низкие скорости нецелесообразны из-за значительного увеличения габаритов турбины);

2) двухпоточную конструкцию в одном корпусе, так как из-за малого располагаемого теплоперепада число ступеней невелико;

3) использовать одновенечную регулирующую ступень (при сопловом парораспределении);

4) использовать выхлопной диффузор с сильно развитым проходным сечением.

Оптимальное значение вакуума, а также коэффициента потерь с выходной скоростью необходимо определять из конкретного технико-экономического анализа установки и предъявляемых к ней требований. Однако можно указать, что целесообразный вакуум дифенильной турбины с точки зрения объемного расхода на выхлопе не должен превышать 0,07 *ата*.

Все вышеизложенное относится и к другим высокотемпературным органическим теплоносителям.

Поступила в Редакцию 21/XII 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Д. Калафати. Термодинамические циклы атомных электростанций. М., Госэнергоиздат, 1963.
2. Ю. И. Корякин и др. В сб. «Исследования по применению органических теплоносителей-замедлителей в энергетических реакторах». М., Атомиздат, 1964, стр. 63.
3. П. И. Христенко. «Атомная энергия», 8, 214 (1960).
4. P. Bareis, G. Leighton. Nucl. Power, 6 (1961).
5. D. Purdy. Nucleonics, No. 4 (1957).
6. Р. Алами, П. Ажерон. Отвод и преобразование тепла в ядерных реакторах. М., Госатомиздат, 1961.
7. А. С. Горшков и др. Доклад № 319, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
8. S. Ellis. J. Inst., Civil Engrs, No. 1, November (1938).
9. А. В. Щегляев. Паровые турбины. М., Госэнергоиздат, 1955.
10. П. Н. Шляхин, М. А. Бершадский. Краткий справочник по паротурбинным установкам. М., Госэнергоиздат, 1961.

УДК 621.039.514.23

Изучение режимов пуска Белоярской атомной электростанции им. И. В. Курчатова на стенде

В. Н. Смолин, В. К. Поляков, В. И. Есиков, Ю. Н. Шуинов

Приводятся результаты экспериментального исследования гидродинамической устойчивости потока теплоносителя в каналах первого и второго реакторов Белоярской АЭС на стенде. Обосновывается выбор методов пуска блоков АЭС, принятых к экспериментальной отработке. Даны результаты изучения пусковых режимов.

В Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова используются реакторы канального типа. В одной группе каналов осуществляется кипение воды, а в другой — перегрев пара [1]. В исходном состоянии реактора перегревательные каналы и паровые тракты заполнены водой. В процессе пуска необходимо освободить эти коммуникации от воды и перейти на охлаждение перегревательных каналов паром. При этом предварительный разогрев и пуск блоков АЭС должен быть произведен без постороннего источника тепла.

В пусковой период, так же как и в номинальном режиме работы станции, необходимо обеспечить надежное охлаждение твэлов (отсутствие кризиса теплоотдачи, обеспечение гидродинамической устойчивости). Изучению бескризисных режимов охлаждения твэлов пароводяной смесью были посвящены работы [2, 3]. В настоящей работе описываются результаты исследований гидродинамической устойчивости расходов теплоносителя в каналах при режиме кипения, рассматривается вопрос перевода перегревательных каналов с режима водяного охлаждения на паровое с последующим достижением номинальных параметров.

Для проведения исследования были созданы экспериментальные теплотехнические стенды, принципиальные схемы которых соответствовали технологическим схемам первого и второго блоков электростанции [4]. Стенд первого блока

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

состоял из двух самостоятельных контуров: замкнутого и разомкнутого. В первый контур были включены три испарительных канала, во второй — один перегревательный. Стенд второго блока — разомкнутый одноконтурный с внутренним циркуляционным подконтуром. В контур были включены два испарительных и два перегревательных канала. В качестве теплоносителя использовалась химически обессоленная вода.

Экспериментальные испарительные и перегревательные каналы были выполнены в натуральную величину [1, 4]. В испарительных каналах теплоноситель по центральной трубке направлялся в нижнюю головку, затем поднимался по шести периферийным трубкам вверх, проходил зону нагрева и поступал в верхнюю головку. Конструкция перегревательных каналов первого блока АЭС аналогична испарительным каналам. В перегревательных каналах второго блока центральная трубка отсутствует. Теплоноситель по трем трубкам движется вниз и по трем — вверх. Змеевиковые компенсаторы линейных расширений в испарительных и перегревательных каналах первого реактора АЭС расположены ниже активной зоны, а в перегревательных каналах второго реактора — выше активной зоны на опускных трубках.

