

изменении рН среды содержание i -го радиоактивного элемента в воде может значительно изменяться (процесс сорбции и десорбции с поверхностей пленок).

Следовательно, значения $K_i^{\text{вид}}$, определенные экспериментально, очень сильно зависят от условий, при которых они определялись. Кроме того, давно установлено [5], что сорбированные на осадках радиоактивные элементы теряют свои индивидуальные свойства, т. е. в системе «пар — вода + взвесь» следует рассматривать распределение между водой и паром не данного радиоактивного элемента, а осадка. Наконец, многие радиоактивные элементы III—VIII групп периодической системы элементов в нейтральной и щелочной средах находятся в растворе в виде радиоколлоидов или псевдоколлоидов. Насколько нам известно, поведение радиоколлоидов в водных системах при высоких температурах пока не изучено.

Исходя из изложенных выше соображений, следует ожидать, что во многих случаях различие в значениях $K_i^{\text{вид}}$ для i -го радиоактивного элемента может быть в 1000 и более раз. Данные, приведенные авторами работы [4, табл. 3, 4, рис. 2), подтверждают этот вывод: на однотипных реакторах при одних и тех же параметрах коэффициенты распределения для $\text{Co}^{58,60}$ получены равными $5 \cdot 10^{-2}$ и $3,3 \cdot 10^{-4}$, для Fe^{59} — 0,11 и 10^{-3} . Данные, приведенные в табл. 4, также подтверждают этот вывод: при одних и тех же параметрах работы выпарной установки $K_{\text{оч}}$ сильно зависит от солевого содержания в растворе, т. е. чем больше осадков образуется в жидкой фазе, тем выше $K_{\text{оч}}$.

Приведенные данные показывают, что при использовании выпарных аппаратов типа ВН для очистки малосолевых радиоактивных растворов оптимальные режимы их работы необходимо подбирать опытным путем, а для промывки пара достаточно устанавливать один промывочный лист. Коэффициенты распределения радиоактивных элементов между кубовым остатком и паром непостоянны и зависят от многих факторов. Поэтому предлагаемый некоторыми авторами метод расчета распределения радиоактивных элементов между паром и раствором, основанный на уравнении материального баланса, практически нельзя использовать, так как многие закономерности поведения отдельных радиоактивных элементов в системах «пар — раствор» и «пар — твердая фаза» при высоких температурах и давлениях пока изучены недостаточно.

Поступила в Редакцию 8/VII 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Колич, Д. В. Радун. Выпарные станции. М., Машгиз, 1963.
2. В. Ф. Багрецов и др. Practices in the treatment of low- and intermediate level radioactive wastes. Vienna, IAEA, 1966, p. 339.
3. А. Г. Касаткин, Ю. И. Дытнерский, С. И. Умарев. «Химическая промышленность», № 3, 38 (1958).
4. О. И. Мартынова и др. «Атомная энергия», 23, 305 (1967).
5. А. К. Лаврухина, Т. В. Малышева, Ф. И. Павлоцкая. Радиохимический анализ. М., Изд-во АН СССР, 1963, стр. 14.

Некоторые вопросы гидродинамики кипящего корпусного реактора

А. П. САРЫГИН, И. Н. СОКОЛОВ, В. И. КОНДРАТЬЕВ, Е. В. КУЛИКОВ,
И. С. ДУБРОВСКИЙ, Е. В. КОЗИН

УДК 621.039.576

Отвод тепла от реактора с помощью естественной конвекции кипящей воды во многом зависит от гидродинамических характеристик циркуляционного контура. Исследование циркуляционного контура реактора ВК-50 позволило уточнить количественные значения некоторых параметров, заложенных в конструкцию реактора, разработать меры, обеспечивающие надежную эксплуатацию, и получить экспериментальные данные, необходимые для проектирования реакторов больших мощностей.

Циркуляционный контур

Описание реактора ВК-50 дано в работах [1, 2]. Контур естественной циркуляции реактора состоит из системы параллельных парогенерирующих кассет активной зоны, «тягового» участка и двух параллельных опускных каналов. Наружный («холодный») опускной канал вместе с центральной группой кассет активной зоны и внутренний («горячий») опускной канал с периферийными кассетами образуют две ветви

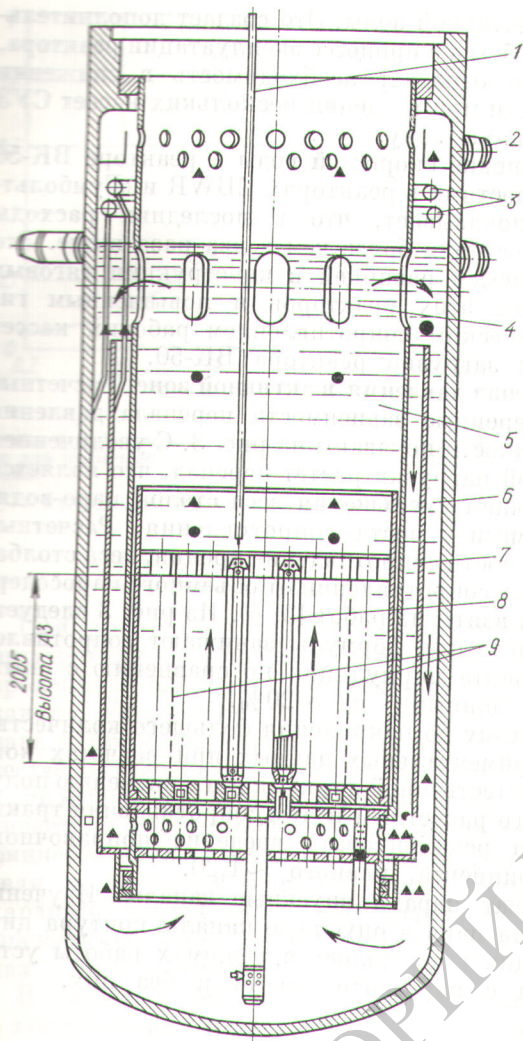


Рис. 1. Размещение датчиков внутрикорпусных измерений:
 1 — канал измерения поля энерговыделения; 2 — патрубок отбора пара; 3 — коллекторы питания; 4 — линия среднего уровня; 5 — тяговый участок; 6 — холодный спуск; 7 — горячий спуск; 8 — рабочая кассета; 9 — граница малой активной зоны; □ — датчики скорости; ▲ — датчики температуры; ● — датчики статического давления.

контура, имеющие общий тяговый участок (рис. 1).

В центральную группу кассет малой активной зоны первой загрузки входят 42 рабочие кассеты и 19 кассет системы СУЗ; остальные 30 рабочих кассет составили периферийную часть активной зоны. Тяговый участок контура, в котором паро-водяная смесь, вышедшая из кассет активной зоны, создает основной движущий напор, представляет собой обечайку внутренним диаметром 2,94 и высотой 2,8 м.

Кассеты СУЗ имеют индивидуальные тяговые участки переменной высоты.

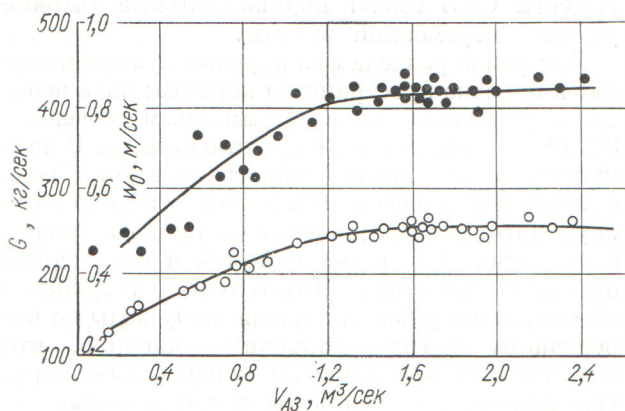
На уровне раздела фаз паровые пузыри выходят в паровое пространство корпуса; вода через 16 переливных окон (суммарным сечением $3,2 \text{ м}^2$) направляется в опускные каналы. В циркуляционные петли парогенераторов вода с помощью насосов отбирается из холодного опускного участка; питательная вода может быть подана как в горячий, так и в холодный опускные участки. Питательные устройства обеспечивают равномерную раздачу воды по поперечному сечению опускных каналов, что обеспечивает эффективную конденсацию пара, увлеченного потоком воды в эти каналы.

Система измерений

Реактор оснащен контрольно-измерительными приборами, которые позволяют получать информацию об эксплуатационной надежности, а также данные по гидродинамическим параметрам циркуляционного контура. Давление, расход теплоносителя, температура в различных точках реакторной установки определяются с помощью стандартных приборов. Размещение датчиков внутрикорпусных измерений на реакторе показано на рис. 1. Датчики скорости, расположенные в рабочих и компенсирующих кассетах, позволяют определить величину и направление скорости циркуляции теплоносителя, относительная погрешность в измерении которой составила $\pm 13\%$. При измерении перепадов давления на разных участках контура циркуляции исследовались гидравлические сопротивления и полезные напоры контура с относительной погрешностью 5—10%. Для предотвращения вскипания воды импульсные трубки охлаждались питательной водой. Большинство датчиков внутрикорпусных измерений размещено равномерно по периметру опускных и тяговых участков; датчики расхода перед установкой в реактор были градуированы на стенде вместе с комплектами вторичных приборов.

Результаты исследования

Исследования проводились в основном при давлениях 35 и 70 бар в диапазоне мощностей от пусковой до номинальной. Режимы работы установки можно разделить на две группы: работу с получением пара только в реакторе и совместную выработку пара в парогенераторах и реакторе.



Р и с. 2. Зависимость расхода теплоносителя по контуру G (●) и скорости на входе в рабочие кассеты w_0 (○) от объемной паропроизводительности активной зоны V_{A3} при $P = 30 \div 70$ бар.

Расход теплоносителя. Изменение общего расхода воды, протекающей через активную зону, и скорости воды в одной из рабочих кассет представлено на рис. 2. Скорость воды увеличивается до значений паропроизводительности $1,0-1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$, а затем остается практически неизменной. Количественный и качественный характер зависимости при различном положении кассет СУЗ и разных недогревах теплоносителя до температуры насыщения изменяется незначительно. В широком диапазоне мощностей расход воды имеет весьма пологий максимум, что объясняется равновесием между увеличивающимся (при росте паровой нагрузки) сопротивлением контура циркуляции и большим значением движущего напора тягового участка. Установлено, что наличие общего тягового участка при изменении радиального коэффициента неравномерности энерговыделения в пределах $1,2-1,4$ позволяет получить постоянство скоростей воды по радиусу активной зоны. Благодаря индивидуальным тяговым участкам над каждой из топливных частей кассет СУЗ в них устанавливается повышенное значение объемного паросодержания. Это приводит к примерно вдвое большим скоростям циркуляции теплоносителя через эти кассеты по сравнению с рабочими.

При паропроизводительности реактора $60-80 \text{ т/ч}$ и выше в верхней части общего тягового участка, расположенного над индивидуальными тяговыми участками кассет СУЗ, содержится достаточно большое количество пара, чтобы через эти кассеты устанавливалась надежная циркуляция и в том случае, когда топливная часть кассет СУЗ полностью выведена из пре-

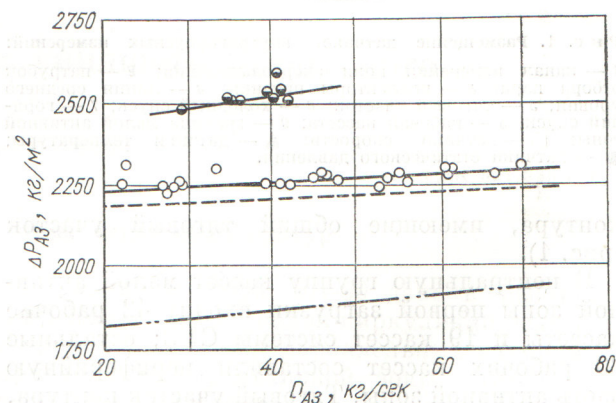
делов активной зоны. Это создает дополнительные удобства в процессе эксплуатации реактора, так как отпадает необходимость в снижении мощности при введении нескольких кассет СУЗ в активную зону.

Сравнение скоростей воды в реакторе ВК-50 со скоростями в реакторах ЕВWR и «Гумбольдт-Бей» показывает, что в последних расходы теплоносителя более чем в два раза выше. Это объясняется разницей в конструкции тяговых участков этих реакторов и повышенным гидравлическим сопротивлением рабочих кассет первой загрузки реактора ВК-50.

Перепад давления в активной зоне. Расчетные и измеренные зависимости перепада давления от мощности показаны на рис. 3. С увеличением паровой нагрузки растет перепад, что является следствием уменьшения веса столба паро-водяной смеси и роста сопротивления. Расчетные зависимости сопротивления трения, веса столба, местных сопротивлений от объемного паросодержания взяты из работ [3, 4]. Из рис. 3 следует, что расчетные формулы занижают сопротивление тракта циркуляции по сравнению с опытными данными на $\sim 20\%$.

