

Определение коэффициентов формы ячеек в продольно обтекаемых пучках стержней

Бенедиктас Чесна

*Литовский энергетический институт, Бреслауэс, 3, LT-44403 Каунас, Литва
Эл. почта: benas@mail.lei.lt*

Представлены результаты аналитического и экспериментального исследования коэффициента формы элементарных ячеек для ряда наиболее распространенных продольно обтекаемых пучков, помещенных в шестигранной оболочке (правильная сборка) и в круглой обечайке (сборка с неравноценными ячейками). Проанализировано, как коэффициенты формы элементарных ячеек (центральных, периферийных и угловых) зависят от их взаимосвязи. Показано, что с уменьшением относительных шагов сборки s/d и w/d коэффициент формы периферийных элементарных ячеек уменьшается. Установлено, что коэффициент формы канала зависит от числа Re , а его влияние на коэффициенты формы угловых, центральных (треугольных) и периферийных элементарных ячеек одинаковое.

Ключевые слова: пучок, ячейка, коэффициент формы

1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы формирования полей скорости и температуры в продольно обтекаемых пучках стержней, представляющих собой систему взаимосвязанных каналов, между которыми происходит массо-, импульсо- и тепло- обмен, имеют существенные особенности по сравнению с процессами в изолированных каналах. Из-за случайных геометрических отклонений (напр., прогибы или сдвиги стержней) происходит местное перераспределение расходов теплоносителя по элементарным ячейкам. Элементы дистанционирования стержней (дистанционирующие решетки, проволоочная навивка) влияют на межканальное перемешивание и степень турбулентности потока. Неравномерность распределения теплоносителя по ячейкам различной геометрии (центральные, периферийные ячейки) определяется гидродинамическими особенностями взаимосвязанных каналов.

Роль различных факторов, вызывающих неоднородности потока, меняется в зависимости от типа аппарата и конструкции тепловыделяющих сборок. Высокая теплонапряженность таких сборок, наличие в них дистанционирующих элементов приводят к нестабильности гидродинамики и теплообмена по длине каналов. Однако учесть эти факторы на основе одномерного представления гидравлики кассеты нельзя, поскольку требуется более полное и всестороннее описание течения теплоносителя.

В настоящее время ячейстые методы являются эффективным инструментом расчета местных теплогидравлических характеристик стержневых сборок. В рамках этих методов остается открытым вопрос определения зависимостей, необходимых для расчета местных теплогидравлических параметров ячеек. Особенно это относится к сборкам с гидравлически неравноценными ячейками.

Для дальнейшего уточнения ячейстых методов расчета следует решить задачу теплогидравлики для ряда поперечных сечений сборки, сохранив при этом средние значения теплогидравлических параметров в ячейках. Разработка более точных методов расчета требует экспериментального изучения местных гидродинамических характеристик в стержневых сборках как с теплогидравлически неравноценными ячейками, так и с равноценными ячейками.

Цель настоящей статьи – показать зависимость коэффициента формы ячеек в продольно обтекаемых пучках стержней от числа Рейнольдса и корреляцию этого коэффициента между центральной, угловой и периферийной ячейками. Под коэффициентом формы ячеек подразумевается отношение коэффициента гидравлического сопротивления элементарной ячейки ξ_j к коэффициенту гидравлического сопротивления трубы, $\xi_{тр}$, т. е. $\Phi = \xi_j / \xi_{тр}$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УЧАСТКИ

Для проведения экспериментальных исследований использовались экспериментальные участки, представляющие собой сборки 19-трубного пучка с различными ячейками в поперечном сечении (рис. 1). Исследуемые модели являются типичным примером сборок с малым количеством стержней. Пучок, помещенный в круглую обечайку, представляет собой сборку с теплогидравлически неравноценными ячейками, а помещенный в шестигранную обечайку – правильную сборку. Пучки собраны из гладких стержней диаметром $d = 30$ мм, диаметр круглой обечайки $D = 215$ мм. Относительный шаг упаковки сборки $s/d = 1,35$, длина сборки – 3,3 м. Более детально экспериментальные участки и экспериментальные установки описаны в [1].