Экспериментальные каналы в отличие от рабочих не имели твэлов. Теплоноситель в экспериментальных каналах нагревался электрическим током низкого напряжения на длине, соответствующей активной зоне реактора. Все трубки каналов в зоне нагрева были соединены между собой параллельно общими токоподводящими контактами. Центральная трубка испарительных каналов электрически изолировалась от периферийных трубок. С целью некоторого приближения характера тепловыделения по высоте экспериментальных каналов к тепловыделению в рабочих каналах зона нагрева была разбита на шесть участков различной длины. Подбором длин этих участков был достигнут ступенчатый характер тепловыделения, приближающийся к косинусоидальному.

Экспериментальные каналы имели несколько штуцеров для подключения приборов теплотехнического контроля. В испарительных каналах дроссельные шайбы, которые одновременно служили и для измерения расходов по трубкам каналов, устанавливались после змеевиковых компенсаторов.

Как было сказано выше, экспериментальные испарительные каналы представляли собой систему из пучка параллельных парогенерирующих труб, включенных между двумя коллекторами (верхней и нижней головками). Из опыта эксплуатации паровых котлов известно, что в пучке параллельных обогреваемых трубок могут быть пульсации и разверки расходов. Эти явления недопустимы, так как пульсация расхода сопровождается частыми и многократными колебаниями температуры стенок трубок, что может привести к их разрушению, а разверка расходов в трубках пучка — к пережогу последних. Поэтому выбор беспульсационных режимов работы каналов имеет большое практическое значение.

Устойчивость расхода теплоносителя в испарительных каналах исследовалась в широком диапазоне давлений, расходов и мощностей. Основное внимание уделялось определению таких параметров, как давление, расход, паросодержание и мощность, совокупность которых создавала условия, вызывающие возникновение пульсаций, а также температурному режиму парогенерирующих трубок во время пульсации расхода. В результате исследования установлено, что при определенных условиях в периферийных трубках каналов может быть пульсация расхода.

Пульсации расходов теплоносителя в трубках испарительных каналов во всех случаях, когда они имели место, возникали при достижении на выходе из каналов температуры насыщения. Пульсации представляли собой периодические колебания расходов теплоносителя в периферийных трубках как в сторону повышения, так и в сторону понижения. Колебания расхода в отдельных трубках сдвинуты по фазе: когда в одних трубках увеличивался расход, в других—уменьшался. Однако общий расход через канал оставался постоянным.

При сохранении неизменными всех параметров, при которых возникали пульсации, пульсационный режим удерживался неограниченное время. Дальнейшее повышение теплосодержания воды на входе в испарительные каналы (после возникновения пульсаций) приводило к увеличению амплитуды пульсаций и достижению максимального значения, затем амплитуда пульсации уменьшалась. При достижении определенного паросодержания на выходе из канала пульсации прекращались (рис. 1, *а*). Частота пульсаций в зоне малых паросодержаний составляла 3—6 колебаний в 1 *мин*. Последующее увеличение паросодержания снова приводило к возникновению пульсаций. Вторичные пульсации (см. рис. 1, *б*), возникавшие в зоне высоких паросодержаний, характеризовались значитель-

