

УДК.536.24

СОРОКИНА Т.В.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННЫХ АППАРАТАХ

За профілями швидкостей незбуреного потоку в різних перерізах роторно-пульсаційного апарату розраховано критичні значення числа Рейнольдса. Досліджено гідродинамічну нестійкість та визначено область стійкості течії в перерізах РПА.

По профилям скоростей невозмущенного потока в различных сечениях роторно-пульсационного аппарата рассчитаны критические значения числа Рейнольдса. Исследована гидродинамическая неустойчивость и определена область устойчивости течения в сечениях РПА.

The critical numbers of Reynolds are designed for different sections of rotor-pulse apparatus according to profile of undisturbed flow velocities. The hydrodynamic instability is investigated and the field of flow stability in sections of rotor-pulse apparatus is defined.

$U(y)$ – скорость основного течения,

U_{cp} – среднерасходная скорость,

h – полуширина канала,

p – давление,

$u'(t, x, y)$, $v'(t, x, y)$ – возмущающее движение, наложенное на основное течение,

t – время,

x, y – продольная и поперечная координаты,

α – волновое число,

$\beta = \beta_r + i\beta_i$, β_r – круговая частота колебания,

β_i – коэффициент нарастания колебаний,

$c = \beta/\alpha = c_r + ic_i$, c_r – скорость распространения волн возмущений,

c_i – инкремент нарастания возмущений,

$\varphi(y)$ – амплитуда возмущенной скорости,

ω – угловая скорость вращения,

ψ – функция тока, штрих - означает производную по координате y , волна сверху – означает безразмерные величины,

$\tilde{\alpha} = \alpha h$, $\tilde{U} = U(y)/U_{cp}$, $\tilde{c} = c/U_{cp}$,

$\tilde{\varphi} = \varphi(y)/(U_{cp}h)$, $\tilde{y} = y/h$,

$Re = 2U_{cp}h\mu/\rho$ - число Рейнольдса,

ρ, μ – значение плотности и вязкости по сечению канала.

Введение

Широкое распространение в промышленности получили роторно-пульсационные аппараты (РПА), основанные на принципе дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЕ) и используемые в пищевой, фармацевтической и химической промышленности для получения тонкодиспергированных суспензий, эмульсий, газожидкостных смесей [1]. Для улучшения качества перемешивания важно теоретически правильно подобрать режим работы аппарата и уметь рассчитать гидродинамические характеристики перемешиваемой жидкости. Интенсивное перемешивание происходит при турбулизации потока. Поэтому важно уметь рассчитать устойчивость течения в РПА -

границу перехода ламинарного течения в турбулентное.

Цель исследования

Данная работа посвящена теоретическому исследованию гидродинамических характеристик роторно-пульсационного аппарата. Объектом исследования выбран роторно-пульсационный узел РПА, конструкция которого включает коаксиальные цилиндрические обечайки, перфорированные отверстиями (прорезями): две неподвижные обечайки – статоры, между которыми располагается вращающаяся – ротор. Схема аппарата представлена на рис. 1. Вода выбрана в качестве моделируемой жидкости.

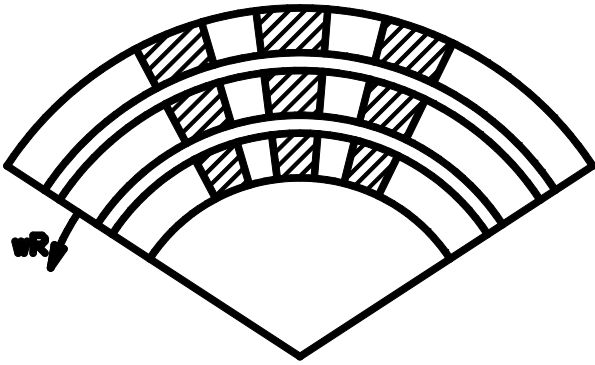


Рис. 1. Принципиальная конструкция сегмента образца РПА.

