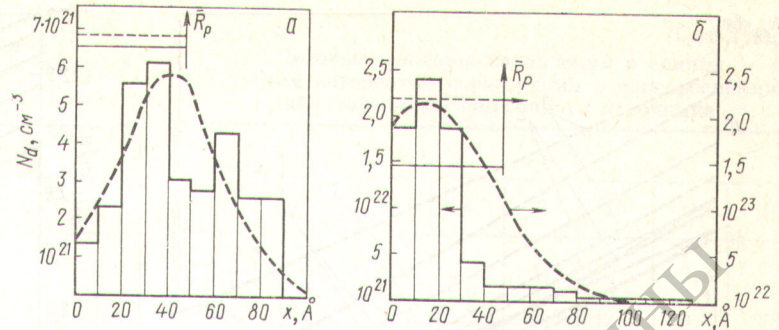


Распределение дефектов по глубине материала, построенное по совокупности автоионных изображений поверхностных слоев при дозе облучения  $1 \cdot 10^{13}$  (а) и  $5 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> (б)



Кроме обедненных зон, содержащих несколько сот вакансий, были обнаружены и более мелкие скопления, содержащие около десятка вакансий. Расстояние от мелких вакансионных скоплений до крупных составило несколько десятков ангстрем. По-видимому, такие скопления являются обедненными зонами субкаскадов смещений энергией  $\sim 1$  кэВ. Перекрытие каскадов смещений с одновременным отжигом повреждений внутри каскадов в настоящее время изучено сравнительно мало. Единственным способом, позволяющим исследовать этот процесс на атомарном уровне, по-видимому, является автоионная микроскопия.

К важнейшим параметрам, необходимым для сопоставления, например, распухания при нейтронном облучении и имитационном эксперименте, относится распределение дефектов по глубине образца. Экспериментально получить такие сведения весьма затруднительно, особенно при сравнительно небольшой энергии бомбардирующих ионов. На рисунке показано, как распределяются вакансии по глубине при различных дозах облучения, причем направление оси  $x$  совпадает с направлением пучка ионов. Наряду с экспериментальными гистограммами построены и теоретические кривые (пунктир). Значения средней плотности вакансий (сплошная линия) и средней плотности смещений (пунктир), определенные соответственно из гистограммы и теоретической кривой, отличаются на 4,4%. Смещение максимума гистограммы к поверхности по мере возрастания дозы облучения вызвано распылением образца. Судя по изменению распределения дефектов, коэффициент распыления равен 60—70 атом/ион. Согласно расчетам, средняя концентрация смещений при данной дозе должна составлять  $2,2 \cdot 10^{23}$  см<sup>-3</sup>. Однако наблюдаемое значение равно  $1,45 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Причина такого расхождения заключается в специфике процесса развития каскада смещений в кристалле, обладающем высокой концентрацией вакансий. Образующиеся в каскаде смещенные атомы могут попадать в уже имеющиеся вакансии, что приведет к снижению общего числа создаваемых дефектов.

Как уже указывалось, основным видом радиационных повреждений при дозе облучения  $1 \cdot 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup> являются обедненные зоны единичных каскадов смещений. Перекрытие каскадов при дозе  $1 \cdot 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к тому, что наряду с этим возникают дефектные области от слияния нескольких обедненных зон. С увеличением дозы

