

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

SERIES CHEMISTRY AND TECHNOLOGY

ISSN 2224-5286

Volume 1, Number 427 (2018), 93 – 99

УДК 66.02.071.7

Д.К. Жумадуллаев¹, А.А. Ешжанов¹, А.А. Волненко¹, А.Э. Левданский²¹ Южно-Казахстанский государственный университет им.М.Ауэзова, г.Шымкент, Казахстан;² Белорусский государственный технологический университет, г.Минск, Беларусь
e.mail: nii_mm@mail.ru**ЕДИНЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРУБЧАТОГО ПУЧКА СМЕСИТЕЛЬНОГО И
ПОВЕРХНОСТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКОВ**

Аннотация. Тепломассообменные процессы и аппараты широко используются на предприятиях химической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, газоперерабатывающей, металлургической, пищевой, химико-фармацевтической и энергетической отраслей Казахстана, а также в производствах агропромышленного комплекса, строительных материалов, в системах пылегазоулавливания.

Существующие конструкции постоянно модернизируются и создаются новые. Известными методами интенсификации тепломассообмена являются режимный и конструктивный. Как показали исследования, наиболее перспективным методом конструктивной интенсификации является метод, использующий закономерности вихревого взаимодействия потоков. Благодаря научно обоснованному выбору расстояний между турбулизирующими элементами, зависящих от их формы и размеров, можно при постоянной скорости потоков изменить режимы взаимодействия фаз или усилить характеристики массо- и теплообмена за счет вихревого перемешивания в пределах одной фазы.

Дан анализ известным данным по обтеканию элементов насадки, расположенных вдоль и поперек потока, и представлены расчетные зависимости для определения степени взаимодействия вихрей в вертикальном и радиальном направлениях. На основании закономерностей взаимодействия вихрей, образующихся при обтекании регулярно расположенных насадочных элементов, создан класс аппаратов с различным типом регулярной насадки.

Установленные закономерности и расчетные зависимости были использованы при едином подходе к расчету гидравлического сопротивления смесительных тепломассообменных и поверхностных теплообменных аппаратов.

Ключевые слова: регулярная насадка, вихри, вертикальный шаг, радиальный шаг, синфазность, степень взаимодействия вихрей, гидравлическое сопротивление, смесительные аппараты, поверхностные аппараты.

Введение. Тепломассообменные процессы и аппараты широко используются на предприятиях химической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической газоперерабатывающей, металлургической, пищевой, химико-фармацевтической и энергетической отраслей Казахстана, а также в производствах агропромышленного комплекса, строительных материалов, в системах пылегазоулавливания. Вместе с тем большое разнообразие применяемых конструкций не всегда удовлетворяет требованиям производства. Одной из основных причин их простаивания и нерентабельности работы является то, что используемая технология и техника обладает высоким материальным и энергетическим индексом. Последний показатель имеет существенное значение в современных условиях рыночной экономики.

Согласно [1] при создании новой техники и технологии необходимо исходить из перспективных направлений научных и проектно-конструкторских работ в конкретной области знания с учетом реальных условий и требований к эксплуатации и изготовлению разработки.

Причем при прогнозировании облика проектируемого объекта необходимо исходить из оценки положительных и отрицательных признаков известных аналогов.

Существуют два подхода к интенсификации теплообмена: режимный и конструктивный.

В первом определяющими параметрами являются повышение скоростей потоков. Это направление способствовало созданию аппаратов с прямоточным движением потоков, что привело к резкому и неоправданному увеличению энергетических затрат. В последние годы в Казахстане проводятся исследования [2,3] по целенаправленному управлению физико-химическими свойствами взаимодействующих фаз с целью повышения эффективности процессов тепло- и массопереноса.

Определяющими параметрами конструктивного подхода является размеры, формы и расположение элементов контактного устройства. Это направление впервые развито в научной школе Южно-Казахстанского государственного университета им. М.О.Ауэзова. Оно основано на научных открытиях [4,5]. Это - перспективный метод интенсификации теплообменных и газоочистных аппаратов. Так, оказалось, что благодаря научно обоснованному выбору расстояний между турбулизирующими элементами, зависящих от их формы и размеров, можно при постоянной скорости потоков изменить режимы взаимодействия фаз. Примером реализации такой задачи является созданный класс аппаратов с регулярной подвижной насадкой. Такие аппараты значительно превосходят широкоприменяемые конструкции теплообменных аппаратов вследствие невысокой энергоемкости при высокой эффективности проводимых процессов, за счет того, что в них заложен принцип создания синфазного режима взаимодействующих фаз.

Методы исследований. Для проведения исследований гидравлического сопротивления использовался метод непосредственного измерения с применением чашечного манометра и микроманометра.

Результаты исследований. В рамках проводимой нами работы проведены исследования гидравлического сопротивления (ΔP) трубного пучка регулярной структуры в зависимости от режимных и конструктивных параметров, которые сопоставлены с данными, полученными в работах [1,6,7]. В зависимости от скорости газового потока установлены три гидродинамических режима: пленочно-капельный, капельный (развитой турбулентности) и режим брызгоуноса.

Результаты исследований гидравлического сопротивления от шагов расположения труб в вертикальном и радиальном направлениях представлены на рисунках 1 и 2.

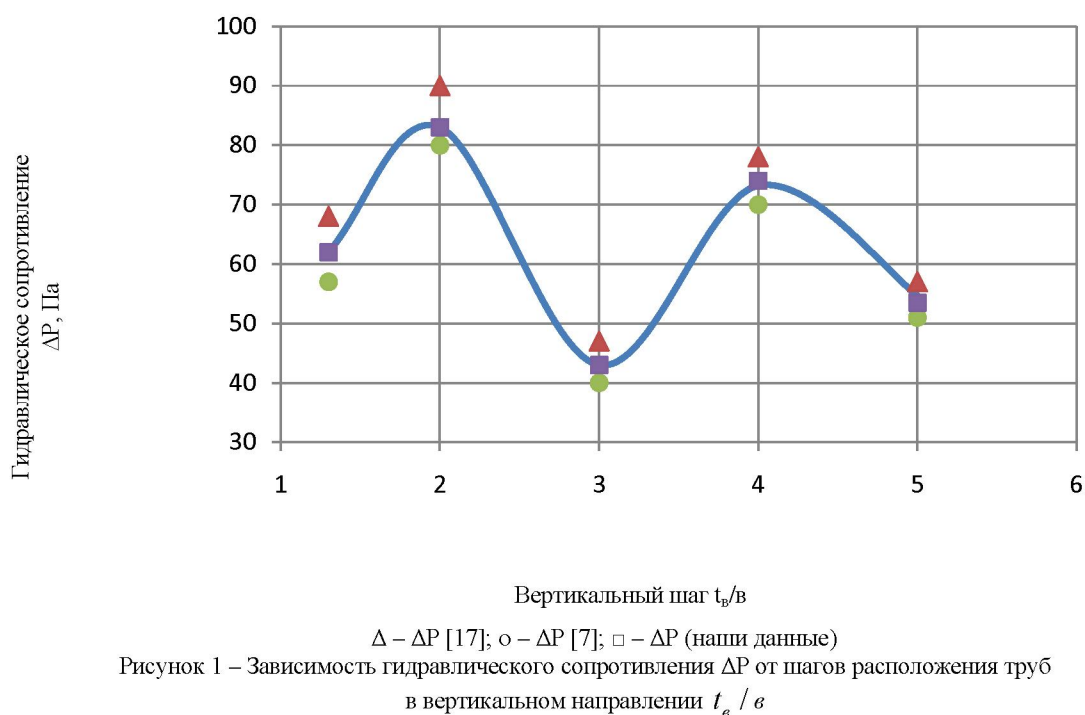
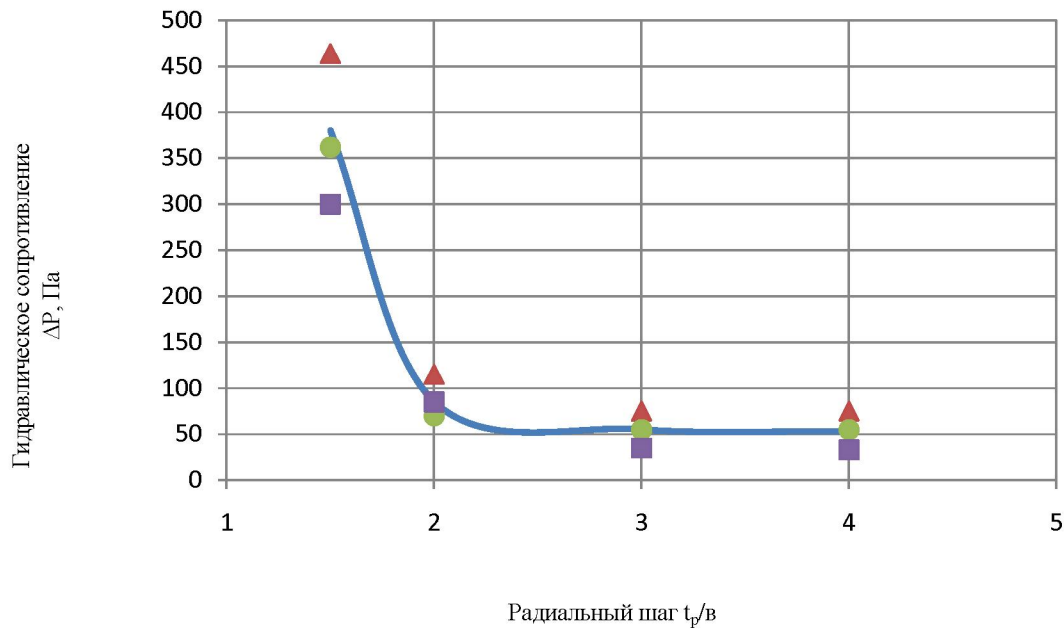


Рисунок 1 – Зависимость гидравлического сопротивления ΔP от шагов расположения труб в вертикальном направлении t_v/v



Δ – ΔP [17]; \circ – ΔP [7]; \square – ΔP (наши данные)

Рисунок 2 – Зависимость гидравлического сопротивления ΔP от шагов расположения труб в радиальном направлении t_p / v

Как видно из рисунка 1 при изменении шагов расположения труб в вертикальном направлении t_v/d от 2 до 5 кривая зависимости имеет два экстремума приходящиеся на $t_v/d=2$ и 4. При других значениях шагов наблюдается снижение величин ΔP .

При изменении шагов расположения труб в радиальном направлении t_p/d от 1,5 до 2 (рисунок 2) значение величин гидравлического сопротивления резко снижается, а после $t_p/d=2$ это снижение незначительно. Объяснением этому является следующее.

В работах [1,8,9-11] рассмотрены механизмы взаимодействия вихрей в слое шаровой насадки, призматических насадочных элементов и пластин. Известно, что за сферическими телами образуются тороидальные вихри и срыв их происходит симметрично. За пластинами, призматическими телами с круглым, квадратным, х-образным, треугольным и т.д. сечением осуществляется несимметричный срыв вихрей. В отличие от образующейся за сферой дорожки вихрей, обладающей периодом движения, след за пластинами и призматическими телами имеет еще и полупериод. В результате этого насадочные элементы, расположенные с шагом в половину меньше, чем при симметричном срыве, будут формировать вихри одновременно.

Для определения степени взаимодействия вихрей, образованных за насадочными элементами, расположенными по ходу движения потока с шагом t_e предложено уравнение [1,8]:

$$\theta_e = 0,85 + 0,15 \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(4 \frac{t_e \cdot S \ell}{m_k \cdot v} + 1 \right) \right]. \quad (1)$$

В результате обработки результатов исследований гидродинамических параметров и анализа данных, представленных в работах [1,8,12-14], нами получены уравнения для определения m_k :

$$m_k = \alpha (1 - e^{-t_v/b}), \quad (2)$$

где c - коэффициент, найденный обработкой экспериментальных данных гидродинамических и массообменных характеристик (для примера, у шаров $c=0,868$; цилиндров $c=0,487$; пластинчатых вращающихся элементов круглой формы $c=0,54$, квадратной формы $c=0,326$).

Входящее в уравнение (1) число Струхала Sl , устанавливает тесную связь между частотой срыва вихрей f , скоростью потока W_Γ и шириной тела b , и в определенном интервале чисел Рейнольдса является величиной постоянной, зависящей только от геометрической формы обтекаемого тела. Для шаров $Sl=0,183$, для цилиндров $Sl=0,2$, пластин $Sl=0,137 \div 0,157$.

Важность учета влияния шага расположения обтекаемых твердых тел рядом поперек обтекаемому потоку (t_p) отмечено в работах [1,8,11,15,16]. В работе [5] определено некоторое критическое расстояние между твердыми телами, превышение которого приводит к образованию вихрей с частотой, зависящей от характерного размера обтекаемых тел. Расположение твердых тел на расстоянии менее критического приводит к тому, что частоту срыва вихрей определяет не размер обтекаемых тел, а величина зазора, образованного соседними в поперечном направлении элементами. Чем меньше зазор, тем больше частота образования и срыва вихрей. Рост числа образованных вихрей при малых величинах зазора приводит к значительному потреблению энергии потока.

Согласно [5,8] тела, расположенные в одном ряду перпендикулярно к обтекаемому потоку, инициируют образование вихрей с масштабами λ . Для дискретно расположенных тел в одном ряду, перпендикулярно обтекаемому потоку возможны два случая: в первом случае масштаб и частота вихрей определяются шириной тела (при $t_p \geq 2d_p$ $\lambda=d_p$), а во втором случае размером зазора между телами (при $t_p < 2d_p$ $\lambda=t_p-d_p$).

Из условия взаимодействия параллельных вихревых струй следует, что коэффициент, характеризующий степень взаимодействия вихрей в радиальном направлении и учитывающий изменение частоты вихреобразования, θ_p может быть определен по формуле:

$$\theta_p = \frac{t_p - \lambda}{t_p - d_p} \quad (3)$$

Среди аппаратов с регулярным расположением насадочных элементов внимание исследователей привлекает аппарат с трубчатой насадкой. Особенностью разработанной и исследованной конструкции аппарата с трубчатой насадкой регулярной структуры является то, что в ней возможно регулирование процесса теплообмена непосредственно в зоне контакта при подаче теплоносителя в трубы. При этом контакт происходит через стенки труб и движение теплоносителя в трубах не влияет на структуру газожидкостного слоя в аппарате.

Аппарат с трубчатой насадкой регулярной структуры относится к большой группе теплообменных аппаратов смесительного типа.

Потери напора потока, затрачиваемые на образование и взаимодействие вихрей в трубчатом пучке аппарата, на изменение направления газового потока, на трение газа о поверхность насадочных элементов и пленку жидкости могут быть вычислены по следующей зависимости [1,6,7,8]:

$$\Delta P_L = \xi_L \cdot \frac{H}{t_e} \cdot \frac{\rho_g W_\Gamma^2}{2\varepsilon_0}, \quad (4)$$

где H - высота насадки, м; ρ_g - плотность газа, кг/м³; W_Γ - скорость газа, м/с; ξ_L - коэффициент сопротивления, учитывающий потери давления при взаимодействии вихрей в вертикальном и радиальном направлениях, на трение газа о поверхность насадочных элементов и пленку жидкости; ε_0 - порозность ряда насадки

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{d}{t_p} \quad (5)$$

Обработкой экспериментальных данных ΔP_L [6,7,17] получены практически идентичные расчетные зависимости для определения коэффициентов ξ_L :

$$\xi_L = 0,25 \cdot \theta_\epsilon \cdot \theta_p \cdot Re_{жс}^{0,1}, \quad (6)$$

В формуле (6) $Re_{жс}$ – число Рейнольдса:

$$Re_{жс} = \frac{U_{жс} \cdot d_{эКВ}}{\nu_{жс}}, \quad (7)$$

где $U_{жс} = L/3600$ – скорость жидкости, м/с; $\nu_{жс}$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с; L – плотность орошения, м³/м²·ч; $d_{эКВ}$ – эквивалентный диаметр насадки, м.

Для расчета потери давления на трение в межтрубном пространстве поверхностного теплообменника в работах [18-20] предложены уравнения, учитывающие конструктивные и режимные параметры. Нами предложено уравнение, аналогичное по структуре с уравнением (4):

$$\Delta p_{mt} = \lambda_{mp} \cdot \frac{D}{t_\epsilon} \cdot \frac{\rho_{жс} \cdot W^2}{2} \quad (8)$$

Здесь D – внутренний диаметр аппарата, м; t_ϵ – шаг расположения труб по ходу движущегося потока.

Для расчета коэффициента λ_{mp} нами предложено уравнение, учитывающее степень взаимодействия вихрей при обтекании труб по ходу и поперек движущегося потока:

$$\lambda_{mp} = 2,275 \cdot \theta_\epsilon \cdot \theta_p \cdot Re^{-0,2} \quad (9)$$

Входящие в уравнение коэффициенты θ_ϵ и θ_p рассчитываются по формулам (1) и (3).

Выводы. Описаны и экспериментально подтверждены механизмы взаимодействия вихрей, образованных за трубами в вертикальном и радиальном направлениях. Показано наличие синфазных режимов при изменении вертикальных шагов и значение критического шага в радиальном направлении, разграничивающего два механизма образования вихрей.

Используя единый подход, предложены уравнения для расчета гидравлического сопротивления смесительных и поверхностных аппаратов, учитывающие степень взаимодействия вихрей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Волненко А.А. Научные основы разработки и расчета вихревых массообменных и пилеулавливающих аппаратов. Дис.... док.техн.наук. – Шымкент, 1999. – 300 с.
- [2] Бренер А.М. Конвективный тепломассоперенос при движении жидкости в каналах и пленочной конденсации пара в условиях больших градиентов температуры в химических аппаратах. Дис.... докт.техн.наук. Чимкент, 1993-350с.
- [3] Ташимов Л. Конвективный тепло- и массообмен в пленочных процессах химической технологии / Вопросы моделирования и устойчивости/. – Алматы: Білім, 1999. - 200с.
- [4] Балабеков О.С., Петин В.Ф. Закономерность взаимодействия вихрей, возникающих при отрывном обтекании потоком газа или жидкости дискретно расположенных вдоль него тел /Диплом №144 на открытие. – М. – 2000.
- [5] Балабеков О.С., Волненко А.А., Пралиев С., Корганбаев Б.Н., Балабекова М.О., Викторов С.В. Закономерность формирования параллельно движущихся вихревых струй при течении потока газа или жидкости через систему поперек к нему расположенных дискретных источников. Свидетельство о научном открытии №269. Международная ассоциация авторов научных открытий, М.- 2004.
- [6] Бекибаев Н.С. Научные основы сопряженных тепло- и массообменных процессов в синфазно-вихревых аппаратах: дис. ... докт. техн. наук. – Шымкент. 2008. – 240 с.

[7] Серикұлы Ж. Разработка и расчет теплообменных аппаратов с подвижной насадкой с учетом масштабного перехода: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2015. -141 с.

[8] Расчет и конструирование теплообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой /Балабеков О.С., Волненко А.А. – Шымкент, 2015.- 184 с.

[9] Мустафина А.И. Гидродинамика и массообмен в аппарате с регулярной подвижной пластинчатой насадкой в широком диапазоне нагрузок по жидкости. – Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1989 – 180с.

[10] Балабеков О.С., Волненко А.А., Серманизов С.С., Мусин Н.А. Принципиальные основы разработки теплообменного оборудования с учетом закономерностей вихреобразования // Современные машины и аппараты химических производств: Сб. тез. докл. IV Всес. научн. конф. – Чимкент, 1988, Ч.2. – С.3 – 5.

[11] Петин В.Ф. Разработка и моделирование массообменного аппарата с регулярной подвижной насадкой на основе импульсного взаимодействия фаз. Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1982. – 241с.

[12] Перри Джон Г. Справочник инженер-химика. – Л.: Химия, Ленингр. отд-ние, 1969. – т.1. – 639с.

[13] Fage A. – Johansen, F.C. On the flow of air behind an inclined flat plate of infinite span // Proc. Roy. Soc. – London A, 1927. – V.1. –V.116.

[14] Novak J., Svuss Csc. Vstahy mezi souřinitelem odporu a strouhalovým řísem teles // Strojirenstvi. – 1978. – т.28. – № 5. – P.282 –287.

[15] Раматуллаева Л.И., Волненко А.А., Хусанов Ж.Е., Петин В.Ф. Механизм взаимодействия вихрей в слое регулярных конических пластинчатых элементов //Тр. Межд. науч. конф. «Актуальные проблемы науки и образования в современных условиях». Шымкент: ЮКГИ им. М.Сапарбаева, 2008. – С. 132-135.

[16] Бекибаев Н.С., Волненко А.А., Раматуллаева Л.И. Механизм взаимодействия вихрей при обтекании дискретно расположенных цилиндрических тел //Наука и образование Южного Казахстана. – 2007. - №5-6 (64-65). – С. 146-150.

[17] Сарсенбекулы Д. Методология расчета и проектирования аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры: дис. ... доктора PhD. – Шымкент. 2017. -143 с.

[18] Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1991. – 496с.

[19] Машины и аппараты химических производств /Под ред. И.И. Чернобыльского. - М.: Машиностроение, 1975. - 454с.

[20] Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи. /И.В.Доманский, В.П.Исаков, Г.М.Островский и др.; Под общ. ред. В.Н. Соколова – Л.: Машиностроение, 1982. – 384с.

Жумадуллаев Д.К.¹, Ешжанов А.А.¹, Волненко А.А.¹, Левданский А.Э.²

¹М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік университеті, Шымкент қ., Қазақстан;

² Белорусь мемлекеттік технологиялық университеті, Минск қ., Беларусь

БЕТТІК ЖӘНЕ АРАЛАСТЫРҒЫШТЫҚ ЖЫЛУ АЛМАСТЫРҒЫШТАРДЫҢ ҚҰБЫРЛЫ ШОҒЫРЫНДАҒЫ ГИДРАВЛИКАЛЫҚ КЕДЕРГІНІ ЕСЕПТЕУДІҢ БІРЫҢҒАЙ ТӘСІЛДЕМЕСІ

Аннотация. Жылуалмасу процестері мен құрылғылары Қазақстанның химия, мұнай өңдеу, мұнай-химия, газ өңдеу, металлургия, азық-түлік, химия-фармацевтика және энергетика салаларында, сондай-ақ агроөнеркәсіптік кешенде, құрылыс материалдарында, шаң мен газ ұстау жүйелерінде кеңінен қолданылады.

Қолданыстағы құрылымдар үнемі модернизацияланады және жаңасы құрылады. Жылуалмасуды қарарқындатудың белгілі әдістері режимді және конструктивті болып табылады. Зерттеулер көрсеткендей, конструктивті қарқындылықтың ең перспективалы тәсілі ағындардың құйындылық әрекеттесу заңдарын қолданатын әдіс. Өздерінің пішіні мен өлшеміне тәуелді турбулентті элементтер арасындағы қашықтықты ғылыми тұрғыдан негізделген таңдау арқасында фазалық өзара әрекеттесу режимдерін тұрақты ағынмен өзгертуге немесе бір фаза аясында құйынды араластырудың арқасында масса мен жылу алмасу сипаттамаларын жақсартуға болады.

Саптама элементтері айналасында және ағын бойында орналасқан ағындар туралы белгілі деректерге талдау жүргізілді және құйындардың тік және радиалды бағыттардағы өзара әрекеттесу дәрежесін анықтауға есептік тәуелділіктері ұсынылды. Тұрақты орналасқан саптамалық элементтерді бойлай ағу барысында қалыптасқан құйындардың өзара әрекеттесу заңдылықтарына негізделген, әр түрлі тұрақты саптамалары бар аппарат класы жасалды.

Белгіленген заңдылықтар мен есептемелік тәуелділіктер араластырғыштық жылуалмасу және беттік жылуалмасу аппараттарындағы гидравликалық кедергіні есептеудің бірыңғай тәсілдемесінде пайдаланылды.

Түйін сөздер: тұрақты саптама, құйындар, тік қадам, радиалды қадам, синфазалық, құйындардың өзара әрекеттесу дәрежесі, гидравликалық кедергі, араластырғыш құрылғылар, беттік құрылғылар.

D.K. Zhumadullaev¹, A.A. Yeshzhanov¹, A.A. Volnenko¹, A.E. Levanskiy²

¹M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent, Kazakhstan

²Belorussian State Technological University, Minsk, Belarus

e.mail: nii_mm@mail.ru

COMMON APPROACH TO THE CALCULATION OF HYDRAULIC RESISTANCE OF A HOLLOW BEAM OF CONTACT AND SURFACE HEAT EXCHANGERS

Abstract. Heat and mass transfer processes and apparatus are widely used at the enterprises of chemical, oil refining, petrochemical, gas processing, metallurgical, food, chemical-pharmaceutical and energy industries in Kazakhstan, as well as in the agro-industrial complex, building materials production, dust and gas collection systems.

The existing designs are being constantly modernized, with the new ones being created. The known methods of heat and mass transfer intensification are the operating and the design ones. As the research has shown, the most promising method of design intensification is the method, using the laws of vortex interaction of flows. Due to the scientifically substantiated choice of distances between the turbulence creating elements, depending on their shape and size, it is possible to change the phase interaction modes at a constant flow rate or to improve the mass and heat transfer characteristics due to the vortex mixing within a single phase.

There has been done the analysis of the known data on streamlining around the packing elements, arranged along and across the flow, with the calculated dependences given for determination of the vortex interaction degree in the vertical and radial directions. On the basis of the laws of interaction of vortices, being formed during streamlining around regularly arranged packing elements, there has been created a class of apparatus with different types of regular packing.

The established regularities and calculated dependencies have been used in the common approach to the calculation of hydraulic resistance of contact heat and mass transfer and surface heat exchange apparatus.

Keywords: regular packing, vortices, vertical pitch, radial pitch, in-phase operation, vortex interaction degree, hydraulic resistance, contact apparatus, surface apparatus.