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

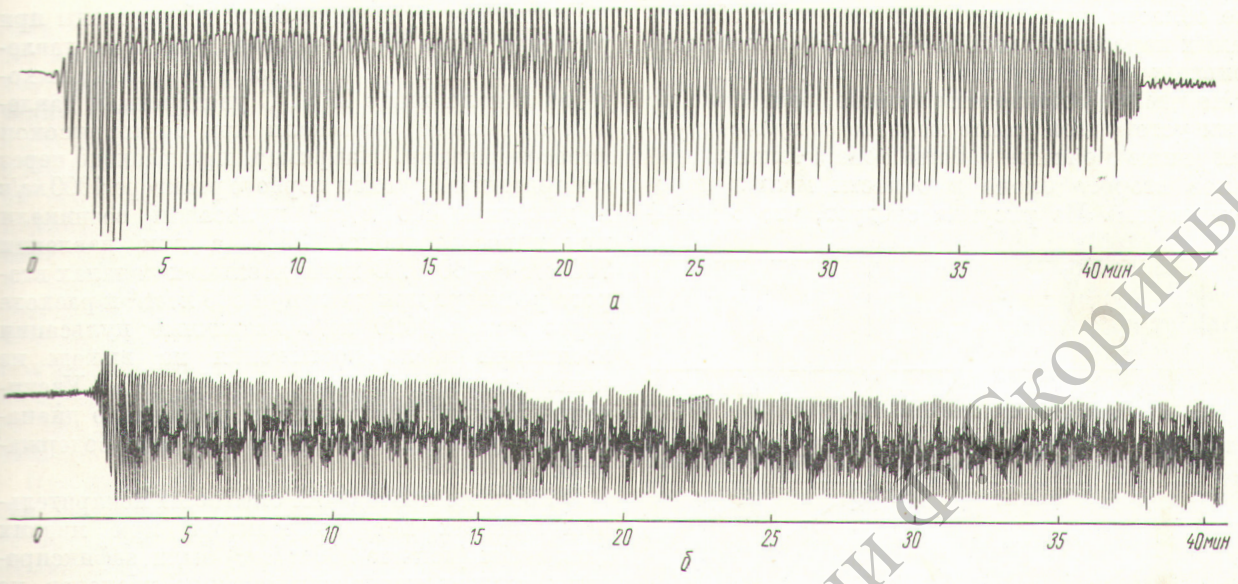
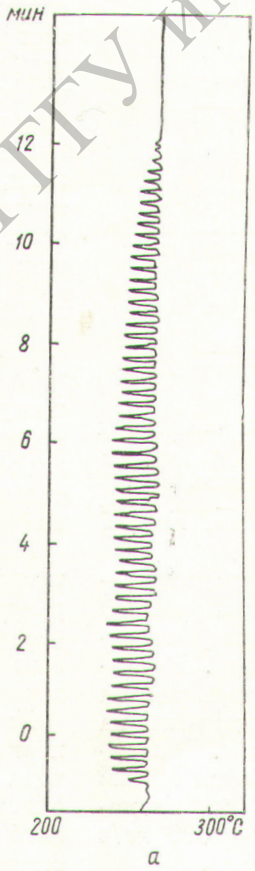


Рис. 1. Пульсации расхода теплоносителя G в трубке испарительного канала в области малых (*а*) и больших (*б*) паросодержаний.

ной амплитудой и довольно высокой частотой (15—20 колебаний в 1 *мин*).

Пульсации расхода в трубках каналов сопровождались колебаниями температуры стенок трубок по всей длине с частотой, совпадающей с частотой колебаний расхода. В области малых паросодержаний колебания температуры стенок в верхних сечениях зоны нагрева (где наблюдалось поверхностное или объемное кипение) происходили только в сторону понижения от первоначального значения (рис. 2, *а*); в экономайзерной зоне — в обе стороны от первоначального значения (см. рис. 2, *б*). Максимальная амплитуда колебаний температуры стенок находилась в экономайзерной зоне каналов и не превышала разности температур, которую имеют стенки обогреваемых трубок при температуре теплоносителя, равной температуре насыщения и температуре входа в каналы. В области высоких паросодержаний при возникновении вторичных пульсаций колебания температуры стенок в верхних сечениях зоны нагрева носили кризисный характер и происходили только в сторону увеличения от первоначального значения. Таким образом, в результате исследования обнаружены



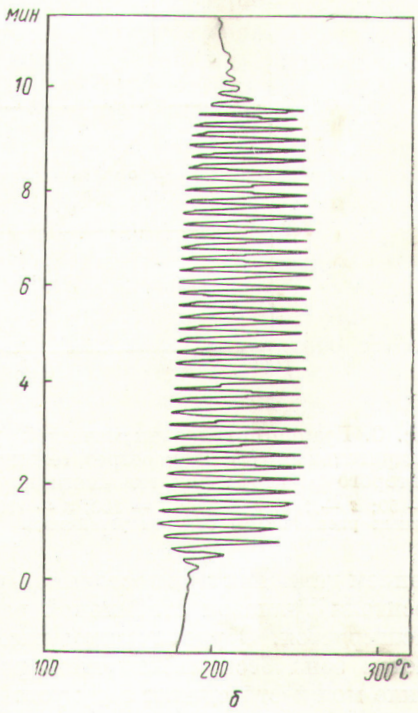


Рис. 2. Колебания температуры стенок обогреваемых трубок при пульсации расхода:

а — в зоне поверхностного или объемного кипения; *б* — в экономайзерной зоне

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

две области пульсационных режимов: область малых паросодержаний ($x = 0 \div 15\%$) и область больших паросодержаний ($x = 25 \div 80\%$).

