

О. С. БАЛАБЕКОВ, Б. Р. ИСМАИЛОВ, А. Ш. ШАРАФИЕВ

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ВЗАЙМОДЕЙСТВИЯ ФАЗ ПРИ РАСЧЕТЕ ПРОТИВОТОЧНЫХ АППАРАТОВ

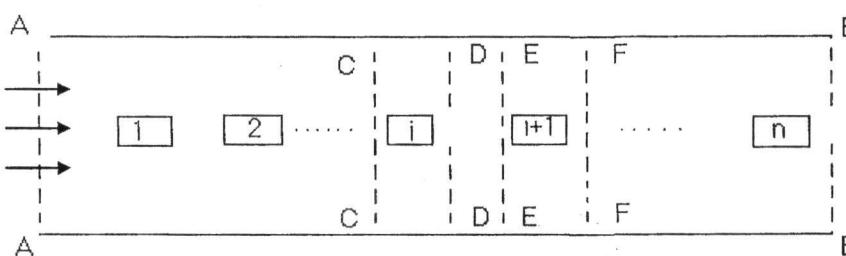
Показано использование принципа многоступенчатого взаимодействия фаз применительно к расчету противоточных массообменных аппаратов. С помощью численного решения системы уравнений Прандтля методом Спaldинга найдены гидродинамические характеристики аппарата – составляющие скорости, функция тока, завихренность. Применением функции диссипации определена зависимость гидравлического сопротивления аппаратов с регулярными насадками от режимных параметров.

Анализ течения газа и жидкости в контактных зонах колонных противоточных массообменных аппаратов показывает, что при обтекании насадок в зонах их непосредственного влияния одновременно реализуются все виды упрощенных схем взаимодействия – прямоточное, противоточное и перекрестноточное. Поэтому, если подойти к моделированию гидродинамики и тепломассообмена в таких аппаратах строго, то необходимо написать и решить соответствующие уравнения во всех точках контактной зоны с учетом особенностей каждого вида взаимодействия. Однако такой подход, осложненный турбулентным характером течения потоков, на деле оказывается громоздким и трудным для реализации.

Для расчета турбулентного движения газа в контактной зоне противоточного массообменного аппарата нами предлагается принцип многоступенчатого взаимодействия [1], смысл которого заключается в следующем. Длина каналов колонных аппаратов велика, и сквозной расчет динамических характеристик численными методами требует очень большого объема памяти компьютера и времени счета. С другой стороны, из-за многократного повторения вычислительных процедур происходит накопление погрешностей округления, что может привести к искажению конечного численного решения. Для решения этой проблемы нами использован прием [2], который можно назвать также принципом гидродинами-

ческого установления, известный для прямых цилиндрических труб: профиль скорости, заданный на входе в канал (например, прямоугольный или параболический), развиваясь по течению, через определенное расстояние достигает такой формы, которую можно считать установившейся. Этот прием вписывается в рамку идеи академика О. С. Балабекова о представлении колонного массообменного аппарата как совокупности нескольких каналов с многоступенчатым взаимодействием фаз (КМВФ). Для многоступенчатых каналов, в которых нами проведены расчеты динамических характеристик газового потока, этот принцип означает следующее (рис. 1):

1. Пусть  $\varphi(x,y)$  – одна из динамических характеристик в КМВФ. Обозначим через  $\varphi_{i,j}^{(k)}$  ее значения в узлах конечно-разностной сетки в момент времени  $t_k$ . На входе в КМВФ можно задавать значения  $\varphi_{0,j}^{(k)}$ , определяющие форму входного профиля. В расчетах ламинарного и турбулентного режимов на входе нами задавались прямоугольный и параболический профили. На других сечениях разностной сетки в начальный момент времени задавали такие значения динамических функций, которые обеспечивали постоянства расхода по всем горизонтальным сечениям канала. С возрастанием времени эти значения постепенно принимают свои истинные значения, соответствующие модели движения.



**Рис. 1.** Схема многоступенчатого взаимодействия фаз в массообменном аппарате.  
Ось абсцисс – продольное направление, ось ординат – поперечное направление к потоку,  
1,2,...,n – обтекаемые элементы

2. Проводим одну итерацию по соответствующей формуле расчета и находим  $\varphi_{i,j}^{(1)}$  для одной ступени контакта.

3. Для продолжения итерации во второй ступени контакта значения  $\varphi_{i,j}^{(1)}$  при  $i=n$  (на выходе из первой ступени контакта) передаются значениям  $\varphi_{0,j}^{(2)}$  для второй ступени контакта.

4. Находим значения  $\varphi$  для второй ступени контакта.

5. Если значения  $\varphi$  для двух следующих друг за другом ступеней контакта совпадают с заданной точностью, то итерации заканчиваются, и значения  $\varphi$  на последней ступени контакта могут быть приняты за установившиеся значения динамических характеристик на стабилизированном участке канала.

Таким образом, всю длину КМВФ можно представить как совокупность начального и стабилизированного участков, причем длина стабилизированного участка оказывается гораздо больше длины начального участка [2]. Такой эффект установления известен для цилиндрических труб: входной профиль скорости, развиваясь по течению, через определенное расстояние от входа устанавливается, приобретая форму параболы, т.е. реализуется течение Пуазейля. Длина начального участка зависит от формы входного профиля (прямоугольная, трапециевидная, параболическая и т.д.). При работе КМВФ в двухфазном режиме входной участок существует и для жидкости, длина которого также зависит от степени равномерности подачи жидкости из распределительных устройств. Например, при противотоке жидкость стекает вниз через распределительные устройства, обеспечивающие достаточную равномерность, и существует определенное расстояние, после которого ее распределение можно считать установившимся. Областью течения являются КМВФ с регулярным расположением элементов, определяющих многоступенчатость взаимодействия фаз. Поэтому «принцип установления» в таких задачах означает одинаковое распределение динамических характеристик для всех ступеней контакта, которые будут рассчитываться только для одной ступени контакта. Поток, входя в канал (сечение А-А), движется в продольном направлении, обтекая на своем пути регулярно расположенные элементы контактной зоны 1,2,...n. С течением достаточного большого

времени Т, за которое поток, развиваясь в своем течении, обтекает несколько элементов, все гидродинамические характеристики устанавливаются. Для цилиндрических прямых каналов известен эффект выхода течения на динамически стабилизированный участок, длина которого приблизительно равна  $40d$ , где  $d$  – диаметр канала. Численными экспериментами, проведенными нами для канала с параллельными полками, а ранее – для зигзагообразного канала установлено существование начального (А-С) и стабилизированного участков (С-В), причем длина С-В гораздо больше, чем А-С. В данном случае можно говорить об установлении по скорости и завихренности начиная с элемента  $i$  с некоторой точностью  $\varepsilon$ . Существующие тепло- и массообменные аппараты используют не один, а несколько рядов параллельно установленных каналов, поэтому при моделировании течений в них возникает вопрос о взаимном влиянии нескольких потоков. В этом случае необходимо использовать условия сопряжения с соответствующими граничными и начальными условиями:

$$U_s = ku_0, \vartheta_s = 0, \omega_s = z(\psi_s, \psi_{s-1}, \psi_{s+1}), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент уменьшения, зависящий от разброса общего расхода газа;  $S$  – кривая, которую можно считать линией симметрии между двумя рядами потоков, обтекающих 2 ряда элементов насадок;  $z = z(\psi_s, \psi_{s-1}, \psi_{s+1})$  – функция, получаемая трехточечной аппроксимацией гра-

нического условия  $\frac{\partial \psi}{\partial n} / s = 0$  для функции завихренности.

При обтекании первой и последней гирлянды влияние твердых стенок канала моделируем условиями прилипания  $u = 0, \vartheta = 0$ , а для вихря  $\omega$  воспользуемся условием непротекания газа на границе канала или разделяющей линии

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0. \quad (2)$$

Основой математической модели турбулентного течения газа в КМВФ колонных массообменных аппаратов является следующая система [2]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - w = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( w \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( w \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial \left( \mu_{\text{эф}} w \right)}{\partial x} \right\} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial \left( \mu_{\text{эф}} w \right)}{\partial y} \right\} - S_w = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial \left( \mu_{\text{эф}} k \right)}{\partial x} \right\} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial \left( \mu_{\text{эф}} k \right)}{\partial y} \right\} - S_k = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( l \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( l \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial \left( \mu_{\text{эф}} l \right)}{\partial x} \right\} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial \left( \mu_{\text{эф}} l \right)}{\partial y} \right\} - S_l = 0. \quad (6)$$

Уравнения (3)–(6) относятся к типу эллиптических уравнений математической физики. Доказано [5], что в областях с ограниченными границами, аналогичных КМВФ, и с соответствующими граничными условиями 1-и 2-рода они имеют единственное решение, устойчивые от-

носительно начальных и граничных условий. Особенностью уравнений (3)–(6) является их единичная форма записи, которая дает возможность разработать универсальный алгоритм их численного решения. Отличительные свойства динамических функций отражают источниковые члены  $S_w$ ,  $S_k$ ,  $S_l$ . Приведем их выражения в декартовой системе координат:

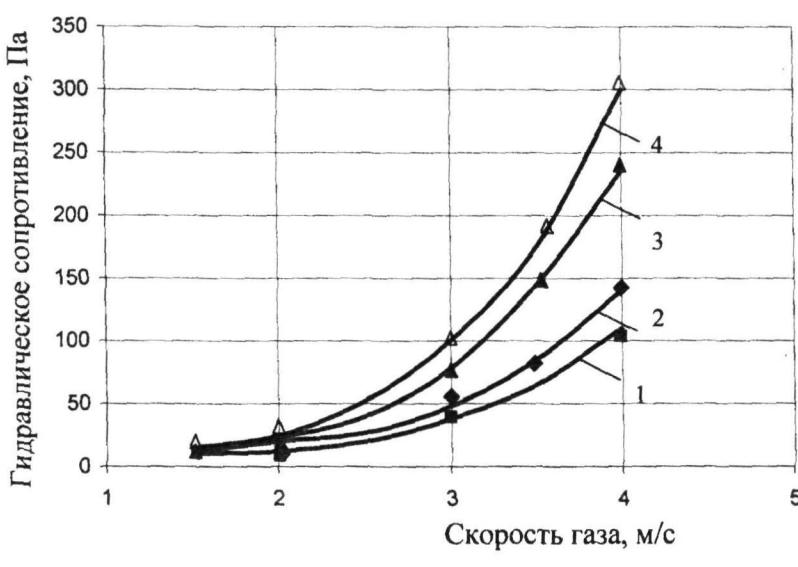
$$S_w = 0, \quad (7)$$

$$S_k = W_{kac,k,t} - D_k = \\ = \mu_i \left[ 4 \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right) + \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right)^2 \right] - C_D \rho k^{3/2} l^{-1}, \quad (8)$$

$$S_l = C_S \rho k^{1/2} - C_B l k^{-1} W_{kac,k,t}, \quad (9)$$

$$\mu_{\text{эф}} = C_\mu \rho V_0 \bar{k}^{1/2} d\bar{l} = \rho V_0 d C_M \bar{k}^{1/2} d\bar{l} = \\ = \rho V_0 d \overline{\mu_{\text{эф}}}. \quad (10)$$

Гидравлическое сопротивление колонных противоточных аппаратов определяет энергетические затраты на проведение технологических процессов. Одним из эффективных подходов к расчету гидравлического сопротивления является принцип аддитивности общего гидравлического сопротивления [3], когда составляющими являются гидравлическое сопротивление сухого аппарата, газожидкостного слоя и сопротивление, вызванное силами поверхностного натяжения. Численное решение системы (3)–(6) с соответ-



**Рис. 2.** Сравнение расчетных и экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению аппарата РПН  
Аппарат с РПН.  $E = 0,32 \text{ м}^2/\text{м}^2$ .

- 1 –  $L = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;
- 2 –  $L = 25 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;
- 3 –  $L = 35 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;
- 4 –  $L = 50 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

ствующими граничными условиями, учитывающими геометрию насадки, позволяют рассчитывать гидравлическое сопротивление через функцию диссипации энергии, которая является функцией составляющих скорости:

$$P = \mu_t \left[ 4 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) y^2 \right]. \quad (11)$$

На рис. 2 показано сравнение экспериментальных и расчетных значений гидравлического сопротивления аппарата с регулярными подвижными полочными насадками. Вычисление гидравлического сопротивления проведено интегрированием дискретной функции диссипации (11) в области контактной зоны аппарата. Для диапазона изменений скорости газа и плотности орошения применение принципа многоступенчатого взаимодействия потоков дает удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балабеков О.С. Избранные труды. Физико-химическая гидродинамика и закон о синфазности вихреобразования. Шымкент, 2001. 277 с.

2. Исмаилов Б.Р. Моделирование многоступенчатого взаимодействия газа и жидкости в колонных массообменных аппаратах: Дис. ... докт. техн. наук. Шымкент. 2002. 247 с.

- 3. Шарафьев А.Ш., Капаев К.Н., Серманизов С.С.** Расчет гидравлического сопротивления аппаратов с регулярной подвижной насадкой // Поиск. 2004. №1. С. 66-71.

## Резюме

Өзара кері бағытталған ағымдық массаауысу аппаратарының үшін көп сатылы тәсілдің қолдануы көрсетілген. Прандтлдың теңдеулер жүйесінің Сподингтің сандық тесілімен шешіл, аппараттың негізгі мінездемелері – жылдамдық, ағымдық және құйындық функциялары табылған. Диссипативтік функцияны қолданып, мерзімді саптамалы аппараттардың гидравликалық кедергісінің режимдік параметрлермен байланысы анықталған.

### **Summary**

In the given work use of a principle of multistage interaction of phases with reference to calculation counterflow massexchange devices is shown. With the help of the numerical decision of system of equations Prandtl method Spalding finds hydrodynamical characteristics of the device - making speeds, function  $\psi$  and  $\omega$  current. Application of function dissipative determines dependence of hydraulic resistance of devices with regular nozzles from regime parameters.

*Южно-Казахстанский  
государственный университет  
им. М. Ауэзова*

Поступила 2.07.06г.