоваться различное оборудование для гидромеханического разделения дисперсных систем.

Гидроциклоны благодаря своим эксплуатационным преимуществам (компактность, высокая удельная производительность, надежность) получили широкое распространение в технологических процессах разделения жидких неоднородных систем и очистки оборотных и сточных вод [1, 2].

В работе [3] приведены результаты моделирования процесса очистки сточных вод производства ПВХ от частиц твердой фазы напорной флотацией в гидроциклонах. Показано, что процесс извлечения взвешенных частиц ПВХ из сточных вод напорной флотацией, реализо-

ванный в поле центробежных сил в гидроциклоне, позволяет существенно интенсифицировать процесс и добиться практически полного извлечения частиц твердой фазы за счет выделения из сточных вод частиц ПВХ наиболее мелких фракций.

Наиболее широкое использование в промышленности для разделения суспензий получили цилиндрикониические гидроциклоны. Одна из конструкций таких аппаратов представлена на рис. 1. Гидроциклон состоит из корпуса 1, образованного короткой цилиндрической частью и конусом. Исходная суспензия подается в гидроциклон под избыточным давлением по питающему (входному) патрубку 2, установленному тангенциально к корпусу. Под действием центробежной силы инерции, возникающей за счет интенсивного вращательного движения потока суспензии, сравнительно крупные и тяжелые частицы материала твердой фазы отбрасываются к внутренней стенке аппарата, перемещаются по спиральной траектории в коническую часть и разгружаются через сливной патрубок (песковый насадок) 4. Частицы же более тонких классов радиальным потоком жидкости передвигаются к оси аппарата и выносятся восходящим осветленным потоком, выходящим через верхний сливной патрубок 3.

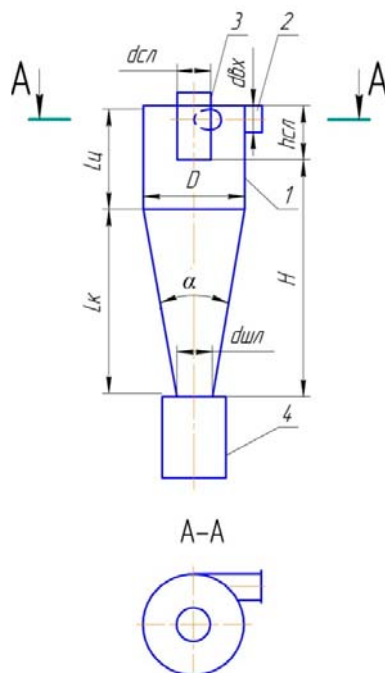


Рис. 1. Схема гидроциклона экспериментальной установки: 1 – цилиндрикоконический корпус; 2 – питающий (входной) насадок; 3 – верхний сливной насадок; 4 – приемный бункер; D – внутренний диаметр гидроциклона; d_{cl} , h_{cl} – внутренний диаметр и глубина погружения сливного насадка; d_{wn} – диаметр пескового насадка; $L_{ц}$, $L_{к}$ – высота цилиндрической и конической части соответственно; α – угол конуса

Эксперимент проводился на базе лабораторной установки, предназначенной для исследования процесса разделения в поле центробежных сил в гидроциклоне.

Геометрические характеристики лабораторного гидроциклона приведены в табл. 1.

При проведении экспериментальных исследований конструктивные характеристики не изменялись: диаметры входной, сливной и песковой насадок, напор подачи суспензии для всех случаев были постоянными. Основным изменяющимся технологическим параметром было содержание в исходной суспензии частиц твердой фазы.

В качестве модельного загрязнителя для приготовления рабочей суспензии был использован суспензионный ПВХ с диапазоном крупности частиц $3 \div 80$ мкм, плотностью 1138 кг/м^3 [4].

Для проведения экспериментальных исследований готовились искусственные пробы с заданным содержанием частиц твердой фазы ПВХ: 5 г/л, 10 г/л, 15 г/л и 20 г/л.

Для корректного контроля разницы начальной массы и массы уловленной тонкодисперсной фазы в каждом опыте исходное количество суспензии составляло $0,02 \text{ м}^3$.

Таблица 1

Геометрические характеристики лабораторного гидроциклона

Параметр	Ед. измерения	Значение
Диаметр гидроциклона	мм	40
Угол конусности	град.	15
Диаметр сливного насадка	мм	12
Глубина погружения сливного насадка	мм	60
Диаметр пескового насадка	мм	8
Диаметр питающего входного насадка	мм	12
Длина цилиндрической части	мм	50
Длина конической части	мм	150

Принципиальная схема и общий вид установки представлены на рис. 2, 3.

