

УДК 621.039.52.034.3

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОЩНОСТЬЮ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ГАЗОТУРБИННЫМ ЦИКЛОМ

Головки В.Ф., Дмитриева И.В., Кодочигов Н.Г., Кузнецов Л.Е.
(АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород)

Применение высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР) в сочетании с газотурбинной установкой (ГТУ) замкнутого цикла позволит максимально использовать его основное достоинство — высокую температуру теплоносителя (рабочего тела) и, следовательно, повысить к.п.д. производства электроэнергии ядерной энергетической установки (ЯЭУ). Перспективность таких энергоустановок определяется также возможностью их применения в комбинированной выработке технологического тепла, электрической энергии и в бытовом теплоснабжении за счет высокой температуры сбросного тепла. ВТГР в сочетании с газовой турбиной являются достаточно маневренными и экономичными установками и предпочтительны для ЯЭУ, допускающих работу на переменных нагрузках или в условиях неопределенности графика электрических нагрузок.

В условиях нормальной эксплуатации система управления ЯЭУ должна обеспечивать пуск, останов, устойчивую и эффективную работу на 100%-ной нагрузке и в заданном диапазоне ее изменения. Система управления может быть охарактеризована эффективностью ЯЭУ на разных уровнях нагрузки и допускаемой скоростью перехода с одного уровня нагрузки на другой. Требования к системе управления полезной мощностью реакторной установки зависят от ее назначения и потребителей энергии.

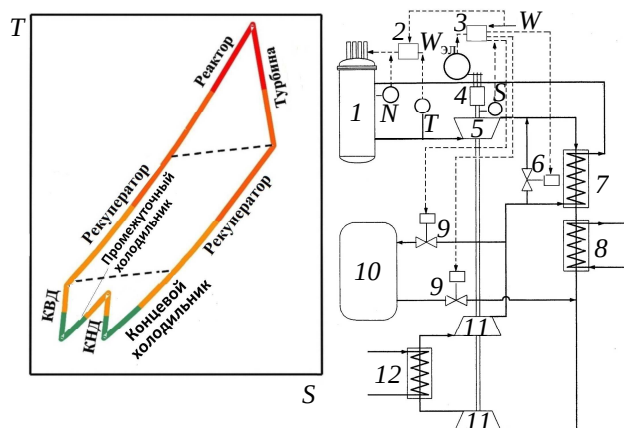
ЯЭУ укрупненно разделяются на реакторную часть, производящую тепловую энергию, и систему преобразования тепловой энергии. Совокупность технологических режимов работы составных компонентов и оборудования определяет параметры и режимы эксплуатации ЯЭУ.

Изменение нейтронной мощности в реакторе является процессом малоинерционным, зависящим от перемещения стержней регулирования, а на изменение тепловой мощности, определяющей температуру теплоносителя, влияет как изменение нейтронной мощности, так и аккумулялирующая способность конструктивных материалов реактора. Так, в установках с газоохлаждаемыми реакторами малой мощности

~5 МВт и менее, где в качестве конструктивных материалов могут использоваться тугоплавкие металлы, инерция изменения тепловой мощности почти не наблюдается по сравнению с графитовыми реакторами большой мощности до 600 МВт [1].

Эффективность установок на частичных нагрузках зависит как от типа цикла, так и от выбранного способа изменения нагрузки. ГТУ замкнутого цикла обладает способностью управления полезной мощностью путем изменения массы гелия (давления) в цикле при небольшом изменении температуры в контуре. Это достигается организацией массообмена между контуром и специальными емкостями. Другим способом является организация внутренних перепусков газа в контуре. Возможен также третий способ — изменением мощности и температуры газа на выходе из реактора (на входе в турбину), аналогичный способу изменения нагрузки в газотурбинных установках открытого цикла.

