

5. Моравський В.С., Левицький В.Є., Суберляк О.В. Модифікований пінополістирол. Експлуатаційні властивості конструкційних матеріалів. // Хімічна промисловість України. – №4. – 2008. – С. 50-54.
6. Моравський В.С., Тарнавський А.Б., Левицький В.Є. Фізико-механічні властивості композитів на основі поліаміду та модифікованого полістиролу // Вісник НУ "Львівська політехніка". Хімія, техн. речовин та їх застосування. – № 609. – 2008. – С. 378-381.
7. Суберляк О.В., Шибанова А.М., Моравський В.С. Модифікація полістиролу і його відходів додатками різної природи у в'язко-текучому стані // Хімічна промисловість України. – №6. – 2009. – С. 38-41.

*В статті розглянуті основні характеристики масообміну для високошвидкісного відцентрового тепломасообмінного апарата, при використанні різних видів контактних пристроїв. Наведені експериментальні залежності для масовіддачі у газовій фазі і у фазі рідини*

*Ключові слова: відцентрові сили, масопередача, контактний пристрій*

*В статье рассмотрены основные характеристики массообмена в высокоскоростном центробежном теплообменном аппарате, при использовании разных видов контактных устройств. Приведены экспериментальные зависимости для массоотдачи в газовой и жидкой фазах*

*Ключевые слова: центробежные силы, массопередача, контактное устройство*

*In the article are considered basic descriptions of mass-transfer in a high-speed heat and mass transfer centrifugal vehicle, at the use of different types of contact devices. Experimental equalizations are resulted for mass transfer in gas and liquid phases*

*Keywords: centrifugal forces, mass transfer, contact device*

УДК 66.021+66.048

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА МАСООБМЕНА В ЦЕНТРОБЕЖНОМ АППАРАТЕ

**Е. В. Манойло**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра химической техники и промышленной экологии  
Национальный технический университет «Харьковский  
политехнический институт  
ул. Фрунзе 21, г. Харьков, 61002  
Контактный тел.: (057) 707-62-57, 063-252-53-31  
E-mail: bublikova1@yandex.ru

Проведение процессов массопередачи в условиях действия центробежных сил нашло широкое применение в промышленной практике. Можно отметить, что воздействие на систему взаимодействующих фаз центробежных ускорений является в ряде случаев наиболее простым способом интенсификации процессов теплообмена.

В аппаратах центробежного типа процессы теплообмена протекают как в тонкой пленке жидкости, так и в виде мелких капель и пузырьков, создаваемых механическим путем. В целом роторные массообменные аппараты по сравнению с традиционными колонными являются более эффективными, так как в них, как правило, удается обеспечить стабильную работу при малых плотностях ороше-

ния, а время выхода аппарата в рабочий режим существенно сокращается. Кроме того возможность независимого регулирования центробежного ускорения и подачи газа и жидкости позволяет по время эксплуатации легко оптимизировать процессы тепло- и массообмена добиваясь выхода необходимого продукта.

В центробежных аппаратах проблема равномерного распределения контактирующих фаз решена с помощью воздействия на систему высоких центробежных ускорений от 200 до нескольких тысяч g. В настоящей работе приводятся результаты исследований массообмена в высокоскоростном центробежном аппарате, принципиальная конструкция которого представлена на рис. 1.

В корпусе аппарата 1 вращается ротор 2 в котором установлено контактное устройство 3. Ротор 2 расположен консольно на валу 4. По трубе, расположенной по оси аппарата, поступает исходная жидкость, которая распыляется через распределительное устройство 5. Через штуцер 6 в аппарат тангенциально подается газ (пар), который взаимодействует с жидкостью в контактном элементе и затем отводится из аппарата через трубу 8. За счет вращения ротора под воздействием центробежной силы жидкость, поступающая в контактный элемент, движется противотоком навстречу газу (пару) и выводится из аппарата через штуцер 7. 9 – патрубок отвода запирающей жидкости. Для предотвращения проскока газа предусмотрены уплотнения жидкостного типа 10.