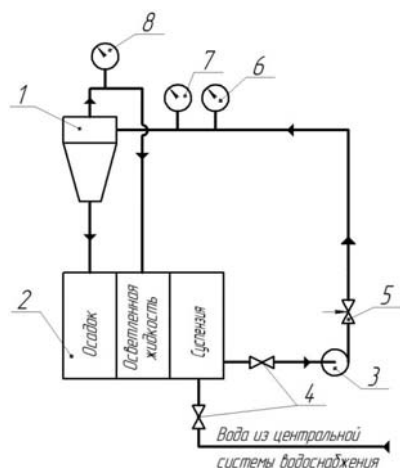


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – гидроциклон; 2 – емкость, разделенная на три отсека; 3 – центробежный насос; 4 – запорная арматура; 5 – регулировочная арматура; 6 – водяной счетчик; 7 – манометр; 8 – вакуумметр



Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

Малоконцентрированная суспензия, заранее приготовленная в одном из отсеков емкости 2, с помощью центробежного насоса 3 по трубопроводу подается в гидроциклон 1. Регулирование расхода суспензии осуществляется регулировочной арматурой 5. Регистрация расхода осуществляется с помощью водяного счетчика 6. После прохождения гидроциклона 1 сгущенный и осветленный продукты возвращаются

в соответствующие отсеки емкости 2. Перед входным штуцером гидроциклона в схеме установлен манометр 7, который предназначен для измерения входного давления исходной суспензии. На сливном патрубке аппарата предусмотрен вакуумметр 8.

После разделения суспензии для сбора оставшегося в трубах и гидроциклоне суспензионного ПВХ через установку прогоняется чистая вода, собранные твердые частицы считаются уловленными при разделении. Шлам пропускается через фильтры для отделения уловленного осадка и высушивается в сушильном шкафу.

Содержание твердых частиц в пробе суспензии определялось по концентрации взвешенных веществ фильтрацией через плотный бумажный фильтр и взвешиванием на лабораторных весах CAScaux220 с точностью до 0,1 мг.

Эксперимент проводился при $t_{\text{возд}} = 20^\circ\text{C}$, перепад давления до и после аппарата составлял 3 кгс/см^2 . Производительность гидроциклона по исходной суспензии составляла $40 \text{ м}^3/\text{ч}$. Испытания проводились для заданных значений концентрации суспензионного ПВХ в воде, полученные результаты усреднялись по трем параллельным опытам.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

Концентрация начальная, г/л	Масса нач. ч-ц в 20 л раствора, г	Масса уловленных частиц M_1 , г	Масса уловленных частиц M_2 , г	Масса уловленных частиц M_3 , г	Степень очистки, %
5	100	82,75	83,49	83,45	84
10	200	136,08	135,30	135,25	68
15	300	172,56	171,98	171,63	60
20	400	221,21	220,65	221,01	55

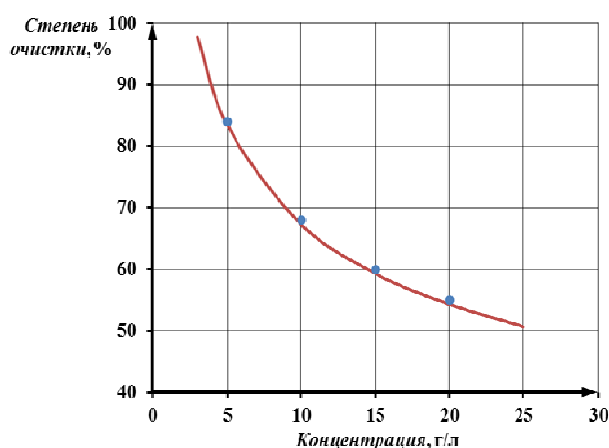


Рис. 4. График зависимости степени очистки суспензии ПВХ от концентрации дисперсной фазы

По полученным результатам была построена зависимость, отображающая изменение степени извлечения частиц твердой фазы в напорном гидроциклоне от концентрации дисперсной фазы в суспензии (рис. 4).

Аппроксимация экспериментальных данных проводилась степенной зависимостью с помощью метода наименьших квадратов.

