

## ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.533:621.64

**В.И. Полуничев, Г.П. Шумайлов, К.Б. Вешняков, П.А. Горбунов**

### **РЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ДЛЯ АЭС «КУДАНКУЛАМ» (ИНДИЯ)**

ОАО «ОКБМ И.И. Африкантов»

В проектах АЭС «Куданкулам», НВАЭС-2, АЭС «Белене» предусматривается система пассивного отвода тепла (СПОТ) с контуром воздушного охлаждения. Устойчивая работа СПОТ, необходимая скорость расхолаживания реактора в режиме "горячего" резерва достигаются с помощью регулирующего устройства, работающего пассивно от давления пара второго контура по определенному алгоритму либо от пружины при дистанционном открытии. В статье приведены результаты конструкторских и экспериментальных исследований регулирующих устройств, которые к настоящему времени изготовлены и поставлены на строительную площадку 1 и 2 блоков АЭС "Куданкулам" (Индия).

*Ключевые слова:* система пассивного отвода тепла, регулирующее устройство, Куданкулам.

#### **Введение**

Разработка пассивных систем отвода остаточных тепловыделений реакторных установок (РУ) в аварийных ситуациях является одной из важнейших задач при проектировании систем безопасности. Эта задача может решаться путем использования некоторого запаса воды в парогенераторах (ПГ) или отдельных емкостях, размещенных под защитной оболочкой или за ее пределами. В подобных проектах вода аккумулирует энергию остаточных тепловыделений при нагреве и испарении. При этом в процессе развития аварийной ситуации постулируется возможность через определенный промежуток времени после ее возникновения восстановить электроснабжение, подачу охлаждающей технической воды, управление и т.п. Существует ограничение по времени, в течение которого технически оправданные запасы воды позволяют осуществлять пассивное аварийное охлаждение РУ.

При проектировании новых перспективных РУ с реакторами типа ВВЭР в соответствии с современными требованиями закладываются технические решения, направленные на дальнейшее повышение безопасности. В проекте АЭС «Куданкулам», Нововоронежской АЭС-2, АЭС «Белене» используется одно из таких решений – СПОТ с контуром воздушного охлаждения, предназначенная для отвода остаточных тепловыделений от реактора без ограничений по времени в аварийных режимах с потерей других каналов теплоотвода. Кроме того, СПОТ обеспечивает работу другой системы безопасности – пассивной системы фильтрации межоболочечного пространства (ПСФ).

СПОТ включает в себя воздушные теплообменники-конденсаторы, которые по пароводяному тракту соединены с ПГ. Охлаждение теплообменников-конденсаторов осуществляется атмосферным воздухом, естественная циркуляция которого организуется с помощью тяговых труб.

Особенностью СПОТ является воздушный контур охлаждения с регулируемым расходом охлаждающего воздуха, что позволяет поддерживать РУ в разогретом состоянии. Это

достигается с помощью регулирующего устройства, работающего «по прямому действию» давления рабочей среды второго контура, величина которого определяется уровнем остаточных тепловыделений в реакторе.

На протяжении ряда лет ОАО «Атомэнергопроект» совместно с ВНИИАМ, ОАО «Гидропресс», Институтом проблем энергетике национальной академии наук Беларуси, ОАО «ОКБМ Африкантов» и др. выполняли комплекс исследований в обоснование основных характеристик СПОТ. Последние испытания на стенде ОАО «Гидропресс», проведенные в зимних и летних условиях, подтвердили основные проектные параметры СПОТ, в том числе мощность системы при различных температурах атмосферного воздуха, тепло-гидравлические характеристики регулирующего устройства, параметрическую устойчивость работы системы [1].

