Сопоставление экспериментальных и расчетных местных температур поверхностей стержней в угловом сегменте продольно обтекаемой газоохлаждаемой сборки

Бенедиктас Чесна

Литовский энергетический институт, Бреслауёс 3, LT-44403 Каунас, Литва Эл. почта: benas@mail.lei.lt В статье представлено сопоставление экспериментальных и расчетных по программе DARS [1] местных температур поверхностей стержней в угловом сегменте продольно обтекаемой 15-стержневой газоохлаждаемой сборки. Модели собраны из 15 гладких или шероховатых стержней. Модели имитировали угловую и периферийную зоны специальной сборки, помещенной в шестигранный кожух. Представлены рекомендации по коэффициенту турбулентного перемешивания для переходных процессов, имеющих место между периферийными и угловыми ячейками такой сборки. Для определения коэффициентов теплоотдачи шероховатой сборки проанализирована возможность использовать экспериментальные корреляционные зависимости, полученные другими исследователями.

Ключевые слова: пучок, ячейка, шероховатость

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование гидравлических особенностей стержневых сборок в шестигранном кожухе имеет большое значение для уточнения методов расчета местных теплогидравлических параметров подобных конструкций методом элементарных ячеек. Ячеистые методы теплогидравлического анализа стержневых сборок получили широкое распространение не только для анализа экспериментальных данных, но и при разработке и оптимизации новых конструкций каналов разных теплообменников и реакторов. Для обоснования этих методов расчета в различных странах проведен широкий круг детальных экспериментальных исследований на специальных моделях газоохлаждаемых сборок. Такие эксперименты были проведены и в Литовском энергетическом институте (ЛЭИ). Это позволило получить ряд обобщенных зависимостей по поперечному перемешиванию, по влиянию шероховатости стержней на интенсификацию теплообмена и на коэффициент поперечного перемешивания, по гидравлическому сопротивлению периферийных ячеек, примыкающих к кожуху сборки, определяющих скорости и подогревы газа в этих ячейках и тем самым перепады температур по периметрам периферийных стержней в газоохлаждаемых сборках. Полученные экспериментальные данные закладывались в алгоритмы расчетных аналитических программ, по которым проводились аналитические расчеты новых моделей сборок или анализировались новые экспериментальные данные. В Литовском энергетическом институте на основании новейших экспериментальных и расчетных исследований была разработана методика быстрого определения теплогидравлических параметров проектируемых или существующих продольно обтекаемых сборок, собранных из гладких или шероховатых стержней, с дистанционирующими решетками или проволочной навивки, не прибегая к дополнительным дорогостоящим экспериментам. Методика реализована в пакете компьютерной программы DARS.

Цель настоящей статьи – с помощью экспериментальных данных подтвердить работоспособность компьютерной программы DARS.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ УЧАСТОК

Для проведения экспериментальных исследований использовался экспериментальный участок, представляющий собой сборку 15-стержневого пучка (рис. 1). Исследуемая модель представляет периферийную и угловую зону модели из 217 стержней, помещенных в шестигранный кожух. Пучки собраны из гладких и шероховатых стержней (труб) диаметром 30 мм. Нанесенная на стержни шероховатость – спиральная, трапециедальная, двухзаходная. Высота шероховатости – 0,3 мм, шаг между витками – 3 мм. Шероховатость нанесена только на длину 810 мм между 3 и 4 дистанционирующими решетками. Относительный шаг упаковки сборок s/d = 1,326, длина сборок – 3 м. Пучки дистанционировались специальными дистанционирующими решетками, высота которых составляла 30 мм.

Перепад давления по длине экспериментального участка измерялся с помощью 26 отборов статического давления,



Рис. 1. Схема экспериментальной модели и разрез поперечного сечения. *1* – обечайка, *2* – дистанционирующие решетки, *3* – стержни пучка, *4* – шпильки для подвески пучка, *5* – подключение электрической энергии. *X* – начало отчета продольной координаты экспериментального участка

вмонтированных в стенке кожуха сборки (по 2 отбора в каждом сечении).