На рис. 3, *а* приведены кривые, разделяющие зоны устойчивой (выше кривых) и пульсационной (ниже кривых) работы испарительных каналов второго блока в области малых паросодержаний. Из рисунка следует, что с повы-

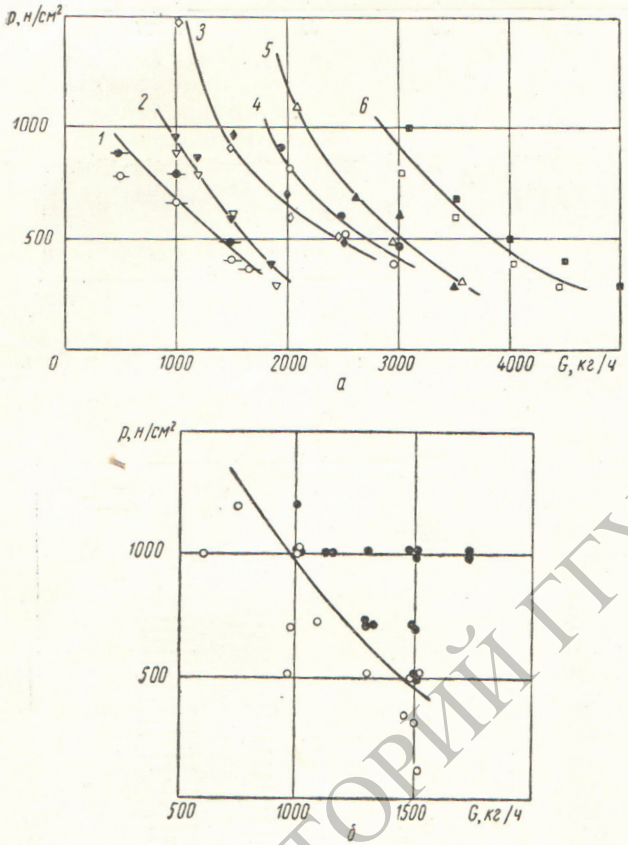


Рис. 3. Границы гидродинамической устойчивости в испарительных (*а*) и перегревательных (*б*) каналах второго реактора при мощности на канале, *квт*:
1 — 50; *2* — 100; *3* — 200; *4* — 300; *5* — 400; *6* — 800. Выше кривых расположены области устойчивой работы каналов.

шением давления при постоянном расходе теплоносителя диапазон стабильной работы каналов расширяется. С увеличением расхода увеличивается зона беспульсационной работы. Увеличение мощности сужает зону устойчивой работы каналов. Приведенные данные получены на каналах с шайбами диаметром 6,2 *мм*. В каналах первого блока с шайбами диаметром 4,2 *мм* при давлении 980 *н/см²* и выше во всем диапазоне исследованных расходов (700—2500 *кг/ч* на канал) пульсаций не наблюдалось.

Вторичные пульсации были обнаружены при расходах через канал меньше 1000 *кг/ч*, давлении ниже 600 *н/см²* и паросодержании на выходе из канала выше 25%. С увеличением давления пульсации возникали при более высоком паросодержании. Например, при расходе через испарительный канал первого реактора 1000 *кг/ч* и давлении 400 *н/см²* пульсации возникали при паросодержании 35%, а при давлении 700 *н/см²*—60%. В испарительных каналах второго реактора при давлении 600 *н/см²* и расходе через канал 1000 *кг/ч* вторичные пульсации возникали после достижения на выходе из канала паросодержания, равного 80%. Увеличение расхода через каналы расширяло диапазон беспульсационной работы по паросодержанию.

В процессе проведения опытов на испарительных каналах первого реактора при низких давлениях (меньше 200 *н/см²*) были зафиксированы случаи перераспределения расходов по трубкам каналов, приводящего к «запариванию» трубок. В одной из трубок расход снижался в два-три раза по сравнению с первоначальным, в других трубках — увеличивался; при этом резко возрастала температура стенок трубок с минимальным расходом. Это явление наступало после возникновения пульсаций. Специально проведенные исследования на перегревательных каналах второго реактора показали, что при достижении в нижней головке температуры насыщения и при определенном сочетании давления и расхода через канал происходит запаривание опускных трубок, сопровождающееся значительным повышением температуры стенки трубки. На рис. 3, *б* представлена кривая, отделяющая зону устойчивой работы (выше кривых) от неустойчивой. В случае поступления в перегревательный канал воды, находящейся на линии насыщения или пароводяной смеси, устойчивость движения теплоносителя по трубкам сохраняется и ниже граничной кривой.

На основании данных, полученных в результате проведенных исследований, были выбраны режимы работы, обеспечивающие устойчивый расход и надежное охлаждение в испарительных и перегревательных каналах в пусковой период и при номинальном режиме.