облучения до  $5 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> происходит перекрытие множества каскадов, сопровождающееся появлением обширных дефектных областей. Перекрытие каскадов снижает эффективность образования радиационных дефектов. Так, если при дозах облучения  $1 \cdot 10^{12}$  и  $1 \cdot 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> каждый ион образует в среднем по 300 вакансий, то при дозе облучения  $5 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> уже только 22 вакансии. Средняя концентрация вакансий в поврежденном слое при дозе облучения  $1 \cdot 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup> составляет  $3,5 - 7,0 \cdot 10^{-3}$  атомных долей, при дозе  $1 \cdot 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> — она в 10 раз меньше, а при дозе  $5 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> — не превышает 0,09—0,17 атомных долей. Согласно [8], объем вакансии в вольфраме равен 0,42  $\Omega$ . Таким образом, среднее вакансионное распухание поврежденного слоя при максимальной дозе облучения может достигать 7%. При высоких дозах облучения не обнаружено образования пор размером более 10 Å, однако существующие мелкие поры при соответствующих термических условиях могут играть роль зародышей более крупных пор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобков А. Ф. и др. «Атомная энергия», наст. вып., с. 325.
2. Doran D. «Rad. Effects», 1970, v. 2, p. 249.
3. Beeler J., Beeler M. In: Proc. Intern. Conf on Fundamental Aspects of Radiation Damage in Metals. Gatlinburg, 6—10 Oct. 1975, CONF-751006-P1, US ERDA, v. 1, p. 28.
4. Кирсанов В. В. В кн.: Реакторное материаловедение. М., изд. ЦНИИатоминформ, 1978, т. 1, с. 340.
5. Beavan L., Scanlan R., Seidman D. «Acta Metallurgica», 1971, v. 19, p. 1339.
6. Кирсанов В. В. «Физика твердого тела», 1977, т. 19, с. 1184.
7. Beeler J., Yoshikawa N. In: Materials Research and Standards, 1971, v. 11, N 29, p. 50.
8. Томпсон М. Дефекты и радиационные повреждения в металлах, М., «Мир», 1971.

Поступило в Редакцию 15.12.78  
В окончательной редакции 08.01.80

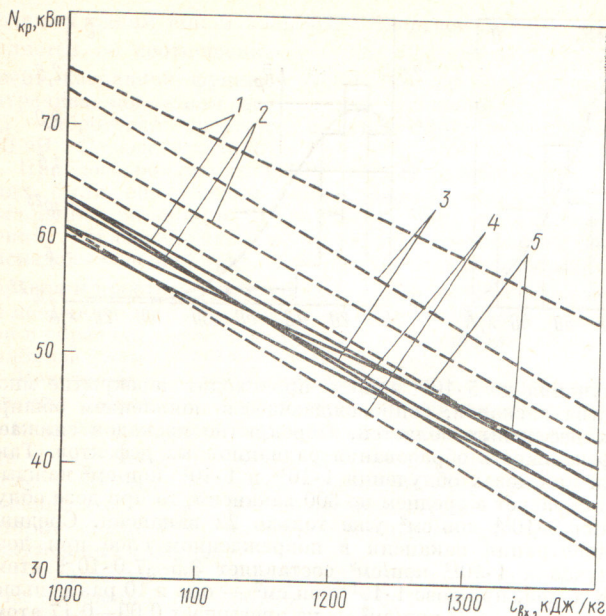
УДК 621.039

О влиянии растворенного в воде газа на критические тепловые нагрузки

ФИСЕНКО В. В., КАТКОВ Ю. Д., ЛАСТОЧКИН А. П., МАКСИМОВ В. И.

В связи с возрастающими требованиями к надежности элементов оборудования АЭС и в первую очередь к активным зонам энергетических реакторов в СССР и за рубежом опубликован ряд работ, посвященных исследованию кри-

зиса теплообмена при вынужденном течении воды в трубах. В 1976 г. были опубликованы табличные данные для расчета кризиса теплоотдачи при кипении воды в равномерно обогреваемых круглых трубах [1]. В таблицах приведены



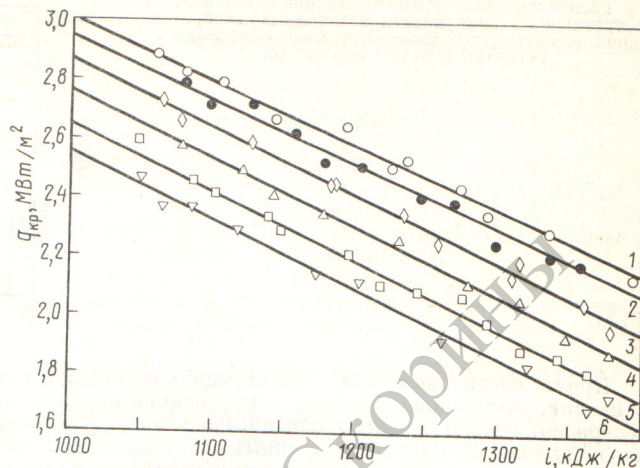
Р и с. 1. Сравнение эксперимента (---) и расчета (—) [1] при давлении 18,0 (1); 16,0 (2); 14,0 (3); 12,0 (4) и 10,0 (5) МПа

тщательно выверенные и согласованные экспериментальные данные о критических тепловых нагрузках и граничном паросодержании, полученные при кипении воды в технически гладких трубах диаметром 8 мм при относительной длине канала  $l/d \geq 20$ , диапазоне давления от 3 до 20 МПа, массовой скорости от 0,5 до 5,0 Мг/(м<sup>2</sup>·с), недогреве от 0 до 75 К и шаге изменения относительной энтальпии 0,05.