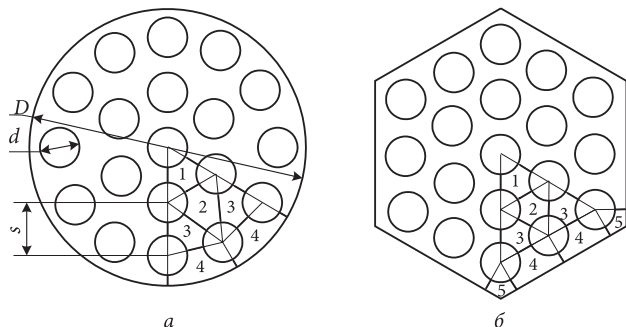


Рис. 1. Поперечное сечение 19- стержневой сборки с круглой (а) и шестигранной (б) обечайкой. 1–5 – различные типы ячеек

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Коэффициент сопротивления элементарных ячеек

Программа RKN [2] дает возможность рассчитать коэффициенты сопротивления отдельных ячеек ξ_i и коэффициент сопротивления пучка в целом ξ по рассчитанным распределениям скорости и касательных напряжений. В таблице представлены результаты таких расчетов при $Re = 10^5$. Указанные значения отнесены к коэффициенту сопротивления трубы $\xi_{тр}$. Расчеты ξ_i и ξ выполнены с учетом и без учета кривизны смоченной поверхности. Как видно из таблицы, учет влияния кривизны смоченной поверхности увеличивает относительный коэффициент сопротивления ячеек $\xi_i/\xi_{тр}$ на 13%. При $Re = 10^5$ значение для пучка $\xi/\xi_{тр}$, полученное без учета кривизны стенки, совпадает с экспериментальным значением, равным 1,05.

Таблица. Относительные коэффициенты трения $\xi_i/\xi_{тр}$ для различных ячеек и для всей 19-стержневой гладкой сборки с неравноценными ячейками при $Re = 10^5$

Учет кривизны поверхности	Номер элементарной ячейки <i>i</i>				$\xi/\xi_{тр}$
	1	2	3	4	
С учетом	1,17	1,24	1,22	1,15	1,18
Без учета	1,07	1,06	1,07	1,05	1,05

В сборках данного типа относительные коэффициенты сопротивления ячеек $\xi_i/\xi_{тр}$, рассчитанные без учета кривизны стенки, отличаются от экспериментальных значений, полученных для различных ячеек, максимально на 9%.

На рис. 2 сопоставляются коэффициенты сопротивления правильной ячейки, отнесенные к коэффициенту сопротивления трубы при $Re = 10^5$ в зависимости от s/d . Распределение касательных напряжений рассчитано по методике М. Ибрагимова [4] (программа RKN). В одном случае профиль скорости рассчитан по зависимости для полностью турбулентного ядра трубы $u^+ = R_{тн} + A_s \ln u^+$, где $A_s = 2,5$ и $R_{тн} = 5,5$ (кр. 2), в другом случае (кр. 1) предполагалось, что на любой нормали к поверхности стержня кривизна пограничного слоя $r/(r + y_0)$ влияет на коэффициенты A_s и $R_{тн}$ также, как и во внутренней области кольцевого канала. Зависимости A_s и $R_{тн}$ от $r/(r + y_0)$ задавались в таблицах по опытным данным [3].

На рис. 2 представлена кр. 3, полученная в работе [4] на основе обобщения обширного экспериментального мате-

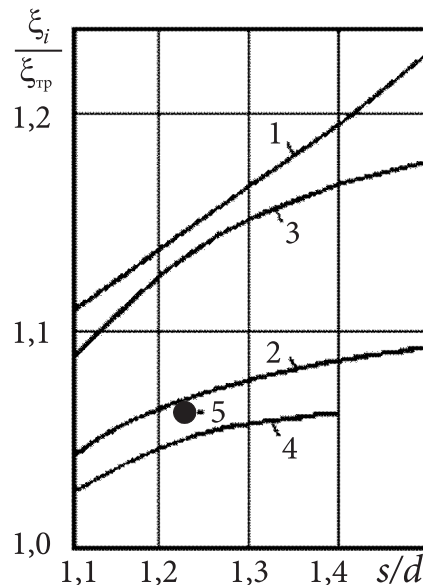


Рис. 2. Зависимость относительных коэффициентов трения $\xi_i/\xi_{тр}$ правильной ячейки от s/d . 1 – расчет по профилю скорости в кольцевом канале, 2 – расчет по профилю скорости в трубе, 3 – обобщенные эксперименты по каналам сложной формы [4], 4 – обобщенные эксперименты по пучкам труб [5], 5 – эксперимент К. Реме [5]