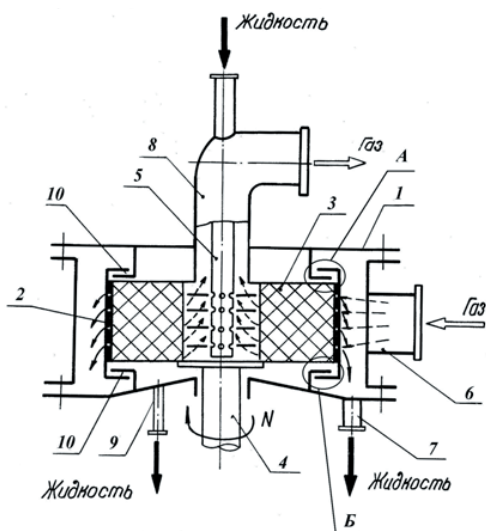


Рис. 1. Центробежный теплообменный аппарат

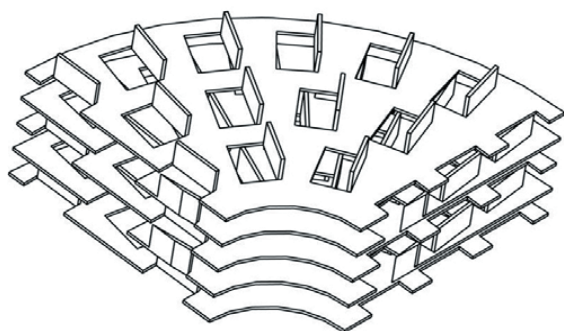


Рис. 2. Элемент контактного устройства 1 типа

Контактные устройства разнообразны по конструкции и выбираются в зависимости от физико-химических свойств контактирующих фаз. Для исследуемого центробежного аппарата был создан ряд контактных устройств. Были испытаны следующие конструкции трех типов контактных устройств.

Для проведения эффективного массообмена необходимо, чтобы контактные элементы имели высокую проницаемость, развитую удельную поверхность, обладали коррозионной стойкостью и механической прочностью, были надежны в эксплуатации и просты в изготовлении. На практике используют контактные элементы в виде насыпной внавал мелкой керамиче-

ской насадки, стеклянных шаров, хаотического нагромождения тонкой проволоки, "вспененного" металла, металлических пластин. Диапазон удельной поверхности контактных элементов колеблется от десятков до тысяч квадратных метров в кубическом метре. Перечень применяемых для изготовления материалов также очень широк: металл, керамика, стекло, искусственное волокно, пластмассы. Поэтому трудно сделать однозначный вывод о наиболее эффективном виде контактного элемента.

При разработке новых конструкций контактных элементов был сформулирован ряд требований, предъявляемым к контактным элементам центробежных аппаратов. Так было определено, что для промышленного аппарата, работающего при больших числах оборотов, использование в качестве контактных элементов любых видов мелкой насыпной насадки и легкоосминаемых материалов является малоэффективным, поскольку это может привести к большим дисбалансам вращающихся масс, что, в свою очередь, вызовет сильные биения и выход из строя аппарата в целом. Поэтому целесообразно в высокоскоростных центробежных аппаратах применять контактные элементы в виде осесимметричных кольцевых пакетов, неподвижных относительно корзины ротора.

Контактные устройства показаны на рис. 3-4. Следует отметить, что все сетчатые элементы (тип 3) обладают одним существенным недостатком: при работе с загрязненными: умышленными средами они могут сравнительно быстро забиваться твердым осадком и терять эффективность.

