УДК 532.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА В КАНАЛЕ СО СПИРАЛЕВИДНЫМИ НАСАДКАМИ

Х.Б.Исмаилов, А.А.Волненко, Б.Р.Исмаилов
ЮКГУ им. М.Ауезова, г. Шымкент

Аппараты с многоступенчатым взаимодействием газа и жидкости, в которых используется эффект синфазности вихрей, возникающих при обтекании насадочных тел, обладают рядом преимуществ по сравнению с аппаратами других конструкций [1]. Так, при обтекании насадок газовым потоком возникают зоны с максимальными значениями локальных скоростей [2], которые создают необходимую кинетическую энергию газа для диспергирования жидких структурных элементов - пленок, крупных капель, струй. Если удается найти распределение динамических характеристик фаз по всему объему аппарата, то это дает возможности оценки границ рабочего режима (например, среднерасходной скорости газового потока) аппарата расчетным путем, адекватность которого можно проверить экспериментально измерением одного из определяющих динамических характеристик.

Имеется большое количество работ, в которых границы рабочего режима определяются экспериментально, но полученные рекомендации можно применить только для условий эксперимента. В связи с этим, разработка математических моделей движения потоков, их численная реализация и получение распределения скорости, завихренности, давления по всему объему аппаратов остается одной из актуальных задач.

Одной из разновидностей высокоскоростных тепломассообменных аппаратов являются аппараты системы Подбильняка [3]. В качестве насадочного элемента в них служит спираль Архимеда, вращающаяся с определенной угловой скоростью, на поверхности спирали с достаточно широкими витками образуется пленка жидкости, а газ в результате обтекания спирали приобретает форму завихренного потока. По внутренней поверхности насадки движется пленка, противотоком – газ. Эффективность массообмена, гидравлическое сопротивление, границы рабочего режима по угловой скорости и параметру спирали исследованы в [3]. При этом ряд задач решен двумя методами: методом интегральных соотношений и предложенным авторами методом.

В данной статье приведены результаты исследования движения газа в канале с насадками в форме «вытянутой» спирали Архимеда, установленных по определенной схеме согласно [1]. Строго говоря, для математического описания движения газа в канале с такими обтекаемыми телами необходимо применять трехмерные уравнения Рейнольдса с учетом турбулентности с замыкающими соотношениями. Однако, в первом приближении для получения, преимущественно, качественной картины обтекания в ламинарном режиме, нами при моделировании приняты следующие допущения:

1. Течение газа является осесимметричным и безотрывным.

2. Сечение насадки по осевому направлению представляет собой ступенчатые прямые с нулевым углом наклона от горизонтальной оси (рисунок 1).

3. Насадки расположены по схеме [1], которая практически исключает влияние соседних насадок, расположенных по соседству с вертикальными и горизонтальными направлениями.

Объемная форма рассматриваемых насадок близка к конической, поэтому допущения 1 и 2 не вносят большой погрешности в модель, при условии, что число Рейнольдса соответствует медленному ламинарному безотрывному течению (Re<100).