## 1. Устройство и характеристики системы

СПОТ предназначена для длительного пассивного отвода остаточных тепловыделений в запроектных авариях с потерей всех источников переменного тока в следующих случаях:

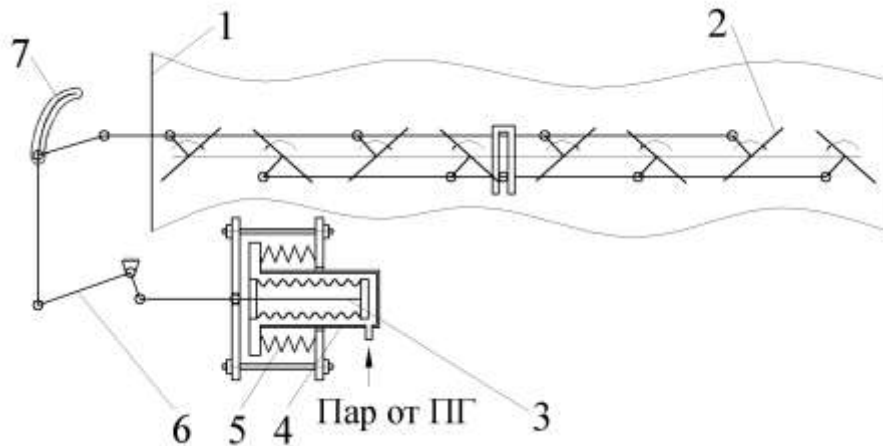
- при герметичном первом контуре, когда в течение не менее суток СПОТ обеспечивает поддержание РУ в разогретом состоянии, из которого возможен быстрый ввод в действие;
- при течах первого контура, когда расхолаживание реакторной установки производится с максимально возможной скоростью совместно с гидроемкостями системы аварийного охлаждения зоны (САОЗ). В этом случае СПОТ обеспечивает частичный отвод тепла от активной зоны, снижая тем самым необходимые производительность САОЗ и продолжительность процесса проливки.

Для регулирования мощности СПОТ в воздушном тракте над теплообменником установлен шибер регулирующего устройства с поворотными лопатками. Управление лопатками осуществляется через передаточный механизм приводом пассивного действия, исполнительный механизм которого работает от давления среды второго контура. При течах первого контура производится полное открытие лопаток шибера дистанционно оператором при использовании энергии сжатых пружин.

Проведены обширные конструкторские, расчетные и экспериментальные исследования, в том числе поиск и обоснование оптимального алгоритма изменения угла поворота лопаток от давления пара, при котором обеспечивается оптимальная скорость расхолаживания и параметрическая устойчивость работы СПОТ. Например, в условиях линейной зависимости угла поворота лопаток шибера от давления в ПГ, показали, что при малых углах открытия лопаток шибера система предрасположена к «низкочастотной» параметрической неустойчивости, что в дальнейшем подтвердилось экспериментально на стенде ТДУ-1 в ОИЭЯИ-Сосны (г. Минск). Причиной возникновения колебаний явилось резкое возрастание модуля производной коэффициента гидравлического сопротивления шибера от угла поворота его лопастей при малых углах их открытия [1].

Для исключения колебаний были разработаны алгоритм и регулирующее устройство для его реализации, которое обеспечивает линейное изменение мощности воздушного канала СПОТ от давления в парогенераторе. Для этого в регулирующее устройство включен передаточный механизм, обеспечивающий соответствующее изменение угла поворота лопаток шибера от давления пара. В основу такого механизма положена кулиса, позволяющая обеспечить практически любую зависимость угла поворота лопаток шибера от давления пара [2]. При этом использована встречная схема поворота лопаток шибера, обладающая более благоприятной для конструктивного исполнения передаточного механизма зависимостью проходного сечения шибера от угла поворота лопаток (рис. 1).

Устойчивость работы системы на основе принятых решений в режиме отвода остаточных тепловыделений была подтверждена расчетным путем, а затем экспериментально.



**Рис. 1. Кинематическая схема регулирующего устройства системы пассивного отвода тепла:**

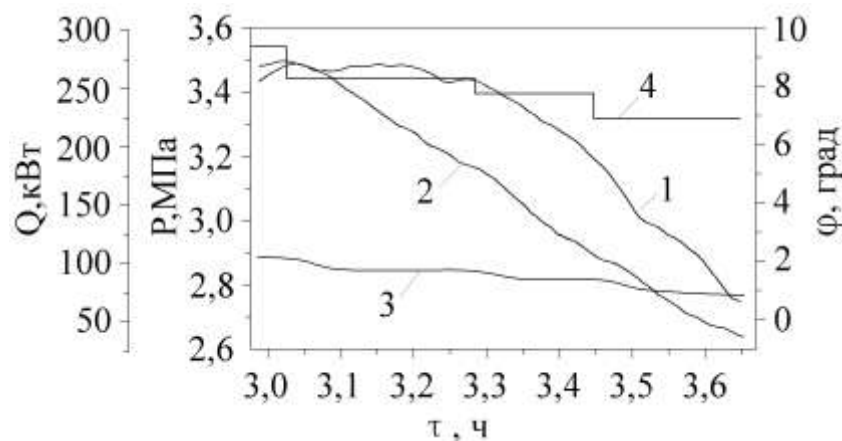
1 – тяговая труба; 2 – лопатки шибера; 3 – шток привода; 4 – корпус привода; 5 – пружина;  
6 – передаточный механизм; 7 – кулиса

## 2. Экспериментальные исследования регулирующего устройства

Исследования работоспособности СПОТ в эксплуатационных режимах и проверка технических решений на начальном этапе проводились на специально спроектированной для этого экспериментальной установке ТДУ-1. Результаты изменения параметров во времени показаны на рис. 2 [3, 4].

С целью экспериментального подтверждения устойчивости отвода остаточных тепловыделений реактора к атмосферному воздуху и проверки работоспособности регулирующего устройства СПОТ, разработанного и изготовленного ОАО «ОКБМ Африкантов», были проведены испытания на полномасштабной модели в ОАО «Гидропресс» (рис. 3) [5].

Испытания полномасштабной модели на стенде ОАО «Гидропресс» были разделены на два этапа (летний и зимний) для определения влияния температуры окружающей среды на мощность теплоотвода СПОТ и работу регулирующего устройства.



**Рис. 2. Изменение угла поворота лопаток (1), давления во втором контуре (2), тепловой мощности, снимаемой системой (3) при изменении мощности первого контура (4) на стенде ТДУ-1**

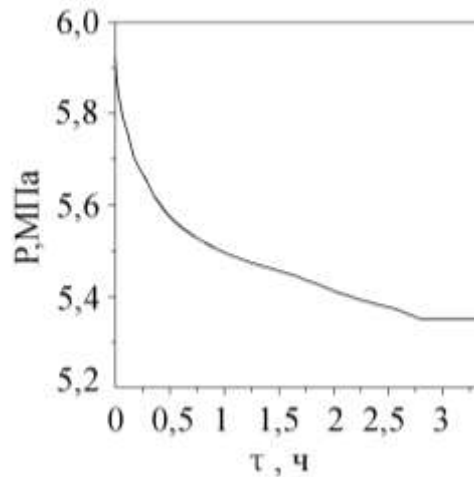


Рис. 3. Изменение давления в парогенераторе на стенде ОАО «Гидропресс» в режиме «горячего» резерва

На первом этапе испытаний зимой 2003 г. проверялась способность регулятора работать по назначению в заданном диапазоне регулирования давления в парогенераторе, от которого зависит отводимая мощность, в том числе определены: сопротивление воздушного тракта регулирующего устройства при различных углах поворота лопаток шиберов; устойчивость совместной работы модели теплообменника и регулирующего устройства.

Результаты экспериментов в целом подтвердили основные проектные характеристики регулирующего устройства (характер изменения угла поворота лопаток от давления пара), обеспечивающие параметрическую устойчивость работы модели СПОТ. По результатам первого этапа испытаний была выполнена доработка регулирующего устройства с целью гарантированного получения требуемых характеристик.

После доработки регулирующего устройства летом 2004 г. проведен *второй этап испытаний*, подтвердивший, что при выбранном алгоритме управления обеспечивается близкое к линейному изменение мощности СПОТ от давления пара в заданном диапазоне регулирования. Гидравлическое сопротивление регулятора в полностью открытом положении пренебрежимо мало и не влияет на отводимую мощность, которая остается той же самой, что и при отсутствии регулятора.

Проведены испытания по определению характеристик регулирующего устройства и изменения основных параметров пароконденсатного тракта при имитации изменения мощности остаточных тепловыделений. Результаты испытаний приведены на рис. 4.