Для измерения температуры стенки труб № 2, 3, 4 и 10 (рис. 1) к внутренней ее поверхности были приварены термопары, выполненные из хромель-алюмелевой проволоки диаметром 0,3 мм. Термопары приварены в 5 сечениях по длине (X = 0,273, 0,607, 0,94, 1,774 и 2,917 м); в каждом сечении по 5 термопар для труб № 2, 3, 4 и по 6 термопар для трубы № 10. Термопары покрыты жаростойкой изоляцией.

Для облегчения проведения экспериментов и для получения более полной эпюры температур стенок исследуемых стержней пучка верхняя часть труб № 2, 3, 4 и 10 изготовлена поворотной с целью поворачивания их вокруг своей оси на 360°. Трубы поворачивались с помощью координатного устройства с шагом через 6°.

Температура на входе T_0 измерялась с помощью пяти хромель-алюмелевых термопар, поставленных непосредственно перед решеткой привода электроэнергии 5 (рис. 1). Истинная температура на входе (на отметке X = 0) пересчитывалась по формуле

$$T_f = T_0 + \frac{Q}{G \cdot c_p},\tag{1}$$

где Q – количество тепла, выделенного на пучке длиной 250 мм (до отметки X = 0), G – расход воздуха.

Опыты проведены в потоке воздуха в диапазоне $\text{Re}_f = (0,33-0,911) \cdot 10^5$ и теплового потока $q = 3400-7800 \text{ Br/M}^2$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Сборка с гладкими стержнями

Анализ экспериментальных данных и теплогидравлические расчеты проведены по компьютерной программе DARS, которая была создана в ЛЭИ [1]. Коэффициент теплоотдачи вычислялся по известной формуле [2]

$$Nu = 0,023 \text{ Re}^{0,8} \text{ Pr}^{0,4}.$$
 (2)

Коэффициент турбулентного перемешивания между ячейками определялся по формуле Роу и Энгл [3]:

$$\beta_{k,n} = 0,0062 \frac{d_h}{\Delta} \operatorname{Re}^{-0,1}.$$
(3)

При определении $\beta_{k,n}$ между элементарными ячейками № 4, 5 и 6 по зависимости (3) полученное значение увеличивалось в 3 раза.

На рис. 2 представлено сопоставление экспериментальных и расчетных температур наружной поверхности стенок стержней. Для стержней № 2, 3 и 10 имеет место хорошее совпадение расчета с экспериментом. Для углового стержня № 4 расчет совпадает с экспериментом только в выходном сечении (X = 2,917 м).

3.2. Сборка с шероховатыми стержнями

Так как для такой сборки искусственная шероховатость была нанесена только на длине 0,81 м от концевой решетки (передняя часть сборки оставалась гладкой), то были подобраны и другие сечения для измерений. В гладкой части



Рис. 2. Температура стенки по периметру стержня и по длине модели при Re = 0,50 · 10⁵ (*сборка из гладких стержней*): *a, б, в, г* − соответственно стержни № 2, 3, 10 и 4. Точки и кривые – эксперимент и расчет по DARS: 1 - X = 0,273 м; 2 - X = 0,607 м; 3 - X = 0,94 м; 4 - X = 1,773 м; 5 - X = 2,917 м

измерения температур проводились по высоте от 0,48 до 2,037 м, а для шероховатой части – от 2,247 до 2,932 м. Экспериментальные точки для каждого стержня № 2, 3, 4 и 10 на шероховатой части были сняты поворотом труб через 6° по азимуту.

Для получения корреляционных зависимостей функций $G(h^+)$ и $R(h^+)$ необходимо провести подробные исследования параметров использованной шероховатости в кольцевом канале. Такие исследования проведены не были. В данных теплогидравлических расчетах использовали рекомендации, представленные в [4]. В этой работе исследовалась оребренная поверхность для определения влияния формы ребра, угла атаки и отношения шага ребра к высоте на трение и теплообмен. Получены следующие зависимости для корреляций шероховатости:

$$G(h^{+}) = 10 (h^{+} / 35)^{k} / (\alpha / 45^{0})^{n},$$
(4)

где α – угол атаки; k = 0 при $h^+ < 35$ и k = 0,28 при $h^+ \ge 35$; n = 0,5 при $\alpha < 45^\circ$ и n = -0,45 при $\alpha \ge 45^\circ$

$$R(h^{+}) = 4.9 (h^{+} / 35)^{m} / [(\Phi / 90^{0})^{0.35} (10 / P / h)^{n} (\alpha / 45^{0})^{0.57}],$$
(5)

t, °C

125

в

где m = -0,13 при $h^+ < 35$ и m = 0 при $h^+ \ge 35; n = -0,13$ при P/h < 10 и n = 0,53 ($\alpha / 90^\circ$)^{0,71} при $P/h \ge 10$.

t, °C

125

На рисунках 3 и 4 представлено сопоставление расчетной температуры наружной поверхности стержня по высоте и по периметру с опытными данными соответственно для для гладкой и шероховатой частей сборки. На гладком участке наблюдается хорошее согласие расчета с экспериментом. Для шероховатого участка результаты расчета согласуются с экспериментом в пределах 5–12 %.

3.3. Обсуждение результатов

Проведенный анализ показал, что результаты расчета хорошо согласуются с опытными данными как для гладкой, так и для шероховатой сборки. Некоторое отличие имеется для углового стержня гладкой сборки. Расчетные результаты по угловому стержню гладкой сборки хорошо согласуются с экспериментальными данными, снятыми только на выходном сечении. Анализируя такое отличие, можно предположить, что это связано с экспериментом, так как экспериментальные точки, нанесенные на рисунках, практически не отличаются между собой по высоте, несмотря на то, что средний подогрев во всех опытах приблизительно равнялся 50 °C.

Для шероховатых сборок результаты расчета согласуются с опытными данными в пределах 5–12 °С. Следует отметить, что наибольшее различие приходится на переходный участок от гладкого до шероховатого.

Нами было установлено, что турбулентное перемешивание в периферийных элементарных ячейках, граничащих с



Рис. 3. Температура стенки по периметру стержня и по длине модели при Re = 0,47 · 10⁵ (*для гладкой части сборки*): *a*, *б*, *в*, *г* – соответственно стержни № 2, 3, 10 и 4. Точки и кривые – эксперимент и расчет по DARS: 1 - X = 0,48 м; 2 - X = 1,2 м; 3 - X = 1,3 м; 4 - X = 1,773 м

Рис. 4. Температура стенки по периметру стержня и по длине модели при Re = 0,47 · 10⁵ (*для шероховатой части сборки*): *а, б, в, г* – соответственно стержни № 2, 3, 10 и 4. Точки и кривые – эксперимент и расчет по DARS: 1 - X = 2,037 м; 2 - X = 2,247 м; 3 - X = 2,507 м; 4 - X = 2,767 м

угловой ячейкой, гораздо сильнее, чем в центральных ячейках. В данных расчетах коэффициент турбулентного перемешивания в этой области модели был увеличен в 3 раза по сравнению с рассчитанным по формуле (4).

В расчетах сборки с шероховатыми стержнями с определенной геометрией шероховатости при использовании методики Далле Донне [5] необходимо также иметь и экспериментальные данные по гидродинамике и теплообмену, полученные на одиночном стержне в кольцевом канале. По этим исследованиям получают корреляции для функций $G(h^+)$ и $R(h^+)$. При отсутствии таких экспериментов можно использовать корреляционные зависимости (4) и (5), представленные в работе [4].

4. ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ показал, что результаты расчета по программе DARS хорошо согласуются с экспериментальными данными.

 На основе анализа экспериментальных и расчетных данных получено подтверждение для корреляций поперечного перемешивания в окрестности углового стержня.

3. При отсутствии экспериментальных данных по трению и теплообмену с определенным типом искусственной шероховатости на кольцевых каналах можно использовать корреляционные зависимости для функций $G(h^+)$ и $R(h^+)$, апробированные в данной работе.

Основные обозначения и сокращения

 c_p – теплоемкость, Дж / (кг · K); d – диаметр стержня (труб) сборки, м; d_h – гидравлический диаметр элементарной ячейки, h – высота элементов шероховатости, м; h^+ – безразмерная высота шероховатости; P – шаг между элементами шероховатости, м; s – шаг упаковки сборки, м; Δ – зазор между элементарными ячейками; Φ – угол формы шероховатости; DARS – литовское сокращение от "Расчет газоохлаждаемой сборки"; Re – число Рейнольдса, Nu – число Нуссельта.

> Received 1 October 2008 Accepted 5 January 2009

Литература

 Cesna B. The thermal-hydraulic calculation model for gas flow in a fuel rod assembly // Proceedings of 13th International Heat Transfer Conference, 13–18 August 2006. Sydney, Australia. Published by Begell House, Inc. Paper NCL-07 (12 pages).

- Субботин В. И. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. Москва: Атомиздат, 1975.
- Rowe D. S., Angle C. W. Cross flow mixing between parallel flow channels during boiling // BNWL-371. Part II: Measurements of Flow and Enthalpy in Two Parallel Channels, 1967.
- Han I. C., Glicksman L. R., Rohsenow W. M. An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1978. Vol. 21. N 8. P. 1143–1156.
- Dalle Donne M., Meyer L. Turbulent convection heat transfer from rough surfaces with two-dimensional rectangular ribs // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1977. Vol. 20. N 6. P. 583–620.

Benediktas Čėsna

EKSPERIMENTINIŲ IR APSKAIČIUOTŲ STRYPŲ PAVIRŠIAUS VIETINIŲ TEMPERATŪRŲ PALYGINIMAS DUJOMIS AUŠINAMOS RINKLĖS KAMPINIAME SEGMENTE

Santrauka

Straipsnyje pateikiamas apskaičiuotų pagal skaičiavimo kompiuterinę programą DARS [1] dujomis aušinamų rinklių rezultatų palyginimas su eksperimentiniais rezultatais, gautais 15 vamzdžių rinklės modeliuose. Modeliai buvo surinkti iš 15 lygių ir šiurkščių vamzdžių ir imituoja specialios rinklės periferinę ir kampines zonas. Pateikiamos rekomendacijos dėl skersinio maišymosi tarp periferinių ir kampinių elementarių modelio kanalų koeficiento. Išanalizuota galimybė panaudoti kitų autorių gautas eksperimentines koreliacines funkcijas šiurkščios rinklės skaičiavimo atvejui.

Raktažodžiai: rinklė, elementarus kanalas, šiurkštumas

Benediktas Čėsna

A COMPARISON OF MEASURED AND CALCULATED LOCAL TEMPERATURES ON ROD SURFACES IN AN ANGULAR SEGMENT OF GAS-COOLED BUNDLES

Summary

The paper presents a comparison of the calculated results of gas-cooled bundles employing the DARS code with the experimental measurements obtained in 15 smooth or rough rod bundle models. The models were simulated into angular and peripheral zone segments of a special assembly placed in a hexahedral shield. Recommendations regarding the turbulent mixing coefficient for the transients taking place between peripheral and angular cells of such assembly are presented. For the definition of the heat transfer coefficient of a rough assembly, the possibility to use experimental correlation dependences of other researchers is analysed.

Key words: bundle, cell, roughness