

А. Р. Валеев (асп.), С. К. Чуракова (д.т.н., проф.), К. А. Муллабаев (асп.)

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
кафедра нефтехимии и химической технологии
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; e-mail: spestersnape@gmail.com

A. R. Valeev, S. K. Churakova, K. A. Mullabaev

ANALYSIS OF THE DESIGN OF TUBULAR DISTRIBUTORS IN ORDER TO INCREASE THE UNIFORMITY OF DISTRIBUTION OF THE LIQUID PHASE

Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; e-mail: spestersnape@gmail.com

Рассмотрены некоторые варианты конструктивного оформления трубчатых распределителей жидкой фазы. Методами CFD-моделирования проведена оценка равномерности распределения жидкой фазы и выполнен сравнительный анализ эффективности различных вариантов распределительных устройств. В ходе CFD-анализа показано, что применение боковых трубок переменного диаметра, а также отглушение торцов боковых трубок в трубчатом распределителе позволяет увеличить равномерность распределения жидкой фазы, обеспечивая эффективную работу контактных устройств массообменных аппаратов.

Ключевые слова: CFD-анализ; оптимизация; отверстие; проектирование; распределение потоков; распределительное устройство; функция эффективности распределения.

Равномерное распределение жидкости является важным фактором, который обеспечивает эффективную работу контактных устройств массообменных аппаратов. В случае низкой эффективности распределителей жидкости на контактных устройствах возможно появление областей с локальным пересыханием, что приводит к выведению таких областей из процесса массообмена, а также снижает срок службы контактного устрой-

ства. Целью настоящей работы было изучение эффективности распределения жидкости трубчатыми распределителями при помощи методов CFD-анализа, а также с применением CAD-систем¹.

Key words: CFD-analysis; design; distribution device; distribution efficiency function; flow distribution; optimization; orifice.

Методология расчетного исследования

В программе SolidWorks были построены 3D-модели трубчатых распределителей жидкости. Общий вид базовой конфигурации представлен на рис. 1.

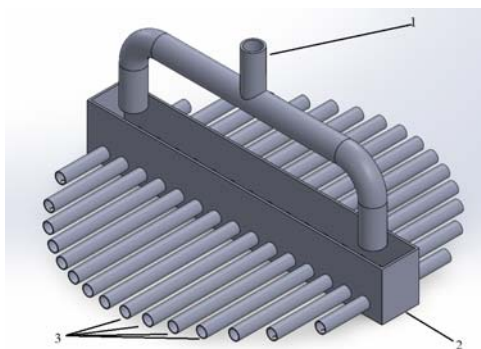


Рис. 1. 3D-модель базовой конфигурации трубчатого распределителя жидкости: 1 – входной коллектор; 2 – «корыто»; 3 – оросительные трубки

Расчет проводился в среде ANSYS CFX в стационарной постановке. Основные параметры модели представлены в табл. 1. В качестве результатов CFD-моделирования были получены данные о скорости потоков сплошной и дисперсной фаз, а также объемная доля дисперсной фазы в каждой точке расчетной области.

Таблица 1

Основные параметры расчетной модели

Параметр	Значение
Диаметр колонны, мм	800
Диаметр трубок, мм	25
Постоянный диаметр отверстий, мм	5
Шаг между отверстиями, мм	40
Количество трубок:	
- с 3 отверстиями	2
- с 4 отверстиями	2
- с 6 отверстиями	2
- с 7 отверстиями	4
- с 8 отверстиями	5
Итого отверстий	94
Дисперсная фаза	Вода
Температура, °C	25
Общий расход дисперсной фазы, м³/с	0.005
Расход через одно отверстие, м³/с	$2.66 \cdot 10^{-5}$
Сплошная фаза	Воздух
Температура, °C	25
Расход сплошной фазы, м³/ч	3620

Методика оценки эффективности распределения дисперсной фазы рассмотрена в работе ². Функция эффективности распределения для капель дисперсной фазы $\Phi(v_\phi)$ рассчитывается по формуле:

$$\Phi(v_\phi) = \frac{1}{1 + \sigma_\phi / \bar{\phi}},$$

где σ_ϕ – среднеквадратичное отклонение величины объемной доли дисперсной фазы;

$\bar{\phi}$ – среднее значение объемной доли дисперсной фазы в сечении S_{XY} .

