

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Лейпунский и др. «Атомная энергия», 18, 342 (1965).
2. А. И. Лейпунский и др. Доклад № 369, представленный на Третью женеvскую конференцию по атомной энергии (Женева, 1964).
3. А. И. Лейпунский, В. М. Мурогов, М. Ф. Троянов. Доклад, представленный на совещание экспертов по использованию тория. Вена, МАГАТЭ, 1966; см. также сб. «Вопросы физики ядерных реакторов», т. I. Обнинск, 1968, стр. 20.
4. C. Zaleski, D. Smidt. ANS-100, 275 (1965).
5. D. Okrent Nuclear Safety, 6, 340 (1965).
6. R. Hankel et al NDA, 2164—3 (1962).
7. В. В. Хромов и др. «Атомная энергия», 17, 3 (1964).
8. А. И. Новожилов и др. Симпозиум СЭВ «Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах». Обнинск, 1967.
9. В. В. Хромов и др. Сб. «Физика ядерных реакторов». Под ред. Л. Н. Юровой. Вып. 4. М., Атомиздат, 1968, стр. 159.
10. Г. И. Марчук и др. Критические параметры гомогенных размножающих систем. М., Атомиздат, 1965.
11. Л. П. Абагян и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964.
12. Л. П. Абагян и др. Nucl. Data for Reactors, Vol. 2, Vienna, IAEA, 1970, p. 667.
13. А. Н. Шмелев. Сб. «Инж. физ. вопросы ядерных реакторов», М., Атомиздат, 1966, стр. 85.
14. W. Loewenstein, B. Blumenthal. ANL-7420, 751 (1965).
15. W. Allen, D. Stoker, A. Campise, Proc. of Second International Thorium Fuel Cycle Symposium. Tennessee, Gatlinburg, 1966, p. 81.

Экспериментальное исследование пусковых режимов одноконтурной петли с естественной циркуляцией

В. М. СЕЛИВАНОВ, В. Г. КОНОЧКИН, Н. П. ДОРМИДОНТОВ, В. Н. СМЫСЛОВ

УДК 621.039.514.23

На водяной петле естественной циркуляции Первой АЭС проведены экспериментальные исследования пусковых режимов одноконтурного канального реактора типа реактора Билибинской АТЭЦ [1].

Экспериментальная петля (рис. 1) представляет собой замкнутый контур, образованный установленными в реакторе каналами, а также подъемными и опускными трубами, которые присоединены к барабану-сепаратору. Контур снабжен системой конденсации пара, системами подпитки и продувки. В схеме петли предусмотрена возможность подачи азота в паровое пространство барабана-сепаратора для создания газовой подушки. Движение теплоносителя в контуре осуществляется за счет естественной циркуляции; имеющийся в схеме циркуляционный насос используется только для предварительных экспериментов по градуировке мощности каналов в водяном режиме. На схеме (см. рис. 1) показаны отметки высот расположения основных элементов контура (в метрах).

Эксперименты проводились с пятью одинаково зашайбованными каналами типа каналов Первой АЭС [2], отличавшимися увеличенным числом твэлов (пять), а также нижним расположением компенсаторов на подъемных трубах. Относительные мощности каналов составили: 1,0; 0,81; 0,80; 0,76; 0,65.

Петля оборудована системой КИП, обеспечивающей измерение и запись температур теп-

лоносителя по участкам контура и расходов как в отдельных каналах, так и суммарного в петле. Для контроля температуры наружной оболочки твэлов по три твэла в каждом канале снабжены поверхностными термопарами.

В экспериментах по пусковым режимам ставились следующие задачи: определение величины первоначального давления в контуре с целью обеспечения устойчивого режима разогрева; выяснение влияния начальных условий (в частности, опрокинутой циркуляции в отдельных каналах) на развитие движения теплоносителя в контуре; определение влияния величины пусковой мощности на характер развития циркуляции; сопоставление методов пуска петли — с газовой подушкой или с полностью заполненным водой контуром.

