

УДК 621.22

DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-4-52-58

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПЕРВОГО КОНТУРА ДВУХКОНТУРНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

*А.В. Разуваев, О.В. Киреева, Н.В. Краснолудский, В.А. Разуваев*

**Аннотация.** Предложена модернизированная система установки компенсатора давления в первый контур двухконтурной ядерной энергетической установки с реакторами типа ВВЭР. Схема предусматривает повышение надежности корпуса компенсатора давления за счет равномерного его прогрева в процессе нормальной эксплуатации. Приведены основные гидравлические параметры схемы, дан их детальный анализ. Проведен теплотехнический расчет для проверки предполагаемого эффекта по уменьшению затрат на эксплуатацию теплоэлектронагревательных приборов. Сделаны выводы об эффективности применения модернизированной схемы установки компенсатора давления. Предложенная схема требует дополнительного технического решения для обеспечения заявленного эффекта, в частности, необходимо увеличить затраты на теплоэлектронагревательные элементы.

**Ключевые слова:** энергетическая установка; компенсатор давления; теплоэлектронагревательные приборы; теплотехнический расчет.

---

## КОШ КОНТУРЛУУ ЯДРОЛУК ЭНЕРГЕТИКАЛЫК ТҮЗҮЛҮШТҮН БИРИНЧИ КОНТУРУНУН ИШЕНИМДҮҮЛҮГҮН ЖОГОРУЛАТУУ

*А.В. Разуваев, О.В. Киреева, Н.В. Краснолудский, В.А. Разуваев*

**Аннотация.** Макалада суу энергетикалык реактору тибиндеги реакторлор менен эки контурлуу ядролук энергетикалык түзүлүштүн биринчи контурунда басымдын компенсаторун орнотуунун модернизацияланган системасы сунушталган. Схема басым компенсаторунун корпусунун ишенимдүүлүгүн нормалдуу иштөө учурунда бир калыпта жылытуунун эсебинен жогорулатууну карайт. Схеманын негизги гидравликалык параметрлери келтирилген, алардын толук талдоосу берилген. Жылуулук жана электр жылытуу приборлорун эксплуатациялоонун өздүк наркын төмөндөтүүнүн күтүлгөн натыйжасын текшерүү үчүн термотехникалык эсептөө жүргүзүлдү. Басым компенсаторун орнотуу үчүн модернизацияланган схемамы колдонуунун натыйжалуулугу жөнүндө корутунду чыгарылган. Сунушталган схема жарыяланган натыйжаны камсыз кылуу үчүн кошумча техникалык чечимди кабыл алуу талап кылынат, атап айтканда, жылуулук жана электр жылытуу элементтеринин баасын жогорулатуу зарыл.

**Түйүндүү сөздөр:** энергетикалык түзүлүш; басым компенсатору; жылуулук жана электр жылытуу приборлору; жылуулукту техникалык эсептөө.

---

## IMPROVING THE RELIABILITY OF THE FIRST CIRCUIT OF A TWO-CIRCUIT NUCLEAR POWER PLANT

*A.V. Razuvaev, O.V. Kireeva, N.V. Krasnoludsky, V.A. Razuvaev*

**Abstract.** The article presents an upgraded system for installing a pressure compensator in the primary circuit of a two-circuit nuclear power plant with VVER type reactors. The scheme provides for increasing the reliability of the pressure compensator housing due to its uniform heating during normal operation. The main hydraulic parameters of the scheme are given, their detailed analysis is given. A thermal engineering calculation was carried out to verify the expected effect of reducing the cost of operating thermal and electric heating devices. Conclusions are drawn about the effectiveness

of the use of the upgraded pressure compensator installation scheme. The proposed scheme requires an additional technical solution to ensure the claimed effect, in particular, it is necessary to increase the cost of thermal and electric heating elements.

**Keywords:** power plant; pressure compensator; thermal and electric heating devices; thermal engineering calculation.

С целью повышения надежности и экономичности работы таких сложных технологических объектов, как атомная электрическая станция, предложена модернизированная схема установки компенсатора давления в первом контуре двухконтурной ядерной энергетической установки (ЯЭУ).

Компенсатор давления (КД) – крупногабаритное оборудование ЯЭУ, предназначенное для создания и поддержания необходимого давления, а также для регулировки объема теплоносителя – воды, при ее нагревании в замкнутом объеме петли первого контура двухконтурной ЯЭУ.