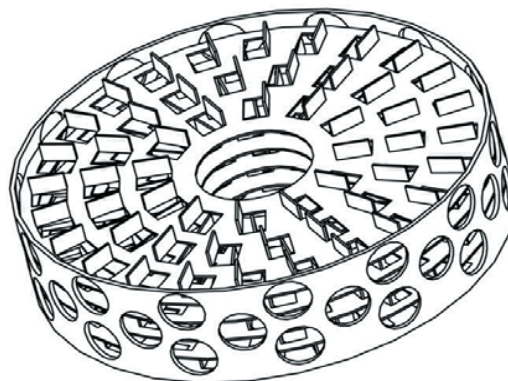


Рис. 3. Контактный элемент 1 типа

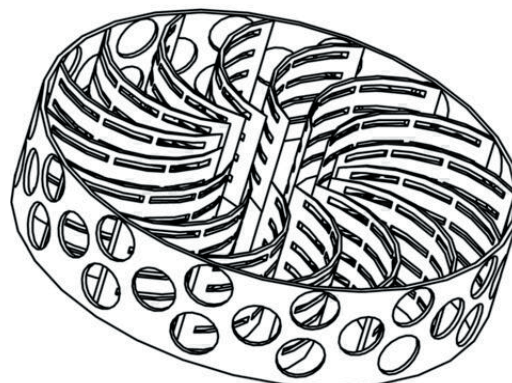


Рис. 4. Контактный элемент 2 типа

Контактные элементы работают следующим образом. Жидкость, поступающая на внутренний диаметр кольцевого пакета, под действием центробежных сил проходит через каналы контактного элемента радиально наружу. При этом гофры сетчатых элементов или лопасти контактного элемента играют роль турбулизаторов как для жидкости, так как и для идущего навстречу газа. Характер движения жидкости преимущественно пленочный, но в местах пересечения гофр и на кромках пластин или гофр происходит разрыв пленки. Образующиеся при разрыве капли попадают на плоские участки элементов контактного устройства, где вновь образуется жидкая пленка.

При исследовании массообмена были испытаны контактные элементы диаметром 200 мм на модельных системах. Частота вращения ротора изменялась от 2000 до 5000 об/мин, что соответствует ускорению от 280 до 1745 g, нагрузка по газу, отнесенная к среднему диаметру контактного устройства изменялась от 1,04 до 2,89 кг/м<sup>2</sup>·с или 58,6 – 145 м<sup>3</sup>/ч, плотность орошения – от 0,354 до 26,5 кг/м<sup>2</sup>·с (20 – 240 кг/ч). Температура поддерживалась на уровне от 18 до 23°С.

Вся геометрическая поверхность вращающихся контактных элементов полностью смочена жидкостной пленкой, которая постоянно и с большой скоростью обновляется, а в свободном объеме контактных устройств развивается также капельная поверхность контакта фаз, что приводит к высоким показателям массопередачи.

В связи с тем, что надежное определение поверхности контакта фаз в исследуемом аппарате представляет значительные трудности, кинетику массообмена характеризовали высотами единицы переноса. Для жидкой фазы

$$h_L = (d - d_0) / (2N_L)$$

Число единиц переноса в жидкой фазе

$$N_L = \ln[(C_i - C_1) / (C_i - C_2)]$$

где C<sub>i</sub> – равновесная концентрация десорбируемого компонента на границе раздела фаз, кг/м<sup>3</sup>; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> – концентрация в жидкой фазе на входе и выходе из аппарата, кг/м<sup>3</sup>.

Для газовой фазы

$$h_G = (d - d_0) / (2N_G)$$

а число единиц переноса

$$N_G = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y^* - y} = \ln \frac{y_2^* - y_2}{y_1^* - y_1}$$

где y\*, y – равновесная и рабочая концентрации десорбируемого компонента в газовой фазе, мол. доли.

**Массоотдача в газовой фазе**

В качестве модельной системы, позволяющей оценивать сопротивление газовой фазы, исследовали процесс десорбции аммиака из водного раствора в поток воздуха. На рис. 5 представлена зависимость высоты единицы переноса h<sub>G</sub> от скорости газа при различных нагрузках по жидкости. Как видно из

графика, эффективность массоотдачи падает с увеличением скорости газа и увеличивается с ростом плотности орошения.

На рис. 6. приведена зависимость h<sub>G</sub> от нагрузки по жидкости при различных режимах вращения ротора. Установлено, что высота единиц переноса снижается с ростом плотности орошения и увеличением частоты вращения ротора, т.е. интенсивность массоотдачи растет и h<sub>G</sub> достигает величины порядка 25...30 мм при частоте вращения ротора, равной 5000 об/мин. Следует отметить, что в обычных насадочных колоннах высота единицы переноса при абсорбции составляет 400...600 мм.

В результате обработки данных получена корреляционная зависимость для определения эффективности массоотдачи в газовой фазе:

$$h_G / d_e = 1,522 Re_G^{0,39} Re_L^{-0,3} Fr^{-0,11} Sc_G^{0,66} \tag{1}$$

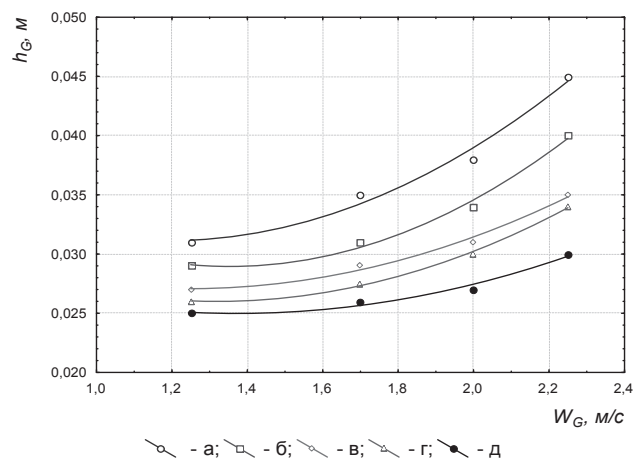


Рис. 5. Зависимость высоты единицы переноса в газовой фазе в аппарате с контактным элементом 1 типа от скорости газа при n = 4000 об/мин и различных нагрузках по жидкости: Q<sub>L</sub> 10<sup>5</sup>: а – 2,2 м<sup>3</sup>/с; б – 3,3 м<sup>3</sup>/с; в – 4,4 м<sup>3</sup>/с; г – 5,5 м<sup>3</sup>/с; д – 6,6 м<sup>3</sup>/с

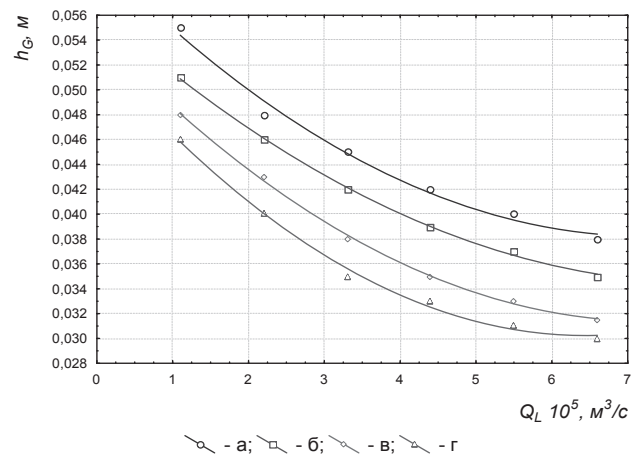


Рис. 6. Зависимость высоты единицы переноса в газовой фазе в аппарате с контактным элементом 1 типа от нагрузки по жидкости при W<sub>G</sub> = 2,25 м/с и различных частотах вращения ротора n: а – 2000 об/мин; б – 3000 об/мин; в – 4000 об/мин; г – 5000 об/мин

Экспериментальные данные сопоставлены с расчетом по формуле (1) при всех изученных нагрузках по газу и жидкости и частотах вращения ротора. В результате полученное уравнение описывает экспериментальные данные с точностью  $\pm 10\%$ .

По экспериментальным данным были построены сравнительные зависимости высот единиц переноса в газовой фазе от плотности орошения при постоянных скорости газа  $W_G = 2,25$  м/с и частоте вращения ротора  $n = 4000$  об/мин (рис. 7). Как видно, значения  $h_G$  имеют ярко выраженную тенденцию к снижению при увеличении нагрузки по жидкости. Сопоставление зависимостей показывает, что наибольшей эффективностью обладает контактный элемент 1 типа, затем идет контактный элемент 2 типа и 3 типов. Наибольшую высоту единиц переноса в газовой фазе, а значит, наименьшую эффективность массоотдачи показал аппарат с контактным элементом 3 типа (из сетки).

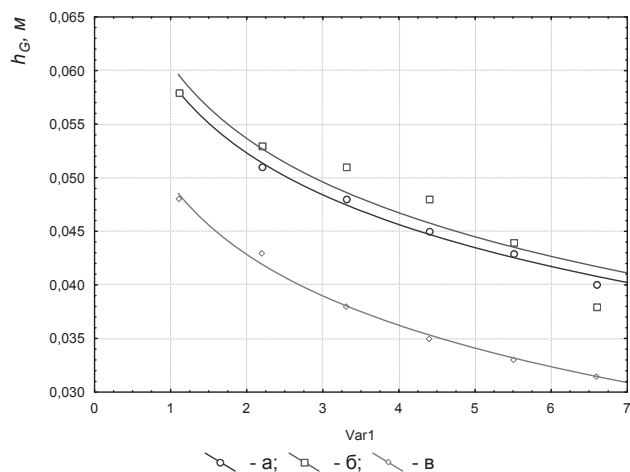


Рис. 7. Сравнительная зависимость высоты единиц переноса в газовой фазе в аппарате с различными типами контактных элементов от нагрузки по жидкости при  $W_G = 2,25$  м/с и частоте вращения ротора  $n = 4000$  об/мин: а – тип 1; б – тип 3; в – тип 2

### Массоотдача в жидкой фазе

Для изучения массоотдачи, контролируемой сопротивлением в жидкой фазе, исследовали десорбцию диоксида углерода из воды в воздух. На рис. 10 показана зависимость  $h_L$  от скорости газа. Оказалось, что высота единиц переноса в жидкой фазе растет с повышением нагрузки по газу, при этом плотность орошения практически не влияет на эффективность массоотдачи в исследованном диапазоне ее изменения.