Для сравнительной оценки эффективности распределения потоков в CFD-среде просчитываются поля объемной доли дисперсной фазы. Далее высчитывается $\Phi(v_\phi)$. Значения функции $\Phi(v_\phi) > 0.5$ отвечают приемлемому распределению, а $\Phi(v_\phi) < 0.5$ – неравномерному распределению. Рассматриваемое сечение S_{XY} находится на расстоянии 200 мм ниже распределительного устройства.

Оценка эффективности базовой конфигурации трубчатого распределителя

Поля скоростей в сечении XZ и объемных долей дисперсной фазы в сечении XY представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

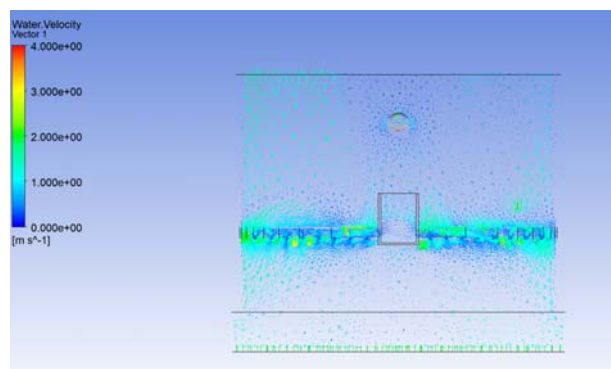


Рис. 2. Поле скоростей жидкой фазы для базовой конфигурации трубчатого распределителя

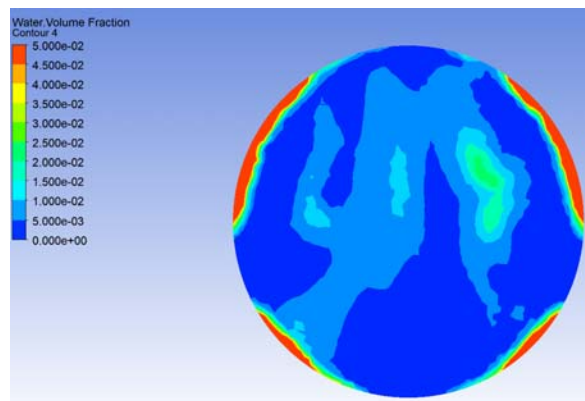


Рис. 3. Поле объемных долей жидкой фазы для базовой конфигурации трубчатого распределителя

В результате расчета получено значение функции распределения 0.313. Такое низкое значение говорит о практической нецелесообразности данной конструкции. Однако на практике трубчатые распределители распространены достаточно широко, что расходится с полученными результатами ³. Было обнаружено, что применяемые на практике конструкции трубчатых распределителей имеют ряд конструктивных отличий ⁴, влияние которых на эффективность распределения жидкости будет рассмотрено далее.

Оценка эффективности трубчатого распределителя с переменным диаметром сливных отверстий

В качестве одного из способов модернизации трубчатых распределителей на практике используется применение сливных отверстий переменного диаметра для обеспечения постоянного напора жидкости по длине трубки⁵.

Расчет основан на том, что потеря давления по длине трубки компенсируется увеличением диаметра следующего отверстия. В соответствии с уравнением Бернулли⁶:

$$\frac{\rho \omega_n^2}{2} = \frac{\rho \omega_{n-1}^2}{2} - \Delta P,$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;
 ω_{n-1} , ω_n – скорость потока в $(n-1)$ -ом и n -ом отверстиях соответственно, м/с;
 P – потери давления на участке от $(n-1)$ -го до n -го отверстия, Па.

Потери давления по длине трубок определяются исходя из уравнения Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{D} \frac{\rho W_{n-1}^2}{2},$$

где λ – коэффициент трения;
 l – длина участка трубки, м;
 D – диаметр трубки, м;
 W_{n-1} – скорость потока жидкости на участке трубки от $(n-1)$ -го до n -го отверстия, м/с.

Коэффициент трения зависит от режима течения жидкости. При ламинарном режиме течения жидкости определяется по формуле Пуазейля⁶:

$$\lambda = \frac{64}{Re},$$

а при турбулентном режиме – по формуле Блазиуса⁶:

$$\lambda = \frac{0.316}{\sqrt[4]{Re}}.$$

Преобразуя эти уравнения, получаем уравнение для расчета требуемой скорости в n -ом отверстии:

$$\omega_n = \sqrt{\omega_{n-1}^2 - \lambda \frac{l}{D} W_{n-1}^2}.$$

Также необходимо учитывать, что расход жидкости после каждого отверстия уменьшается на величину расхода через одно отверстие. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Анализируя результаты расчета, можно сделать вывод, что падение давления по длине трубки незначительно и не требует корректировки диаметра сливных отверстий.

Оценка эффективности трубчатого распределителя с переменным диаметром оросительных трубок

Другим распространенным способом повышения эффективности распределения жидкости является установка трубок различного диаметра, так как трубки, расположенные ближе к краю устройства, имеют меньшее количество отверстий и должны пропускать меньший расход.

Диаметр трубки определяется исходя из требуемого расхода в трубке и рекомендованной скорости для самотека жидкости, составляющей 0.6–1 м/с. В данном расчете используется среднее значение рекомендованного диапазона – 0.8 м/с. Результаты расчета представлены в табл. 3.

В табл. 3 подчеркиванием выделены трубки, применяемые в рассматриваемой конструкции. Поля скоростей в сечении XZ и объемных долей дисперсной фазы в сечении XY представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

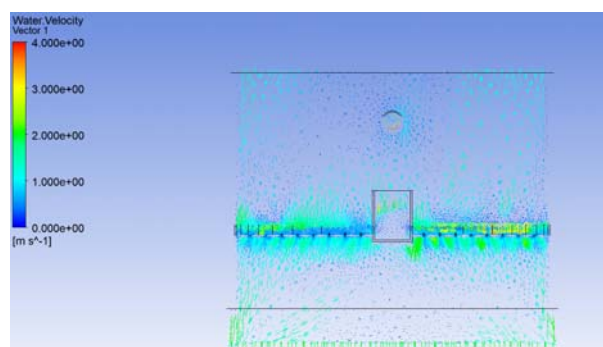


Рис. 4. Поле скоростей жидкой фазы в трубчатом распределителе с трубками переменного диаметра

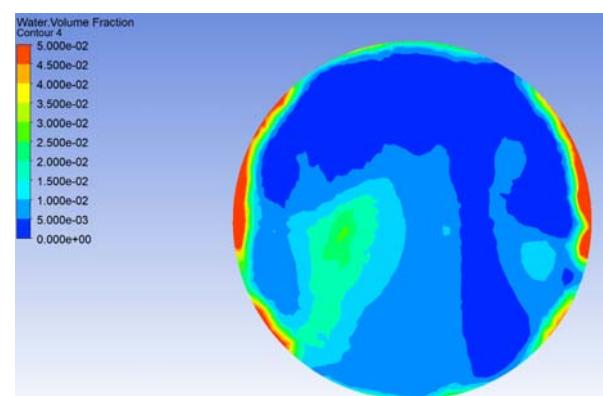


Рис. 5. Поле объемных долей жидкой фазы в трубчатом распределителе с трубками переменного диаметра

Значение функции распределения, полученное в результате расчета, составило 0.365. Данное значение выше, чем у базовой конфигурации, однако, все еще недостаточно высоко для практической целесообразности данной конструкции.

Оценка эффективности трубчатого распределителя с отглушенными по торцам трубками

Концы исходной конструкции трубчатого распределителя открыты, что приводит к потоку большого количества жидкости насквозь трубки, минуя сливные отверстия. Это подтверждается наличием зон пониженного распределения жидкости на рис. 3 в центральной области. Данная проблема решается отглушением торцов трубок⁷⁻⁹.

Поля скоростей в сечении XZ и поля объемных долей дисперсной фазы в сечении XY представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Значение функции распределения, полученное в результате расчета, составило 0.543. Таким образом, отглушение трубок в трубчатом распределителе обеспечивает приемлемую эффективность распределения жидкости.

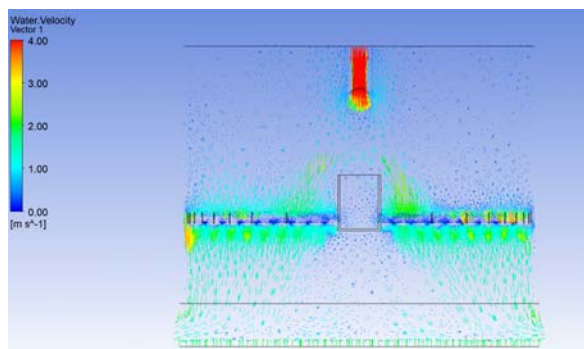


Рис. 6. Поле скоростей жидкой фазы в трубчатом распределителе с отглушенными по торцам трубками

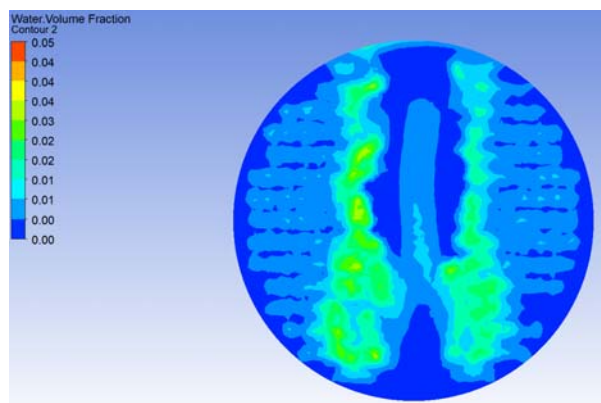


Рис. 7. Поле объемных долей жидкой фазы в трубчатом распределителе с отглушенными по торцам трубками

Оценка эффективности трубчатого распределителя с отглушенными по торцам оросительными трубками переменного диаметра

Применение переменного диаметра трубок увеличивает эффективность базовой конфигурации трубчатого распределителя жидкости. И, несмотря на то, что повышения эффективности от данной модификации недостаточно для практической целесообразности, в совокупности с отглушением трубок значение функции эффективности распределения превышает аналогичные результаты для отдельных модификаций и составляет 0.577. На основании этого можно заключить, что данная конструкция является наиболее эффективной из рассмотренных.

Таблица 2

Результаты расчета переменного диаметра сливных отверстий

Номер отверстия, n	1	2	3	4	5	6	7	8
Расход в трубке, Q_n , м ³ /с	$4.26 \cdot 10^{-4}$	$3.72 \cdot 10^{-4}$	$3.19 \cdot 10^{-4}$	$2.66 \cdot 10^{-4}$	$2.13 \cdot 10^{-4}$	$1.60 \cdot 10^{-4}$	$1.06 \cdot 10^{-4}$	$5.32 \cdot 10^{-5}$
Скорость на участке трубки, W_n , м/с	-	0.759	0.650	0.542	0.434	0.325	0.217	0.108
Критерий Рейнольдса, Re	-	18973	16262	13552	10842	8131	5421	2710
Коэффициент трения, λ	-	0.0269	0.0280	0.0293	0.0310	0.0332	0.0368	0.0438
Скорость в предыдущем отверстии, ω_{n-1} , м/с	-	2.710	2.706	2.699	2.691	2.684	2.679	2.676
Скорость в текущем отверстии, ω_n , м/с	2.710	2.706	2.699	2.691	2.684	2.679	2.676	2.675
Перепад давления, ΔP , Па	10.83	18.92	21.56	18.81	13.41	8.03	2.68	10.83
Диаметр текущего отверстия, d_2 , мм	5.00	5.00	5.01	5.02	5.02	5.03	5.03	5.03

Таблица 3

Результаты расчета трубок переменного диаметра

Количество отверстий в трубке	1	2	3	4	5	6	7	8
Расход в трубке, Q_n , м ³ /с	$5.32 \cdot 10^{-5}$	$1.06 \cdot 10^{-4}$	$1.60 \cdot 10^{-4}$	$2.13 \cdot 10^{-4}$	$2.66 \cdot 10^{-4}$	$3.19 \cdot 10^{-4}$	$3.72 \cdot 10^{-4}$	$4.26 \cdot 10^{-4}$
Скорость в трубке, W , м/с	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Диаметр трубки необходимый, мм	9.20	13.02	15.94	18.41	20.58	22.54	24.35	26.03
Диаметр трубки стандартный, мм	10	15	<u>15</u>	<u>20</u>	20	<u>20</u>	<u>25</u>	<u>25</u>

Эффективность различных конструкций трубчатых распределителей

Конструкция	Значение функции распределения $\Phi(v_p)$	Повышение эффективности относительно базового варианта, %
Базовый вариант	0.314	-
Трубчатый распределитель с трубками переменного диаметра	0.365	16.53
Трубчатый распределитель с отглушенными по торцам трубками	0.543	73.13
Трубчатый распределитель с трубками переменного диаметра и отглушенными по торцам трубками	0.577	83.84

Поля скоростей в сечении ZX и объемных долей дисперсной фазы в сечении XY представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

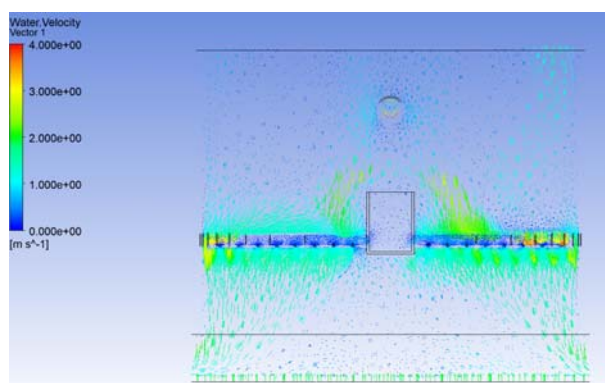


Рис. 8. Поле скоростей жидкой фазы в трубчатом распределителе с отглушенными по торцам оросительными трубками переменного диаметра

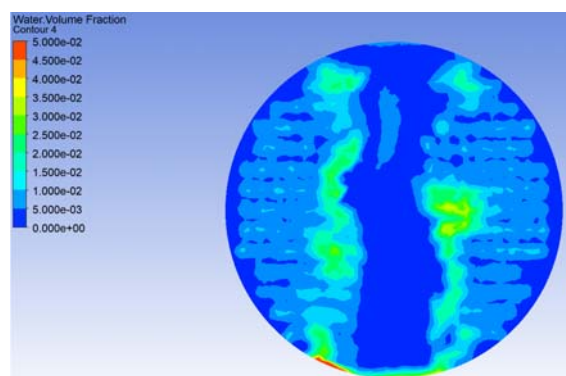


Рис. 9. Поле объемных долей жидкой фазы в трубчатом распределителе с отглушенными по торцам оросительными трубками переменного диаметра

Обсуждение результатов

В табл. 4 представлен сравнительный анализ эффективности различных конструкций трубчатых распределителей жидкости.

Эффективность применения сливных отверстий переменного диаметра не подтвердилась расчетами – изменение диаметра, вызванное перепадом давления по трубке, составило не более 0.03 мм, что для практического применения незначительно. Две другие же модификации показали увеличение эффективности. Применение трубок различного диаметра увеличило эффективность орошения на 16.53%, а отглушение трубок по торцам – на 73.13%. Совместное применение данных технических решений увеличивает эффективность орошения на 83.84%.

Таким образом, наиболее эффективной из рассмотренных нами является конструкция трубчатого распределителя с отглушенными по торцам трубками переменного диаметра.