Сосуд КД находится под высоким давлением [1, 2]. Внизу корпуса КД установлен небольшой отрезок трубы под трубопровод, который соединяет горячую нитку одной из петель 1-го контура с КД.

К примеру, на Ростовской АЭС на четыре энергоблоке установлен КД с внутренним объемом 79 куб. м, с толщиной стенок корпуса 160 мм, массой в 178 т и длиной 14 метров.

Приведем принципиальную гидравлическую схему включения КД в контур петли первого контура (рисунок 1, а). С целью упрощения выделим гидравлическую схему первого контура двухконтурной ЯЭУ с компенсатором давления, которая и является предметом подробного анализа (рисунок 1, б). Такие схемы описаны в работах [1, 2] и являются типовыми для действующих АЭС.

В состав ЯЭУ входят следующие основные контуры и системы: первый и второй контуры циркуляции теплоносителя; система аварийного отвода тепла; система аварийного охлаждения активной зоны; система подпитки первого контура; система ввода жидкого поглотителя и снижения давления в герметичном ограждении; система охлаждения корпуса реактора (заполнения кессона реактора водой); система рециркуляции [1–3].

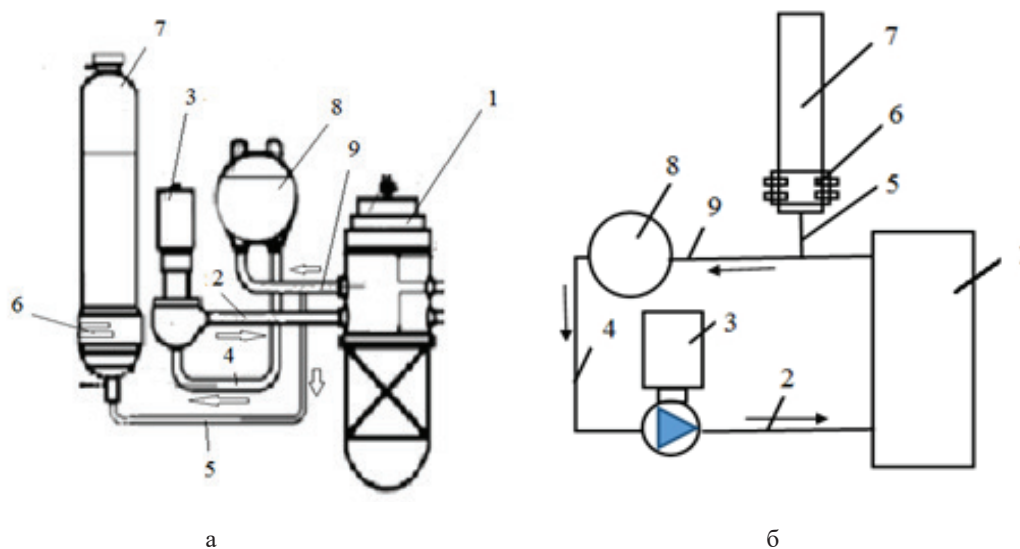


Рисунок 1 – Принципиальная упрощенная гидравлическая схема первого контура двухконтурной ядерной энергетической установки:

а – технологическая схема; б – позиции условных обозначений, одинаковы для обоих вариантов:

1 – реактор; 2 – трубопровод: главный циркуляционный насос – реактор;

3 – главный циркуляционный насос; 4 – трубопровод: парогенератор – главный циркуляционный насос;

5 – трубопровод от нижней части компенсатора давления к первому контуру;

6 – трубчатые электронагреватели; 7 – компенсатор давления; 8 – парогенератор;

9 – трубопровод: реактор – парогенератор

При нормальной эксплуатации теплоноситель первого контура отводит тепло от активной зоны реактора (рисунок 1, поз. 1) и передает его в парогенератор (поз. 8) воде – пару второго контура. В качестве теплоносителя первого контура используется специально подготовленная вода.

Система компенсации объема предназначена для компенсации увеличения объема воды при ее нагреве до номинальных значений, и создания при этом давления в первом контуре реакторной установки в заданных пределах при ее штатной работе.