Были исследованы три метода пуска петли на естественной циркуляции:

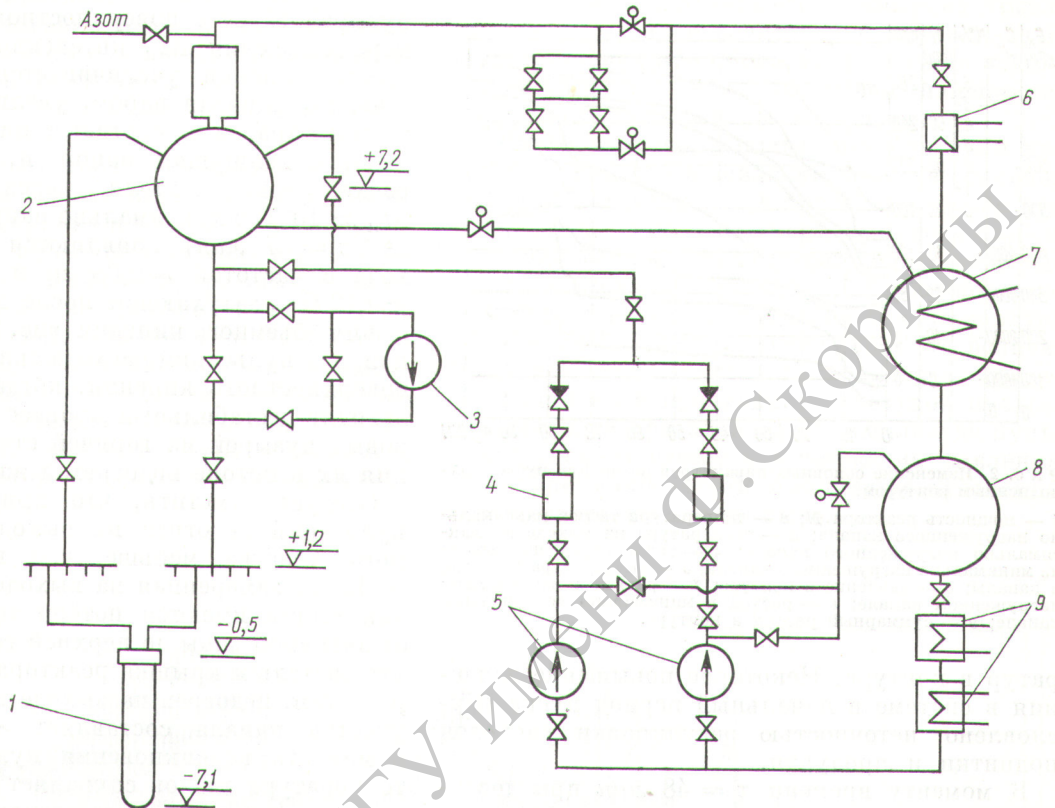
пуск с полностью заполненным контуром ($p = 20 \div 50 \text{ ама}$);

пуск с газовой подушкой ($p = 5 \div 30 \text{ ама}$);

пуск с атмосферного давления (частный случай режима с газовой подушкой, $p = 1 \text{ ама}$).

Эксперименты по пусковым режимам проводились при двух исходных состояниях реактора: 1) холодном — при температуре в петле $40\text{--}50^\circ\text{C}$ и температуре графита $\sim 50^\circ\text{C}$; 2) горячем — при температуре в петле $70\text{--}100^\circ\text{C}$ и температуре графита $\sim 190^\circ\text{C}$.

Повышение мощности реактора при пуске проводилось в соответствии с эксплуатацион-



Р и с. 1. Принципиальная схема петли;

1 — экспериментальный канал; 2 — барабан-сепаратор; 3 — циркуляционный насос; 4 — механический фильтр; 5 — питательный насос; 6 — редукционно-охлаждающее устройство; 7 — конденсатор; 8 — сборный бак; 9 — охладитель конденсата.