Опыт применения высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с газотурбинным циклом ограничен. Проводятся разработки проектов подобных установок в нашей стране и за рубежом. Так, в нашей стране прорабатывались проекты реакторных установок с малой около 5 МВт и большой тепловой мощностью от 300 МВт и более [1, 2]. Тепловые схемы этих ЯЭУ подобны и могут отличаться параметрами и наличием или отсутствием промежуточного охлаждения гелия при сжатии. На рис. 1 показана схема установки мощностью 600 МВт, которая включает реакторный модуль и систему преобразования энергии с прямым (в первом контуре) рекуперативным газотурбинным циклом, одновальной турбомашинной, двухступенчатым сжатием с промежуточным охлаждением в компрессоре. Расход гелия в первом контуре 320 кг/с, температура гелия на входе/выходе реактора 850/490 °С, давление гелия на выходе из компрессора высокого давления 7,24 МПа. Значительная электрическая мощность АЭС (около 300 МВт) предполагает ее работу в



Р и с. 1. Схема реакторной установки с турбомашинной и основными регулируемыми устройствами: 1 — реактор; 2 — система управления мощностью реактора; 3 — система управления турбомашинной; 4 — генератор; 5 — турбина; 6 — байпасный клапан; 7 — рекуператор; 8 — конечный холодильник; 9 — регулирующие клапаны заполнения и удаления гелия; 10 — гелиевая система; 11 — компрессор высокого (КВД) и низкого давления (КНД); 12 — промежуточный холодильник (N — мощность реактора; T — температура; W — заданная нагрузка; $W_{эл}$ — мощность генератора; S — частота вращения вала)

составе сети централизованного электроснабжения, при этом ротор синхронного генератора, подключенного к такой сети, вращается с частотой, равной частоте в сети при любом уровне нагрузки. Одновальная конфигурация турбомашин, состоящая из генератора, газовой турбины и двух компрессоров, рассматривается как более простая с точки зрения управления реакторной установкой и решения вопросов защиты турбомашин от разгона в аварийных ситуациях.

Изменение параметров в разных способах управления анализируется с помощью математической модели ЯЭУ с ГТУ замкнутого цикла [3].

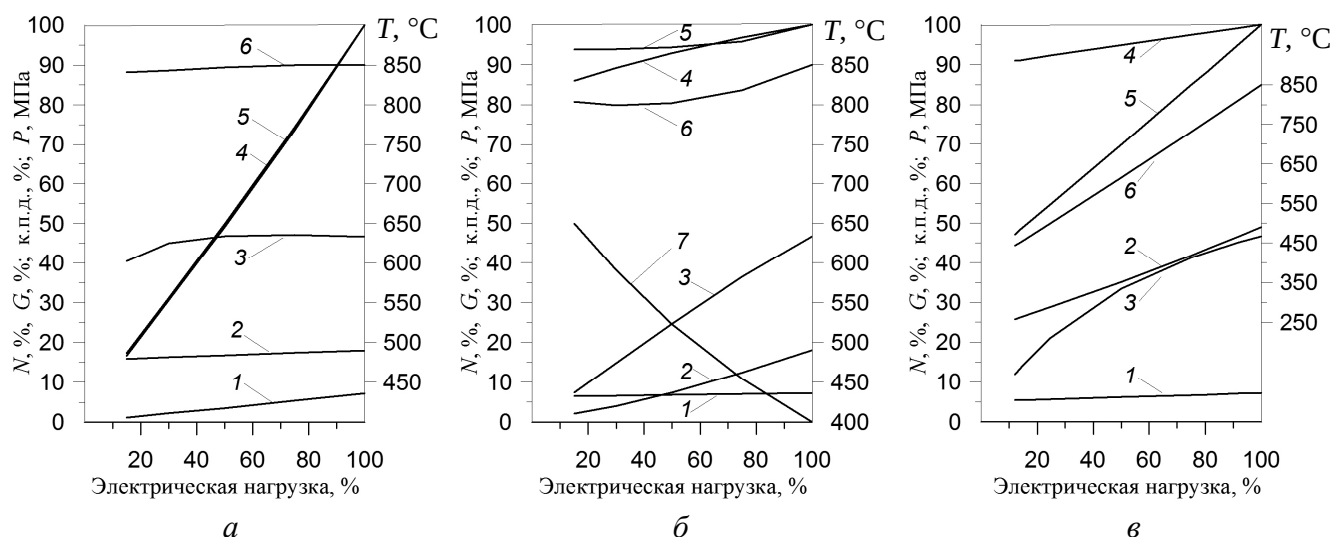
Схема управления мощностью. На рис. 1 показана примерная схема управления полезной мощностью реакторной установки. Система автоматического управления турбомашинной в зависимости от заданной мощности выдает управляющие сигналы на соответствующие регулирующие устройства. Вне зависимости от способа мощность реактора регулируется своей системой управления, получающей сигналы о температуре на выходе реактора или заданной полезной мощности. Система управления фиксирует отличие температуры теплоносителя за реактором или полезной мощности от заданной и выдает соответствующий сигнал на систему

управления и защиты реактора. В способе управления массой гелия основное воздействие на мощность реактора оказывает изменение температуры на выходе из реактора. В способе управления с помощью байпасирования контура заданная нагрузка обеспечивается открытием байпасных клапанов и незначительным изменением мощности реактора, связанным с изменением температуры теплоносителя за реактором. Турбомашинная в течение переходных процессов перехода на разные уровни мощности не отключается от электросети, в этом случае ротор синхронного генератора вращается с частотой, равной частоте в сети.

