

УДК 621.22  
DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-8-28-32

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СХЕМЫ ДВУХКОНТУРНОЙ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

*А.В. Разуваев*

*Аннотация.* Рассматриваются вопросы стабильного обеспечения потребителей энергоснабжением за счет применения атомных электростанций. Показана возможность применения технологий отработавшего ядерного топлива на атомной станции с тепловыми нейтронами, что позволяет использовать его на атомных станциях, работающих по технологии на быстрых нейтронах с дальнейшим его использованием на оборот, что обеспечивает его круговорот. Проведен расчет величины необходимого кавитационного запаса главного циркуляционного насоса. Предложены меры по обеспечению необходимого кавитационного запаса главного циркуляционного насоса. Применение «гибридной» схемы будет способствовать решению вопросов выполнения требований инструкции по эксплуатации в требованиях по температурным напорам между отдельными частями конструкций оборудования первого контура при прогреве и эксплуатации энергоустановки.

*Ключевые слова:* атомная энергоустановка; паровая система компенсации давления; кавитационный запас центробежного насоса; «гибридная» гидравлическая схема; главный центробежный насос.

---

## ЭКИ КОНТУРЛУУ АТОМДУК ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНЫН СХЕМАСЫН МОДЕРНИЗАЦИЯЛОО

*А.В. Разуваев*

*Аннотация.* Макалада атомдук электр станцияларын колдонуу аркылуу керектөөчүлөрдү энергия менен туруктуу камсыз кылуу маселелери каралган. Жылуулук нейтрондору бар атомдук станцияда колдонулган ядролук отун технологияларын колдонуу мүмкүнчүлүгү көрсөтүлгөн, бул аны андан ары аны жүгүртүүгө колдонуу менен, тез нейтрондордо технология боюнча иштеген атомдук станцияларда колдонууга мүмкүндүк берет, бул анын айлануусун камсыз кылат. Негизги циркуляциялык насосун кавитациясынын зарыл запасын эсептөө жүргүзүлдү. Негизги циркуляциялык насосун зарыл болгон кавитациялык запасын камсыз кылуу боюнча чаралар сунушталды. «Гибридик» схеманы колдонуу электр орнотмосу ысып кеткенде жана пайдаланууда биринчи контурдагы жабдуулардын конструкцияларынын айрым бөлүктөрүнүн ортосундагы температуралык басымдар боюнча талаптардагы эксплуатациялоо боюнча нускаманын талаптарын аткаруу маселелерин чечүүгө өбөлгө түзөт.

*Түйүндүү сөздөр:* атомдук энергия станциясы; басымды компенсациялоо боюнча буу системасы; борбордон четтөөчү насосун кавитациялык запасы; «гибридик» гидравликалык схема; негизги борбордон четтөөчү насос.

---

## MODERNIZATION OF THE CIRCUIT OF THE DOUBLE-CIRCUIT NUCLEAR POWER PLANT

*A.V. Razuvaev*

*Abstract.* The issues of stable provision of consumers with energy supply through the use of nuclear power plants are considered. The possibility of using spent nuclear fuel technologies at a nuclear power plant with thermal neutrons is shown, which makes it possible to use it at nuclear power plants operating on fast neutron technology with its further use per revolution, which ensures its circulation. The calculation of the required cavitation reserve of the main circulation pump is carried out. Measures to ensure the necessary cavitation reserve of the main circulation pump are proposed. The use of a "hybrid" scheme will contribute to solving the issues of meeting the requirements of the

operating instructions in the requirements for temperature pressures between individual parts of the structures of the primary circuit equipment during heating and operation of the power plant.

**Keywords:** nuclear power plant; steam pressure compensation system; cavitation reserve of centrifugal pump; "hybrid" hydraulic scheme; main centrifugal pump.

Как известно, запасы углеводородного топлива на Земле ограничены, в то время как экономики мировых стран продолжают развиваться и требуют все большего увеличения энергоснабжения. В этой связи в мире отмечается рост, развитие и производство альтернативных энергогенерирующих мощностей. К таким альтернативным способам производства энергии относятся ветро- и солнечные энергоустановки [1]. Однако использование этих генерирующих мощностей в зимний период 2020–2021 гг. показало себя не лучшим образом. Был отмечен ряд недостатков в их использовании.