КД как правило выполняется в виде вертикального сосуда, который устанавливается на кольцевую опору. Материал обечаяек и днищ – низколегированная сталь марки 10ГН2МФА. Внутренняя поверхность КД плакирована нержавеющей сталью. В верхней части КД находятся: люк для визуального осмотра и технического обслуживания; штуцеры для трубопроводов впрыска теплоносителя и под трубопроводы сброса пара через импульсивно-предохранительное устройство (ИПУ) в барботер; штуцеры под уровнемеры и импульсные трубки для измерения уровня воды и других параметров. К нижнему днищу КД приварен патрубок с переходом к трубе 426×40 мм, соединяющий компенсатор давления с «горячей» ниткой 4 петли главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) первого контура с компенсатором.

Внутри КД установлено разбрызгивающее устройство, защитный экран и блоки трубчатых электронагревателей (ТЭН). Основные параметры КД представлены в таблице 1.

Кипение воды в объеме КД достигается за счет работы ТЭНов, а образующийся пар собирается в верхней его части, создавая при этом паровую подушку. Созданное в сосуде давление передается в основной контур по трубопроводу, соединяющему его нижней частью с горячей ниткой циркуляционной петли по принципу сообщающихся сосудов.

Таблица 1 – Основные технические данные компенсатора давления

Номинальное давление стационарного режима, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	15,7 ±0,3 (160 ±3)
Температура номинального стационарного режима, К (°С)	619 ±2 (346 ±2)
Рабочая среда	Пар, вода I контура
Емкость (полный объем), м <sup>3</sup>	79
Объем воды при номинальном режиме, м <sup>3</sup>	55
Параметры электронагревателя:	
Мощность единичного нагревателя, кВт	90
Общая мощность блоков электронагревателей, кВт	2520

Изменение давления от номинального значения в КД достигается за счет сжатия или расширения паровой подушки в свободном объеме компенсатора. В случае значительного снижения давления пара в компенсаторе, а следовательно, и во всем контуре, происходит включение дополнительных групп электронагревателей, которые и нагревают воду, компенсируя давление до необходимого значения.

В случае, если происходит увеличение давления в КД выше значения, указанного в регламенте, то для его снижения через разбрызгивающее устройство, смонтированное в верхней части КД (в паровом объеме подушке), подается теплоноситель из «холодной» нитки циркуляционной петли контура, после чего происходит снижение давления паровой подушки за счет конденсации части пара, что и замедляет либо прекращает рост его давления в контуре.

Проведем анализ установки корпуса КД в горячую нитку первого контура ЯЭУ. КД подключен к ветке циркуляции теплоносителя между реактором и парогенератором только по одному трубопроводу, подключенному к нижней части корпуса КД. Из этого следует, что внутренний объем КД подключен только по одному трубопроводу, по которому объем горячей воды идет только при увеличении ее температуры, а значит и объема, при постепенном прогреве во всем контуре. Это приводит, в лучшем случае, к прогреву нижней части корпуса КД. Поэтому и нужны ТЭНы для нагрева воды в нижней части корпуса КД.

Для наглядности приведем некоторые выдержки из инструкции по эксплуатации установки КД в контуре и величины его параметров и требований, которые предъявляются к работе этой системы [4]:

5.2. Технологические ограничения и меры безопасности.

5.2.1. Скорость разогрева первого контура не должна превышать 20 °С/ч.

5.2.2. Скорость разогрева КД не должна превышать:

1) 20 °С/ч при азотной «подушке» в КД;

2) 20 °С/ч при температуре в КД менее 483К (210 °С);

3) 30 °С/ч при температуре в КД более 483К (210 °С) (после перехода на паровую «подушку»).

5.2.4. Разность температур верха и низа корпуса КД не должна превышать 323К (50 °С).

5.2.5. Разность температур верха и низа корпуса КД при разогреве не должна превышать 358К (85 °С).

5.2.6. Разность температур теплоносителя в КД и в первом контуре не должна выходить за пределы 293...343К (20–70 °С).

5.2.17. При температуре первого контура более 323К (50 °С) должна быть подана вода промконтур-ра на ГЦН.

5.2.29. Во время сдувки азота давление в первом контуре не должно снижаться до значения, гарантирующего запас до вскипания не менее 15 °С.

5.2.30. При прекращении принудительной циркуляции в первом контуре контролировать наличие естественной циркуляции и запаса до вскипания не менее 15 °С на выходе из ТВС.

5.2.34. Скорость изменения давления в первом и втором контурах должна быть не более 10 кгс/см<sup>2</sup> в минуту.