требованиями [2]. После достижения заданной мощности дальнейший разогрев производился на постоянной мощности; величину ее выбирали, исходя из максимально допустимого подогрева в каналах $\sim 100^\circ \text{C}$ в водяном режиме (по условиям работы компенсаторов).

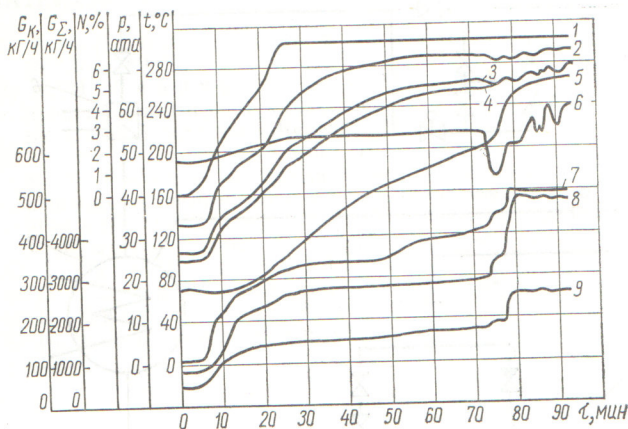
Пуск с полностью заполненным контуром осуществлялся при постоянном давлении в системе, которое поддерживалось за счет подпитки и продувки из барабана-сепаратора; температура питательной воды в опытах составляла $\sim 30^\circ \text{C}$. При недогреве до кипения 5–8 мин на выходе из максимально напряженного участка питательный насос останавливался и уровень в барабане-сепараторе выводился в нормальное положение за счет плавного увеличения расхода продувки, после чего продувка прекращалась и давление в петле поднималось до номинального (60 атм). При достижении номинального давления открывался па-

ровой вентиль, включался питательный насос и петля выводилась на стационарный режим.

Аналогичный способ разогрева и образования уровня в испарителях применяется при пуске во втором контуре первого блока Белоярской АЭС [3].

На рис. 2 показано изменение основных параметров контура при горячем пуске с водой под давлением $\sim 50 \text{ атм}$ и мощности реактора 7%. Как видно из рисунка, повышение температуры твэлов и температуры на выходе из каналов начинается через $\sim 6 \text{ мин}$ после начала подъема мощности, а повышение температуры воды на входе в каналы — через $\sim 12 \text{ мин}$. Это объясняется временем прогрева воды в барабане-сепараторе и транспортным запаздыванием в опускных и подъемных трубах.

Изменение расходов в каналах и петле при однофазном режиме течения определяется характером изменения мощности и полем темпе-



Р и с. 2. Изменение основных параметров петли при пуске с заполненным контуром:

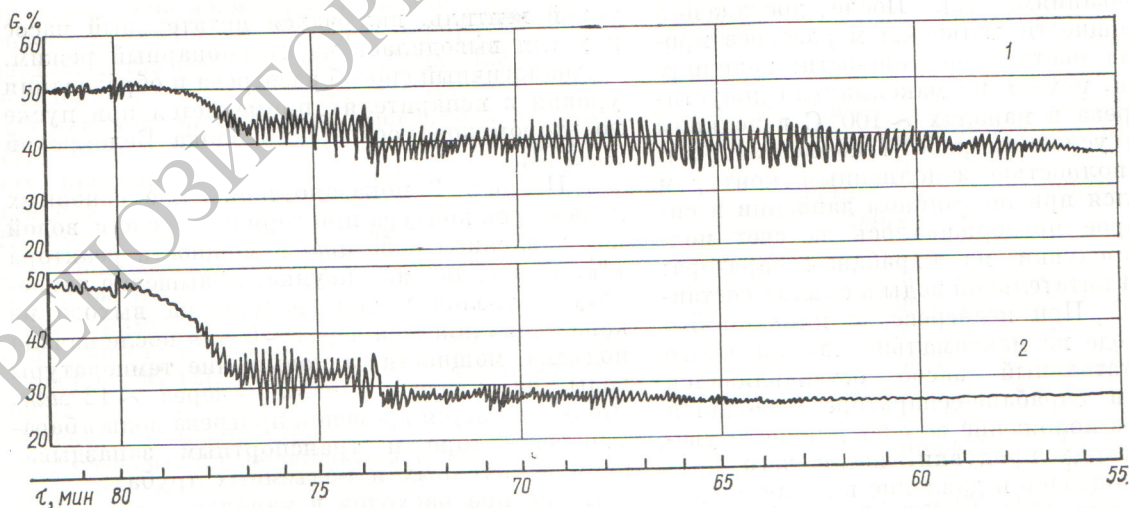
1 — мощность реактора N ; 2 — температура твэлов максимально нагруженного канала; 3 — температура на выходе из максимально нагруженного канала; 4 — температура на выходе из минимально нагруженного канала; 5 — температура на входе в каналы; 6 — давление в контуре; 7 — расход в максимально нагруженном канале; 8 — расход в минимально нагруженном канале; 9 — суммарный расход в контуре.