Уравнение спирали Архимеда в полярной системе координат имеет вид

$$\rho = a\varphi, \tag{1}$$

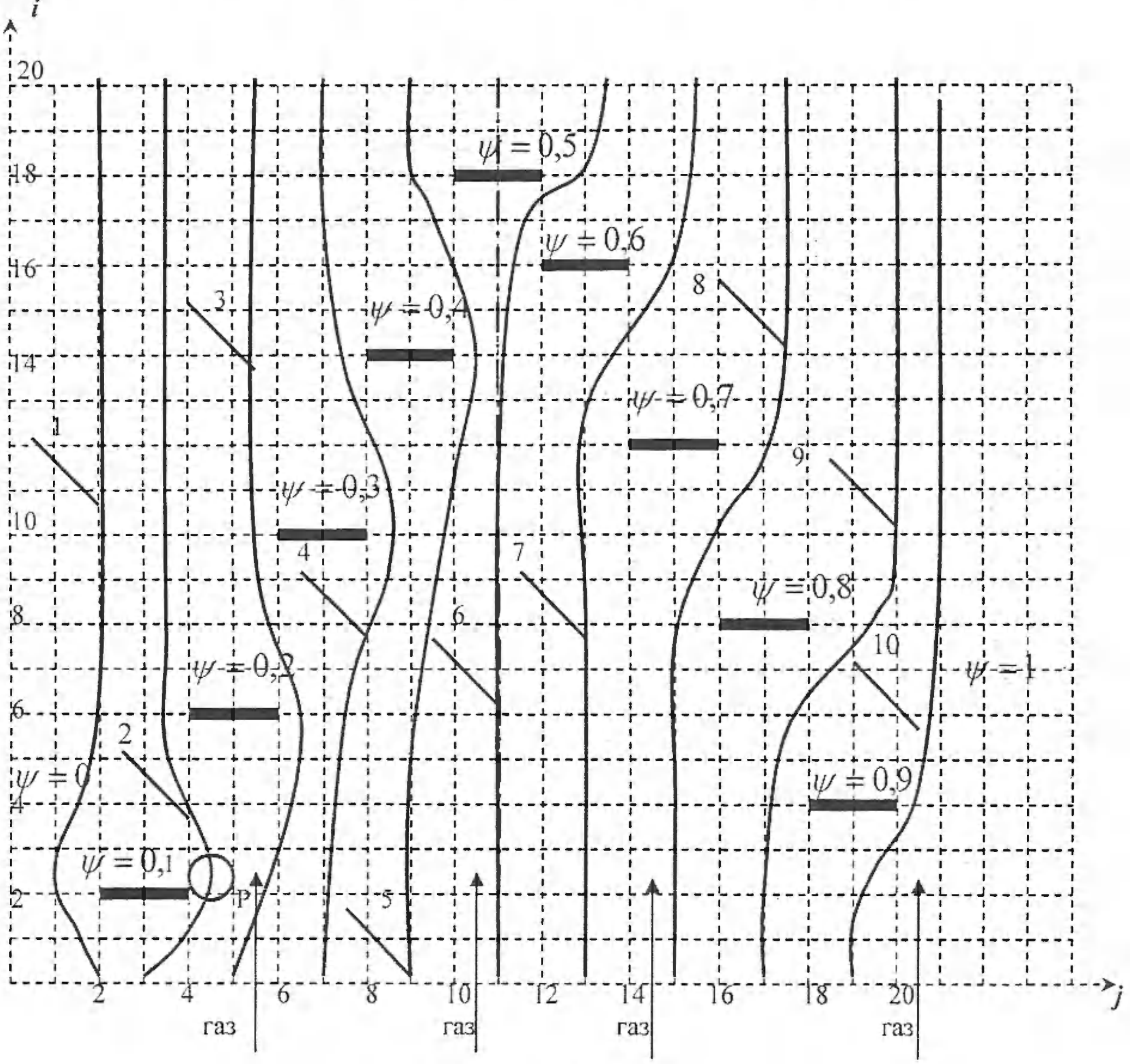
а горизонтальные сечения «вытянутой» спирали приближенно можно представить как:

$$x = ia\cos\varphi,$$

$$y = ia\sin\varphi,$$

$$z = ih_c / n,$$

где i - индекс сечения, h_c - высота насадки, n - количество витков спирали.



1 - $\psi = 0{,}1$, 2 - $\psi = 0{,}15$, 3 - $\psi = 0{,}25$, ...,

7 - $\psi = 0{,}65$,..., 9 - $\psi = 0{,}85$, 10 - $\psi = 0{,}95$.

Рисунок 1 - Осевое сечение насадки, сетка для решения конечно-разностной схемы (3) и изолинии функции тока при Re=100

Значения функции тока на сечениях спирали осевой плоскостью подобраны таким образом, что выполняются условия расхода для начального момента времени. Система уравнений Навье-Стокса, записанная в терминах «функция тока - вихрь», имеет следующий вид [4]:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}=\omega,$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial t}+u\frac{\partial\omega}{\partial x}+\vartheta\frac{\partial\omega}{\partial y}=\mathrm{Re}(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}), \tag{2}$$

где ψ,ω - функции тока и завихренности, соответственно, Re - число Рейнольдса: $\mathrm{Re}=\dfrac{U_0 d}{\nu}$, где U_0-среднерасходовая скорость, м/с; d - характерный линейный размер канала, м; ν - коэффициент кинематической вязкости, м^2/с. В качестве характерного линейного размера нами взята ***a***- ширина витка спирали в выражении (1).

Конечно-разностная схема метода установления для 1 – уравнения системы (1) имеет следующий вид:

$$\psi_{i,j}^{n+1,s+1}=\psi_{i,j}^{n+1,s}+\alpha_0\left[\frac{1}{4}\left(\psi_{i+1,j}^{n+1,s}+\psi_{i-1,j}^{n+1,s+1}+\psi_{i,j+1}^{n+1,s}+\psi_{i,j-1}^{n+1,s+1}-h^2\psi_{i,j}^{n+1,s}\right)-\psi_{i,j}^{n+1,s}\right], \tag{3}$$

где α_0- итерационный параметр, определяемый через сеточные параметры

$$\sigma,h\left(\alpha_0=4\sigma/h^2\right). \tag{4}$$

Граничным условием при расчете по формуле (3) является условие $\psi=const$, задаваемое на сечениях. Расчет поля функции тока по формуле (3) проводится до получения стационарного решения. Это значит, что внутренний итерационный цикл с параметром s должен заканчиваться при определенном условии, которое характеризует достижение стационарного режима. При плавном изменении $\psi_{i,j}$ в процессе итераций можно использовать самое простое из этих условий, состоящее в том, что разность значений функции тока в двух соседних итерациях s и $s+1$ не превосходит некоторой заданной величины:

$$\max\left|\psi_{i,j}^{s+1}-\psi_{i,j}^{s}\right|<\varepsilon. \tag{5}$$

При выполнении условия (5) расчет уравнения Пуассона по формуле (3) прекращается и мы получим поле вихря и поле функции тока, удовлетворяющие разностным аналогам уравнений для ψ и ω на временном слое ***n+1***. Для получения решения в следующий момент времени рассмотренная выше процедура повторяется, с той лишь разницей, что в качестве начальных значений теперь используются найденные величины полей $\psi_{i,j}^{n+1},\omega_{i,j}^{n+1}$.