Для отработки на стенде пусковых режимов первого реактора АЭС был принят метод перевода перегревательных каналов на паровое охлаждение с использованием аккумулированного тепла. Этот метод аналогичен методу, описанному в работе [5]. Сущность его заключа-

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины

лась в следующем. Установка разогревается без кипения теплоносителя в первом и втором контурах. После достижения стационарного значения температуры воды в испарителях мощность уменьшается и подача питательной воды в контур прекращается. Вода из второго контура отводится через перегревательные каналы. Давление во втором контуре падает, вода вскипает, пароводяная смесь продолжает вытекать из контура, и, наконец, в испарителях образуется устойчивый уровень. Перегревательные каналы окончательно освобождаются от воды. Предварительный разогрев второго контура без кипения теплоносителя позволяет освободиться от шайбования трубок перегревательных каналов.

При изучении гидродинамической устойчивости расходов в испарительных каналах было установлено, что кипение в первом контуре без межвитковых пульсаций можно было допустить лишь при давлении 700—800 *н/см²*. Двухконтурная технологическая схема стенда, так же как и схема первого блока АЭС, позволяет в пусковой период автономно устанавливать в первом контуре любое давление при отсутствии кипения в испарительных каналах. Это дает возможность перевести первый контур в режим кипения после продувки перегревательных каналов и установления во втором контуре такого давления, при котором в первом контуре при переводе его в режим кипения давление не упало бы ниже указанного предела.

Опыты проводились при начальном давлении в первом контуре 1000 *н/см²* и во втором — 300÷400 *н/см²*. После заполнения контуров водой создавалось заданное давление, устанавливался расход теплоносителя через каналы и включался нагрев. Стенд разогревался до такой температуры воды на выходе из перегревательного канала, которая на 5—10° С ниже температуры насыщения. Затем понижалась мощность до 3—4% от номинальной, и подача питательной воды прекращалась. Во втором контуре давление падало, что приводило к вскипанию воды. С этого момента парообразование в контуре происходило как за счет тепла первого контура, так и за счет аккумулированного тепла.

По мере выхода теплоносителя из системы второго контура через перегревательный канал в испарителе образовывался уровень и осуществлялась продувка перегревательного канала паром. О продувке судили по повышению температуры стенок трубок в нижнем сечении обогреваемой зоны канала и по получению перегретого пара на выходе из него. Скорость падения давления во втором контуре составляла 10—15 *н/см²×мин*. Время от момента прекращения подачи питательной воды в контур до полной продувки канала составляло 10—15 *мин*. В дальнейшем уровень в испарителях поддерживался подачей питательной воды, а повышение давления во втором контуре происходило по мере увеличения мощности. При мощности 25—30% от номинальной и давлении во втором контуре 700—800 *н/см²* в первом контуре допускалось кипение и путем продувки воды из сепаратора в нем устанавливался необходимый уровень.

На рис. 4, *а* показана диаграмма изменения температуры теплоносителя на входе в перегревательный канал и выходе из него при переходном режиме, а на рис. 4, *б* — диаграмма изменения температуры стенки обогреваемой трубки в том же процессе. Из диаграммы следует, что продувка канала происходила плавно, без резких изменений температуры стенок трубок.

Проведенные исследования показали, что метод пуска с использованием аккумулированного тепла обеспечивает надежное охлаждение испарительных и перегревательных каналов в пусковой период. Описанный метод пуска был положен в основу разработки пусковых режимов первого блока Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова. Надежность выбранного метода пуска и тщательная отработка его на стенде способствовали успешному проведению пусковых операций на АЭС [6].

В отличие от схемы первого блока АЭС схема второго блока одноконтурная. Это обстоятельство не позволяет в полной мере использовать метод пуска, примененный для первого блока, так как глубокое падение давления в контуре приведет к возникновению пульсаций расхода в трубках испарительных каналов. Последующее увеличение мощности после продувки перегревательных каналов с пульсирующими расходами в испарительных каналах может привести к разверке расходов и пережогу твэлов. Следовательно, продувку перегревательных каналов необходимо провести при обеспечении стабильного расхода теплоносителя в испарительных каналах.