Обобщены данные, полученные в экспериментах как на дегазированной воде, так и на воде с концентрацией газа, измерение которой либо вообще не проводилось, либо применявшиеся способы дегазации и контроля не позволяли с необходимой точностью оценить остаточное количество растворенного газа [2, 3]. Таким образом, целесообразно оценить, насколько велико может быть отличие значений критических тепловых нагрузок, рассчитанных по рекомендациям работы [1], от значений, найденных опытным путем при близком к нулю содержании растворенного газа.

С этой целью была создана экспериментальная установка с газовой и паровой системой компенсации объема теплоносителя, системой очистки и контроля содержания растворенного в воде газа. Потребность определения концентрации растворенного газа не превышала  $\pm 5\%$ . Используемая система очистки позволяла добиваться остаточной концентрации растворенного в воде газа не более 30 н. см.<sup>3</sup> N<sub>2</sub>/кг Н<sub>2</sub>O.

Экспериментальный участок представлял собой цилиндрический канал из стали 0Х18Н10Т длиной 1,0 м внутренним диаметром  $8 \cdot 10^{-3}$  м с равномерным электрообогревом по длине. Теплоноситель в канале двигался снизу



Р и с. 2. Зависимость  $q_{кр} = f(i_{вх})$  для  $P = 18$  МПа по данным эксперимента при  $C = 0$  (○); 500 (●); 1200 (◇); 220 (△); 3200 (□); 3500 (▽) н. см.<sup>3</sup> N<sub>2</sub>/кг Н<sub>2</sub>O

вверх с постоянной во всех экспериментах массовой скоростью  $\rho W = 2000$  кг/(м<sup>2</sup>·с), на вход в экспериментальный участок подавалась дегазированная вода с разной степенью недогрева до насыщения. Критический тепловой поток фиксировался по резкому возрастанию температуры стенки канала. Эксперименты проводились в таком диапазоне начальных параметров:  $P = 10 \div 18$  МПа,  $\Delta t_H = 10 \div 100$  К.

На рис. 1 приведено сопоставление расчета, выполненного по рекомендациям [1], с экспериментальными данными. Расхождение расчетных и экспериментальных данных минимально при давлении 10–12 МПа. При  $P = 18$  МПа и малом недогреве это расхождение составляет  $>25\%$ . На рис. 2 приведены полученные авторами экспериментальные данные о влиянии концентрации газа в воде на критические тепловые нагрузки.

Таким образом, становится необходимым исследовать влияние растворенного в воде газа на критические тепловые нагрузки в широком диапазоне начальных параметров. Это влияние может оказаться существенным в установках с газовой системой компенсации объема теплоносителя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табличные данные для расчета кризиса теплоотдачи при кипении воды в равномерно обогреваемых круглых трубах. «Теплоэнергетика», 1976, № 9, с. 90.
2. Субботин В. И. и др. В кн.: Исследования теплоотдачи к пару и воде, кипящей в трубах при высоких давлениях. М., Атомиздат, 1958.
3. Алексеев Г. В., Зенкевич Б. А., Субботин В. И. В кн.: Труды ЦКТИ, «Котлотурбостроение». Л., 1965, вып. 58, с. 123.

Поступило в Редакцию 04.12.78  
В окончательной редакции 11.12.79

УДК 539.121.72:539.122

## Влияние флюоресценции на факторы накопления гамма-излучения в свинце

БУТУЕВА И. Н., ТРОФИМОВ И. Н.

Расчет защиты от  $\gamma$ -излучения радиоактивных источников энергией 200 кэВ и менее обычно производят по кратностям ослабления, представленным в справочнике [1], которые учитывают большой запас значений факторов

накопления. Однако в ряде практических задач требуется сокращение массы свинцовой защиты до минимума, для чего необходимы более точные расчеты факторов накопления.