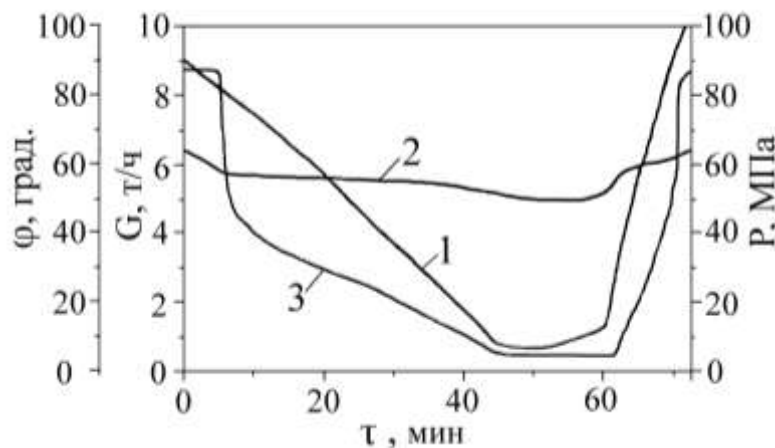


Рис. 4. Зависимость давления пара в модели парогенератора (2) и угла открытия лопаток регулирующего устройства (3) от тепловой мощности (расхода подаваемого пара) (1)

При принятой в проекте зависимости площади проходного сечения (угла поворота лопаток) от давления пара в парогенераторе обеспечивалась устойчивая работа системы пассивного отвода тепла во всем диапазоне углов открытия лопаток регулирующего устройства [1].

В СПОТ с предложенным регулирующим устройством при работе установки в режиме «горячего» резерва обеспечивалось длительное поддержание давления во втором контуре в заданном пределе до существенно меньших значений мощности, чем в СПОТ без регулирующего устройства, т.е. время нахождения установки при повышенных параметрах значительно увеличивается.

### 3. Результаты изготовления регулирующих устройств

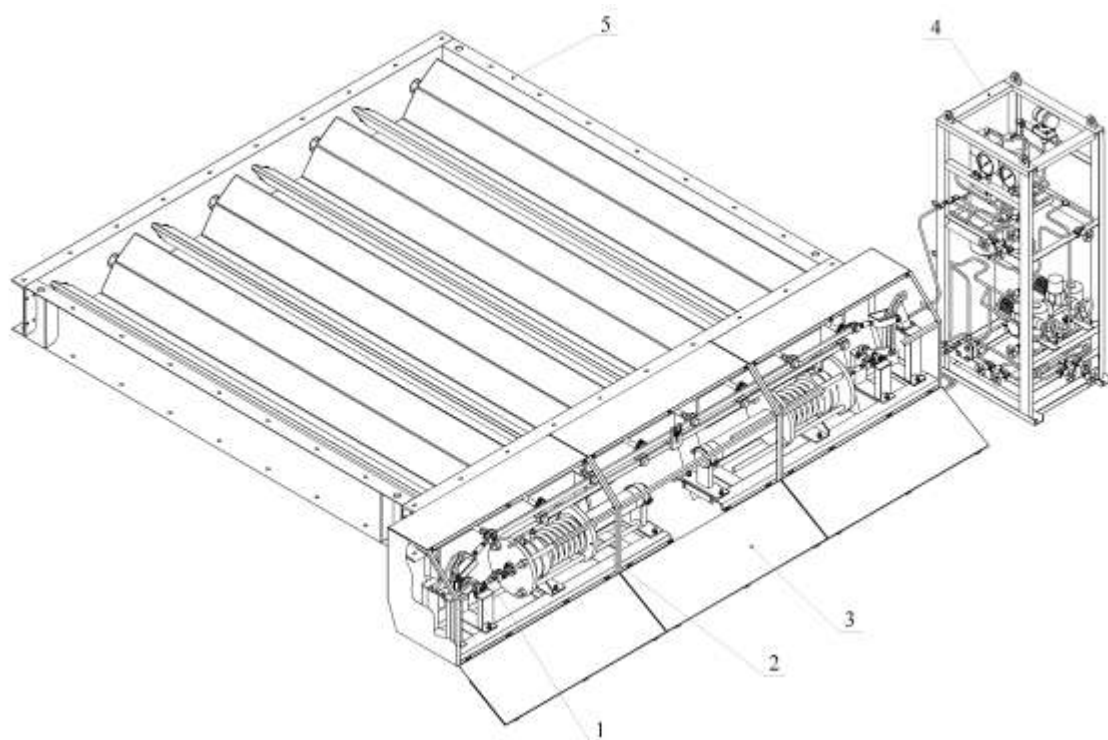
В 2008 году завершены изготовление, испытания и поставка 24 регулирующих устройств СПОТ для двух блоков АЭС «Куданкулам» (Индия) с РУ ВВЭР-1000.

На рис. 5 показан общий вид регулирующего устройства СПОТ АЭС «Куданкулам», в основу которого были положены технические решения, проверенные на стенде ОАО «Гидропресс».

После изготовления регулирующих устройств проводились комплексные испытания головного и серийных образцов. Целью испытаний являлась проверка, подтверждение и контроль соответствия технических характеристик регулирующих устройств требованиям технических условий.

Результаты настройки головного образца и усредненные данные для всех 24 серийных регулирующих устройств приведены на рис. 6.

Анализ полученных результатов показал, что для всех регулирующих устройств удалось установить требуемый техническими условиями диапазон регулирования, при этом отмечается хорошая сходимости результатов, что свидетельствует о высоком уровне производства и правильности заложенных в проект решений по способам и объемам регулировок.



**Рис. 5. Общий вид регулирующего устройства для АЭС «Куданкулам»:**  
 1 – передаточный механизм; 2 – привод пассивного действия; 3 – кожух;  
 4 – блок управления; 5 – шибер

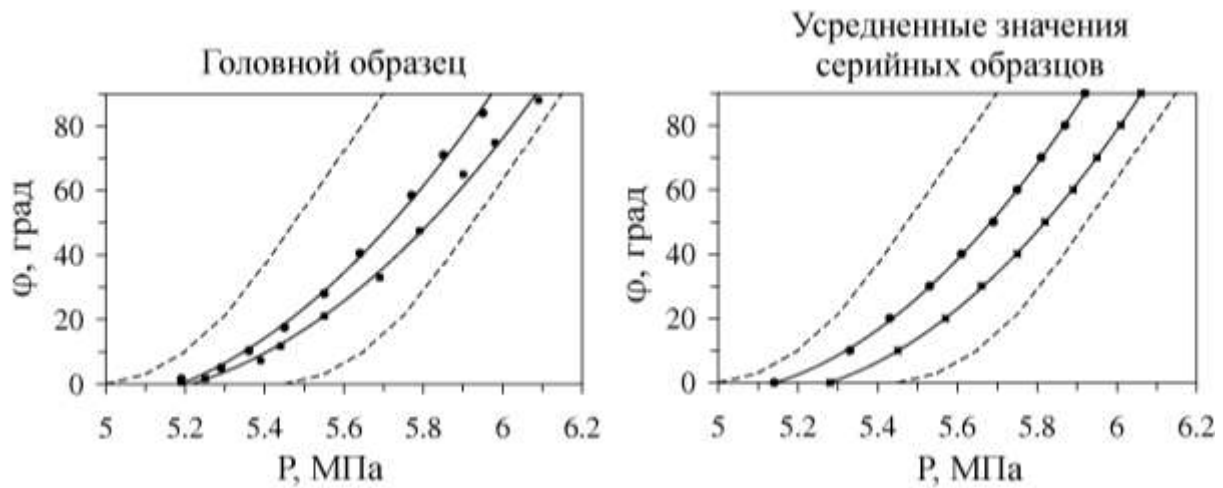


Рис. 6. Зависимость угла поворота лопаток от давления в приводах:  
 —■— - открытие; —●— - закрытие; - - - - заданный диапазон регулирования

#### 4. Модернизация регулирующего устройства для новых проектов СПОТ

Полученный опыт проектирования и изготовления регулирующих устройств СПОТ АЭС «Куданкулам» дает возможность их модернизации для новых проектов СПОТ в части: упрощения конструктивного исполнения; снижения стоимости; доработок для удобства монтажа, обслуживания и регулировок; расширения режимов использования.

Одним из путей модернизации регулирующего устройства является реализация режима, при котором дистанционное управление лопатками шиберов обеспечивается при исключении из состава блока управления пневмобаллона и связанной с ним арматуры. Регулирующее устройство дает возможность обеспечить пассивный отвод тепла при давлении пара ниже диапазона регулирования, что исключено в проекте регулирующего устройства СПОТ АЭС «Куданкулам». Режим работы регулирующего устройства для перспективных систем показан на рис. 7.

