

Т. Г. Умергалин (д.т.н., проф., зав. каф.)¹, Ф. Б. Шевляков (к.т.н., доц.)²,
Б. Е. Мурзабеков (асп.)¹, Е. М. Захарова (к.х.н., н.с.)³, В. П. Захаров (д.х.н., проф.)⁴

ВОДНАЯ ОТМЫВКА ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТА В ТУРБУЛЕНТНОМ АППАРАТЕ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
¹кафедра химической кибернетики, ²кафедра общей и аналитической химии
450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; тел. (347) 2420837, e-mail: Umergalin2010@yandex.ru

³Институт органической химии Уфимского научного центра РАН,
лаборатория синтеза функциональных полимеров
450054, г. Уфа, ул. пр. Октября, д. 71; e-mail: lena991999@mail.ru

⁴Башкирский государственный университет,
кафедра высокомолекулярных соединений и общей химической технологии
450074, г. Уфа, ул. З. Валиди, 32; тел. (347) 2736608, e-mail: ZaharovVP@mail.ru

T. G. Umergalin¹, F. B. Shevlyakov¹,
B. E. Murzabekov¹, E. M. Zakharova², V. P. Zakharov³
**WATER WASHING OF GAS CONDENSATE
IN TURBULENT APPARATUS**

¹Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., 450062, Ufa, Russia; ph. (347) 2420837, e-mail: Umergalin2010@yandex.ru

²Institute of Organic Chemistry of Ufa Scientific Center of the RAS
71, pr. Oktyabrya, 450054, Ufa, Russia; e-mail: lena991999@mail.ru

³Bashkir State University
32, Zaki Validi Str., 450074, Ufa, Russia; ph. (347) 2736608, e-mail: ZaharovVP@mail.ru

Представлены результаты численного расчета и экспериментального изучения закономерностей диспергирования двухфазного потока и перепада давления в трубчатом турбулентном аппарате применительно к процессу водной отмывки газового конденсата от солей. Предложена геометрия трубчатого турбулентного аппарата диффузор-конфузорной конструкции, обеспечивающая перепад давления 0.22 атм, формирование эмульсии с диаметром капель дисперсной фазы 0.8 мм, производительность процесса около 100 м³/ч.

Ключевые слова: газовый конденсат; перепад давления; турбулентный аппарат; эмульсия.

The results of numerical calculation and experimental study of two-phase flow patterns of dispersion and differential pressure in a tubular turbulent apparatus for the process of water washing gas condensate salts are present. Proposed geometry of the tubular turbulent device diffuser-confuser type providing a pressure drop of 0.22 bar, the formation of emulsions with droplets of the dispersed phase with a diameter of 0.8 mm, the performance of the process is about 100 m³/hr.

Key words: emulsion; gas condensate; pressure drop; turbulent apparatus.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МД-4973.2014.8, РФФИ (проект 14-03-97027).

This work was financially supported by a grant of the President of the Russian Federation MD-4973.2014.8, RFBR (project 14-03-97027).

Одним из ключевых процессов подготовки газового конденсата к его стабилизации методом фракционирования ректификацией является стадия экстракции водорастворимых солей. Предварительное обессоливание газового конденсата при отмывке пресной водой позволяет на последующих стадиях снизить солеотложение на технологическом оборудовании. В работах ^{1,2} выявлена возможность эффективного смешения нефти и нестабильного газового конденсата с водой в трубчатом турбулентном аппарате. Смешение газового конденсата с небольшим количеством пресной воды (0.5–2 % объемн.) в трубчатом турбулентном аппарате диффузор-конфузорной конструкции позволяет снизить общее содержание солей с 97 г/м³ до 15–20 г/м³. Очевидно, что эффективность водной экстракции солей определяется возможностью получения мелкодисперсной системы газовый конденсат-вода с высокой удельной поверхностью раздела фаз. Ввиду того, что в трубчатых турбулентных аппаратах эффективное перемешивание достигается исключительно за счет энергии движения высокоскоростного потока через систему местных сопротивлений, то ограничивающим фактором по качеству получаемых дисперсных систем является перепад давления на концах аппарата.