Стал вопрос поиска более надежных альтернативных способов выработки электрической энергии для нужд потребителей. Такими источниками могут стать ядерные энергетические установки [2, 3]. Они основаны как на использовании топлива по одной технологии (с тепловыми нейтронами) для работы атомной энергетической установки (АЭУ), так и по другой технологии (на основе быстрых нейтронов). В данной статье приведено обоснование модернизации двухконтурной атомной энергетической установки.

В работе [4] рассматривалась гидравлическая система энергоустановки на базе двигателя внутреннего сгорания, схема которой является аналогичной модернизированной схеме АЭУ по техническому предложению [5]. Там же рассмотрена работа системы высокотемпературного охлаждения двигателя внутреннего сгорания и способ обеспечения необходимого давления воды для ее стабильной работы.

Гидравлические системы энергетических установок выполняют различные функции. В энергетических установках с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) теплота от втулки и крышки цилиндра отводится в радиатор, т. е. в атмосферу. На атомных электрических станциях (АЭС) теплота от тепловыделяющих элементов, расположенных в активной зоне реактора, отводится во второй контур. Теплопередача осуществляется в теплообменнике парогенератора в воде второго контура, где и образуется пар. Полученный пар подается на паровую турбину, который в свою очередь связан с электрогенератором, в результате чего происходит выработка электроэнергии. Пар после паровой турбины охлаждается в конденсаторе, а отведенное тепло «сбрасывается» в атмосферу через теплообменные аппараты различной конструкции.

Принципиальная «единая» гидравлическая схема обеих АЭУ показана на рисунке 1, где приведена расшифровка позиций по системе охлаждения как ДВС, так и модернизированной АЭУ согласно [4].

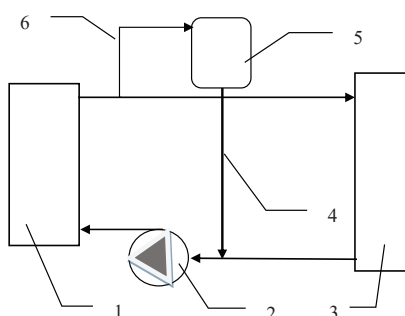


Рисунок 1 – Принципиальная гидравлическая схема энергоустановок:

1 – энергетическая установка; 2 – водяной насос, главный центробежный насос;

3 – радиатор, парогенератор; 4 – сливная трубка, труба;

5 – расширительный бак, компенсатор давления; 6 – паротводящая трубка, сливная труба

Представленная гидравлическая схема на рисунке 1 является результатом анализа достоинств и недостатков паровой и газовой систем компенсации давления, которые приводятся в работах [6, 7]. В [6] наиболее подробно рассмотрена «гибридная» система компенсатора давления. Она учитывает основные положительные свойства анализируемых паровой и газовой систем.

После начала заполнения теплоносителем первого контура и достижением его объема самого низкого уровня (на уровне подключения дыхательной трубы к корпусу компенсатора давления), в свободный от теплоносителя объем компенсатора давления (КД) подается необходимое давление воздуха (или газа). После этого с последующим уменьшением этого объема воздуха за счет увеличения объема теплоносителя и нагрева воздуха от горячего потока теплоносителя с подающей трубы (рисунок 1, поз. 6) давление воздуха будет увеличиваться и достигнет необходимой заданной величины. В работе [6] приведен оценочный расчет возможного использования воздуха (или газа) в свободном объеме компенсатора давления с обеспечением предварительного давления, с последующим доведением величины этого давления до требуемого значения при эксплуатации.

Для поддержания необходимого давления воздуха в объеме КД, возможно, потребуется система его поддержки. Предполагается, что она заменит систему с азотной подушкой для создания предварительного давления.