Управление полезной мощностью изменением массы (давления) газа в контуре. При этом способе часть гелия отбирается из контура в ресивер. Способ регулирования давлением гелия является наиболее эффективным, поскольку давление во всех точках цикла изменяется пропорционально изменению массы газа при сохранении объемного расхода и температуры газа в сходственных точках цикла. Таким образом, газотурбинный цикл без изменений будет смещаться эквидистантно в T — S -диаграмме (по оси S), сохраняется газодинамическое подобие течения гелия по тракту контура и в лопастных системах турбин и компрессоров, что обеспечивает к.п.д., близкий к к.п.д. на 100%-ной нагрузке. Так как рабочая точка на характеристике компрессора не смещается, то обеспечивается устойчивая работа в широком диапазоне режимов. Недостатком этого способа регулирования является относительно медленное изменение полезной мощности, связанное с пропускной способностью системы заполнения и удаления гелия, а также дополнительные затраты энергии на работу подкачивающего компрессора и создание больших емкостей ресиверов для хранения гелия. С увеличением диапазона изменения мощности объем ресивера возрастает.

На рис. 2, а показано изменение параметров установки на частичных нагрузках для данного способа управления. Мощность и температура гелия на выходе из реактора изменяются со 104 до 600 МВт и с 840 до 850 °С соответственно, температура гелия на входе в реактор во всем диапазоне сохраняется на уровне 480—490 °С.

Технически осуществимая в данном способе скорость изменения полезной мощности массой гелия в контуре может достигать до 1% $N_{ном}$ в



Р и с. 2. Статические параметры реакторной установки, регулируемые массой гелия (*a*), перепуском гелия через байпасные клапаны (*b*), мощностью реактора и температурой гелия перед турбиной (*v*): 1 — давление гелия на выходе из компрессора высокого давления P ; 2, 6 — температура гелия на входе и выходе из реактора T соответственно; 3 — к.п.д. (нетто) реакторной установки; 4 — расход гелия через реактор G_p ; 5 — мощность реактора N ; 7 — относительный расход гелия через байпасный $G_{\text{БК}}/G_p$

1 мин. На изменение мощности накладывается ограничение на изменение температуры гелия в контуре — от 100 до 250 $^\circ\text{C}/\text{ч}$, позволяющее исключить тепловые удары и увеличение перепада температуры по толщине металлоконструкций тракта гелиевого контура более 30—50 $^\circ\text{C}$. Оно должно соблюдаться при всех способах управления и особо актуально для режимов пуска и останова реакторной установки.

В установках типа ГТ-МГР, работающих в составе централизованной сети, ротор синхронного генератора, подключенного к сети, вращается с частотой, равной частоте в сети на любых уровнях нагрузки. В транспортных установках допустимо применение одновальных газотурбинных установок, например, в судовых установках с винтом регулируемого шага. В таких установках возможно в некотором диапазоне мощности сохранять частоту вращения вала двигателя, что дает возможность регулировать мощность изменением массы газа [4].

Для уменьшения суммарного объема ресивера можно использовать несколько резервуаров при разном давлении. Место добавления и возвращения газа влияет на устойчивость работы компрессоров в течение переходных процессов. Так, в процессе добавления газа в полость перед компрессором происходят снижение степени сжатия в компрессоре π_k , увеличение при постоянной частоте вращения расхода через компрес-

сор и удаление расчетной точки от линии помпажа. При выпуске газа из контура за компрессором давление за компрессором и π_k уменьшаются, расход увеличивается, что также повышает устойчивость его работы.