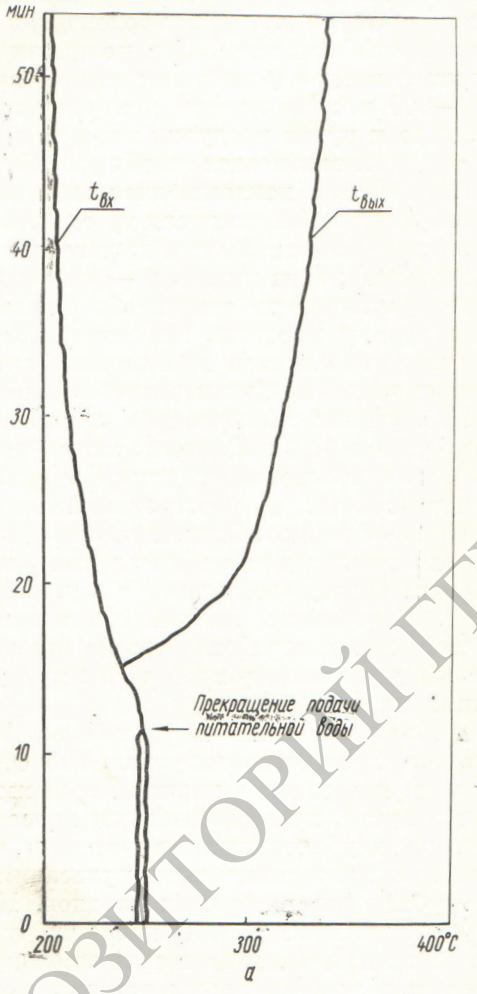
Для обработки на стенде был принят метод постепенного замещения воды, циркулирующей через перегревательные каналы, сначала пароводяной смесью, а затем паром. Такой метод был применен на одной из петель Первой атомной электростанции [7]. В контуре петли имелись испарительные и перегревательные каналы. Устанавливался некоторый расход воды по

Репозиторий ГГУ имени Ф. Скорины

испарительным каналам, часть воды через сепаратор направлялась в перегревательные каналы. Выход на перегрев осуществлялся увеличением мощности до момента образования уровня в сепараторе без регулирования расхода теплоносителя.

напора столба теплоносителя в подъемном тракте канала [8].

Разогрев стенда до получения в сепараторе воды, находящейся на линии насыщения, и последующая продувка перегревательных каналов производились при давлении, обеспечиваю-



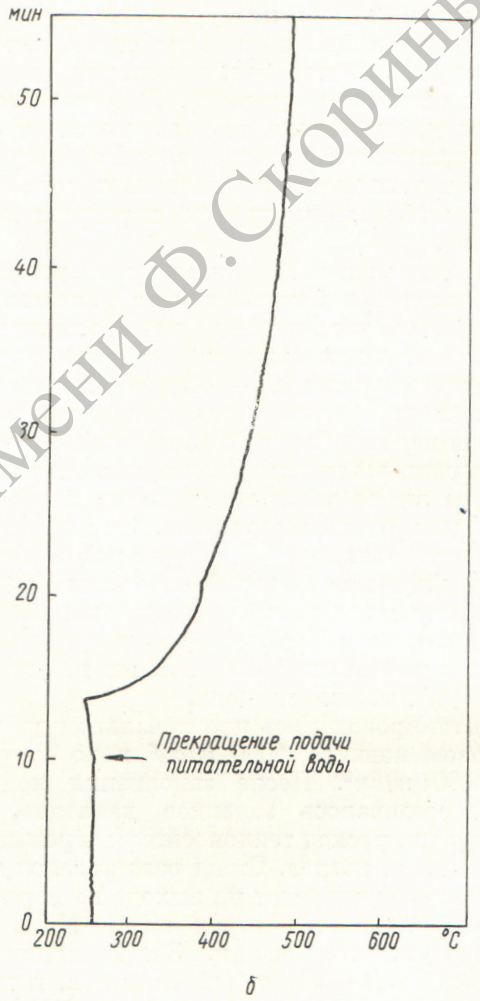
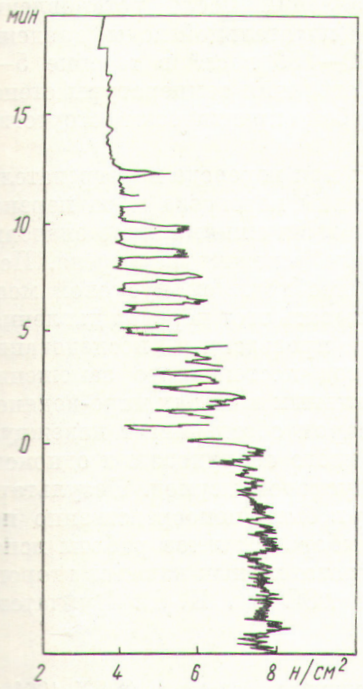


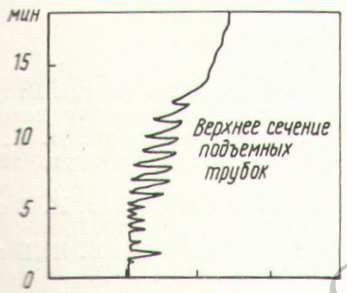
Рис. 4. Изменения температур в переходном режиме:
а — температура теплоносителя на входе и выходе пароперегревательного канала первого реактора; *б* — температура стенки обогреваемой трубки.