Создание предварительного давления в первом контуре необходимо в связи с работой главного циркуляционного насоса (ГЦН) на стадии прогрева теплоносителя первого контура. Так как ГЦН центробежного типа, то на его всасывании должно быть обеспечено необходимое давление с целью создания требуемого кавитационного запаса насоса, который в свою очередь необходим для стабильного потока теплоносителя по гидравлическому контуру. Поэтому необходимо провести анализ работы первого контура АЭУ, т. к. это связано с его надежностью.

Рядом исследователей установлено положительное влияние  $T_{\text{охл}}$  на снижение интенсивности кавитационных разрушений у втулок цилиндров двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [8]. Вместе с тем, повышение  $T_{\text{охл}}$  при неизменной конструкции водяного тракта, напоре и подаче циркуляционного насоса (ЦН), возможно лишь при достаточно большом значении действительного (располагаемого) кавитационного запаса насоса  $\Delta H_p^{\text{ин}}$ , превышающем значение его критического (требуемого) запаса не менее, чем в 1,1...1,5 раза, т. е.

$$\Delta H_p^{\text{ин}} \geq (1,1 \dots 1,5) \Delta H_{\text{кр}}^{\text{ин}}. \quad (1)$$

Невыполнение этого условия приводит, как правило, к срыву устойчивой работы ГЦН из-за перехода его в режим развитой кавитации.

Требуемый кавитационный запас определяется как конструкцией насоса, так и его параметрами и представляет собой минимально допустимую разность между удельной энергией потока на входе в рабочее колесо при данной подаче, и энергией, соответствующей давлению насыщения паров перекачиваемой жидкости при данной температуре. Как показано в [9], удовлетворительной расчетной схемы для аналитического определения величины  $\Delta H_{\text{кр}}^{\text{ин}}$  пока не существует.

Однако теоретически и экспериментально был установлен факт непосредственной взаимосвязи кавитационных характеристик насоса с его быстроходностью, определяемой по известному выражению для коэффициента быстроходности:

$$n_s = 3.65 \frac{n \sqrt{Q_{\text{ин}}}}{H_{\text{ин}}^{3/4}}, \quad (2)$$

где  $n$ ,  $Q_{\text{ин}}$  и  $H_{\text{ин}}$  – соответственно, частота вращения, подача и напор ГЦН. В свою очередь величины  $Q_{\text{ин}}$  и  $H_{\text{ин}}$  должны соответствовать расчетным значениям, определяемым из теплового и гидравличе-

ского расчета проектируемой гидравлической системы. Кавитационные характеристики в этих случаях оценивают с помощью кавитационного коэффициента быстроходности  $C$ , в зависимости от быстроходности насоса согласно данным таблицы 2 в работе [9].

Тогда искомое значение  $\Delta H_{mp}^{ин}$  находят, преобразуя известную формулу С. Руднева:

$$\Delta H_{mp}^{ин} = 10 \cdot \left(\frac{n}{C}\right)^{4/3} \cdot Q^{2/3}. \quad (3)$$

Проведем расчет коэффициента быстроходности по формуле (2) и при следующих исходных величинах:  $n = 1\,000$  об/мин, частота вращения крыльчатки ГЦН;  $Q_{ин} = 20\,000$  м<sup>3</sup>/час = 5,55 м<sup>3</sup>/с – производительность ГЦН;  $H_{ин} = 6,75$  кг/см<sup>2</sup> = 68,8 м – напор ГЦН. Эти исходные данные взяты из работы [10]. Величина коэффициента быстроходности будет равна:

$$n_s = 3,65 \frac{1000 \sqrt{5,55}}{68,8^{0,75}} = 359,97 \text{ м.}$$

Зная величину коэффициента быстроходности, по таблице 2 работы [9] найдем кавитационный коэффициент быстроходности «С», равный  $\approx 1200$ , и затем по формуле (3) определим требуемый кавитационный запас:

$$\Delta H_{mp}^{ин} = 10 \cdot \left(\frac{1000}{1200}\right)^{1,33} \cdot (5,55)^{0,67} = 24,75 \text{ м}$$

и далее по формуле (1) определим действительный (располагаемый) кавитационный запас насоса  $\Delta H_p^{ин}$ :

$$\Delta H_p^{ин} = (1,1 \dots 1,5) \cdot \Delta H_{mp}^{ин} = 24,75 \cdot 1,4 = 34,65 \text{ м.}$$

Таким образом, расчетные данные по располагаемому кавитационному запасу говорят о величине в  $\approx 35$  м.