Все перечисленные выше параметры свидетельствуют о необходимости иметь более равномерный температурный перепад по всему корпусу КД. На основании этого, предлагается модернизированная гидравлическая схема включения КД в первый контур двухконтурной ЯЭУ. На данной схеме осуществляется циркуляция части горячей воды, взятой из петли «реактор – парогенератор», и подаваемой в верхнюю часть корпуса КД; слив воды осуществляется так же, как и прежде – через нижнюю часть корпуса, но подается на всасывание главного циркуляционного насоса. Модернизированная гидравлическая схема представлена на рисунке 2 [5].

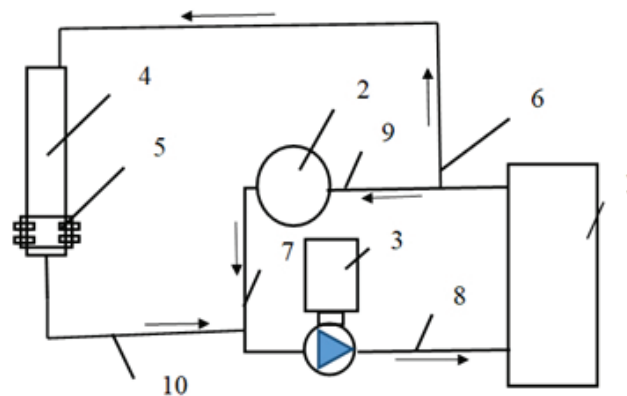


Рисунок 2 – Предлагаемая модернизированная гидравлическая схема включения компенсатора давления в первый контур системы циркуляции двухконтурной ядерной энергетической установки:

1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – главный циркуляционный насос;

4 – компенсатор давления; 5 – трубчатые электронагреватели;

6 – трубопровод к верхней части компенсатора давления; 7 – трубопровод парогенератор – главный циркуляционный насос; 8 – трубопровод – главный циркуляционный насос – реактор;

9 – трубопровод реактор – парогенератор; 10 – трубопровод от нижней части компенсатора давления на вход главного циркуляционного насоса

В предлагаемой модернизированной схеме включения КД в контур остальные системы контроля, мониторинга, защиты и другие по возможности остаются прежними. Особое внимание следует уделить системе трубопроводов, так как модернизация системы может отразиться на их конструктивных особенностях.

Для обеспечения работы АЭС необходимы трубопроводы различного назначения и размеров, следовательно, и материал для их изготовления различен. Проектированию систем трубопроводов при создании атомной станции уделяется особое внимание, а их стоимость достигает 10 % общей стоимости оборудования всей станции.

В результате модернизации схемы установки КД в двухконтурной ЯЭУ, предлагается переместить КД параллельно реактору (рисунок 3). Часть горячей воды проходит через КД, после чего испаряясь, создает давление пара в свободном объеме КД, равным давлению насыщения пара при соответствующей температуре. Таким образом, создается часть давления для поддержания необходимого давления пара в КД.

В патенте [5] оговаривается, что при таком включении КД в контур нет необходимости включать трубчатые электронагреватели – ТЭНы, либо уменьшить их количество, что в свою очередь ведет к снижению затрат электроэнергии на собственные нужды и уменьшению количества электронагревательных устройств.

Для выяснения данного утверждения был проведен следующий расчет. Теплофизические свойства воды и водяного пара взяты из справочника Ривкина [6].

Плотность воды при температуре 347 град. и давлении 16 МПа:

$$\rho_s = \frac{1}{0,0017067} = 585,926 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Плотность пара при температуре 347 град. и давлении 16 МПа:  $\rho_n = \frac{1}{0,009391} = 106,485 \text{ кг} / \text{м}^3.$

Как видно на рисунке 3, вода поступает от реактора. Следовательно, горячая нитка имеет температуру 320 град. и давление 16 МПа.