Методы исследования

Для изучения устойчивости в РПА использовался метод линейных возмущений [2]. Суть этого метода заключается в наложении на скорость основного течения $U(y)$ пульсационных составляющих скорости $u'(t, x, y)$, $v'(t, x, y)$. Тогда поле скоростей можно представить в следующем виде $u(t, x, y) = U(y) + u'(t, x, y)$, $v(t, x, y) = v'(t, x, y)$, (1)

Наложённое возмущение является двухмерным, поэтому можно ввести функцию тока, удовлетворяющую уравнению неразрывности в виде

$$u' = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v' = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad \psi = \varphi(y) \exp[i(\alpha x - \beta t)]. \quad (2)$$

После подстановки выражения (1) в уравнение Навье-Стокса

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + 2\omega \rho v,$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] - 2\omega \rho u,$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0.$$

с последующей линеаризацией, с учетом (2) и обезразмериванием получаем уравнение Орра-Зоммерфельда [2, 3]

$$(\tilde{U} - \tilde{c})(\tilde{\varphi}'' - \tilde{\alpha}^2 \tilde{\varphi}) - \tilde{U}'' \tilde{\varphi} =$$

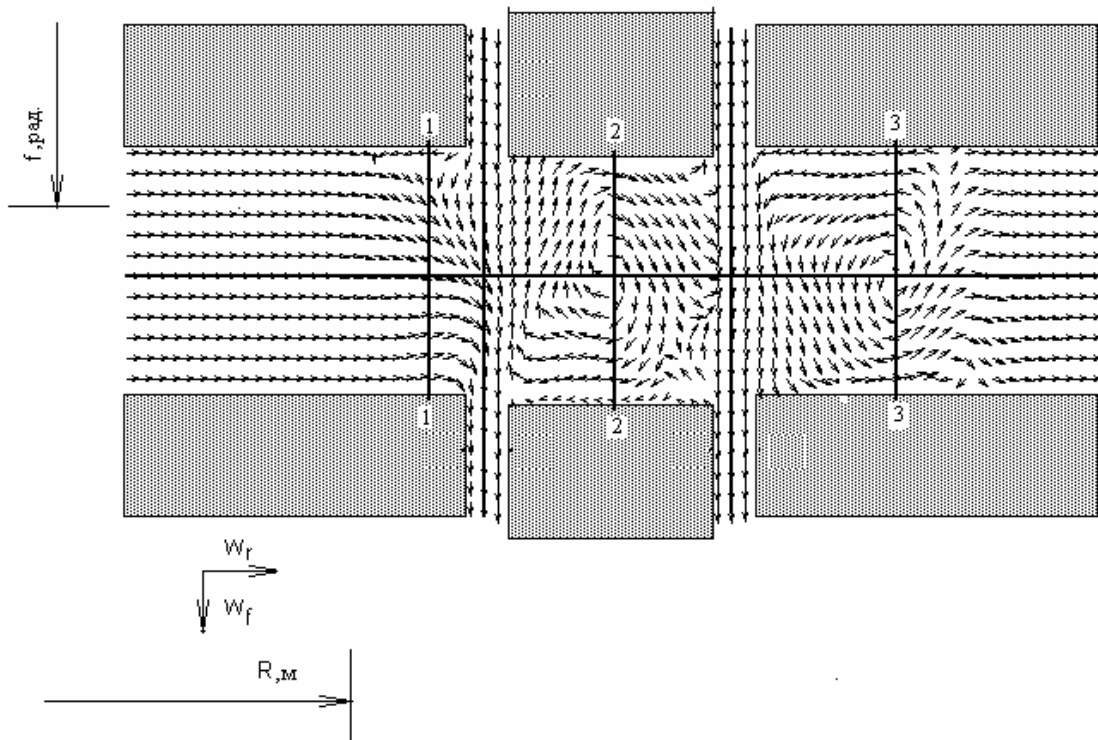


Рис. 2. Сегмент образца РПА.

f – круговая частота вращения, w_r – радиальная скорость, w_f – круговая скорость, R – радиус.