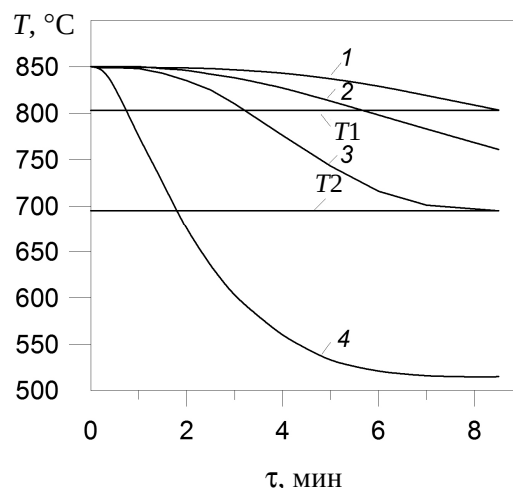
Управление полезной мощностью перепусками газа в контуре. Для быстрых маневров полезной мощности со скоростью 10% $N_{\text{ном}}$ в 1 мин и более, а также предотвращения разгона турбомшины больше допустимых оборотов 120% $n_{\text{ном}}$ используются перепуски гелия с необходимой скоростью и расходом по контуру газотурбинного цикла, например, наиболее распространенный способ перепуска газа из полости с напора компрессора высокого давления на выход из турбины (см. рис. 1). В этом случае мощность электрогенератора существенно зависит от расхода гелия по байпасной ветке, снижающего мощность турбины за счет уменьшения расхода гелия и повышения давления за ней. Эффективная реализация этого способа управления определяется быстродействием открытия байпасной ветки и ее пропускной способностью. Режим возможен при почти неизменной мощности реактора, баланс которой обеспечивается отводимой мощностью в концевом и промежуточном холодильниках. Поскольку при данном способе управления существенно уменьшается к.п.д. установки, его следует использовать лишь для уменьшения времени перехода на режим пониженной нагрузки и после достижения

установившегося состояния переходить к более экономичному способу поддержания мощности.

На рис. 2, б видно, что снижение нагрузки до 15% возможно при байпасировании 50% расхода гелия (относительно расхода через реактор). При изменении полезной нагрузки от 100 до 15% $N_{\text{ном}}$ температура гелия на входе в турбину должна снижаться с 850 до 803 °С, на входе в реактор — с 490 до 410 °С соответствующим изменением мощности реактора с 600 до 563 МВт.

Анализ статических параметров установки позволяет оценить наиболее значимые параметры, соответствующие требуемому изменению нагрузки. Так, при изменении нагрузки с помощью байпасных клапанов с требуемой скоростью 10%/мин в диапазоне регулирования нагрузки от 15 до 100% время изменения параметров должно составлять 8,5 мин. Необходимо учитывать ограничения на изменение параметров, например, нормативно допустимое нейтронной мощности в реакторе. В динамических процессах параметры установки могут не соответствовать установившемуся режиму. Определяющей особенностью стационарных установок с высокотемпературным реактором является большая масса графитового отражателя (до 1000 кг), что вследствие влияния запасенного тепла приводит к инерционности температуры гелия на выходе из реактора при изменении нейтронной мощности.

Как показал расчетный анализ, в рассматриваемом реакторе мощностью 600 МВт с одновальной турбомашинной в переходных режимах параметры реакторной установки не сильно отклоняются от статических, обеспечивая требуемое изменение нагрузки со 100 до 15% за 8,5 мин при допустимом изменении мощности реактора. Так, температура гелия на входе в турбину при управлении с помощью байпасных клапанов должна снижаться с 850 до 803 °С (см. рис. 2, б), что с учетом динамики переходного режима и особенностей реактора допустимо (рис. 3, кривая 1). Для двухвальной турбомашинной даже при максимальной проектной скорости перемещения регулирующих стержней температура гелия может быть снижена до 695 °С (см. рис. 3, кривая 3), что выше требуемой регулируемой температуры 690 °С. Влияние тепловой инерционности реактора требует



Р и с. 3. Изменение температуры гелия на выходе из реактора во времени для уменьшения полезной нагрузки со 100 до 15% за 8,5 мин при снижении мощности реактора с одновальной турбомашинной до 0,916 $N_{\text{ном}}$ за 8,5 мин (1), с двухвальной турбомашинной до 0,41 $N_{\text{ном}}$ за 8,5 мин (2) и 4 мин (3) с максимальным проектным изменением нейтронной мощности реактора, при аварийном останове с максимальным изменением нейтронной мощности реактора для сравнения (4) (T_1 , T_2 — предельная температура в способе управления с помощью байпасных клапанов с одновальной и двухвальной турбомашинной соответственно, T — температура, τ — время)

большого снижения мощности реактора. Для малых установок с меньшей тепловой инерционностью характерно отслеживание нейтронной мощности тепловой мощностью реактора, что упрощает выбор способа управления и системы регулирования.