В наших опытах необходимая пусковая мощность определялась из условия обеспечения надежной продувки перегревательных каналов. Это обусловливалось необходимостью обеспечения прохождения такого расхода пара через каждую подъемную трубку любого перегревательного канала вплоть до момента продувки последнего из них, который создавал бы перепад давления между нижней головкой и сборным коллектором, равный или больше нивелирного

щем беспульсационный режим работы испарительных каналов. Первоначальный расход питательной воды принимался таким, чтобы были соблюдены условия, обеспечивающие устойчивость расходов в опускных трубках перегревательных каналов (см. рис. 3, *б*). После разогрева стенда до получения в сепараторе воды, находящейся на линии насыщения, расход питательной воды постепенно уменьшался. В перегревательные каналы поступала паро-водяная

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф.Скорины





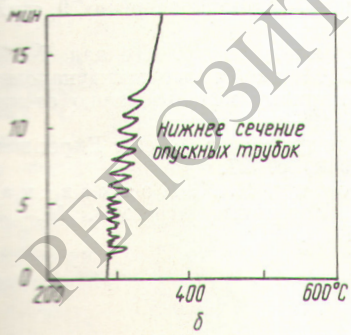
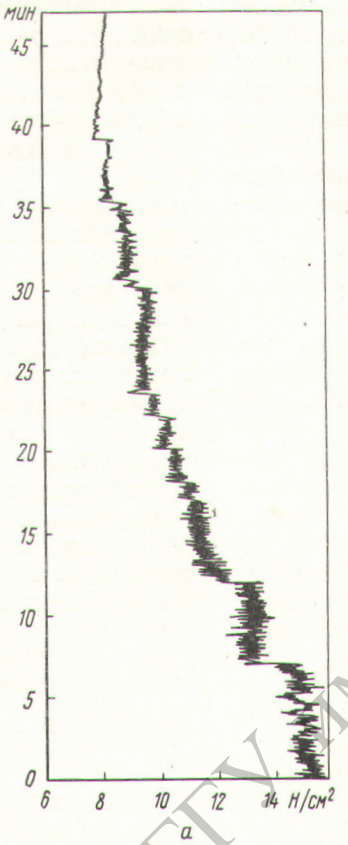


Рис. 5. Изменения перепада давления на перегревательном канале (*а*) и температуры стенки трубки (*б*) при пуске на малом уровне мощности.



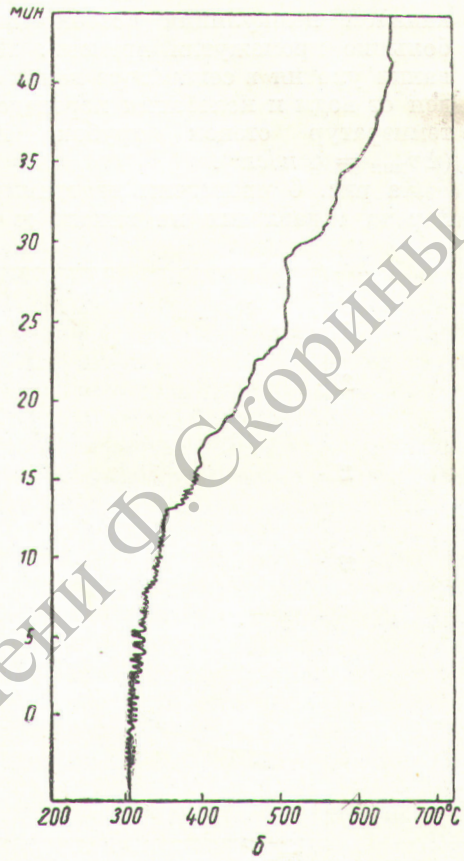


Рис. 6. Изменения перепада давления в перегревательном канале (*а*) и температуры стенки трубки (*б*) при пуске на большем уровне мощности.

смесь и, наконец, после образования уровня в сепараторе,— насыщенный пар. Уровень в сепараторе образовывался снижением расхода питательной воды до величины, несколько меньшей количества генерируемого пара. За продувкой перегревательных каналов следили по температуре перегретого пара, температуре стенок обогреваемых трубок и уровню в сепараторе. Исследования проводились на одном и двух параллельно включенных перегревательных каналах при давлении 490 и 880 *н/см²*. Основное внимание уделялось определению условий, при которых обеспечивается надежное охлаждение перегревательных каналов в пусковой период.

