

УДК 66.081.6-278:004.021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПО ДЛИНЕ ТУРБУЛИЗИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА В СОСТАВЕ МЕМБРАННОГО АППАРАТА

Котляров Р.В., Шевцова Т.Г., Стефанкин А.Е., Романова В.В., Ивина О.А., Кроль А.Н.
ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», Кемерово, e-mail: kotliarov_rv@mail.ru

Технология очистки и разделения веществ получила широкое распространение в тех отраслях промышленного производства, которые требуют выделения отдельных компонентов из их смесей, получения высокочистых веществ и их концентрирования, в частности в химической отрасли. Современной технологией очистки и разделения жидких и газообразных химических сред является мембранная технология. Переработка промышленных сред с применением мембранной технологии зачастую происходит без фазовых превращений. Мембранная технология в большинстве случаев оказывается более экономичной и менее энергоемкой по сравнению с другими методами разделения и очистки, также позволяет более полно использовать сырье и энергию. Наряду с преимуществами мембранной технологии имеются недостатки, которые снижают эффективность ее использования в химической промышленности. Основным недостатком обусловлен образованием в процессе переработки среды на поверхности мембраны слоя задерживаемых веществ, что значительно снижает производительность мембранного оборудования. Наиболее эффективным методом борьбы с ним является использование турбулизирующих элементов, которые изменяют гидродинамические условия и снижают толщину слоя задерживаемых веществ на мембране. Моделирование гидродинамических условий позволит установить эффективность использования турбулизирующего элемента в составе мембранного аппарата. В статье предложена математическая модель гидродинамических условий в мембранном аппарате, использующем конический перфорированный элемент в качестве турбулизирующего элемента. Также предложен алгоритм расчета гидродинамических условий, позволяющий определить потери давления по длине турбулизирующего элемента в зависимости от количества отверстий на его боковой поверхности. Алгоритм реализован в среде MatLAB. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Ключевые слова: мембранный аппарат, гидродинамические условия, моделирование, турбулизирующий конический перфорированный элемент

A MODELLING OF HYDRODYNAMIC CONDITIONS ON LENGTH OF THE TURBULIZING ELEMENT AS A PART OF THE MEMBRANE DEVICE

Kotlyarov R.V., Shevtsova T.G., Stefankin A.E., Romanova V.V., Ivina O.A., Krol A.N.
*Federal State Budgetary Institution of Higher Education «Kemerovo State University»,
Kemerovo, e-mail: kotliarov_rv@mail.ru*

The technology of purification and separation of substances was widely adopted in those branches of industrial production which demand allocation of separate components from their mixes, receiving high-pure substances and their concentration, in particular, in the chemical industry. Modern technology of purification and separation of liquid and gaseous chemical substances is the membrane technology. Processing of industrial substances often happens to use of membrane technology without phase transformations. In most cases the membrane technology is more economic and less power-intensive in comparison with other methods of separation and purification. It also allows use raw materials and energy more fully. Along with advantages of membrane technology there are defects which reduce efficiency of its use in chemical industry. The main defect is caused by formation in the processing of the substances on a surface of a membrane of a layer of the detained substances that considerably reduces the productivity of the membrane equipment. The most effective method against these phenomena it is use of the turbulizing elements which change hydrodynamic conditions and reduce thickness of a layer of the detained substances on a membrane. Modeling of hydrodynamic conditions will allow determine efficiency of use of the turbulizing element as a part of the membrane device. In article the mathematical model of hydrodynamic conditions in the membrane device using the conic perforated element as the turbulizing one is offered. The algorithm of calculation of hydrodynamic conditions allowing determine pressure losses by length of the turbulizing element depending on quantity of holes on its side surface is also offered. The algorithm is realized in the MatLAB. The certificate on the state registration of the computer program is received.

Keywords: membrane device, hydrodynamic conditions, modelling, turbulizing conic perforated element

Мембранная технология считается передовой в химическом производстве. Мембранные методы широко применяются для разделения и очистки жидких смесей, изменения их концентрации. В химической промышленности мембранные методы используются в составе простых и многостадийных технологических процессах [1]. Наиболее важными преимуществами мем-

бранной технологии являются: переработка промышленных сред без фазовых превращений, простота конструкций мембранных аппаратов, высокая экономичность, низкая энергоемкость и др. Однако мембранным методом свойственно явление концентрации поляризации, которое заключается в повышении концентрации задерживаемых веществ у поверхности мембраны [2].

Вследствие этого происходит снижение производительности мембраны. Для уменьшения негативного влияния концентрационной поляризации, как правило, турбулизируют прилегающий к поверхности мембраны слой жидкости использованием различного рода турбулизаторов.

Цель исследования: разработка математической модели изменения гидродинамических условий в мембранном аппарате, в составе которого имеется турбулизирующий элемент. Моделирование гидродинамических условий позволит установить эффективность использования турбулизирующего элемента, установить рациональные значения его основных конструктивных параметров и рассчитать потери мощности на элементе.

Материалы и методы исследования

Объектом моделирования являются гидродинамические условия в мембранном аппарате с турбулизирующим элементом в виде перфорированной конической вставки [3]. Мембранный аппарат состоит из цилиндрического корпуса, с одной стороны которого имеется штуцер для подачи исходной среды, с другой стороны расположен штуцер для отвода конечного продукта (сконцентрированной среды). На внешней стенке корпуса установлен штуцер для отвода очищенного продукта. В корпусе аппарата коаксиально установлена полупроницаемая трубчатая мембрана. В канале мембраны расположен турбулизирующий элемент в виде конической вставки, боковая поверхность которой перфорирована. Предполагается, что направленный поток среды, выходя из отверстий турбулизирующего элемента, увеличивает степень турбулизации среды внутри мембраны, что обеспечивает снижение толщины слоя задерживаемых веществ на ее поверхности и повышает производительность мембранного аппарата.

Выявим основные закономерности, происходящие при движении перерабатываемой среды по длине турбулизирующего элемента. Предположим, что мембранной переработке подвергается слабоконцентрированная жидкая среда. Основными характеристиками, подлежащими определению, в таком случае являются: расход и скорость течения среды, а также потери давления по длине турбулизирующего элемента. Выделим фрагмент элемента (рис. 1).

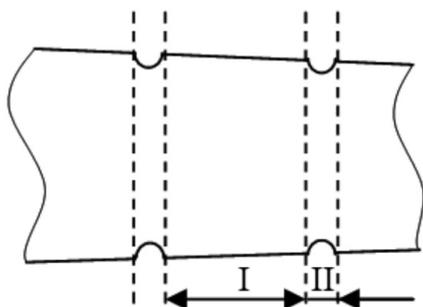


Рис. 1. Фрагмент турбулизирующего элемента

Движение жидкой среды внутри рассматриваемого гидродинамического элемента сопровождается следующими потерями давления: во-первых, потери за счет конического сужения элемента (потери при движении в конфузоре) в зоне I, во-вторых, потери давления при истечении из отверстий, расположенных на боковой поверхности элемента (зона II) [4, 5]. Общей зависимостью, определяющей потери давления на гидродинамическом элементе, является формула [4]:

$$\Delta p = \frac{L \rho v^2}{d \cdot 2}, \quad (1)$$

где Δp – потери давления, Па;
 λ – коэффициент гидравлического трения;
 L – длина турбулизирующего элемента, м;
 d – диаметр турбулизирующего элемента, м;
 v – скорость течения жидкости, м/с;
 g – ускорение свободного падения;
 ρ – плотность жидкой среды, кг/м³.

Потери давления на трение в зоне I определяются формулой [6, 7]:

$$\Delta p = \zeta_{\text{конф}} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2)$$

где $\zeta_{\text{конф}}$ – коэффициент сопротивления конфузора.

$$\zeta_{\text{конф}} = \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2. \quad (3)$$

Таким образом потери давления на трение при движении жидкой среды в конфузоре:

$$\Delta p = \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4)$$

где n – степень сужения конфузора.

Коэффициент гидравлического трения λ определяется режимом течения жидкости, т.е. числом Рейнольдса (Re). Как правило, течение жидкой среды в трубе, имеющей круглое сечение, характеризуется ламинарным режимом при $Re \leq 2300$ [8, 9]. При этом коэффициент гидравлического трения равен

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (5)$$

Турбулентный режим возникает при значениях

$$4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta},$$

где d – диаметр турбулизирующего элемента, м;
 Δ – шероховатость его поверхности, м.

В этом случае коэффициент гидравлического трения определится как

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (6)$$

или, иначе,

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}. \quad (7)$$

Давление среды на выходе зоны I определится разностью давления на ее входе и соответствующих потерь на трение по ее длине:

$$p_2 = p_1 - \Delta p. \quad (8)$$

В зоне II потери давления обусловлены истечением жидкости из затопленного отверстия, находящегося на боковой поверхности турбулизирующего элемента. Чтобы определить данные потери, необходима скорость истечения среды из отверстия. Она может быть рассчитана, исходя из формулы [10]:

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (9)$$

где g – ускорение свободного падения;

φ – поправочный коэффициент (принят $\varphi = 0,95$);
 h – уровень жидкой среды, м.

В этом случае давление определяется формулой

$$p = \rho gh. \quad (10)$$

Тогда

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}}. \quad (11)$$

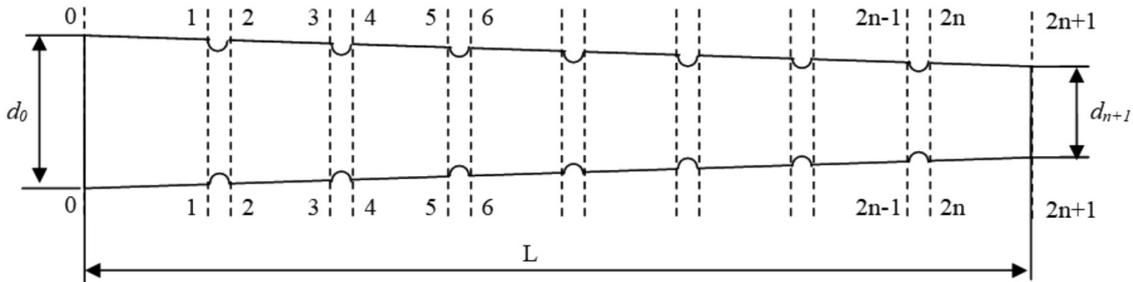


Рис. 2. Внешний вид турбулизирующего элемента

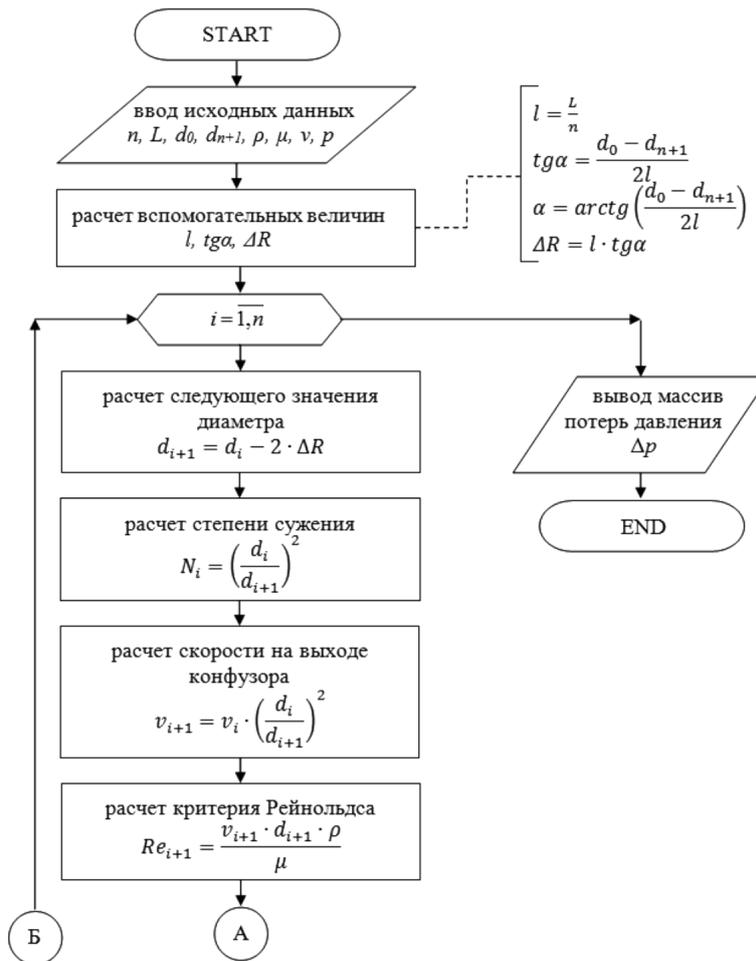


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета гидродинамических условий по длине турбулизирующего элемента (начало рисунка)

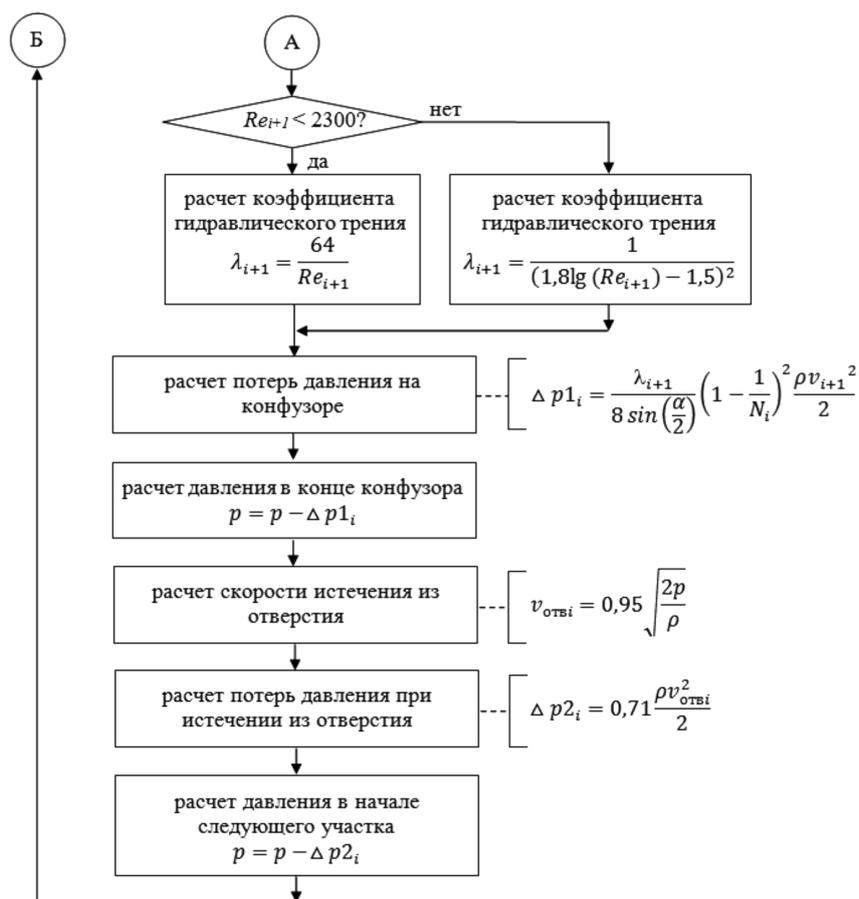


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета гидродинамических условий по длине турбулизирующего элемента (окончание рисунка)

Определить потери давления на отверстиях позволяет формула (2). Для цилиндрических отверстий коэффициент местного сопротивления составляет $\zeta = 0,71$ [7, 11]. Определение потерь давления в соответствии с формулами (2–11) необходимо повторить по всей длине турбулизирующего элемента.

Скорость течения жидкой среды, необходимая в расчетах потерь давлений, определяется уравнением неразрывности потока в зависимости от исходной (заданной) скорости:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 = \text{const}, \quad (12)$$

где v_1 и S_1 – средняя скорость и площадь сечения на входе зоны элемента;
 v_2 и S_2 – средняя скорость и площадь сечения на выходе зоны элемента.

Результаты исследования и их обсуждение

С учетом приведенных формул разработан алгоритм расчета гидродинамических условий по длине турбулизирующего элемента, который позволяет выполнить моделирование течения слабоконцентрированной жидкой среды. К входным дан-

ным отнесены геометрические параметры турбулизирующего элемента (рис. 2) – его начальный (d_0) и конечный (d_{n-1}) диаметры и длина (L), также расстояние между отверстиями (l) или их количество (n), давление на входе в мембранный аппарат (p), исходная скорость жидкой среды (v), ее плотность и вязкость (ρ и μ).

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3. Программная реализация алгоритма выполнена в среде MatLAB. Авторами получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [12].

Результатом моделирования является массив скоростей течения жидкой среды и потерь давления по длине турбулизирующего элемента.

Заключение

Предложенная математическая модель изменения гидродинамических условий, в частности скорости движения среды и потерь давления, при течения жидкости по

длине турбулизирующего конического перфорированного элемента в зависимости от количества отверстий на его боковой поверхности позволяет осуществить расчет и обоснованный выбор рациональных значений геометрических параметров элемента. Модель предполагает использование при расчетах процессов мембранной переработки слабоконцентрированных жидких сред в зависимости от их плотности и вязкости. Расчет потерь давления на турбулизирующем элементе может быть положен в основу расчета мощности насосного оборудования в составе мембранной установки. Алгоритм расчета является универсальным, его программная реализация позволяет установить рациональные значения конструктивных параметров опытно-промышленного оборудования на основе разработанного мембранного аппарата при переработке различных жидких сред.

Список литературы

1. Френкель В.С. Мембранные технологии: прошлое, настоящее и будущее // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 8. С. 48–54.
2. Ключников А.И., Потапов А.И., Полянский К.К. К вопросу регенерации мембран в процессах микро- и ультрафильтрации технологических жидкостей пищевых производств // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. № 1. С. 312–315.
3. Стефанкин А.Е., Котляров Р.В. Аппарат для мембранной фильтрации // Патент РФ 152198. Патентообладатель ФГБОУ ВО «КемТИПП». 2015. Бюл. 13.
4. Бондарева М.В., Коржов Е.Н. Исследование течений жидкости в щелевом зазоре между эксцентрическими цилиндрической и конической поверхностями // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. №3 (34). С. 127–134.
5. Боницкая О.В., Зотова С.В. Математическая модель осесимметричного установившегося течения ньютоновской жидкости в коническом канале // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013. Вып. 2. Ч. 1. С. 67–74.
6. Крохалев А.А., Котляров Р.В., Хачатрян Л.Р. Математическая модель гидродинамических условий при обтекании жидкостью конической поверхности в цилиндрическом канале // Техника и технология пищевых производств. 2015. № 1 (36). С. 92–96.
7. Хорохорина И.В., Лазарев С.И., Полянский К.К., Лазарев К.С., Кузнецов М.А. Методика расчета геометрических и конструктивных параметров электроультрафильтрационного аппарата // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2015. Т. 20. № 2. С. 494–497.
8. Ерофеев И.В., Коржов Е.Н., Шашкин А.И., Иванов А.В., Добросоцкая М.В. Математическое моделирование турбулентного течения жидкости в кольцевом конфузоре под действием перепада давления // Вестник ВГУ. Серия: физика, математика. 2011. № 1. С. 138–146.
9. Яхно О.М., Кривошеев В.С., Коваль А.Д., Кривошеев О.В. Изучение влияния центробежной силы на течение неньютоновской жидкости в конических кольцевых каналах // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Прикладная механика. 2012. № 2/7 (56). С. 66–69.
10. Шавалиев М.Ф., Латыпов Э.Д. Гидродинамика инокулятора со спиральным движением потока // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 19. С. 108–109.
11. Седелкин В.М., Суркова А.Н., Пачина О.В., Потехина Л.Н., Машкова Д.А. Моделирование мембранной ультрафильтрации вторичного молочного сырья // Мембраны и мембранные технологии. 2016. Т. 6. № 1. С. 99–110. DOI: 10.1134/S2218117216010090.
12. Стефанкин А.Е., Котляров Р.В. Расчет гидродинамических условий среды при движении в цилиндрическом канале с перфорированной конической вставкой // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617768. Патентообладатель ФГБОУ ВО «КемТИПП». 2016.