Проблемным вопросом байпасного регулирования являются термоциклические нагружения, которым подвергаются металлоконструкции в зоне смешения разнотемпературных потоков гелия, что снижает их ресурс, и поэтому необходимо качественное смешение потоков. Проблемными являются также повышение температуры гелия на выходе из турбины и разогрев всей лопастной системы турбины до входной температуры при ее аварийной остановке. Влияние данного способа на устойчивость работы компрессоров аналогично механизму выпуска газа из контура за компрессором в способе управления массой гелия, так как в течение переходного процесса при открытии перепуска газа давление за компрессором и π_k уменьшаются, расход увеличивается, устойчивость работы компрессоров не нарушается. При одинаковых исходных параметрах быстрее изменяется мощность ГТУ замкнутого цикла, имеющая мень-

ший объем контура, так как перепуск уже не-большого количества газа вызывает резкое падение высокого или увеличение низкого давления.

Управление полезной мощностью регулированием мощности реактора и температуры газа на входе в турбину. Этот способ сравним или немного превосходит по экономичности предыдущий (регулированием байпасированием) в зависимости от мощности установки. Как видно на рис. 2, в, при снижении полезной мощности в диапазоне от 100 до 15% к.п.д. установки снижается до 14%. Но он предполагает значительное изменение температуры гелия в реакторе, поэтому необходимо учитывать тепловую инерцию реактора, которая будет определять изменение мощности. Для малых установок, когда инерция реактора невелика, на первый план выступает ограничение скорости изменения температуры конструкций реактора и оборудования системы преобразования энергии. Решением проблемы может служить дополнительное открытие байпасных клапанов, что, однако, усложняет систему регулирования и требует отдельного изучения.

Сравнение разных способов управления. Эффективность способов управления полезной мощностью (изменение мощности, экономичность, требования к системе управления) во многом зависит от конфигурации и уровня мощности реакторной установки. Для больших реакторных установок типа ГТ-МГР с точки зрения экономичности очевидно преимущество способа управления с помощью изменения массы в гелиевом контуре, при котором к.п.д. реакторной установки снижается с 46,6 до 40% в диапазоне частичных нагрузок от 100 до 15%. В том же диапазоне при способе управления мощностью реактора к.п.д. снижается до 14%, при управлении перепуском гелия — почти в 2 раза (до 7%).

Как было отмечено, каждый способ управления имеет свои ограничения. В первом способе это относительно медленное изменение нагрузки, связанное с пропускной способностью системы удаления и добавления гелия, и диапазон регулирования, диктуемый объемом гелиевых ресиверов. Второй способ управления — с помощью мощности реактора и температуры гелия перед турбиной из-за тепловой инерции контура допускает только медленное изменение

полезной мощности. Третий способ, хотя и существенно снижает к.п.д. при перепуске гелия, позволяет быстро снизить полезную мощность с требуемой скоростью до 10%/мин. Как показали оценочные расчеты, для установок различной мощности в целом сохраняются тенденции изменения параметров газотурбинного цикла и их относительные значения.

Таким образом, для поддержания высокого к.п.д. на частичных нагрузках эффективен комбинированный способ управления, например, до 50—80% $N_{\text{ном}}$ — давлением, при меньшей мощности — байпасированием или температурой гелия. При этом может быть значительно уменьшен объем емкостей хранения гелия. Для быстрого снижения нагрузки безальтернативно регулирование перепусками гелия, после достижения установившегося режима — восстановление высокого к.п.д. удалением соответствующего количества гелия из контура. Для благоприятных условий протекания переходных режимов могут предусматриваться дополнительные перепуски гелия (вокруг реактора, рекуператора и др.), которые увеличивают число оборудования и усложняют систему управления работой реакторной установки, что может отразиться на ее безопасности.

Переход на режим частичных нагрузок сопровождается кратковременными отклонениями (колебаниями) параметров и забросами (провалами) мощности. Сглаживание переходного процесса и сокращение времени перехода на заданный режим достигаются комбинированием разных способов управления и выбором оптимального алгоритма управления.