Целью настоящей работы являлось изучение гидродинамического режима работы трубчатого турбулентного аппарата диффузор-конфузорной конструкции применительно к процессу отмывки газового конденсата водой, в частности, экспериментальное изучение закономерностей диспергирования двухфазного потока и оценка гидравлического перепада давления.

Методика проведения экспериментов

Экспериментальное изучение закономерностей образования эмульсий в потоке газовый конденсат-вода проводили в трубчатом турбулентном аппарате диффузор-конфузорной конструкции (длина диффузор-конфузорной секции $L_c=0.048$ м, диаметр диффузора $d_d=0.024$ м, диаметр конфузора $d_k=0.012$ м, число диффузор-конфузорных секций 4, угол раскрытия диффузора $\gamma=45$ град.) (рис. 1). Эксперимент проводили при температуре 18 °С и использовали газовый конденсат плотностью 0.68 г/см³ с компонентным составом, представленным в табл. 1. При фиксированном соотношении вода/газовый конденсат равном 1/100 изменяли объемный расход двухфазного потока в интервале 100–260 см³/с. Ввиду высокого содержания газового конденсата в исследуемом двухфазном потоке в условиях эксперимента образовывались обратные эмульсии.

Частотные кривые распределения капель дисперсной фазы по размерам получали методом видеосъемки при интенсивном проходящем освещении с использованием цифровой фотокамеры. Покадровый просмотр компьютерного изображения движущихся дисперсных систем позволил вычислить истинный размер капель (площадь проекции сферической капли). Подсчет капель проводили в интервале диаметров (мм): 0–0.4; 0.4–0.6; 0.6–0.8; 0.8–1.0; 1.0–1.5; 1.5–2; свыше 2. Для оценки ошибки результатов эксперимента выбирали 8 изображений отдельного участка потока. По экспериментальным данным проводили оценку дисперсии распределения s^2 :

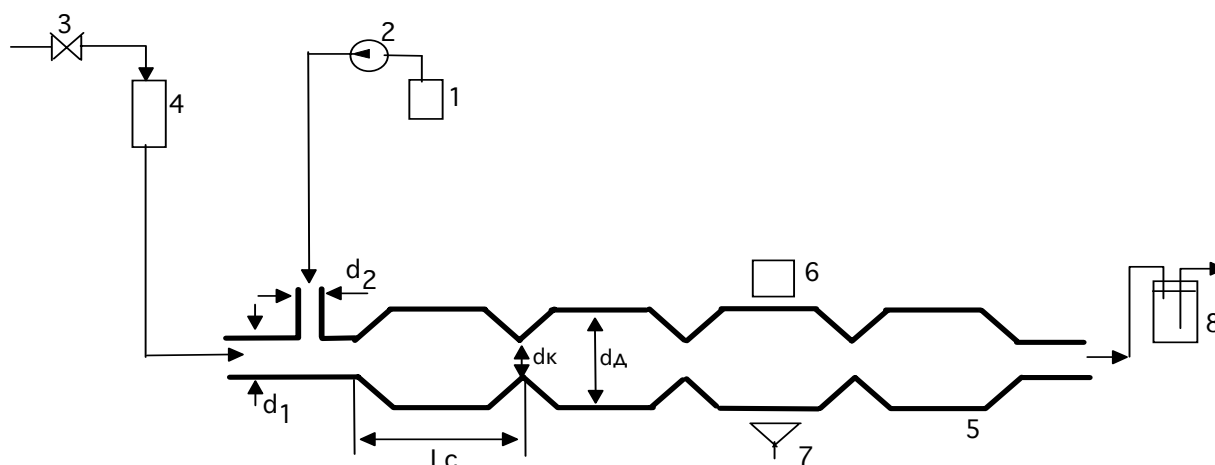


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – емкость для дисперсной фазы, 2 – перистальтический насос, 3 – линия подачи дисперсионной среды, 4 – ротаметр, 5 – трубчатый турбулентный аппарат диффузор-конфузорной конструкции, 6 – видеокамера, 7 – источник света, 8 – сборник.