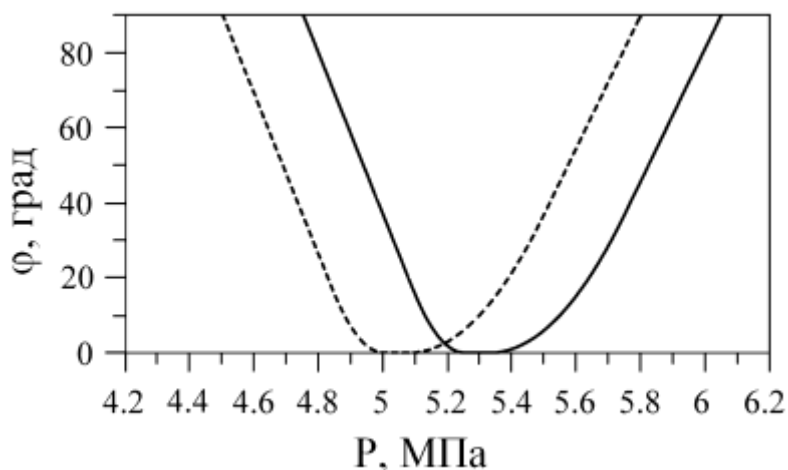


Рис. 7. Режим работы регулирующего устройства для новых проектов СПОТ:  
 — - повышение давления; - - - - понижение давления

Модернизированные регулирующие устройства предполагается использовать при проектировании оборудования СПОТ для последующих блоков АЭС «Куданкулам», Нововоронежской АЭС-2 и АЭС «Белене» (Болгария).

**Библиографический список**

1. **Полуничев, В.И.** Создание и исследование регулирующего устройства системы пассивного отвода тепла для АЭС «Куданкулам» (Индия) / В.И. Полуничев [и др.]. – М.: Атомная энергия, 2007. Т. 102. Вып. 1. С. 49–52.
2. **Пат. 2188354 Российская Федерация, МПК 7 F 16 K 1/22.** Клапан / Полуничев В.И., Плеханов А.А., Шумайлов Г.П.; заявитель и патентообладатель Нижний Новгород ОАО «ОКБМ Африкантов». – № 2188354 ; заявл. 11.09.00 ; опубл. 27.08.02, Бюл. № 24.
3. **Беркович, В.М.** Испытания модели шибера СПОТ с пассивным приводом прямого действия на стенде ТДУ / В.М. Беркович [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сб. ст. 3-я научно-техн. конф. / Подольск, 26–30 мая 2003. С. 38.
4. **Полуничев, В.И.** Система пассивного отвода тепла АЭС нового поколения / В.И. Полуничев, Г.П. Шумайлов, И.В. Рябиков // Научное обеспечение безопасности использования ядерных энергетических технологий: сб. ст. 14-я ежегодная конф. Ядерного общества России / Удомля, 30 июня – 4 июля 2003. С. 45–47.
5. **Полуничев, В.И.** Обеспечение устойчивой работы системы пассивного отвода тепла АЭС нового поколения / В.И. Полуничев, Г.П. Шумайлов, Д.А. Горностаев. – М.: Теплоэнергетика, 2005. №12. С. 50–54.

*Дата поступления  
в редакцию 04.02.2011*

**V.I. Polunichev, G.P. Shumailov, K.B. Veshnyakov, P.A. Gorbunov**

**PASSIVE HEAT REMOVAL SYSTEM REGULATING DEVICES  
FOR KUDANKULAM NPP (INDIA)**

The designs of Kudankulam NPP, NVNPP-2, Belene NPP provide for a passive heat removal system (PHRS) with an air-cooled circuit. Stable operation of the PHRS, required reactor cooldown rate in the "hot" standby mode are achieved by means of a regulating device that is passively operated by the secondary circuit steam pressure according to a definite algorithm or by a spring if opened by remote control. The paper provides results of design and experimental studies for the regulating devices that have been presently manufactured and shipped to the construction site of Kudankulam NPP Unit 1 and 2, India.

*Key words:* passive heat removal system, regulating device, Kudankulam.