Анализ изменения статических параметров при разных способах управления в регулируемом диапазоне изменения полезной мощности позволяет получить информацию для формирования требований к оборудованию и системам и разработки алгоритмов прохождения режимов. Вследствие небольшого изменения температуры гелия на входе и выходе из реактора, составляющего не более 10 °С при управлении изменением массы гелия в контуре и до 70 °С при открытии байпасного клапана, данные способы являются предпочтительными с точки зрения циклического нагружения соответствующего оборудования. Наибольший диапазон изменения температуры гелия, как было отмечено, свойствен способу управления мощностью реактора и

температурой гелия перед турбиной. Режимы с изменением массы протекают с максимальным изменением давления в гелиевом контуре, что приводит к циклическим нагрузкам на теплопередающие поверхности в теплообменниках, на подшипники и уплотнения турбомшины, а также к изменению давления в полости генератора.

В транспортных ядерных установках, для которых на первый план выходит обеспечение требуемой маневренности, возникает проблема быстрого набора полезной мощности. Быстрый переход к режиму большей мощности закрытием перепускного клапана может осуществляться при условии работы на исходном режиме с частично открытым перепуском. При этом необходимо учитывать ограничение увеличения нейтронной мощности реактора.

Отметим, что при управлении многовальтной турбомашинной проблемной является защита от разгона турбины с генератором в случае аварийной потери нагрузки на генераторе. Как показали расчетные оценки [5], внезапная потеря нагрузки со срабатыванием защитных систем приводит к разгону турбокомпрессора до недопускаемой частоты в отличие от одновального варианта. Кроме того, в многовальных установках в турбине низкого давления быстро достигаются помпажные режимы.

Заключение. Данные о статических параметрах в требуемом диапазоне изменения мощ-

ности при разных способах управления позволяют получить информацию для формирования требований к оборудованию и системам реакторной установки и разработки алгоритмов прохождения режимов.

Высокие к.п.д. на 100%-ной и частичных нагрузках в совокупности с высокими технико-экономическими показателями и повышенной безопасностью определяют перспективность создания ВТГР с газотурбинным циклом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганин М.Е., Головки В.Ф., Кодочигов Н.Г. Транспортные ЯЭУ с открытым и замкнутым газотурбинным циклом. — Атомная энергия, 2018, т. 124, вып. 5, с. 246—254.
2. Kiryushin A.I., Kodochigov N.G., Kuzavkov N.G. e.a. Project of the GT-MHR high-temperature helium reactor with gas turbine. — Nucl. Engng Design, 1997, v. 173, p. 119—129.
3. Кодочигов Н.Г., Головки В.Ф., Дмитриева И.В. Статистический анализ параметров реакторной установки с прямым замкнутым газотурбинным циклом. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып. 1, с. 65—76.
4. Манушин Э.А., Бекнев В.С., Осипов М.И., Суровцев И.Г. Ядерные газотурбинные и комбинированные установки. М.: Энергоатомиздат, 1993.
5. Кодочигов Н.Г., Головки В.Ф., Ганин М.Е. Выбор конструктивной схемы турбомшины замкнутого газотурбинного цикла АЭС с высокотемпературным газохладаемым реактором. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 2, с. 88—94.

Поступила в Редакцию 22.08.18

УДК 621.039.519

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖПЕТЛЕВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ВО ВНУТРИРЕАКТОРНОМ НАПОРНОМ ТРАКТЕ ВВЭР-1000

Крапивцев В.Г., Солонин В.И. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

Постоянно растущие требования к безопасности АЭС определяют высокую степень актуальности исследований межпетлевого перемешивания теплоносителя во внутриреакторных трактах в области от входных патрубков до входа потока в активную зону. Исследования позволяют уточнить распределение температуры в ТВС, петлях, особенно в режимах работы реакторной установки с несимметричной нагрузкой или с неодинаковыми характеристиками петель. Они используются для расчета концентрации

бора в активной зоне, петлях при несимметричной подаче в первый контур [1].

Исследования [2—5] малочисленны, что требует дополнительных экспериментальных исследований. Такие исследования проводятся в объеме пусконаладочных работ и теплогидравлических испытаний блоков, а также с использованием маломасштабных моделей внутриреакторного тракта, в которых можно получить значительный объем информации. В настоящей статье приводятся экспериментальные результа-