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i - \overline{d_{cp}})^2,$$

где N — число замеров;
 d — диаметр капель.

Стандартную ошибку Δ при доверительной вероятности 0.95 рассчитывали как $\Delta = \pm 2.4s/\sqrt{N}$. Среднее значение ошибки измерений составило $\pm 7\%$.

Таблица 1
**Физико-химические свойства
газового конденсата**

Параметр	Значение
Плотность конденсата при 20 °С, г/см ³	0.68
Компонентный состав, % объемн.	
Пропан	2.973
Изобутан	1.387
н-бутан	3.880
Изопентан	3.053
н-пентан	3.561
Сумма гексанов+ выше	80.140
Смолы	5.006
Фракционный состав конденсата	
Начало кипения, °С	44
Перегадено, % объемн.	94.5
Остаток в колбе, % объемн.	3.5
Потери при перегонке (летучие), % объемн.	2.0
Отгоняется при температуре °С, % объемн.	
82	10
95	20
107	30
118	40
130	50
150	60
177	70
209	80
262	90
300	95

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что при увеличении объемного расхода двухфазного потока газовый конденсат-вода происходит снижение размера дисперсных частиц по экспоненциальной зависимости (рис. 2). Наблюдается последовательное уменьшение диаметра капель дисперсной фазы при переходе от первой к четвертой диффузор-конфузорным секциям. В частности, диаметр капель дисперсной фазы (воды) в четвертой секции при объемном расходе потока 100 см³/с сопоставим с размером дисперсии в первой секции при 260 см³/с. Размеры капель, образующихся в четвертой секции, при расходе двухфазной системы

140 см³/с сопоставимы с размерами дисперсии во второй секции при 260 см³/с. Эту зависимость размеров формирующихся капель дисперсной фазы от производительности аппарата необходимо учитывать при проектировании узла обессоливания газового конденсата.

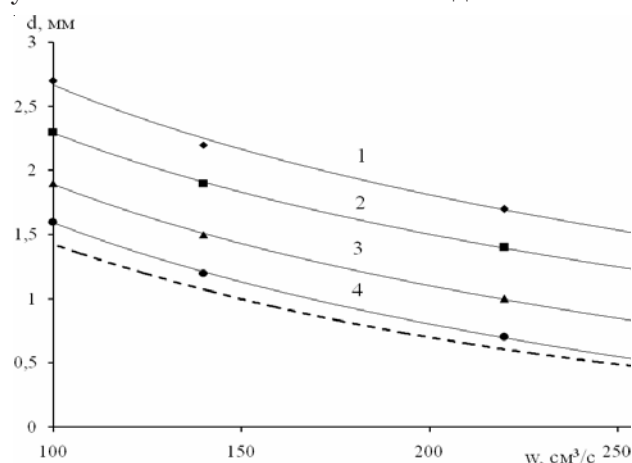


Рис. 2. Зависимость размера частиц дисперсной фазы от объемного расхода двухфазного потока.

Цифры на кривых соответствуют порядковому номеру диффузор-конфузорной секции ($d_d = 0.024$ м, $d_k = 0.012$ м). Эксперимент — сплошные линии, расчет — пунктир).

С целью создания прогностической модели работы узла обессоливания газового конденсата водой в трубчатом турбулентном аппарате проведен сопоставительный анализ соответствия полученных экспериментальных данных расчетным величинам. Аналитическое выражение для расчета диссипации удельной кинетической энергии турбулентности ε имеет вид ³:

$$\varepsilon = 0.625 \left(\frac{f_E f^3 V_K^3}{d_k} \right) \cdot \left(1 + \left(\frac{w_2}{w_1 + w_2} \right)^2 \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{-0.3} \right)$$

$$f = 0.117 + 0.049\gamma - 0.0012\gamma^2 + 1.374 \cdot 10^{-5} \gamma^3 - 5.9 \cdot 10^{-8} \gamma^4,$$

$$F_E = -0.138 + 0.226 \frac{d_d}{d_k} - 0.116 \left(\frac{d_d}{d_k} \right)^2 + 0.0119 \left(\frac{d_d}{d_k} \right)^3 + 0.03 \frac{L_c}{d_d} - 4.95 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d_d}{d_k} \cdot \frac{L_c}{d_d} - 1.93 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{L_c}{d_d} \cdot \left(\frac{d_d}{d_k} \right)^2 - 9.62 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{L_c}{d_d} \right)^2 + 3.22 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d_d}{d_k} \cdot \left(\frac{L_c}{d_d} \right)^2$$

где w — объемный расход; ρ — плотность.

Важным фактором, влияющим на удельную поверхность раздела фаз, является дефор-

мация капле, которая в общем случае обусловлена динамическим напором под воздействием турбулентных пульсаций со стороны дисперсионной среды. Теоретически оценить минимальный размер капли $d_{кр}$, подвергшейся деформации при течении в турбулентном режиме, можно из соотношения, характеризующего устойчивость границы раздела фаз ⁴:

$$\frac{2\sigma}{d_{кр}} = \frac{\rho_1(v')^2}{2}$$

Пульсационная скорость масштаба элемента v' определяется в соответствии с «законом двух третей» Колмагорова-Обухова ⁵:

$$v' = (\varepsilon d_{кр})^{1/3}.$$

Пульсации меньшего масштаба обладают меньшей энергией и не способны деформировать частицы дисперсной фазы. Пульсации большего масштаба увлекают элементы дисперсной фазы без деформации их поверхности.

В результате обработки результатов численного эксперимента получена зависимость минимального значения среднего диаметра капле дисперсной фазы, которые подвержены деформации за счет гидродинамического воздействия со стороны сплошной среды ⁶:

$$d_{кр} = 0.099 \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_1} \right)^{0.6} \cdot \varepsilon^{-0.4}$$

Величину $d_{кр}$ можно принять в качестве диаметра образующихся дисперсных частиц в турбулентном потоке d .

Увеличение скорости потока газового конденсата сокращает время контактирования фаз, но увеличивает уровень турбулентности, при этом размеры капле дисперсной фазы и, соответственно, поверхность раздела фаз, снижаются экспоненциально. Сопоставляя экспериментально полученные значения с расчетными, видно (рис. 2), что выбранная математическая модель по расчету минимального значения диаметра капле дисперсной фазы достаточно точно описывает влияние скорости на размер дисперсных включений на выходе из аппарата. Наибольшее отклонение в условиях эксперимента достигло 18%, а среднее расхождение — порядка 11%.

Расчет показал, что переход от аппарата цилиндрической ($d_0/d_k=1$) к диффузор-конфузорной ($d_0/d_k=3$) конструкции (рост глубины профилирования канала) увеличивает скорость движения двухфазного потока и в большей степени переносит импульс в диффузор. Диспергирование капле воды в объеме газового конденсата происходит по всей длине

аппарата, что позволяет увеличить поверхность контакта фаз более, чем на 60% при переходе от 1 к 4 секции. Увеличение поверхности раздела фаз положительно сказывается на эффективности обессоливания газового конденсата, что экспериментально подтверждено в работе ².

Полученные зависимости позволяют прогнозировать эффективность диспергирования капле воды в объеме газового конденсата, что определяет возможность конструировать смеситель для эксплуатации в широком диапазоне производительности. Верхним пределом по объемному расходу двухфазного потока будет величина перепада давления на концах аппарата, определяемого техническими возможностями насосного оборудования, используемого для перекачивания жидкости. Очевидно, что диспергирование в системе газовой конденсат—вода необходимо проводить при малых перепадах давления, что напрямую связано с затратами энергии для обеспечения требуемой производительности установки.

Экспериментальные исследования показали, что аппарат цилиндрической конструкции характеризуется тем, что величины гидростатического давления в начале и на его конце практически одинаковы (рис. 3).

$P_H, P_K, \Delta P$, атм

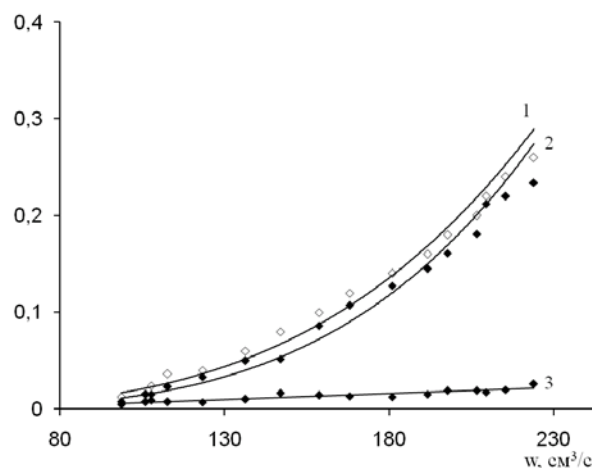


Рис. 3. Перепад давления в аппарате цилиндрической конструкции ($d_0 = 0.024$ м): 1 — начало аппарата (P_H); 2 — конец аппарата (P_K); 3 — перепад давления (ΔP).

В этом случае наблюдается сравнительно низкий перепад давления на концах аппарата, который в условиях эксперимента не превышает 0.03 атм. С достаточной сходимостью расчет можно проводить по уравнению

$$\Delta P = 4 \cdot 10^{-6} w^{1.58} \quad (R=0.93).$$

где R — коэффициент корреляции.

В аппарате диффузор-конфузорной конструкции наблюдается значительное возрастание давления в начале аппарата (рис. 4), что определяет высокие значения перепада давления (ΔP достигает порядка 1 атм).

$$\Delta P \approx P_n = 1 \cdot 10^{-5} w^{2.35} \quad (R=0.99).$$

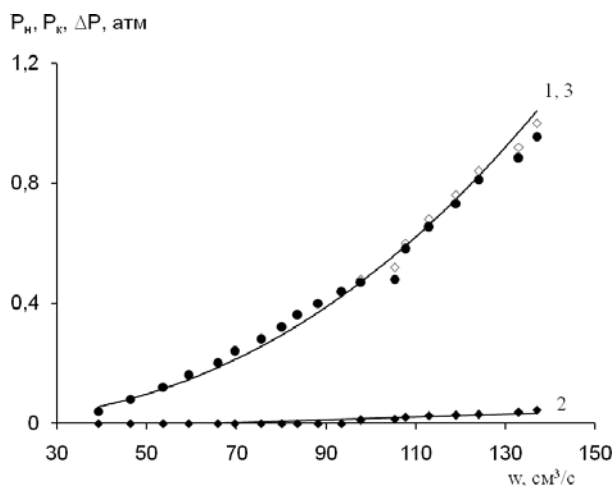


Рис. 4. Перепад давления в аппарате диффузор-конфузорной конструкции ($d_d = 0.024$ м, $d_k = 0.012$ м): 1 — начало аппарата (P_n); 2 — конец аппарата (P_k); 3 — перепад давления (ΔP).

Следует отметить, что при сравнимой производительности давление на конце трубчатого турбулентного аппарата цилиндрической и диффузор-конфузорной конструкции практически одинаково (рис. 5).

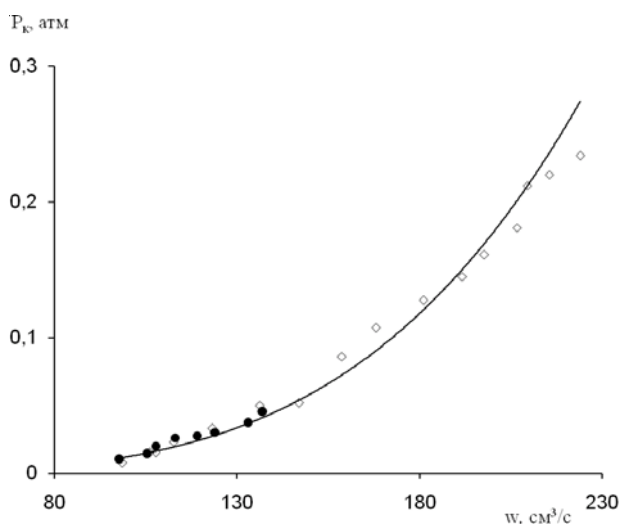


Рис. 5. Давление на конце трубчатого турбулентного аппарата цилиндрической ($d_d = 0.024$ м) ($\diamond$) и диффузор-конфузорной конструкции ($d_d = 0.024$ м, $d_k = 0.012$ м) ($\bullet$).

С целью оптимизации геометрии зоны смешения применительно к водной отмывке газового конденсата предложена формула для расчета перепада давления в трубчатом турбулентном аппарате диффузор-конфузорной конструкции. Для этого перепад давления в отдельной диффузор-конфузорной секции представлен суммой перепадов давлений в расширении (диффузоре), гладкой трубе, и сужении (конфузоре) (рис. 6):

$$\Delta P = \Delta P_{1-2} + \Delta P_{2-3} + \Delta P_{3-4}.$$

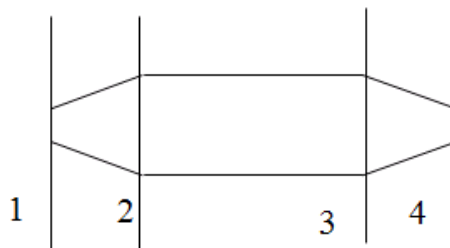


Рис. 6. Схема диффузор-конфузорной секции трубчатого аппарата для расчета перепада давления: 1-2 — диффузор; 2-3 — гладкая труба; 3-4 — конфузор.

Для расчета перепада давления на отдельных участках аппарата при турбулентном движении двухфазного потока использован метод, изложенный в работе 7.

Для диффузора при $\gamma \leq 45^\circ$:

$$\Delta P_{1-2} = 2.6 \sin(\gamma \cdot 6) \cdot \rho_1 \frac{V_K^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S_K}{S_d}\right)$$

Для гладкого участка трубы:

$$\Delta P_{2-3} = \frac{\lambda \cdot L \cdot \rho_1 \cdot V_d^2}{2 d_d \cdot g}, \quad \lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}},$$

где V_K — линейная скорость потока в конфузорной части;

S — площадь поперечного сечения;

λ — коэффициент трения.

Для конфузора при $\gamma \leq 45^\circ$:

$$\Delta P_{3-4} = 0.0049 \cdot \mu \cdot Re^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{8 V_K^2}{d_k} \cdot \frac{1}{6 \tan \frac{\gamma}{2}} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_k}{d_d}\right)^3\right]$$

Сопоставление расчетных данных перепада давления в аппарате с экспериментальными показывает хорошую их корреляцию:

$$\Delta P_{эксн} = 0.955 \text{ атм}, \quad \Delta P_{расчет} = 1.062 \text{ атм}.$$

Применительно к процессу отмывки газового конденсата водой, реализуемого в цехе

подготовки газа и газового конденсата на месторождении Боранколь (АО «Морская Нефтяная Компания «КазМунайТениз», Казахстан), проведен расчет оптимальной конструкции трубчатого турбулентного аппарата, обеспечивающего перепад давления $\Delta P \approx 0.22$ атм: $d_k = 0.06$ м, $d_d = 0.12$ м, длина диффузор-конфузорной секции 0.3 м, число диффузор-конфузорных секций 6, угол раскрытия диффузо-

ра 45 град, общая длина аппарата 1.8 м. Использование аппарата диффузор-конфузорной конструкции обеспечивает производительность процесса по общему расходу двухфазного потока около 100 м³/ч. Расчетный диаметр частиц дисперсной фазы (воды) в этом случае составит около 0.8 мм, что обеспечит формирование дисперсной системы с развитой поверхностью раздела фаз и высокую скорость отмывки газового конденсата от солей.