риала по коэффициенту трения в изолированных ячейках разнообразной формы. Согласно этой работе, $\xi_i/\xi_{тр}$ изолированной ячейки определяется кривизной смоченного периметра β , которую можно выразить как $\beta = y_0/r$, параметром неравномерности ячейки K , зависящим от формпараметра Φ , и степенью изменения y_0 [2]:

$$y_0 = \frac{y_0^{\max} - y_0^{\min}}{y_0^{\text{ср}}} \tag{1}$$

$\xi_i/\xi_{тр}$ определяется по зависимости:

$$\xi_i/\xi_{тр} = f_1(K) \cdot f_2(\beta), \tag{2}$$

где

$$f_1(K) = 0,58 + 0,48 \exp(-0,021K^3), \tag{3}$$

$$f_2(\beta) = 1 + 0,1(1 + \beta)^{4/3}, \tag{4}$$

$$K = y_0 \Phi^{0,25}. \tag{5}$$

Кривая 4 на рис. 2 соответствует зависимости К. Реме [5], полученной при обобщении обширного экспериментального материала (собственного и других авторов) по коэффициенту трения пучков с правильными треугольными ячейками. Значения $\xi_i/\xi_{тр}$, рассчитанные по методу работы [4] (кр. 3), располагаются на 8–10% выше, чем по зависимости К. Реме (кр. 4). На рис. 2 для сравнения нанесена экспериментальная точка для сборки $s/d = 1,22$, полученная К. Реме для условий, наиболее отвечающих условиям “бесконечной” ячейки. Как видно из рисунка, расчеты, выполненные в настоящем исследовании на основе профиля скорости для трубы (кр. 2), и экспериментальная точка К. Реме удо-

влетворительно согласуются с обобщенной зависимостью К. Реме (кр. 4). Расчеты $\xi_i / \xi_{гр}$ (кр. 1), основанные на учете кривизны смоченных поверхностей (принцип локального подобия), дают значения, располагающиеся выше кр. 3.

Анализ кривых на рис. 2 приводит к выводу, что более достоверными результатами являются данные (кр. 2 и 4), полученные при расчетах по профилю скорости при обобщении опытов только по пучкам стержней.

3.2. Расчет коэффициентов формы элементарных ячеек

Разработанные нами методики расчета гидродинамических характеристик любой стержневой сборки с произвольной геометрией позволяют вести систематические расчеты коэффициентов формы ячеек для ряда наиболее распространенных сборок. В настоящем параграфе приведен пример определения коэффициентов формы элементарных ячеек в правильной сборке, помещенной в шестигранный кожух. Такая сборка имеет три характерные элементарные ячейки (рис. 3): треугольную (определяется параметром s/d), периферийную (определяется параметрами s/d и w/d) и угловую (определяется параметром w/d).

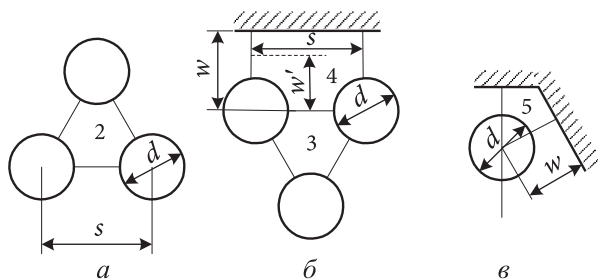


Рис. 3. Характерные элементарные ячейки сборки с правильной треугольной упаковкой стержней в шестигранном кожухе. а – треугольная ячейка, б – взаимодействующие периферийная и треугольная ячейки, в – угловая ячейка

Кроме указанных геометрических параметров (s/d и w/d), коэффициент формы Φ зависит от числа Re, рассчитанного по средней скорости и гидравлическому диаметру элементарной ячейки. Расчеты проведены с помощью программы RKN-M [1] с использованием одновихревой конвективной модели переноса градиентного типа.

На рис. 4 показано, как изменяется коэффициент формы элементарной ячейки в зависимости от шага упаковки пучка при постоянных параметрах w_s и Re. Параметр w_s представляет собой отношение зазора между стержнем и кожухом к зазору между стержнями. Зная w_s , можно перейти к введенным ранее параметрам w/d и w'/d :

$$\frac{w}{d} = w_s \left(\frac{s}{d} - 1 \right) + 1 \quad \text{и} \quad \frac{w'}{d} = 0,5 w_s \left(\frac{s}{d} - 1 \right) + 1. \quad (6)$$

Как видно из рис. 4, в диапазоне $1,05 \leq s/d \leq 1,4$ и $w_s = 1$ (одинаковые зазоры между периферийным стержнем и кожухом и между стержнями) коэффициент формы периферийной ячейки изменяется на 11%. Значение коэффициента формы периферийной ячейки уменьшается с уменьшением шага упаковки пучка s/d . При $w_s = 0,2$ и $s/d = 1,05$ коэффициент формы ячейки Φ составляет 0,84.