ратур в контуре. Некоторое повышение давления в системе в начальный период пуска обусловлено неточностью регулировки расходов подпитки и продувки.

К моменту времени $\tau = 48$ мин при достижении недогрева до кипения на выходе из канала $\Delta t_n \approx 20^\circ \text{C}$ наблюдается повышение расхода G в максимально нагруженном канале. Это можно объяснить появлением паровых

пузырей за счет поверхностного кипения. По мере снижения Δt_n интенсивность поверхностного кипения увеличивается, растет доля сечения, занятая паром, увеличивается время жизни пара, а в соответствии с этим повышаются движущий напор и, следовательно, расход теплоносителя через канал. При $\Delta t_n \approx 10^\circ \text{C}$ в максимально нагруженном канале ($\tau = 57$ мин) появляются пульсации расхода с частотой $\sim 0,08$ гц и амплитудой до $\pm 0,12 G_{\text{ср}}$, затухающие после выхода петли на режим объемного кипения (рис. 3). По-видимому, природа пульсаций расхода связана с режимом поверхностного кипения, когда в канале происходят нестабильный процесс зарождения паровых пузырей на горячей стенке и конденсация их в потоке недогретой жидкости.

Следует отметить, что при возникновении пульсаций недогрев на выходе из обогреваемого участка меньше, чем величина $\Delta t_n = 10^\circ \text{C}$, замеренная на выходе из канала, так как всегда имеются потери тепла на участке от активной зоны до верхней головки (верхний отражатель и крышка реактора); по оценочным расчетам, недогрев на выходе из обогреваемого участка канала составляет $\sim 3^\circ \text{C}$. Начиная с момента возникновения пульсаций расхода температура твэлов сохраняет постоянное значение вплоть до момента резкого снижения давления в контуре, вызванного остановкой питающего насоса ($\tau \approx 73$ мин), после чего все каналы петли выходят на объемное кипение



Р и с. 3. Пульсации расходов при пуске с $p \approx 50$ атм!

1 — максимально нагруженный канал; 2 — минимально нагруженный канал.

и дальнейшее изменение температуры твэлов определяется изменением давления в контуре. Переход к объемному кипению и появление паровой фазы в подъемных трактах контура вызывают резкое увеличение расхода в канале ($\tau \approx 73$ мин).

Изменение параметров теплоносителя в слабо нагруженном канале имеет такой же качественный характер, как и в канале с максимальной мощностью; пульсации расхода в нем в период перехода к двухфазному режиму течения начинаются позднее по времени (но при том же значении недогрева) и имеют меньшую амплитуду ($\sim 0,08 G_{cp}$). Затухают пульсации после перехода к объемному кипению. Суммарный расход в петле изменяется на основе тех же закономерностей, что и расходы в каналах. Пульсаций суммарного расхода в данном режиме не отмечено.

По мере дальнейшего разогрева петли ($\tau > 80$ мин) производится регулировка величины продувки при образовании уровня в барабане-сепараторе, в связи с чем изменяются давление и температуры в контуре.