Аппроксимация вихря проводится «против потока» на регулярной насадке, т.е. в качестве соседнего узла все время берется узел, расположенный ближе к входу канала. Это было предпринято в связи с тем, что такие схемы обеспечивают устойчивость даже для турбулентных течений. Введем следующее обозначение: $\varphi(ih,jh,n\tau)=\varphi_{i,j}^n$. Производные по пространственным переменным будем аппроксимировать центральными разностями, а производные по времени заменим разностным отношением «вперед». Тогда получим следующую явную схему для уравнения вихря:

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1}-\omega_{i,j}^{n}}{\tau}+\frac{\psi_{i,j+1}^{n}-\psi_{i,j-1}^{n}}{2h}*\frac{\omega_{i+1,j}^{n}-\omega_{i-1,j}^{n}}{2h}-\frac{\psi_{i+1,j}^{n}-\psi_{i-1,j}^{n}}{2h}*\frac{\omega_{i,j+1}^{n}-\omega_{i,j-1}^{n}}{2h}=$$
$$=\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\omega_{i+1,j}^{n}-2\omega_{i,j}^{n}+\omega_{i-1,j}^{n}}{h^2}+\frac{\omega_{i,j+1}^{n}-2\omega_{i,j}^{n}+\omega_{i,j-1}^{n}}{h^2}\right). \tag{6}$$

На рисунке 1 показаны результаты численного решения уравнений Навье-Стокса по конечно-разностной схеме (3), (6) для чисел Рейнольдса, соответствующих ламинарному режиму методом стабилизации. Для построения линий тока соединяются узлы разностной схемы, в которых значения функции тока одинаковы (в пределах точности численного решения задачи). В точках области ***P*** значения вертикальной составляющей скорости значительно больше, чем среднерасходная скорость из-за сгущения линии тока (рисунок 1), например, при Re=100 $u_{max} = kU_0$, где u_{max} - максимальная вертикальная составляющая скорости в зоне ***P*** и *k =2,3.* Данный гидродинамический эффект, при реализации которого создается максимальная кинетическая энергия газа, достаточная для диспергирования стекающей пленки жидкости и крупных капель на мелкие капли, экспериментально и теоретически также был указан в работах [1,2].

Литература

1 Волненко А.А. Научные основы разработки и расчета вихревых массообменных и пылеулавливающих аппаратов: Дисс…докт.техн.наук. – Шымкент, 1999.-300с.
2 Исмаилов Б.Р. Моделирование многоступенчатого взаимодействия газа и жидкости. –Алматы: -Кітап палатасы, 2002.-103с.
3 Холпанов Л.П., Шкадов В.Я. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела фаз. –М., 1990.-271с.
4 Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена.-М.: Наука,1984.-284с.

Қорытынды

Навье-Стокс теңдеулері теориясын қолданып, газдың Архимед спиралдары орналасқан каналдағы ағымның математикалық моделі құрастырылған. Газ ағымын вертикалдық координатаға симметриялық деп есептеп, құрастырылған модель сандық тәсілдермен шешілген. Ламинар режимдегі ағымдық және құйын функциясының мәндері табылып, газдың жылдамдығы кейбір нүктелерде орташа жылдамдықтан екі-үш есе артық екендігі дәлелденген.

Summary

Within the framework of the theory of equations Navye -Stocks modeling a flow shelf bodies in the form spiral of Archimedes is carried spent by a gas stream. At assumptions about parallel current of a stream the given system is solved numerically by a method of stabilization. Are found functions of a current in a laminar mode at appropriate number Reynolds. Occurrence of such hydro dynamical effect at which gas, flowing round shelf elements reaches the maximal kinetic energy is shown.

УДК 661.9:532.529:621.184.64

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В МНОГОСТУПЕНЧАТОМ КАНАЛЕ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Б.Р.Исмаилов, С.У.Сарсенбай
ЮКГУ им. М.Ауезова, г.Шымкент

В процессах, проводимых в колонных массообменных аппаратах, массообмен и теплообмен могут совмещаться и при математическом моделировании и реализации соответствующих моделей дифференциальные уравнения гидродинамики, уравнения массообмена и теплообмена должны решаться в комплексе. Существует хорошо известный метод аналогий гидродинамического и тепломассообменного процессов, однако для случая турбулентного течения газов предполагается равенство единице критериев Прандтля или Шмидта. Вычисление эффективного коэффициента теплоотдачи теоретическим путем возможно для очень редких случаев, к тому же имеющих ограниченное значение для техники и химической техно-