В результате проведения опытов установлено, что при недостаточном перепаде давления временное прекращение циркуляции происходило даже на отдельном перегревательном канале. На рис. 5, *а* приведена диаграмма изменения перепада давления на перегревательном канале при постепенном замещении воды паром, а на рис. 5, *б* — диаграммы изменения температур стенок обогреваемых трубок в том же процессе. Из диаграмм следует, что при перепаде давления, равном 4 *н/см²*, циркуляция через канал прекращалась, а температура стенок трубок повышалась. Периодически по мере снижения давления в тракте за

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф.Скорины

каналом циркуляция возобновлялась на небольшие промежутки времени. После образования уровня в сепараторе канал был освобожден от воды и колебания перепада давления и температур стенок трубок прекратились ($\Delta p_{мин} = 4$ *н/см*^{2}).

На рис. 6 приведены диаграммы изменения перепада давления на канале и температуры

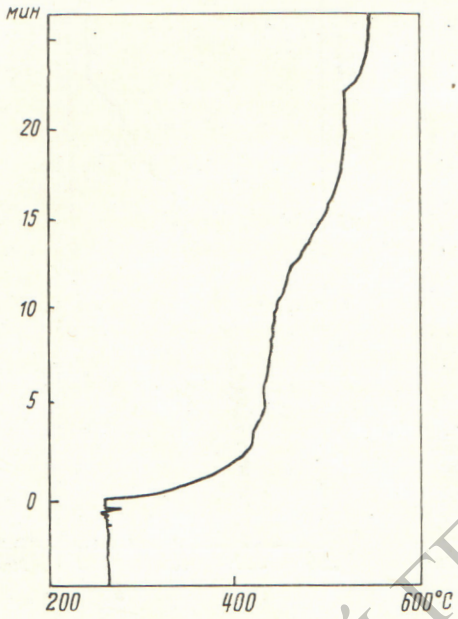


Рис. 7. Изменения температуры стенки обогреваемой трубки перегревательного канала при пуске со снижением давления.

стенок обогреваемых трубок в процессе постепенного замещения, но на большем уровне мощности по сравнению с опытом, результаты которого представлены на рис. 5. В этом случае циркуляция теплоносителя через канал не прекращалась ($\Delta p_{мин} = 8$ *н/см*^{2}). Небольшие колебания температуры стенок трубок объясняются прохождением паровых пробок и их перегревом.

Для ускорения образования уровня в сепараторе и устранения колебания температуры стенок обогреваемых трубок были проведены опыты со снижением давления после установления конечного расхода питательной воды (давление снижалось на 120—150 *н/см*^{2} в течение 5—7 *мин*). При этом колебания температуры стенок обогреваемых трубок практически отсутствовали (рис. 7).

Во всех случаях при переводе перегревательных каналов в режим перегрева пара перепад давления в канале имел минимальное значение после вывода канала в режим перегрева. Поэтому при выборе необходимой пусковой мощности следует учитывать этот перепад давления.

Таким образом, проведенные исследования показали, что метод постепенного замещения воды в перегревательных каналах паро-водяной смесью, а затем паром обеспечивает надежную работу каналов и всего оборудования одноконтурной схемы в пусковой период. Результаты исследований могут быть непосредственно использованы при выборе режимов работы испарительных и перегревательных каналов второго блока Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова в пусковой период.

Поступила в Редакцию 18/IX 1964 г.
В окончательной редакции 26/XI 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Доллежаль и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958)». Т. 2. Докл. советских ученых. М., Атомиздат, 1959, стр. 36.
2. В. Н. Смолин, В. К. Поляков, В. И. Есиков. «Атомная энергия», **13**, 360 (1962).
3. В. Н. Смолин, В. К. Поляков, В. И. Есиков. «Атомная энергия», **16**, 417 (1964).
4. П. И. Алещенков и др. «Атомная энергия», **16**, 489 (1964).
5. В. В. Долгов и др. «Атомная энергия», **9**, стр. 10 (1960).
6. А. Н. Григорьянц и др. Доклад № 308, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
7. В. В. Долгов и др. Power Reactor Experiment. Vienna, IAEA, 1962, p. 27.
8. М. А. Стырикович, К. Я. Катковская, Е. П. Серов. Котельные агрегаты. М.— Л., Госэнергоиздат, 1958.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины