

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Поликарпов и др. Контроль герметичности тепловыделяющих элементов. М., Госатомиздат, 1962.
2. В. В. Гончаров и др. Доклад № П323, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).

3. Л. В. Грошев и др. «Атомная энергия», 21, 412 (1966).
4. Б. С. Желепов, Л. К. Пекер. Схемы распада радиоактивных ядер.  $A \leq 100$ . М.—Л., Изд-во АН СССР, 1966.
5. Б. С. Желепов, Л. К. Пекер, В. О. Сергеев. Схемы распада радиоактивных ядер.  $A \geq 100$ . М.—Л., Изд-во АН СССР, 1963.
6. «Атомная техника за рубежом», № 7, 15 (1967).

## Влияние размеров твэла на теплоотдачу при сверхкритическом давлении

Н. Л. КАФЕНГАУЗ, М. И. ФЕДОРОВ

К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал по теплоотдаче к движущейся по трубе жидкости при сверхкритических давлениях. В некоторых случаях результаты опытов расходятся с теоретическими положениями работ [1,2] и пр., согласно которым при превышении критического значения температуры стенки должно происходить ухудшение теплообмена. По данным работ [3, 4], в этих условиях происходит улучшение теплоотдачи, подобное поверхностному кипению. По мнению авторов работы [5], улучшение теплообмена свойственно лишь тем жидкостям, которые при достаточно высокой температуре подвержены термическому разложению с образованием более легких компонентов.

Проведенными нами исследованиями удалось выявить, что улучшение теплообмена может наблюдаться у жидкостей как разлагающихся, так и неразлагающихся. Решающую роль в характере теплообмена играют режимные параметры течения жидкости (давление  $p$  и скорость течения  $w$ ), а также геометрические размеры

и конструкция твэлов. Значение режимных параметров в определении характера теплообмена было показано в работе [6]. В настоящем сообщении излагаются результаты влияния геометрических размеров и конструкции твэла на характер теплообмена.

Опыты проводились на теплообменной установке с принудительной подачей жидкости. В качестве твэла использовали горизонтально расположенную трубку из стали X18H10T, нагреваемую электрическим током. Рабочей жидкостью служил диизопропилциклогексан ( $p_{кр} = 1,96 \text{ Мн/м}^2$ ,  $T_{кр} = 650^\circ \text{ К}$ ). Среднемассовая температура жидкости во всех опытах не превышала  $300\text{--}350^\circ \text{ К}$ . В процессе исследования определяли значение температуры стенки, при которой начиналось улучшение теплообмена ( $T_y$ ). Выяснено, что эта температура зависит от диаметра проходного сечения твэла и длины нагреваемой части (рис. 1). Опытные данные на рис. 1 соответствуют условиям:  $p = 3,9 \text{ Мн/м}^2$ ,  $w = 5\text{--}20 \text{ м/сек}$ , длина твэла  $L = 30 \text{ мм}$ . С увеличением диаметра  $d$  температура  $T_y$  увеличивалась, причем зависимость эта была тем сильнее, чем меньше скорость течения жидкости.

Для определения роли длины нагреваемой части применяли биметаллический твэл. До начала испытаний трубку размером  $2,7 \times 0,2 \text{ мм}$  из стали X18H10T покрывали электролитическим способом слоем меди толщиной  $20 \text{ мк}$ . После изготовления из такой трубки твэла медь на необходимой длине вытравливали кислотой, так что твэлом служила часть трубки, непокрытая медью. Таким способом можно было изменять длину

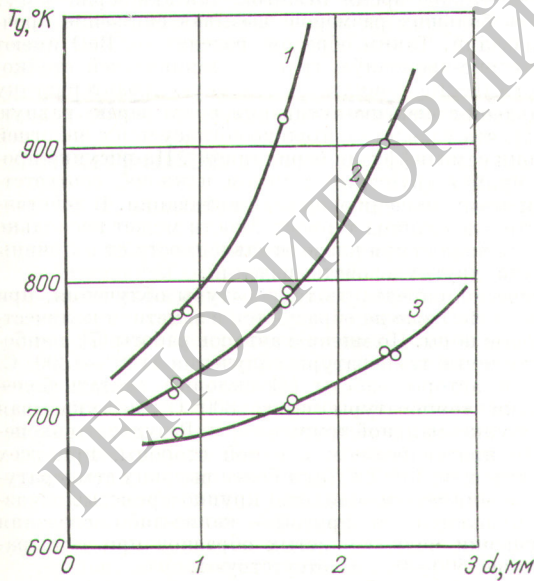


Рис. 1. Зависимость температуры начала улучшенного теплообмена от диаметра твэла при скоростях течения жидкости (м/сек):

1 — 5; 2 — 10; 3 — 20.

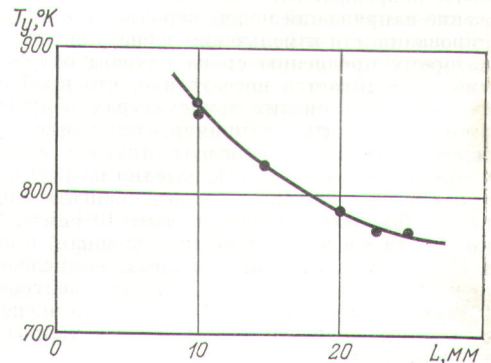


Рис. 2. Зависимость температуры начала улучшенного теплообмена от длины нагреваемой части твэла (диаметр трубки 2,3 мм).

твзла ступеньками в 1—5 мм. На рис. 2 показана зависимость температуры  $T_y$  от длины твзла. Уменьшение длины привело к увеличению  $T_y$ , а при длине, меньшей 8 мм (опыты при  $p=3,4 \text{ Мн/м}^2$ ,  $w=15 \text{ м/сек}$ ), улучшения теплообмена не наступало вовсе.

Определенную роль в характере теплообмена играет форма канала. Многочисленные опыты по теплоотдаче с наружным обтеканием нагреваемого элемента ни в одном случае не сопровождались улучшением теплообмена. В этих опытах нагреваемый элемент в виде пластинки шириной 3,2 мм и толщиной 0,4 мм располагали по осевой линии вертикально расположенного цилиндрического канала диаметром 4 мм по всей длине канала.

Необходимо отметить, что во всех случаях улучшение теплообмена сопровождалось появлением высокочастотных колебаний давления (частота 5—20 кгц, амплитуда 0,2—4 Мн/м<sup>2</sup>). Можно предположить, что улучшение теплообмена обусловлено именно этими колебаниями, возникающими при образовании на поверхности нагрева «газовой» фазы, когда  $T_y > T_{\text{макс}}$ , ( $T_{\text{макс}}$  — температура максимума теплоемкости), а  $T_{\text{ж}} < T_{\text{макс}}$ .

## Оценка радиационной стойкости окиси бериллия при различных температурах

В. И. КЛИМЕНКОВ, А. В. ХУДЯКОВ

Как известно, при экспериментах и эксплуатации в реакторах блоки и другие изделия из BeO, облучавшиеся при низких температурах (до 100° С), разрушались в порошок. С повышением температуры облучения радиационные эффекты в изделиях из BeO уменьшаются [1], но в этом случае начинают играть роль пузырьки гелия, образующегося по ядерным реакциям ( $n, \alpha$ ) и ( $n, 2n$ ) на Be<sup>9</sup>. Таким образом, при низких и высоких температурах облучения существуют механизмы, приводящие к разрушению изделий из BeO. В связи с этим интересно найти интервал температур, в котором BeO будет обладать удовлетворительной радиационной стойкостью.

Основная причина разрушения компактных изделий из BeO при невысоких температурах облучения — анизотропность коэффициента расширения [2]. К тому же при низкотемпературном облучении границы зерен более повреждаемы, чем объем зерна [3]. Поэтому снижение напряжений между зернами (посредством текстурования или взмечдения зерна) приводит лишь к некоторому продлению срока службы облучаемых изделий. Складывается впечатление, что проблему стойкости BeO при низких температурах облучения можно было бы решить, например, созданием на границах зерен пластичных прослоек другого вещества.

Согласно расчетам [4], изделия из BeO при температурах выше 800° С могут выдерживать интегральные потоки быстрых нейтронов более  $10^{22} \text{ см}^{-2}$ . На рисунке приведена расчетная кривая (сплошная) в координатах  $1/T^\circ \text{ К} - \tau$ , где время  $\tau$  (в часах) вычислено в предположении, что поток быстрых нейтронов равен  $10^{14} \text{ нейтр/см}^2 \cdot \text{сек}$ . Можно видеть, что экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с ходом этой кривой.

Температура  $\alpha - \beta$ -фазового перехода 2050° С является наивысшей температурной границей применимости BeO, поскольку компактные образцы, как правило, разрушаются даже при однократном переходе этой

Вероятно, что параметры колебаний давления (амплитуды и частоты) определяются акустическими свойствами двухфазного потока и геометрическими размерами рабочего участка теплообменной установки.

Поступило в Редакцию 5/V 1970 г.

### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Deissler. Trans ASME, 76, № 1 (1954).
2. Н. И. Мелик-Пашаев. «Теплофизика высоких температур» № 6 (1966).
3. K. Goldmann. Internat. Developments on Heat Transfer, 1961.
4. W. Hines, H. Wolf, ARS Journal, 32, No. 3, (1962).
5. Н. Т. Аладьев и др. Тепло- и массоперенос. Т. I. Минск, 1965.
6. Н. Л. Кафенгауз, М. И. Федоров. «Инж.-физ. ж.», 14, № 5 (1968).

УДК 621.039.532.5:621.039.533

границы (сплошная вертикальная прямая на рисунке). Если удастся отыскать способ изготовления BeO с устойчивой при нормальных температурах  $\beta$ -фазой, то, возможно, это приведет к созданию материала с весьма хорошей радиационной стойкостью.

Известно, что при спекании прессовок не всегда выгодно применять чрезмерно высокие температуры или продолжительное время отжига, так как зерна могут достигать больших размеров, вызывая снижение прочности изделий. Таким образом, изделия из BeO имеют температурно-временную границу термической стойкости. Естественно принять за основную характеристику этого явления энергию активации роста зерен, равную 4,7 эв [5], что удовлетворительно согласуется с энергией активации самодиффузии бериллия [6]. На рисунке проведена прямая (пунктир) с углом наклона, соответствующим этому значению энергии активации. В действительности эта граница термической стойкости может несколько смещаться вправо или влево, в зависимости от величины зерна или других свойств изделий.

Интересно определить температуры облучения, при которых в BeO еще не образуются в заметном количестве гелиевые поры. По мнению авторов работы [7], наиболее приемлемые температуры облучения 1100°—1300° С, тогда как авторы работы [4] склонны считать более выгодными температуры выше 800° С, не указывая при этом максимальной температуры. Результаты экспериментов противоречивы: с одной стороны, при всех температурах до 1100° С (при более высоких температурах облучения не проводились) крупнозернистые образцы разрушаются, с другой — какие-либо сведения о разрушении мелкозернистых образцов при температурах выше 500—600° С отсутствуют.

В связи с этим было решено изучить при отжиге в лабораторных условиях температурно-временные зависимости образования гелиевых пор в материале, предварительно облученном при низкой температуре, т. е. с равномерным распределением гелия в кристалли-