Полученная зависимость степени очистки суспензии ПВХ от концентрации дисперсной фазы имеет вид:

$$\eta = 137,42 c^{-0,31}.$$

Результаты испытаний показали, что при концентрации исходной суспензии 5 % получена степень очистки 83 %. Увеличение концен-

трации ПВХ в исходной суспензии ухудшает слив и при достижении $15 \div 20$ % степень извлечения составляет $60 \div 55$ %.

Таким образом, для очистки сильно разбавленных суспензий, к которым относятся и промывочные воды технологического оборудования производства суспензионного ПВХ эффективно использовать гидроциклоны малого размера. Для оптимизации режимов работы гидроциклона требуется проведение дополнительных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов, Д. А. Опыт создания локальных систем очистки оборотных и сточных вод химических производств для защиты водоемов от загрязнений / Д. А. Баранов, А. И. Пронин, В. А. Диков, М. Г. Лагуткин // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 7. – С. 37–41.
2. Терновский, И. Г. Гидроциклонирование / И. Г. Терновский, А. М. Кутепов. – М.: Наука, 1994. – 350 с.
3. Яблонский, В. О. Выбор конструкции и режимов работы гидроциклона для очистки сточных вод производства ПВХ напорной флотацией / В. О. Яблонский // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 5). – С. 68–70.
4. Ульянов, В. М. Поливинилхлорид / В. М. Ульянов, Э. П. Рыбкин, А. Д. Гуткович [и др.]. – М.: «Химия», 1992. – 288 с.

УДК 664.002.5:635.34

М. Д. Романенко, Д. К. Азарян, А. Б. Голованчиков, А. И. Попов

УСТАНОВКА ДЛЯ МАССОВОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КОЧАНОВ КАПУСТЫ

Волгоградский государственный технический университет

В данной статье авторами производится анализ установок для удаления кочерыжек капусты, а также реализован идейный синтез конструкций, результатом которого является установка, позволяющая массово перерабатывать кочаны капусты с возможностью обеспечения безотходности производства, посредством удаления целой кочерыжки из капусты в отличие от прототипа, сверло которого измельчает кочерыжки в стружку.

Ключевые слова: установка для массового удаления кочерыжек капусты, кочерыжка, кочан, сверло, щелевой вырез, диагональный срез, ложемент, ленточный резиноканальный конвейер, оградительный кожух, приемный бункер, монолитный корпус.

M. D. Romanenko, D. K. Azaryan, A. B. Golovanchikov, A. I. Popov

THE UNIT FOR MASS PROCESSING OF CABBAGES

Volgograd State Technical University

In this article, the authors analyze the units to remove the stalk of cabbage and there are implemented ideological synthesis of structures, the result of which is to the unit to mass process the cabbages with the ability to provide non-waste production, by removing a stalk from the cabbage in contrast to the prototype, the drill which grinds stalks into chips.

Keywords: unit for mass processing of cabbages, stalk, cabbage head, drill, slit cut-out, diagonal cut, cradle, rubber belt conveyor, protective casing, hopper, monolithic body.

Техническое решение относится к технологическому оборудованию, предназначенному для переработки овощей и фруктов и может быть использовано в пищевой промышленности и в розничной торговой сети.

Аналогами данной единицы оборудования являются следующие устройства: установка для обработки кочанов капусты [1], машина для удаления кочерыг из кочанов капусты [2], устройство для вырезки кочерыг из кочанов капусты [3], приспособление для удаления кочерыжек капусты [4].

Наиболее близким техническим решением по совокупности признаков к заявляемому объ-

екту и принятому за прототип является установка для высверливания капустных кочерыжек в автоматическом режиме действия. Процесс высверливания происходит посредством двух сверел, воздействующих на кочаны капусты, размещенные на рабочей ленте. Высота сверла регулируется в зависимости от величины капустных кочанов [5].

Устройство состоит из ленточного резиноканального конвейера 1, с закрепленными на нем резиновыми коническими ложементами 2, монолитного корпуса 3, на одном боковом торце которого закреплены две реечные передачи 4, состоящие из прямозубых реек 5 и шестерен 6,

а также валов 7, шкивов 8, прижимных роликов 9, зубчатого ремня 10, электродвигателя 11, оградительных кожухов 12, охватывающих сверла 13, зажатых в патронах 14, притом сверла 13 состоят из полых трубок 15 с режущими зубьями на нижних торцах 16 и щелевыми прорезями 17, выполненными на боковых поверхностях в верхних частях, при этом внутри трубок напротив щелевых прорезей жестко закреплены стержни с диагональными срезами 18. Также с одной стороны от ленточного резино-канного конвейера 1 напротив зоны высверливания расположен бункер 19 для отбрасываемых сверлами кочерыжек, а для кочанов капусты в конце конвейерной ленты находится приемный бункер 20.

Установка для массового удаления кочерыжек капусты представлено на рис. 1–4 и работает следующим образом.

Кочаны капусты укладываются на резиновые конические ложементы 2 резиноканной конвейерной ленты 1, после чего лента перемещается до достижения позиции соосности сверел 13 с ложементами 2, после чего конвей-

ерная лента останавливается до момента завершения технологической операции высверливания кочерыжек капусты. После остановки конвейерной ленты с помощью запущенного электродвигателя 11 приводится в движение ведущий шкив 8, который передает крутящий момент второму ведущему шкиву 8 с помощью зубчатого ремня 10, который, в свою очередь, передает движение четырем ведомым исполняющим шкивам 8 с помощью зубчатого ремня 10. С помощью двух реечных передач 4 монолитный корпус 3 вместе со сверлами 13, зажатых в патронах 14, опускается к кочанам капусты, сверла 13 делают сквозные отверстия в кочанах, после чего вся конструкция поднимается, конвейерная лента продолжает движение и кочаны капусты скидываются в приемный бункер 20 по окончании конвейерной ленты. Далее цикл повторяется и предыдущие кочерыжки капусты выталкиваются последующими с помощью стержней с диагональными срезами 18 через щелевые вырезы 17 и направляются в оградительные кожухи 12, по которым, скапываясь, попадают в бункер 19.

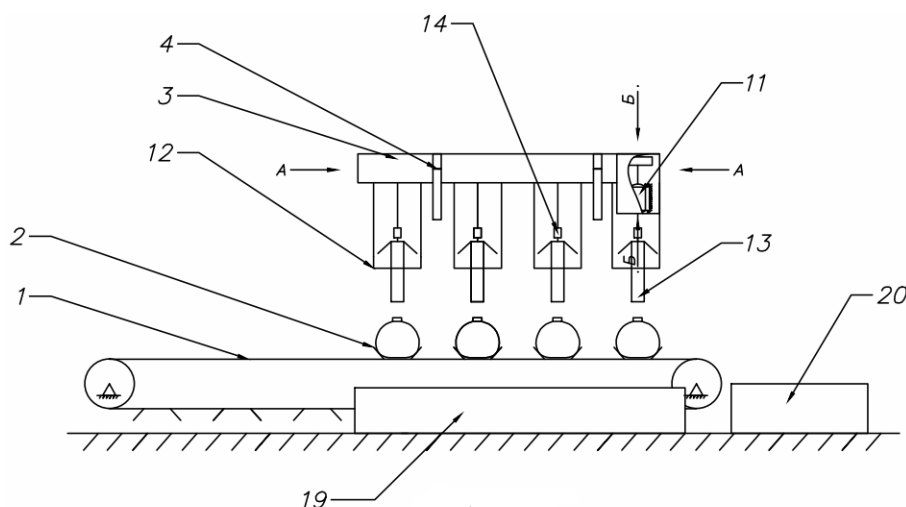


Рис. 1. Схема установки

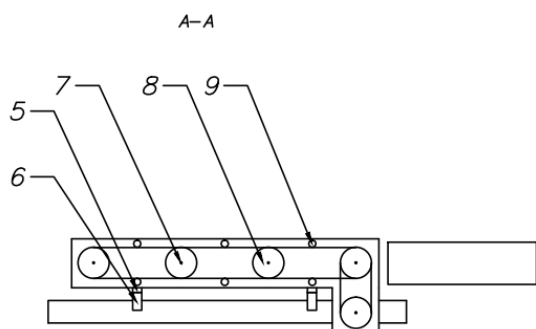


Рис. 2. Схема установки (вид А-А)

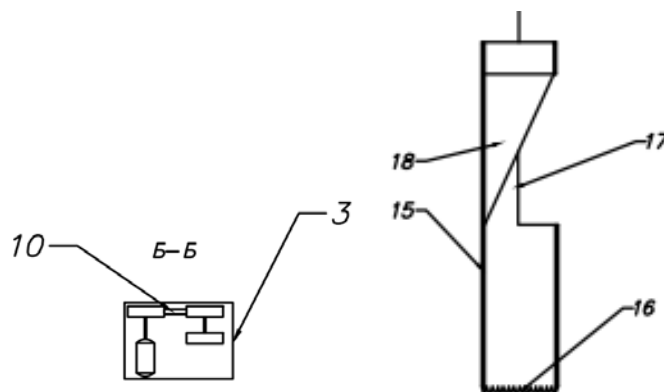


Рис. 3. Схема установки (вид Б-Б)

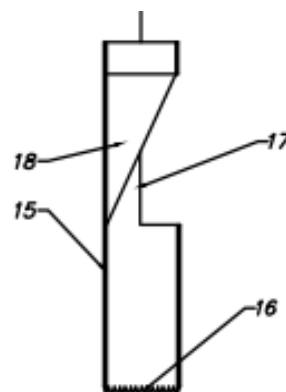


Рис. 4. Сверло

Таким образом, наличие резиновых ложементов 2 на поверхности резиноканной конвейерной ленты ленточного конвейера 1 реализует фиксацию кочанов капусты разных диаметров на конвейерной ленте ввиду своей конусной формы, причем движение конвейерной ленты задано таким образом, чтобы обеспечить технологическую операцию высверливания кочерыжек и дальнейший отброс кочанов в приемный бункер 20, а за счет механизации процесса подачи кочанов капусты по ленточному резиноканному конвейеру 1 с резиновыми коническими ложементами 2 и одновременным высверливанием четырех кочанов капусты становится возможным увеличить производительность установки.

Зубчато-ременные передачи, состоящие из шкивов 8 и зубчатых ремней 10 позволяют эффективно, конструктивно просто обеспечить распределение крутящего момента на четыре сверла 13, а наличие реечных передач 4 в конструкции установки позволяет совершать плавный осевой ход сверла 13.

Наличие полых цилиндрических сверел 13 позволяет снизить затраты на электроэнергию в сравнении с трехлепестковыми коническими сверлами установки, принятой за прототип, ввиду меньшего сопротивления высверливания,

так как площадь контакта полых сверел меньше в сравнении со сплошными. Также данный вид сверла позволяет осуществлять безотходное производство, так как полое сверло не измельчает кочерыжку.

По данной установке была подана заявка на полезную модель РФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. 1412712 СССР, МПК А 23 N 15/01. Установка для обработки кочанов капусты [текст] / Френкель И. З. (СССР). – 4184777/28-13; заявл. 23.01.87; опубл. 30.07.88, Бюл. 28. – 5 с.
2. А. с. 1750628 СССР, МПК А 23 N 15/00. Машина для удаления кочерыг из кочанов капусты [текст] / Лавров В. Н., Петручук Л. Н., Сухов Л. В., Шорохов Е. Т., Юркин Ю. Н., Соколовский Г. А., Ильин А. М. (СССР). – 4802568/13; заявл. 14.03.90; опубл. 30.07.92, Бюл. 28. – 8 с.
3. А. с. 668662 СССР, МПК А 23 N 4/12. Устройство для вырезки кочерыг из кочанов капусты [текст] / Шманев В. И. (СССР). – 2559930/28-13; заявл. 26.12.77; опубл. 25.06.79, Бюл. 23. – 2 с.
4. П. м. 166433 Российская Федерация, МПК А23N15/00. Приспособление для удаления кочерыжек капусты / А. Б. Голованчиков, М. Д. Романенко, Д. И. Романенко, В. В. Шишлянников, В. Н. Карев; ВолгГТУ. – 2016.
5. Установка для высверливания капустных кочерыжек в автоматическом режиме действия, модель HWG-02 [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <https://besteq.ru/catalog/product/681/Avtomaticheskaya-mashina-dlya-visverlivaniya-kocherigek-kapusti-model-HWG-0>.

УДК 66.047.8

Н. В. Тябин¹, Г. И. Лепехин¹, Д. А. Лепехина², Н. А. Прохоренко²

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ ПЕРЕНОСА АНОМАЛЬНО ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ В КРУГЛЫХ ТРУБАХ

¹ МКОУ Рахинская СОШ, Среднеахтубинский район, Волгоградской области

² Волгоградский государственный технический университет

В статье рассматривается теплообмен при течении по круглой трубе сахарной утфели, представляющей вязко-пластическую жидкость.

Ключевые слова: вязко-пластическая жидкость, явления переноса, критерии подобия, критериальные уравнения, круглая труба, сахарная утфель.

N. V. Tyabin, G. N. Lepyokhin¹, D. A. Lepyokhina², N. A. Prokhorenko²

MATHEMATICAL MODELING OF THE TRANSFER OF ANOMALALLY VISCOUS LIQUIDS IN ROUND TUBES

¹ MKOU Rakhinskaya SOSH, Sredneachtubinsky district, Volgograd region

² Volgograd State Technical University

The article deals with heat transfer during a round tube of a sugar masseuite representing a viscous-plastic liquid.

Keywords: visco-plastic fluid, transport phenomena, similarity criteria, criterion equations, round tube, sugar moss.

терий Ильюшина [1]; θ – предельное напряжение сдвига.

С учетом выражения (4) критериальное уравнение для экспериментальной обработки данных при течении вязко-пластической сахарной утфели должно иметь вид:

$$Eu = f(\text{Re}^*, \Gamma). \quad (5)$$

Следует учесть, что в уравнении (5) при обработке результатов эксперимента должна входить концентрация твердых частиц.

Подобие тепловых потоков устанавливается из уравнения (3) с учетом условия равенства тепловых потоков на границе. Граничное условие третьего рода, в котором тепловой поток предназначается пропорциональным разности температур стенки и жидкости имеет вид:

$$-\lambda \frac{\partial T_{cm}}{\partial r} = \alpha(T_{cm} - T_{cp}). \quad (6)$$

При стационарном процессе $\left(\frac{\partial T}{\partial t} = 0\right)$ из уравнения (3) получаем критерий Пекле:

$$Pe = \frac{v \cdot d}{a},$$

который можно преобразовать, если в него ввести эффективную вязкость $\eta_{эф}$ для течения вязко-пластической сахарной утфели в круглой трубе.

$$Pe = \frac{v \cdot d}{a} \cdot \frac{\eta_{эф}}{\rho} \cdot \frac{\rho}{\eta_{эф}} = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta_{эф}} \cdot \frac{\eta_{эф}}{\rho} = \text{Re}^* \cdot \text{Pr}^*,$$

где $\text{Pr}^* = \frac{\eta_{эф}}{\rho \cdot a} = \frac{\eta_{nl} \left(1 + \frac{\theta \cdot d}{6 \cdot v \cdot \eta_{nl}}\right)}{\rho \cdot a}$ – обобщенный критерий Прандтля.

Из граничного условия (6) получаем безразмерный комплекс вида:

$$\frac{\alpha \cdot \Delta T}{\lambda \cdot \text{grad} T} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = \text{Nu},$$

то есть критерий Нуссельта, который представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи.

Следовательно, процесс теплообмена при движении сахарной утфели в трубах можно описать критериальным уравнением:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}^*, \text{Pr}^*) \quad (7)$$

с учетом концентрации твердой фазы.

Уравнения (5) и (7) требуют дальнейшего экспериментального подтверждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тябин, Н. В. О подобии потоков вязкопластической жидкости / Н. В. Тябин // Коллоид. ж. – 1952. – 14, № 4. – С. 270–273.
2. Гухман, А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена / А. А. Гухман. – М.: Высшая школа, 1974. – 328 с.
3. Терентьев, Ю. А. Теплоперенос в псевдопластических сахарных утфелях. Тепло- и массообмен в неньютоновских жидкостях / Ю. А. Терентьев, В. Д. Попов. – М.: Энергия, 1968. – 287 с.

УДК 66.021.3

А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Е. А. Мишта

РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТИ МАССОПЕРЕДАЧИ ЛИСТОВОЙ НАСАДКИ АБСОРБЦИОННОЙ КОЛОННЫ

Волгоградский государственный технический университет

Разработана конструкция абсорбера с листовой насадкой. Проведен сравнительный расчет поверхности массопередачи, разработанной конструкции с конструкцией взятой за прототип. Рассмотрена скорость массопереноса на границе раздела фаз стекающей вниз по поверхности насадки пленки жидкости и поднимающего навстречу ей потока газа.

Ключевые слова: абсорбер, листовая насадка, поверхность массопередачи, скорость массопереноса.

A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko, A. E. Mishta

THE CALCULATION OF THE MASS TRANSFER SURFACE OF THE SHEET NADCI ABSORPTION COLUMN

Volgograd State Technical University

Developed the design of the absorber sheet attachment. A comparative calculation of the mass transfer surface, the developed design with the design taken as a prototype. Considered the rate of mass transfer at the phase interface of water flowing down the surface of the nozzles of the liquid film and up to meet her, the flow of gas.

Key words: absorber, the nozzle sheet, the surface of mass transfer, rate of mass transfer.

Разработанное техническое решение относится к массообменным аппаратам с листовой насадкой, которое может найти применение в химической, нефтехимической, металлургической, энергетической, фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности, а также в экологических процессах очистки дымовых газов и вентиляционных выбросов.

Задачей разработанной и запатентованной конструкции абсорбера является повышение производительности за счет увеличения поверхности массопередачи, что приводит к увеличению скорости массопереноса, на границе раздела фаз стекающей вниз по поверхности насадки пленки жидкости и поднимающего навстречу ей потока газа.

Общий вид в разрезе колонны с трубчатыми рукавами предлагаемой конструкции представлен на рис. 1.

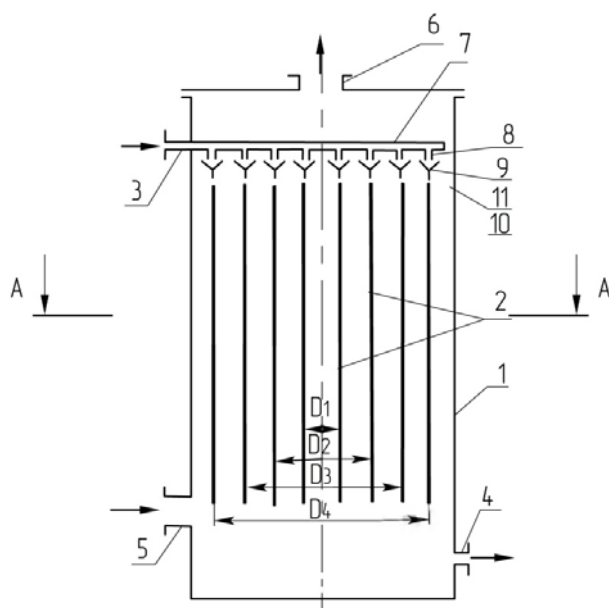


Рис. 1. Предлагаемая конструкции колонны с трубчатыми рукавами

Предлагаемая конструкция абсорбера состоит из колонны, выполненная из корпуса 1 с насадкой в виде трубчатого рукава 2. Корпус 1 содержит патрубки для входа 3 и выхода 4 жидкости и входа 5 и выхода 6 газа. К патрубку 3 входа жидкости прикреплено распределительное устройство для жидкости, состоящее из трубы 7 с распределительными патрубками 8, под каждым из которых установлены щелевые кольцевые воронки 9 для равномерного орошения трубчатых рукавов 2 жидкостью с созданием на них с обеих сторон ее пленки.

Абсорбер работает следующим образом. Жидкость по патрубку 3 подается в распределительное устройство для жидкости, и из трубы 7 попадает в распределительные патрубки 8, а из них в щелевые кольцевые воронки 9, которые равномерно в виде кольцевой пленки орошают обе поверхности вертикальных пластин 2 и жидкость стекает по ним вниз корпуса 1 и отводится из него по патрубку 4. Газ подается по патрубку 5, в корпус абсорбера, равномерно обтекая, поверхности пленок жидкости, стекающей по вертикальным пластинам 2, поднимается вверх вдоль поверхностей трубчатых рукавов 2 и выходит из корпуса 1 по патрубку 6.

Осесимметричная установка внутри колонны трубчатых рукавов позволяет увеличить поверхность массопереноса по сравнению с вертикальными пластинами, выполненными из тканевых полотнищ, как это имеет место в техническом решении, принятом за прототип, что способствует росту производительности.

Выполнение постоянного зазора между смежными рукавами позволяет равномерно с одинаковой скоростью подавать навстречу друг другу пленку стекающей с обеих сторон рукава жидкости и движущийся навстречу ей поток газа, что также приводит к стабильности процесса массопередачи и росту производительности.

Таким образом, осесимметричная установка внутри корпуса 1 колонны трубчатых рукавов 2 позволяет увеличить поверхность массопереноса по сравнению с вертикальными пластинами выполненными из тканевых полотнищ, что способствует росту производительности. Выполнение постоянного зазора между смежными трубчатыми рукавами 2 позволяет равномерно с одинаковой скоростью подавать навстречу друг другу пленку стекающей с обеих сторон рукава жидкости и движущийся навстречу поток газа, что также приводит к стабильности процесса массопередачи и росту производительности.

Сравним площади поверхности рукавов в колонне предлагаемой конструкции с поверхности листовой насадки в колонне, в базовом объекте [1–4].

В абсорбере, представляющем собой насадочную массообменную колонну с пластинчатой насадкой, очищают воздух в процессе абсорбции. Диаметр колонны $D = 0,5$ м, зазор между рукавами $\delta = 0,05$ м. Тогда в колонне осесимметрично можно установить 4 рукава

диаметрами: $D_1 = 0,1$ м, $D_2 = 0,2$ м; $D_3 = 0,3$ м; $D_4 = 0,4$ м (рис. 2).

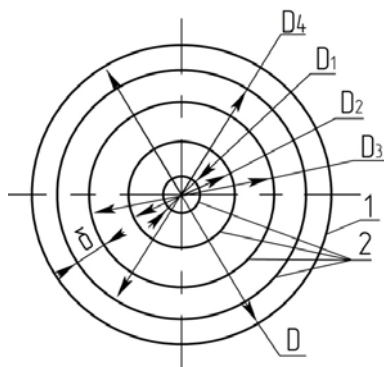


Рис. 2. Схема установки рукавов в предлагаемой полезной модели (вид сверху)

Общая площадь поверхности этих четырех рукавов длиной 1 м составляет:

$$f_3 = \pi(D_1 + D_2 + D_3 + D_4) = 3,14 \text{ м}^2/\text{м}. \quad (1)$$

В базовом объекте (рис. 2) с каждой стороны можно установить по 4 листа шириной с учетом монтажного зазора относительно корпуса аппарата $\delta = 0,05$ м и зазора между листами $\delta = 0,05$ м: $b_1 = 0,39$ м, $b_2 = 0,36$ м, $b_3 = 0,30$ м, $b_4 = 0,13$ м.

Тогда с учетом листа на вертикальной оси $b_0 = 0,4$ м, общая поверхность листов высотой 1 м будет:

$$f_n = b_0 + 2(b_1 + b_2 + b_3 + b_4) = 0,4 + 2(0,39 + 0,36 + 0,30 + 0,13) = 2,76 \text{ м}^2/\text{м}.$$

Установленные в верхней части аппарата для равномерного орошения полотнища выполнены в виде осесимметрично установленных внутри колонны трубчатых рукавов с диаметрами, определяемыми выражением:

$$D_1^2 = D_2^2 - D_1^2 = D_3^2 - D_2^2 = D_{i+1}^2 - D_i^2, \quad (2)$$

где D_1 — диаметр центрального рукава; D_2, D_3, D_i — диаметр последующих трубчатых рукавов, м.

Если задаться диаметром центрального рукава $D_1 = 0,1$ м.

Согласно выражению (2), диаметр последующего трубчатого рукава:

$$D_2 = \sqrt{2D_1^2} = \sqrt{2 \cdot 0,1^2} = 0,14 \text{ м},$$

Согласно выражению (2), выразив D_3 , получим диаметр последующего трубчатого рукава:

$$D_3 = \sqrt{D_1^2 + D_2^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,14^2} = 0,18 \text{ м}.$$

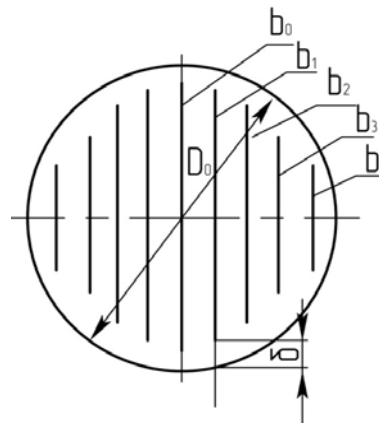


Рис. 3. Схема установки листовой насадки в колонне по прототипу (вид сверху)

Таким образом, площадь поверхности рукавов в предлагаемой конструкции колонны по сравнению с прототипом увеличивается на 13,5 %, что приводит к увеличению скорости тепломассопередачи и возрастанию производительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. — 10-е изд., перераб. и доп. — Л. : Химия, 1987. — 576 с.
2. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов — 10-е изд., стереотипное, доработанное. Перепечатано с изд. 1973 г. — М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. — 753 с.
3. Рамм, В. М. Адсорбция газов / В. М. Рамм. — Изд. 2-е, переработ. и доп. — М. : Химия, 1976. — 656 с.
4. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник / А. С. Тимонин. — Т. 2. — Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. — 884 с.

Редактор
В. В. Свитачева

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–64543 от 22 января 2016 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 23-00-76
E-mail: rector@vstu.ru

Темплан 2018 г. Поз. № 22ж. Подписано в печать 27.03.2018 г. Формат 60 x 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 5,56.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ №
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.