Литература

1. Леонтьев В.С. Инновации в области разработки высокоинтенсивных массообменных устройств для модернизации ректификационных комплексов // Электронный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – №1. – С.178-186.
2. Муллабаев К.А., Чуракова С.К., Валеев А.Р. Разработка методов оценки равномерности распределения фаз в насадочных экстракторах средствами CFD-систем // Баш. хим. ж. – 2022. – Т.29, №2. – С.71-76.
3. Yin F., Wang Z., Afacan A., Nandakumar K., Chuang K.T. Experimental studies of liquid flow maldistribution in a random packed column // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2000. – V.78, №3. – Pp.449-457.
4. Trong D.V., Ali L., Doan H.D., Zhu Y. A new liquid distribution factor and local mass transfer coefficient in a random packed bed // Chemical Engineering Journal. – 2006. – V.123, №3. – Pp.81-91.
5. Пушнов А.С., Масагутов Д.Ф., Кашапов Н.Ф. Оптимизация форм желобковых распределителей жидкости в контактных аппаратах для осуществления процессов тепло и массообмена // Химическая техника. – 2013. – №1. – С.17-20.
6. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
7. Pizzo S.M., Moraes D.Jr. Analysis of Liquid Distribution in a Packed Column on a Pilot Scale // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1998. – V.37, №7. – Pp.2844-2849.
8. Леонтьев В.С., Шариков Ю.В. Методология модернизации и технического перевооружения ректификационных комплексов нефтехимических предприятий // Электронный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – №1. – С.187-199.
9. Леонтьев В.С. Оптимизация одноколонных ректификационных аппаратов для химических технологий и процессов нефтепереработки // Электронный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – №1. – С.255-264.

References

1. Leont'ev V.S. *Innovatsii v oblasti razrabotki vysokointensivnykh massoobmennyykh ustroystv dlya modernizatsii rektifikatsionnykh kompleksov* [Innovations in the field of development high-intensity mass-transfer devices for retrofit of rectifying complexes]. *Neftegazovoe delo* [Petroleum Engineering], 2012, no.1, pp.178-186.
2. Mullabaev K.A., Churakova S.K., Valeev A.R. *Razrabotka metodov otsenki ravnomernosti raspredeleniya faz v nasadochnykh ekstraktorakh sredstvami CFD-sistem* [Development of methods for estimating predictive phase distributions in packed extractors of CFD-system tools]. *Bashkirkii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2022, vol.29, no.2, pp.71-76.
3. Yin F., Wang Z., Afacan A., Nandakumar K., Chuang K.T. [Experimental studies of liquid flow maldistribution in a random packed column]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2000, vol.78, no.3, pp.449-457.
4. Trong D.V., Ali L., Doan H.D., Zhu Y. [A new liquid distribution factor and local mass transfer coefficient in a random packed bed]. *Chemical Engineering Journal*, 2006, vol.123, no.3, pp.81-91.
5. Pusnov A.S., Masagutov D.F., Kashapov N.F., *Optimizatsiya form zhelobkovykh raspredeliteli zhidkosti v kontaktnykh apparatakh dlya osushchestvleniya protsessov teplo i massoobmena* [Optimization of the shapes of flute liquid distributors in contact devices for the implementation of heat and mass transfer processes]. *Khimicheskaya tekhnika* [Chemical engineering], 2013, no.1, pp.17-20.
6. Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic Processes and Apparatuses of Chemical Technology]. Moscow, LLC TID «Alliance» Publ., 2004, 753 p.
7. Pizzo S.M., Moraes D.Jr. [Analysis of Liquid Distribution in a Packed Column on a Pilot Scale]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, vol.37, no.7, pp.2844-2849.
8. Leont'ev V.S., Sharikov Yu.V. *Metodologiya modernizatsii i tekhnicheskogo perevooruzheniya rektifikatsionnykh kompleksov neftekhimicheskikh predpriyatiy* [Methodology of modernization and technical re-equipment of distillation of petrochemical enterprises]. *Neftegazovoe delo* [Petroleum Engineering], 2012, no.1, pp.187-199.
9. Leont'ev V.S. *Optimizatsiya odnokolonnykh rektifikatsionnykh apparatov dlya khimicheskikh tekhnologii i protsessov neftepererabotki* [Optimization of single-column fractionators for chemical technologies and oil refining processes]. *Neftegazovoe delo* [Petroleum Engineering], 2012, no.1, pp.255-264.