Табл. 1. Полиномиальные зависимости эюр скоростей в прорезях РПА и значения критического числа Рейнольдса

Сечение	Полином эюры скорости в данном сечении	Re _{кр}
1-1	$\tilde{U} = 2,07 - 0,76\tilde{y} - 4,29\tilde{y}^2 + 7,51\tilde{y}^3 + 1,18\tilde{y}^4 - 13,28\tilde{y}^5 + 0,83\tilde{y}^6 + 6,33\tilde{y}^7$	≈120
2-2	$\tilde{U} = 0,53 - 8,21\tilde{y} + 0,99\tilde{y}^2 + 2,85\tilde{y}^3 + 6,19\tilde{y}^4 - 3,94\tilde{y}^5 - 7,72\tilde{y}^6 + 9,30\tilde{y}^7$	≈160
3-3	$\tilde{U} = -0,04 + 8,81\tilde{y} + 6,31\tilde{y}^2 - 11,61\tilde{y}^3 - 16,04\tilde{y}^4 + 26,06\tilde{y}^5 + 33,4\tilde{y}^6 - 23,26\tilde{y}^7 - 23,63\tilde{y}^8$	≈180

$$= -\frac{2i}{\tilde{\alpha}Re}(\tilde{\varphi}'''' - 2\tilde{\alpha}^2\tilde{\varphi}'' + \tilde{\alpha}^4\tilde{\varphi}). \quad (3)$$

В данном случае вращение не влияет на форму уравнения Орра-Зоммерфельда, так как в процессе вывода уравнения (3) члены, учитывающие вращение взаимосокращаются. Для определения критерия смены режима нам необходимо уравнение (3) исследовать на собственные значения при нулевом инкременте нарастания возмущений. Для этого использовался метод Галеркина [4].

Обсуждение результатов

Исследование устойчивости проводилось в различных сечениях прорези, показанных на рис. 2.

Задача решалась в двухмерной постановке. Для определения критерия смены режимов в указанных сечениях по известному распределению скоростей строился их профиль путем аппроксимации расчетных данных, полученных авторами [5] (Таблица 1).

Расчет критического числа Рейнольдса проводился по среднерасходным скоростям в сечениях прорезей по их ширине. Усредненная скорость находилась по формуле

$$U_{cp} = \frac{1}{2} \int_{-h}^h u(y) dy. \quad (4)$$

Эюры скоростей в таблице обезразмерены по средней скорости, рассчитанной по формуле (4).

Выводы

Из полученных результатов расчетов можно сделать вывод: турбулизация происходит при низких числах Рейнольдса, что обусловлено формой профиля. По первой теореме Релея профиль скорости, имеющий точку перегиба, неустойчив

[2]. В сечениях РПА, расположенных ближе к центру переход ламинарного течения в турбулентное происходит быстрее, чем в периферийной области (табл. 1).

Проведенное теоретическое исследование РПА дает возможность правильно подобрать модели для расчетов гидродинамических процессов РПА и позволяет эффективно использовать аппараты подобного рода в энергосберегающих технологиях принципа ДИВЭ.

Работа выполнена при частичной поддержке Фонда фундаментальных исследований министерства образования и науки Украины (проект № 040700019).

ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Басок Б.И., Гулый С.И., Накорчевский А.И., Шурчкова Ю.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях.- Киев: ИТТФ НАНУ, 1996.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.- М: Издательство иностранной литературы, 1956.- 528 с.
3. Сорокина Т.В. Исследование неустойчивости двухфазного потока с переменными свойствами// Пром. теплотехника. Приложение к журналу.- 2003.- Т. 25.- № 4.- С. 353-354.
4. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина.- М: Мир, 1988.- 352 с.
5. Басок Б. И., Давыденко Б. В., Кравченко Ю. С., Пироженко И.А. Исследование микроструктуры потока жидкости в роторно-пульсационном аппарате// Доповіді НАН України.-2003.-№ 11.- С. 71-76.

Получено 11.10.2004 г.