Режимы пуска с заполненным контуром при другой мощности и давлении имеют в основном такой же характер, что и описанный режим при $p = 50$ атм, и отличаются следующими особенностями: величиной температурного перепада между оболочкой твэлов и водой, определяемого уровнем мощности; временем выхода контура на объемное кипение, зависящим от величины мощности, начальных параметров, расходов подпитки и продувки; амплитудой пульсаций расходов при закипании. Амплитуда пульсаций расхода растет при снижении давления в контуре; зависимости амплитуды пульсаций от теплового потока не выявлено.

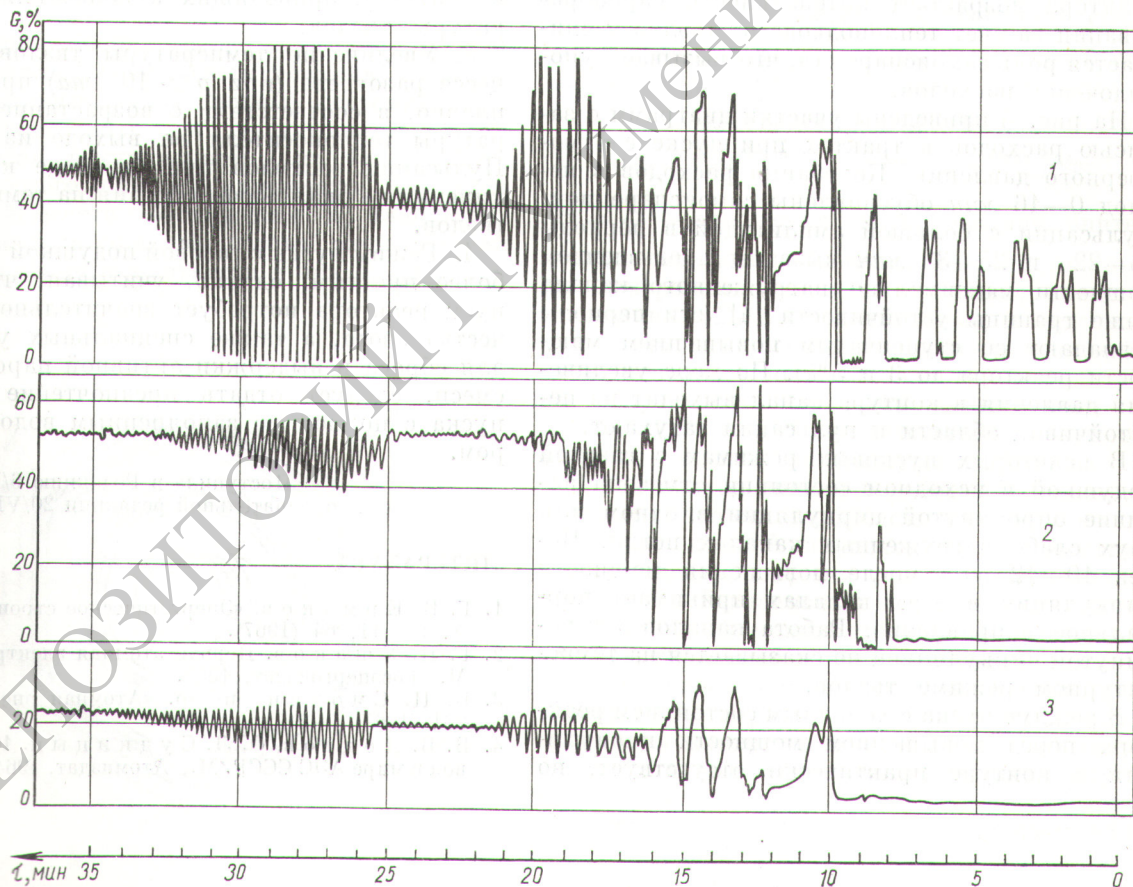


Рис. 4. Пульсации расходов при пуске с $p = 1$ атм:

1 — максимально нагруженный канал; 2 — минимально нагруженный канал; 3 — суммарный расход в контуре петли.

