

Параметры регулирующих стержней

Номер группы стержней	t_j, c	a_{0j}	a_{1j}, c^{-1}	a_{2j}, c^{-2}	a_{3j}, c^{-3}	h_j
1	4,11	0	0	4,853	-1,455	0,04
2	1,666	0,5	0	4,853	-1,455	-0,06629
3	2,566	0,5	0,1082	-0,09672	0,01637	-0,01
4	3,8	0	0	4,853	-1,455	-0,04

ности по закону (14). Если по истечении заданного времени требуется остановить реактор либо перевести его на новый уровень мощности, это можно осуществить еще одной группой органов или комбинацией предыдущих групп.

В качестве примера рассмотрим однородный тепловой цилиндрический реактор без отражателя с параметрами β и l , приведенными выше. Реактор регулируется стержнями, движение которых осуществляется по закону

$$z_j(t) = \begin{cases} a_{0j}, & t < t_{j-1}; \\ \sum_{m=0}^3 a_{mj}(t-t_{j-1})^m, & t_{j-1} \leq t \leq t_j; \\ z_j(t_j), & t > t_j. \end{cases} \quad (15)$$

Здесь $z_j(t)$ — путь, пройденный в реакторе стержнем j -й группы к моменту t , отнесенный к высоте реактора; зависимость эффективности стержня от глубины погружения определяется известной из одногрупповой диффузионной теории формулой

$$k(t) = k_0 + \sum_j k_j \left\{ z_j(t) - \frac{1}{2\pi} \sin [2\pi z_j(t)] \right\}. \quad (16)$$

На рисунке сплошной линией показаны результаты подобных расчетов, которые проводили в два этапа. По результатам, полученным на первом этапе для момента $t_0 \approx 1,67$ с, найдена зависимость $k(t)$, обеспечивающая постоянную мощность реактора, а по ней — с помощью уравнений (15), (16) — пересчитан закон изменения $z_3(t)$. Для простоты предполагали, что самогашение отсутствует. После поддержания постоянной мощности реактора в те-

чение 1 с включали группу стержней № 4, осуществляющую остановку реактора. Численные значения параметров всех четырех групп стержней приведены в таблице.

Вторые члены в правой части равенства (13), содержащие в качестве множителя сравнительно малый параметр — время жизни мгновенных нейтронов l — заметно меньше первых. Так, в рассмотренном примере указанные члены дают вклад в α_i лишь в четвертой значащей цифре. Однако пренебрежение этими членами может привести к некоторым изменениям расчетных значений коэффициентов F_n (см. рисунок).

При известном поведении плотности нейтронов в реакторе концентрацию предшественников запаздывающих нейтронов на момент $t = t_0$ можно рассчитывать по формуле

$$c_i(t) = \frac{\beta_i}{l} \int_0^{t_0} k(\tau) n(\tau) e^{-\lambda_i(t_0-\tau)} d\tau + c_i(0) e^{-\lambda_i t_0}, \quad (17)$$

которая является прямым следствием второго уравнения системы (1). Проверочные расчеты показали, что в действительности для получения необходимой точности зависимости $k(t)$, обеспечивающей постоянство плотности нейтронов в реакторе при $t \geq t_0$, концентрацию предшественников c_i в момент t_0 достаточно вычислить с погрешностью 5%. Поэтому при определении $c_i(t_0)$ по формуле (17) в последней можно считать $k(\tau) = 1$. Если при $t \leq 0$ реактор находился в стационарном состоянии, $c_i(0)$ вычисляются обычно: $c_i(0) = \beta_i n(0) / \lambda_i$. В противном случае удобнее всего выбрать начало отсчета $t = 0$ так, чтобы вкладом второго слагаемого можно было пренебречь, т. е. чтобы $\lambda_i t_0 \gg 1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кипин Дж. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1967.
2. Бриккер И. Н. — Атомная энергия, 1966, т. 21, вып. 1, с. 9.
3. Хетрик Д. Динамика ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1975.
4. Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов. М., Изд-во иностр. лит., 1961.

Поступило в Редакцию 24.03.80
В окончательной редакции 30.06.80

УДК 621.039.534

Двухстенные поверхности для теплообменных аппаратов

КОКОРЕВ Б. В., ТУРЧИН Н. М.

При теплообмене между взаимно агрессивными или взрывоопасными средами нарушение целостности разделяющей теплопередающей поверхности может привести к аварии. Например, в парогенераторах натрия — вода, используемых на АЭС с быстрыми реакторами, малейшая течь перерастает в большую. Если не удастся своевременно обнаружить появление течи и принять меры к отключению и осушению полостей парогенератора, возможно разрушение трубного пучка [1]. В настоящее время на АЭС используют парогенераторы одностенной конструкции. Сложные многокомпонентные трубы, созданные для парогенераторов первых экспериментальных реакторов, существенно увеличивали начальную стоимость последних и не нашли применения.

В последние годы вновь повысился интерес к двухстенным конструкциям, появились разработки, в которых нет заметного увеличения массы и размеров парогенераторов по сравнению с одностенным исполнением [2—4].

Эти разработки могут быть полезны в химическом машиностроении, а также в других отраслях промышленности. На рис. 1 представлены некоторые конструкции двухстенных труб. Трубы могут быть плотно соединены прессовой посадкой или твердым припоем (см. рис. 1, а). Их надежность при этом увеличивается вследствие малой вероятности совпадения дефектов.

Трубы на рис. 1, б, в однотипны по исполнению зоны контакта и плотно прижаты одна к другой. Напряжение

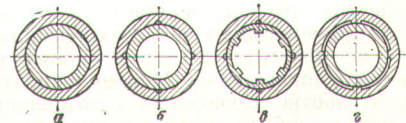
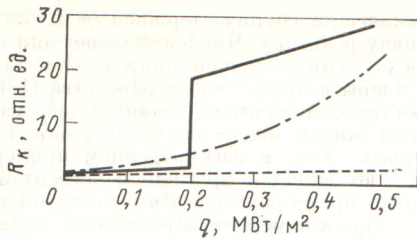


Рис. 1. Конструкции двухстенных труб: неконтролируемые без зазора (а); контролируемые, с гелиевой [2] (б), [3] (в) и с натриевой индикацией [4] (г)



Р и с. 2. Зависимость термического сопротивления зазора от теплового потока

посадки выбирается таким, чтобы деформация выступов шероховатых поверхностей была неполной и сохранилась тем самым пористая структура зоны. Это позволяет при появлении неплотности протекать рабочим средам по зазору. Для облегчения и ускорения движения среды вдоль трубы предусмотрены специальные канавки глубиной 0,3—0,5 и шириной 1,0—1,5 мм. Канавки выходят в полость между двойными трубными досками. Для уменьшения термического сопротивления зоны контакта в полость подается гелий. Существуют два способа контроля течи одной из стенок — детектирование появления гелия (или другого газа) в рабочих средах или детектирование рабочих сред в гелии, возможна и комбинация этих способов. В трубах с натривой индикацией размер зазора существенно не влияет на термическое сопротивление стенки, однако он не может быть ни очень малым, ни слишком большим. Нижний размер зазора должен определяться исходя из условий обеспечения протока в контролируемую полость продуктов взаимодействия воды с натрием, верхний — исходя из условий предотвращения прожоба второй стенки. В настоящее время нет данных, которые позволили бы корректно устанавливать нижнюю и верхнюю границы зазора.

Расчет термического сопротивления зоны контакта R_k затруднен плохо поддающимися учету факторами: чистотой поверхностей, особенностями технологии и др. По данным измерений, для труб, изображенных на рис. 1, б, с зазором 6—12 мкм в зависимости от технологии изготовления и состояния поверхностей R_k изменяется от 0,01 до 0,15 м²·°С/кВт [2]. По нашим данным, для аналогичных труб диаметром 20 × 4 мм из стали 12Х1МФ при тепловых потоках 50—500 кВт/м² R_k изменяется от 0,02 м²·°С/кВт для чистых поверхностей до 0,1 м²·°С/кВт для сильно окисленных.

Увеличение массы и размера аппаратов двухстенного исполнения в основном связано с увеличением общей площади стенок труб и наличием R_k . Для получения достоверных оценок были сделаны сравнительные расчеты применительно к известной конструкции испарителя установки ВН-600 [5]. Штатный одностенный парогенератор (ОПГ) выполнен из труб размером 16 × 2,5 мм, двухстенный (ДПГ) — из составной трубы размером 17 × 2,0 и 13 × 1,5 мм (при выборе размеров использовали существующий опыт изготовления двухстенных труб). Диаметр трубного пучка ДПГ и ОПГ одинаковый. Следовательно, изменение массы парогенератора обусловлено лишь изменениями массы трубного пучка и корпуса при неизменной массе остальных узлов. Результаты расчетов приведены в таблице.

Из нее следует, что уже первые образцы двухстенных труб обладают приемлемыми теплотехническими характеристиками и не приводят к существенному увеличению массогабаритных показателей. Можно ожидать, что при дальнейшей отработке технологии изготовления удастся уменьшить массу труб за счет утонения внутренней или наружной части в зависимости от того, какая из них должна быть основной, несущей всю механическую нагрузку

Сравнительные оценки вариантов парогенераторов с различным размером зазора δ

Параметр	ОПГ	ДПГ		
		$\delta = 5$ мкм	$\delta = 15$ мкм	$\delta = 25$ мкм
Относительная длина трубы (обогреваемая) $L_{\text{ДПГ}}/L_{\text{ОПГ}}$	1	1,15	1,28	1,43
Относительная масса $G_{\text{ДПГ}}/G_{\text{ОПГ}}$	1	1,18	1,25	1,33
Средний тепловой поток, кВт/м ²	250	230	210	160
Максимальный тепловой поток, кВт/м ²	600	470	410	360

ку (в таблице расчеты сделаны для трубы в 1,4 раза тяжелее одностенной). Более высокая начальная стоимость аппаратов компенсируется достоинствами двухстенных конструкций.

Возможность контроля течи практически исключает крупные аварии из-за взаимодействия сред. Появление течи только одной из стенок не требует экстренного аварийного отключения аппарата, а позволяет осуществить его постепенную остановку и исключает тем самым возникновение чрезмерного теплового напряжения в конструкциях установки.

Наши эксперименты показали, что даже при появлении пор и трещин (их имитировали искусственными сверлениями) одновременно в двух стенках на расстоянии трех калибров друг от друга саморазвитие течи не происходит.

Можно обеспечить высокую коррозионную стойкость трубы одновременно к двум средам подбором пары материалов, каждый из которых удовлетворяет требованиям лишь одной среды. В зависимости от начальной посадки, соотношения коэффициентов температурных расширений, теплопроводности среды в зоне контакта слоев могут быть реализованы различные зависимости R_k от теплового потока, например показанные на рис. 2. Это открывает новые возможности в разработке теплообменных аппаратов с изменяемым термическим сопротивлением стенки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрченко Д. С. и др. — IAEA Symp. on Design and Construction Operating Experience of Demonstration LMFBR'S. Vienna, IAEA, 1978, p. 227.
2. Lohmeier A., Bongaards D. Development and Test Results of the Westinghouse Double wall tube Steam Generators including Termal Model Tests. In: Proc. of the US—USSR Seminar on the Development of Sodium Cooled Fast Breeder Reactor Steam Generators. Los Angeles 2—4 Dec. 1974, p. 221.
3. Стрмиска Ф., Старек И. Разработка элементов поверхности теплообмена с двойной стенкой. Докл. на совещ. «Теплофизика и гидродинамика активной зоны и парогенераторов для быстрых реакторов». Марианске Лазне, 2—7 апр. 1978.
4. Кириллов П. Л. — Атомная энергия, 1979, т. 47, вып. 4, с. 275.
5. Титов В. Ф., Халецкий Э. Э., Стекольников В. В. — [2], с. 243.