Последнее хорошо иллюстрирует рис. 9. Экспериментальные значения  $h_L$  не зависят от нагрузки по жидкости и уменьшаются при увеличении скорости вращения.

Так, при изменении частоты вращения ротора от 2000 до 5000 об/мин значение  $h_L$  уменьшается в три раза от 30 до 10 мм. Проведенные исследования позволили получить корреляционное уравнение для определения эффективности массоотдачи в жидкой фазе:

$$h_L / d_e = 0,181 \cdot 10^{-3} Re_G^{0,59} Re_L^{-0,42} Fr^{-0,11} Sc_G^{0,5} \quad (2)$$

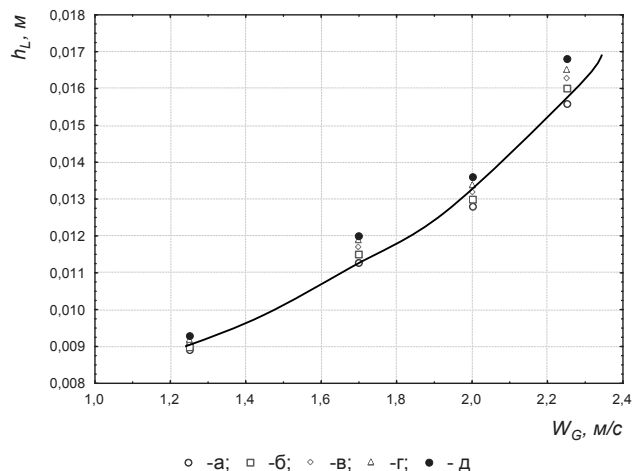


Рис. 8. Зависимость высоты единиц переноса в жидкой фазе в аппарате с контактным элементом 1 типа от скорости газа при  $n = 4000$  об/мин и различных нагрузках по жидкости  $Q_L \cdot 10^5$ : а – 2,2 м<sup>3</sup>/с; б – 3,3 м<sup>3</sup>/с; в – 4,4 м<sup>3</sup>/с; г – 5,5 м<sup>3</sup>/с; д – 6,6 м<sup>3</sup>/с

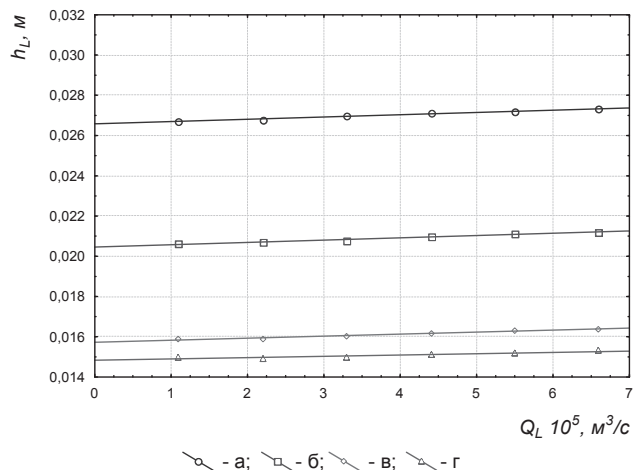


Рис. 9. Зависимость высоты единиц переноса в жидкой фазе в аппарате с контактным элементом 1 типа от нагрузки по жидкости при скорости газа  $W_G = 2,25$  м/с и различных частотах вращения ротора  $n$ : а – 2000 об/мин; б – 3000 об/мин; в – 4000 об/мин; г – 5000 об/мин

Сопоставление опытных и расчетных значений безразмерного параметра  $h_L / d_e$  свидетельствует о том, что максимальное отклонение не превышает  $\pm 15\%$ . Формула (2) может быть рекомендована для практических расчетов.