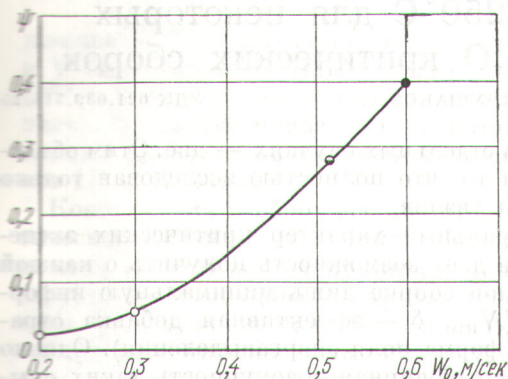
Поэтому до накопления большего количества экспериментальных данных при расчетах контура естественной циркуляции к значению полученного расчетным путем сопротивления тракта можно рекомендовать введение поправочного коэффициента, равного $\sim 1,20$.

Захват пара в опускные каналы. Изучение захвата пара в опускные каналы контура циркуляции проводилось в режимах работы установки с парогенераторами и без них.



Р и с. 3. Зависимость перепада давления на активной зоне ΔP от паропроизводительности активной зоны D_{A3} .

Экспериментальные значения: ○ — при $P = 70$ бар; ● — при $P = 30$ бар. Расчетные значения: — — — при $P = 30$ бар; - · - · - · при $P = 70$ бар.



Р и с. 4. Сравнение опытных данных по захвату пара для различных кипящих реакторов корпусного типа:

○ — ВК-50; ● — EBWR; ● — «Гумбольдт-Бей».

При работе реактора без парогенераторов питательная вода подавалась раздельно и одновременно в холодную и горячую части опускного канала. Установлено, что коэффициент захвата пара ψ , представляющий собой отношение количества захваченного в опускные каналы пара к производительности активной зоны, увеличивается с ростом мощности. Зависимость коэффициента захвата пара от скорости теплоносителя в опускных каналах носит пороговый характер: началу увлечения пара соответствует значение скорости теплоносителя в этих каналах — 0,35 м/сек (рис. 4).

В режимах без подачи питательной воды в холодную или горячую часть опускного канала при указанных выше скоростях снижения движущегося напора практически не наблюдается. Это позволяет говорить о возможном зависании пузырьков пара на начальном участке опускного канала. Полученные данные достаточно хорошо согласуются с экспериментальными результатами [4, 5] по предельным значениям скорости всплытия пузырьков пара. Важно отметить, что увеличение скорости теплоносителя в опускном канале приводит практически к линейной зависимости количества захваченного пара от расхода котловой воды.

При включении одного или двух парогенераторов коэффициент захвата пара возрастает соответственно до значений 0,35 и 0,45, что объясняется близостью патрубков отбора котловой воды на парогенераторы к переливным окнам. В результате повышенные скорости

в районе отборных патрубков увеличивают захват пара в опускные каналы.

Из изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Естественная циркуляция представляет собой простой и компактный способ теплоотвода для корпусных кипящих реакторов.

2. Постоянство расхода в широком диапазоне изменения давления и мощности свидетельствует о надежности реактора в стационарных, переходных и аварийных режимах работы; это означает также, что при повышенных уровнях мощности (60—70%) высвобождается дополнительный запас реактивности из-за уменьшения среднего объемного паросодержания в активной зоне.

3. Возможность подачи различных количеств питательной воды в холодный и горячий опускные участки реактора позволяет высвободить дополнительную реактивность и увеличить время работы горючего между перегрузками.

4. Общий тяговый участок обеспечивает постоянство расхода во всех кассетах активной зоны, величина которого не зависит от энерговыделения в отдельных кассетах.

5. Для первой топливной загрузки реактора полезный напор тягового участка из-за несоответствия геометрических размеров с размерами активной зоны ($D_{AZ}/D_{ТУ} = 0,61$) был относительно небольшим, а гидравлическое сопротивление рабочих кассет оказалось завышенным.

Эти факторы определили высокие значения средних объемных паросодержаний (до 35—45%) и небольшие скорости циркуляции ($w_0 \sim 0,5$ м/сек).

Поступила в Редакцию 5/II 1970 г.
В окончательной редакции 21/IV 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

- И. Н. Соколов и др. Доклад № 306, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
- И. Н. Соколов и др. «Теплоэнергетика», № 5, 62 (1968).
- Н. В. Тарасова. «Гидравлическое сопротивление при течении воды и паро-водяной смеси в обогреваемых трубах и кольцевых каналах». Труды ЦКТИ, т. 59, Л., 1965, стр. 47.
- А. Я. Крамеров, Я. В. Шевелев. Инженерные расчеты ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
- Д. А. Лабунцов и др. «Теплоэнергетика», № 4, 62 (1968).