По данным работы [11], необходимый кавитационный запас для ГЦН-195 должен иметь величину 100 м. Таким образом, имеющийся кавитационный запас величиной в  $\approx 35$  м недостаточен для обеспечения стабильной работы имеющейся гидравлической схемы, тем более на этапе пуска АЭУ. Поэтому для обеспечения расчетного кавитационного запаса следует повысить начальное давление в корпусе КД перед окончательной заливкой теплоносителя до величины как минимум в 100 м, т. е. повысить от предварительно расчетного, предложенного в работе [6] – 86,6 м, на 14 м.

Также при выходе АЭУ на номинальные параметры необходимо проконтролировать срабатывание и обеспечение необходимого давления теплоносителя в 16 МПа (160 кг/см<sup>2</sup>) в первом контуре.

Таким образом, применение рассмотренной «гибридной» схемы (см. рисунок 1) будет способствовать выполнению требований инструкции по эксплуатации [12] по температурному напору между отдельными частями конструкций оборудования первого контура при прогреве и эксплуатации АЭУ.

Поступила: 06.04.23; рецензирована: 21.04.23; принята: 26.04.23.

#### Литература

1. Кужелева К.С. Энергетическая политика ЕС в области ВИЭ, энергоэффективности и внедрения новых ресурсосберегающих технологий / К.С. Кужелева, Б.А. Грачев // Региональная энергетика: безопасность и эффективность. 2018. № 1. С. 8–14.
2. Дмитриев С.М. Конструирование основного оборудования АЭС. Ч. 1 / С.М. Дмитриев, В.А. Фарафонов. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2012. 426 с.
3. Дмитриев С.М. Конструирование основного оборудования АЭС. Ч. 2 / С.М. Дмитриев, В.А. Фарафонов. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2012. 324 с.

4. *Разуваев А.В.* Анализ гидравлической схемы энергоустановок с двигателями внутреннего сгорания / А.В. Разуваев // Глобальная ядерная безопасность. 2020. № 3. С. 73–77. URL: <https://doi.org/10.26583/GNS-2020-03-07>.
5. *Разуваев А.В.* Устройство первого контура двухконтурной ядерной энергетической установки / А.В. Разуваев. Патент РФ на изобретение № 2685220. Дата регистрации в государственном реестре изобретений Российской Федерации 17.04.2019 г.
6. *Разуваев А.В.* Анализ работы систем компенсации давления АЭС / А.В. Разуваев // Глобальная ядерная безопасность. 2022. № 2(43). С. 34–41.
7. *Разуваев А.В.* Анализ работы паровой системы создания и поддержания повышенного давления теплоносителя в первом контуре ядерной энергетической установки / А.В. Разуваев, В.А. Разуваев // Вестник КРСУ. 2021. Т. 21. № 12. С. 80–86.
8. *Полипанов И.С.* Защита систем охлаждения дизеля от кавитационного разрушения / И.С. Полипанов. Л.: Машиностроение, 1973. 152 с.
9. *Карелин В.Я.* Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах / В.Я. Карелин. М.: Машиностроение, 1975. 336 с.
10. *Кривов В.Г.* Совершенствование систем высокотемпературного охлаждения дизелей / В.Г. Кривов, С.А. Синатов, В.В. Кабыш, В.К. Аверьянов // Двигателестроение. 1981. № 4. С. 20–34.
11. Основное оборудование реакторного отделения / Центр подготовки персонала. АО «Концерн Росэнергоатом» «Балаковская атомная станция», 2000. 178 с.
12. Инструкции по эксплуатации «Системы первого контура реакторной установки» ИЭ.3.УА.РЦ-2/03. Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Балаковская атомная станция», 2006.