Литература

1. Шевляков Ф. Б., Умергалин Т. Г., Захаров В. П., Баулин О. А. Нейтрализация нефти в турбулентном аппарате // Баш. хим. ж.— 2012.— Т.19, №3.— С.122-126.
2. Мурзабеков Б. Е., Шевляков Ф. Б., Умергалин Т. Г., Захаров В. П. Отмывка газового конденсата от солей в трубчатом турбулентном аппарате диффузор-конфузорной конструкции // Вестник Башкирского университета.— 2012.— Т.17, №1.— С.36-38.
3. Захаров В. П., Берлин А. А., Монаков Ю. Б., Дебердеев Р. Я. Физико-химические основы протекания быстрых жидкофазных процессов.— М.: Наука, 2008.— 348 с.
4. Barabash V.M., Belevitskaya M.A. Mass transfer from bubbles and drops in mechanically agitated apparatuses // Теоретические основы химической технологии.— 1995.—Т.29, №4.— С.362-372.
5. Колмогоров А. Н. Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности // Доклады АН СССР.—1941.— Т.32, №1.— С.19-21.
6. Takhavutdinov R.G., D'yakonov G.S.1, Mukhametzyanova A.G.1, Zakharov V.P., Minsker K.S. Intensification of dispersion in tubular turbulent apparatuses at manufacturing of synthetic rubbers // Химическая промышленность.— 2002.— Т. 79, №1.— С.22-28.
7. Perry R.H., Green D.W., Maloney J.O. Chemical Engineer's Handbook New York, McGraw: Hill Book Company, 1999.

References

1. Shevlyakov F.B., Umergalin T.G., Zakharov V.P., Baulin O.A. *Neitralizatsiya nefi v turbulentnom apparate* [Oil neutralisation in the turbulent apparatus]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir chemical journal], 2012, v.19, no.3, pp.122-126.
2. Murzabekov B.E., Shevlyakov F.B., Umergalin T.G., Zakharov V.P. *Otmyvka gazovogo kondensata ot solei v trubchatom turbulentnom apparate diffuzor-konfuzornoj konstruksii* [Scavenge of gas condensate from salts in tubular turbulent device of divergent-convergent construction]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta* [Bulletin of Bashkir University], 2012, v.17, no.1, pp.36-38.
3. Zakharov V.P., Berlin A. A., Monakov Yu. B., Deberdeev R. Ya. *Fiziko-khimicheskie osnovy prottekaniya bystrykh zhidkofaznykh protsessov* [Physico-chemical basis of fast flowing liquid-phase processes]. Moscow, Nauka Publ., 2008, 348 p.
4. Barabash V.M., Belevitskaya M.A. [Mass transfer from bubbles and drops in mechanically agitated apparatuses]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 1995, v.29, no.4, pp.362-372.
5. Kolmogorov A. N. *Rasseyaniye energii pri lokalno izotropnoi turbulentnosti* [Energy dissipation at locally isotropic turbulence]. *Doklady Akademii Nauk* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences], 1941, v.32, no.1, pp.19-21.
6. Takhavutdinov R.G., D'yakonov G.S.1, Mukhametzyanova A.G.1, Zakharov V.P., Minsker K.S. [Intensification of dispersion in tubular turbulent apparatuses at manufacturing of synthetic rubbers]. *Khimicheskaya promyshlennost* [Chemical Industry], 2002, v. 79, no.1, pp.22-28.
7. Perry R.H., Green D.W., Maloney J.O. Chemical Engineer's Handbook New York, McGraw: Hill Book Company, 1999.