Классическая формула для расчета количества теплоты не подходит, так как удельная теплоемкость «с» зависит от давления:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t. \quad (1)$$

Для расчета количества теплоты используем разницу энтальпий. Энтальпия воды при температуре 347 град. и давлении 16 МПа:

$$i_{347} = 1646,3 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

Энтальпия воды при температуре 320 град. и давлении 16 МПа:

$$i_{320} = 1451,9 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

Удельная теплота парообразования (конденсации) при температуре 347 град. и 16 МПа:

$$r = 935,6 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

Расход воды на впрыск:

$$G_s = 1061 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Массовый расход на впрыск:

$$G_{\text{ам}} = \frac{G_s \rho_s}{3600} = 172,685 \text{ кг} / \text{с}.$$

Уравнение теплового баланса:

$$r G_n = (i_{347} - i_{320}) G_{\text{вм}}, \quad (2)$$

где  $G_n$  – количество пара, которое будет конденсироваться в единицу времени:

$$G_n = \frac{(i_{347} - i_{320})G_{эл}}{r} = 35,881 \text{ кг / с} \quad (3)$$

Объем конденсируемого пара в единицу времени:

$$V = \frac{G_n}{\rho_n} = 0,337 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (4)$$

Объем паровой подушки:

$$V_n = 24 \text{ м}^3.$$

Время конденсации всего объема паровой подушки:

$$\frac{V_n}{\frac{V}{3600}} = 71,226 \text{ с} \quad (5)$$

Для испарения воды применяются ТЭНы суммарной мощностью  $W = 2520 * 10^3 \text{ Вт}$ .

Количество конденсируемой воды при работе ТЭНов на полной мощности:

$$G_{мэн} = \frac{W}{r} = 2,693 \text{ кг / с} \quad (6)$$

Расчеты показывают, что от впрыска конденсируется 35,881 кг/с пара, а при работе ТЭНов на полной мощности испаряется всего 2,693 кг/с воды. Следовательно, подача воды в паровой объем не даст эффекта по давлению.

Для того чтобы рассчитать необходимую мощность ТЭНов для нагрева поступающей воды в верхнюю часть корпуса КД, необходимо количество пара, которое конденсируется за одну секунду (кг/с), умножить на удельную теплоту парообразования при 347 градусах (Дж/кг). Нагрев 55 м<sup>3</sup> воды от 320 до 347 град. не учитываем, так как данная доля нагрева от общей теплоты незначительна.

Количество конденсируемого пара за 1 секунду:

$$Q = 35,881 \text{ кг / с}.$$

Удельная теплота парообразования при температуре 347 град.:

$$r = 935,6 * 10^3 \text{ Дж / кг}.$$

Тогда необходимая мощность ТЭНов для нагрева поступающей воды в верхнюю часть корпуса КД составит:

$$W_H = Qr = 3,357 * 10^7 \text{ Вт} \quad (7)$$

Сравниваем мощности  $W$  и  $W_H$ :

$$\frac{W_H}{W} \approx 13. \quad (8)$$

Из расчетов получаем, что, согласно модернизированной схеме установки КД (рисунок 3), необходимо заменить имеющиеся ТЭНы на те, которые будут примерно в 13 раз мощнее используемых на данный момент в двухконтурной ЯЭУ. Следовательно, объемы ТЭНов увеличатся, вследствие чего необходимо изменять параметры объема ЯЭУ.

Проведенный расчет и анализ работы модернизированной схемы установки КД в первый контур ЯЭУ показал, что схема является не эффективной и требует дополнительного технического решения для обеспечения заявленного эффекта. Это требует проведения дальнейших исследований и расчетов.

Поступила: 29.12.21; рецензирована: 14.01.22; принята: 19.01.22.

**Литература**

1. *Дмитриев С.М.* Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учеб. пособие / С.М. Дмитриев, Д.Л. Зверев, А.Г. Орлов и др.; под общ. ред. С.М. Дмитриева. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2008. 458 с.
2. *Маргулова Т.Х.* Атомные электрические станции / Т.Х. Маргулова. Н. Новгород: ИздАТ, 1994. 269 с.
3. *Дмитриев С.М.* Конструирование основного оборудования АЭС: учеб. пособие / С.М. Дмитриев, В.А. Фарафонов; под общ. ред. С.М. Дмитриева. Н. Новгород: НГТУ им Р.Е. Алексеева, 2009. 509 с.
4. Системы первого контура реакторной установки: Инструкции по эксплуатации // ИЭ.3.УА.РЦ-2/03.
5. Патент 2685220. Российская Федерация. МПК G21C 15/00 (2006/01). Устройство первого контура двухконтурной ядерной энергетической установки: заявитель и патентообладатель А.В. Разуваев. № 2018114884; заявл. 18.09.2017; опубл. 17.04.2019 // Бюл. № 11. 6 с.
6. *Ривкин С.Л.* Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980. 424 с.