На рис. 5 показано, как изменяется коэффициент формы периферийной ячейки в зависимости от величины Re при

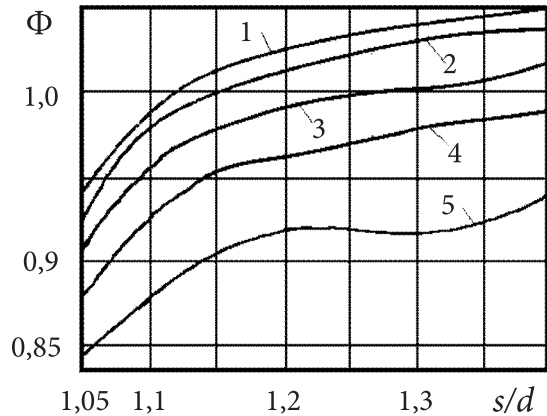


Рис. 4. Зависимости коэффициента формы правильной периферийной ячейки от относительного шага упаковки пучка и расстояния периферийного стержня от кожуха при $Re = 10^5$. w_s : 1 – 1,0; 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2

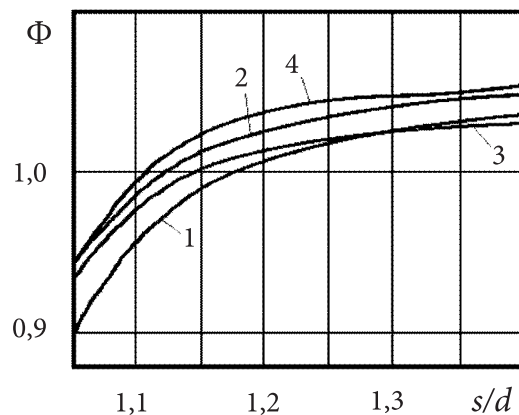


Рис. 5. Влияние Re на коэффициент формы правильной периферийной ячейки и взаимное влияние периферийной и треугольной ячеек ($w_s = 1,0$). Расчет изолированной периферийной ячейки при Re: 1 – 10^4 , 2 – 10^5 , 3 – 10^6 . 4 – расчет для случая взаимодействующих ячеек при $Re = 10^5$

постоянном значении параметра w_s ($w_s = 1,0$). Наблюдается немонотонная зависимость Φ от числа Re. Однако в диапазоне $10^4 \leq Re \leq 10^6$ изменение Φ не превышает 3% при $s/d \geq 1,2$ и 5% при $s/d = 1,05$. На этом же рисунке показано взаимное влияние периферийной и треугольной ячеек для параметров $w_s = 1,0$ и $Re = 10^5$. Как видно из рисунка, расчетный коэффициент формы ячеек при предположении изолированности ячеек отличается от такового в случае взаимодействующих ячеек не более чем на 1% для треугольной ячейки и на 1,5% для периферийной ячейки. Из этого следует вывод, что в диапазоне $1,05 < s/d < 1,4$ коэффициент формы элементарных ячеек можно рассчитывать в предположении, что они изолированы.

Результаты расчетов коэффициентов формы элементарной треугольной ячейки в зависимости от параметров упаковки сборки s/d и w/d при разных числах Re в предположении изолированности и при взаимодействии периферийной и треугольной ячеек показаны на рис. 6. Максимальное влияние периферийной ячейки на коэффициент формы треугольной ячейки не превышает 1% в диапазоне $1,05 \leq s/d \leq 1,4$. Влияние Re на коэффициент формы угловой, треугольной и периферийной ячеек одинаковое.

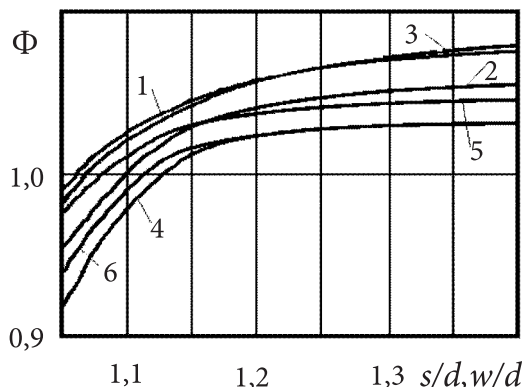


Рис. 6. Коэффициент формы треугольной и угловой ячеек в зависимости от упаковки пучка. 1 и 2 – треугольная изолированная ячейка соответственно при $Re = 10^5$ и 10^6 ($\Phi = f(s/d)$); 3 – треугольная ячейка, взаимодействующая с периферийной ячейкой при $Re = 10^5$ ($\Phi = f(w/d)$); 4, 5 и 6 – элементарная угловая ячейка соответственно при $Re = 10^4$, 10^5 и 10^6 ($\Phi = f(w/d)$)

4. ВЫВОДЫ

1. Разработанные нами методики расчета гидродинамических характеристик любой стержневой сборки с произвольной геометрией позволяют вести систематические расчеты коэффициентов формы ячеек для ряда наиболее распространенных сборок.

2. Наблюдается немонотонная зависимость коэффициента формы ячеек от числа Re . Коэффициент формы ячеек при предположении их изолированности отличается от такового в случае взаимодействующих ячеек не более чем на 1% для треугольной ячейки и на 1,5% для периферийной ячейки. Поэтому в диапазоне $1,05 < s/d < 1,4$ коэффициент формы элементарных ячеек можно рассчитать в предположении, что они изолированы.

3. Значение коэффициента формы периферийной ячейки уменьшается с уменьшением шага упаковки пучка s/d .

4. Влияние Re на коэффициент формы угловой, треугольной и периферийной ячеек одинаковое.

Основные обозначения

- d – диаметр стержня, м;
- D – радиус обечайки, м;
- r – радиус стержня, м;
- Re – число Рейнольдса;
- s – шаг упаковки, м;
- w' – расстояние от центра стержней до центра между стержнем и кожухом, м;
- w – расстояние от центра стержней периферийного ряда до поверхности кожуха, м;
- w_s – отношение зазора между стержнем и кожухом к зазору между стержнями;
- y_0 – расстояние по нормали от поверхности стержня, м;
- Φ – коэффициент формы ячеек;
- ξ – коэффициент гидравлического сопротивления пучка;
- ξ_i – коэффициент гидравлического сопротивления ячейки;
- $\xi_{тр}$ – коэффициент гидравлического сопротивления трубы.

Поступило 27 03 2007

Принято 11 02 2008

Литература

1. Чесна Б. Теплоотдача и гидродинамика в газоохлаждаемых стержневых тепловыделяющих сборках. Каунас, 2003.
2. Cesna B. Analytical and experimental investigations of shear stress in rod bundles with irregular cells // Kerntechnik. 2007. Vol. 72. No. 1–2. P. 20–26.
3. Brighton J. A., Jones J. B. Fully developed turbulent flow in annuli // Trans. ASME. ser. D. 1964. Vol. 86. No. 4. P. 835–844.
4. Ибрагимов М. Х., Исупов И. А., Кобзарь Л. Л. и др. Расчет касательных напряжений на стенке канала и распределение скоростей при турбулентном течении жидкости // Атомная энергия. 1966. Т. 21. Вып. 2. С. 101–108.
5. Rehme K. Simple method of predicting friction factor of turbulent flow in non-circular channels // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1973. Vol. 16. P. 933–950.

Benediktas Čėsna**IŠILGAI APTEKAMŲ RINKLIŲ ELEMENTARIŲ KANALŲ FORMOS KOEFICIENTŲ NUSTATYMAS***S a n t r a u k a*

Pateikti išilgai aptekamų rinklių, sudarytų iš lygiareikšmių ir nelygiareikšmių elementarių kanalų, formos koeficientų eksperimentinių ir analitinių tyrimų rezultatai. Išnagrinėta, kaip elementarių kanalų formos koeficientai priklauso nuo elementarių kanalų (centrinių, periferinių ir kampinių) savitarpio ryšio. Parodyta, kad mažinant rinklės santykinis surinkimo žingsnis s/d ir w/d , periferinio elementaraus kanalo formos koeficientas mažėja. Nustatyta, kad kanalo formos koeficientas priklauso nuo Re , o jo įtaka kampinio, centrinio (trikampio) ir periferinio elementarių kanalų formos koeficientams yra ta pati.

Raktažodžiai: rinklė, elementarus kanalas, kanalų formos koeficientas

Benediktas Čėsna**DETERMINATION OF SHAPE FACTORS FOR ELEMENTARY CELLS IN ROD BUNDLES***S u m m a r y*

The results of analytical and experimental investigations of shape factor for elementary cells in case of some most widespread rod bundles placed in a hexahedral shell (assembly with regular triangular cells) and in a round shell (assembly with non-equivalent cells) are presented. Results of the shape factor calculations in case of an elementary triangular cell depending on parameters of assembly packing s/d and w/d are presented for different Re numbers, assuming their isolability and interaction of peripheral and triangular cells. It is certain that the influence of Re on the shape factor for angular, central (triangular) and peripheral cells is identical.

Key words: bundle, cell, shape factor