Пусковые режимы с газовой подушкой проводились при постепенно нарастающем давлении в контуре, вплоть до номинального. Изменение основных параметров петли при разогреве происходит в общих чертах так же, как было описано выше. Совпадают недогревы на выходе из каналов при возникновении пульсаций расходов, частота пульсаций во всех режимах также составляет 0,08 гц. При снижении давления в контуре амплитуды пульсаций возрастают; при $p \approx 10$ ама отмечены пульсации суммарного расхода.

В пусковых режимах при низком начальном давлении (5 и 1 ама) и $t_{\text{вых}} \approx t_s$ заметно сказывается эффект самоиспарения, обусловленный снижением гидростатического давления по мере подъема теплоносителя по трактам контура. Самоиспарение проявляется в значительных колебаниях расхода, причем в моменты повышения расхода отмечено снижение температуры твэлов. С увеличением мощности реактора возрастает интенсивность парообразования за счет теплоподвода от твэлов и снижается роль самоиспарения, что вызывает упорядочение расходов.

На рис. 4 приведены участки диаграмм с записью расходов в трактах при пуске с атмосферного давления. Колебания расходов в период 0—16 мин обусловлены самоиспарением. Пульсации с большой амплитудой в периоды 16—22 и 25—33 мин вызваны превышением мощности максимально нагруженного канала выше границы устойчивости [4] (эти периоды совпадают со ступенчатым повышением мощности реактора до 3 и 5%). По мере увеличения давления в контуре канал выходит из неустойчивой области и пульсации затухают.

В некоторых пусковых режимах с газовой подушкой в исходном состоянии отмечено наличие опрокинутой циркуляции в одном или двух слабо нагруженных каналах петли. Через 10—12 мин после повышения мощности циркуляция в этих каналах принимает нормальное направление. Работа каналов с опрокинутой циркуляцией не сказывается на температурном режиме твэлов.

В режиме пуска с холодным состоянием реактора перед повышением мощности циркуляция в контуре практически отсутствует, но

по мере увеличения мощности реактора она развивается обычным порядком.

Сопоставление результатов экспериментов по пусковым режимам позволяет сделать следующие заключения:

1. Развитие циркуляции при пуске с $p > 10$ ама происходит устойчиво. Естественная циркуляция в контуре не накладывает ограничений на скорость повышения мощности, которая должна определяться только допустимой скоростью разогрева контура (в экспериментах она достигала 200°C/ч). При наличии перед пуском опрокинутой циркуляции в отдельных каналах движение теплоносителя в них быстро упорядочивается с повышением мощности и не сопровождается отклонениями температуры твэлов.

2. В пусковых режимах с $p < 10$ ама проявляется эффект самоиспарения, выражающийся в периодических колебаниях расходов в каналах (тем больших, чем ниже давление в контуре), приводящих к колебаниям температуры твэлов.

3. Увеличение температуры твэлов в процессе разогрева (при $p > 10$ ама) происходит плавно, в соответствии с возрастанием температуры теплоносителя на выходе из канала. Пульсации расходов при переходе к режиму кипения не оказывают влияния на температуру твэлов.

4. Режим пуска с газовой подушкой является более простым, однако, учитывая, что такой пуск реактора потребует значительного количества азота, а также специальных устройств для сброса и выдержки активной паро-газовой смеси, следует отдать предпочтение режиму пуска с полностью заполненным водой контуром.

Поступила в Редакцию 6/IV 1970 г.
В окончательной редакции 20/VIII 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Ермаков. «Энергетическое строительство», № 10—11, 64 (1967).
2. Г. Н. Ушаков. Первая атомная электростанция. М., Госэнергоиздат, 1959.
3. В. Н. Смолин и др. «Атомная энергия», 19, 261 (1965).
4. В. В. Долгов, О. Л. Судницын. 10 лет Первой в мире АЭС СССР. М., Атомиздат, 1964, стр. 107.