Аналогичные результаты по исследованию массоотдачи в обеих фазах получены и для других контактных элементов. Таким образом, получены корреляционные уравнения для расчета высот единицы переноса в газовой (1) и жидкой (2) фазах в контактном элементе 1 типа (рис. 3), который обладает наименьшим гидравлическим сопротивлением и наибольшей эффективностью среди исследованных типов контактных устройств.

На рис. 10 сопоставлены зависимости высоты единицы переноса  $h_G$  от частоты вращения ротора для трех представленных контактных устройств. Кривые, соответствующие различным конструкциям элементов построены при скорости газа  $W_G = 2,25$  м/с, и плотности орошения  $5,9$  кг/м<sup>2</sup>с. Наглядно видно монотонное повышение интенсивности массоотдачи с ростом частоты вращения.

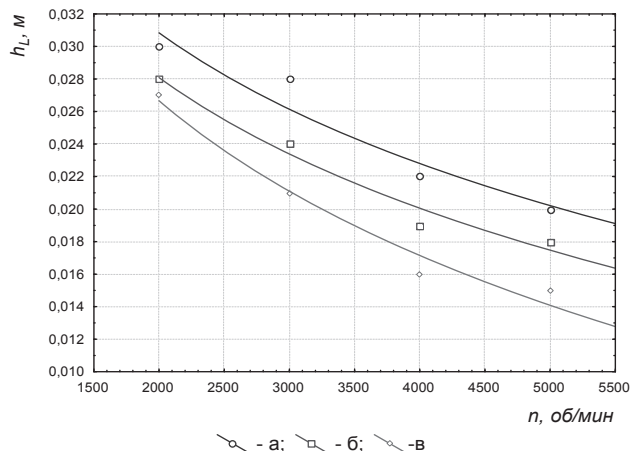


Рис. 10. Сравнительная зависимость высоты единиц переноса в жидкой фазе в аппарате с различными типами контактных элементов от частоты вращения ротора при  $W_G = 2,25$  м/с и  $QL 4,4 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>/с: а – тип 3; б – тип 2; в – тип 1

Как оказалось, наименьшую высоту единицы переноса имеет аппарат с контактным элементом 1 типа (рис. 3). Более высокое значение  $h_L$ , по сравнению с предыдущим, имеет аппарат контактным элементом 2 типа (рис. 4) и наибольшее - значение аппарат с контактным элементом 3 типа. При этом следует подчеркнуть, что среднее значение высоты

единиц переноса у центробежного аппарата с пластинчатым элементом, показавшим наименьшую эффективность массоотдачи в жидкой фазе, составляет 15-20 мм, тогда как для обычных насадочных колонн в процессе десорбции  $CO_2$  эта величина порядка 100-200 мм. Таким образом, эффективность массоотдачи в жидкой фазе у центробежных аппаратов значительно (на порядок и более) выше, чем у массообменных колонных аппаратов, что показывает их эффективность при проведении ряда технологических процессов.

#### Литература

1. Kohl A. L., Gas Purification, [Текст] / Kohl A. L., Riesenfeld F. C., McGraw-Hill, New York (1960).
2. Wandt C.J., Processes in centrifugal vehicles, [Текст] / Wandt C.J., Dailey L.W. Hydrocarbon Process 46(10), 155(1967).
3. Сиренко В. И., Гидродинамика и массообмен в роторном аппарате центробежного типа [Текст] // Сиренко В. И., Кулов Н. Н., Тютюнников А. Б. Теор. осн. хим.технол. (ТОХТ) – М, 1992, т.26, №2,-с.163.
4. Шервуд Т., Массопередача [Текст]/ Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч М.: Химия, 1982.
5. Олевский В.М., Пленочная тепло- и массообменная аппаратура. [Текст] / Олевский В.М., Ручинский В.Р., Кашников А.М. – М.: Химия, 1988, 240 с.
6. Guo, F., Hydrodynamics and Mass Transfer in Cross-Flow Rotating Packed Bed [Текст] / Guo, F., Zheng, C., Guo, K., Feng, Y. & Gardner, N. C. Chemical Engineering Science, 1997, 52, 3853-3859.
7. Sandilya, P., Gas-Phase Mass Transfer in a Centrifugal Contactor [Текст] / Sandilya, P., Rao, D. P., Sharma, A. & Biswas, G. Industrial Engineering Chemistry Research, 2001, 40, 384-392.