

# Системы компенсации давления в первом контуре АЭС с водо-водяным энергетическим реактором

С.А. Горбатов, В.И. Полуничев  
gorbatovs1997@gmail.com | dep59@okbm.nnov.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

*Компенсатор давления - технический сосуд под давлением со специальной конструкцией, обеспечивающей компенсацию изменения объёма воды в замкнутом контуре при её нагревании. Он является конструктивной особенностью двухконтурных реакторов с водой под давлением в качестве теплоносителя (в том числе тяжёловодных), использующихся на атомных станциях, атомных подводных лодках и судах и рассматривается обычно в составе технологической системы, которая обеспечивает поддержание давления в первом контуре в стационарных режимах и ограничение отклонения давлений в переходных и аварийных режимах реакторной установки.*

*Компенсатор давления одновременно является системой обеспечения нужного давления и компенсации изменений объёма теплоносителя в первом контуре, поэтому имеет двойное название — в технической документации и литературе он может называться как компенсатором давления, так и компенсатором объёма.*

**Ключевые слова:** компенсация давления, системы компенсации давления, АЭС, реакторная установка, водо-водяной энергетический реактор.

## Pressure compensation systems in the primary circuit of a nuclear power plant with a pressurized water reactor

S.A. Gorbатов, V.I. Polunichev  
gorbatovs1997@gmail.com | dep59@okbm.nnov.ru

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

*A pressure compensator is a technical pressure vessel with a special design that compensates for changes in the volume of water in a closed loop when it is heated. It is a design feature of two-circuit reactors with pressurized water as a coolant (including heavy water reactors) used at nuclear power plants, nuclear submarines and ships and is usually considered as part of a technological system that maintains the pressure in the primary circuit in stationary modes and pressure deviations in transient and emergency modes of the reactor plant.*

*The pressure compensator is at the same time a system for providing the required pressure and compensating for changes in the volume of the coolant in the primary circuit, therefore it has a double name - in technical documentation and literature it can be called both a pressure compensator and a volume compensator.*

**Keywords:** pressure compensation, pressure compensation systems, nuclear power plant, reactor plant, pressurized water power reactor.

### 1. Введение

Система компенсации давления (КД) предназначена для создания и поддержания давления в первом контуре в заданных пределах на всех режимах работы водо-водяных реакторных установок [1]. Система КД является системой нормальной эксплуатации, важной для безопасности.

Значение давления в первом контуре назначается исходя из условия отсутствия кипения теплоносителя на выходе из активной зоне в стационарных и переходных режимах работы установки. Изменение давления

обусловлено изменением объёма в замкнутой системе первого контура, которое в свою очередь обусловлено изменением средней температуры теплоносителя при пуске, переходных режимах и выводе из действия реакторной установки (РУ). Повышение давления опасно с точки зрения прочности, понижение же может вызвать нарушение циркуляции теплоносителя вследствие парообразования и срыва работы циркуляционных насосов.

В реакторных технологиях используются три типа систем компенсации: газовая, парогазовая, паровая (Рис. 1).

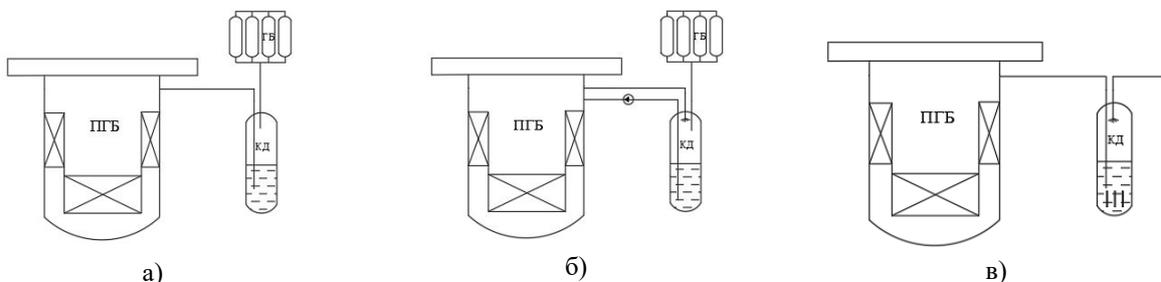


Рис. 1. Варианты систем компенсации давления реакторных установок с водо-водяным реактором: а) газовая; б) парогазовая; в) паровая

Актуальность данной темы определяется необходимостью существенного повышения ресурсных и

техничко-экономических характеристик перспективных РУ с ВВР, которые в значительной степени

связаны с используемым типом системы компенсации давления теплоносителя 1 контура [2]. Создание новых и перспективных судовых реакторных установок невозможно без глубокого и критического анализа существующих проектов, выявления их достоинств и недостатков [4-8]. Целью настоящего исследования является анализ применяемых в реакторных технологиях вариантов систем компенсации, расчёт и сравнение их основных технических характеристик, разработка и расчётное обоснование оптимизированного варианта.

В рамках проделанной работы проведен аналитический обзор существующих вариантов систем компенсации давления: паровая, газовая и парогазовая. Для каждой из них выполнены расчёты объёмов,

определено конструктивное исполнение компенсаторов, рассчитаны прочность, мощность электронагревателей для паровой системы в режиме пуска и при работе РУ, для газовой и парогазовой системы компенсации выполнен расчёт газонасыщения теплоносителя, определена возможность выделения газа в оборудовании первого контура. По результатам анализа известных систем для повышения технико-экономических характеристик, предлагается модернизированная паровая система компенсации давления, проведен аналогичный комплекс расчётов. Она состоит из парового компенсатора для поддержания давления и гидроаккумулятора (ГА), в котором размещается часть вытесненного теплоносителя (Рис. 2). Вода в ГА находится при низкой температуре.

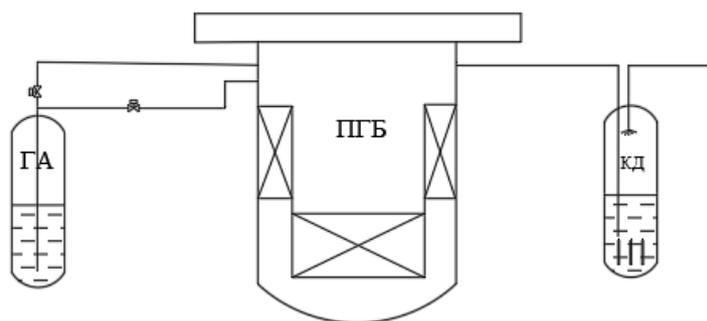


Рис. 2. ПКД с гидроаккумулятором

Полученная система имеет все достоинства паровой системы, при этом имеет преимущество перед традиционными системами компенсации давления. Полученную модель системы компенсации целесообразно использовать в новых проектах с водо-водяными реакторами, имеющими паровую систему компенсации давления.

## 2. Газовая система компенсации давления

Система состоит из компенсатора давления (КД) для размещения вытесненного из реактора теплоносителя и сжатого газа, как рабочего тела. Газ частично может размещаться в баллонах (Рис. 1.а). По полученному объёму определяется конструкция КД, выполняется прочностной расчёт по соответствующим нормам и находится масса.

Основные достоинства системы: отсутствие энергопотребления при работе, простота конструкции и режима управления системой.

Основные недостатки: большие объёмы газовой подушки, высокая концентрация растворенного газа в теплоносителе первого контура [3], большие термодинамические напряжения в коммуникациях, соединяющих реактор и ГКД.

## 3. Парогазовая система компенсации давления

Отличительной особенностью парогазовой системы (ПГКД) является использование в качестве рабочего тела парогазовой смеси. В ПГКД подается теплоноситель из реактора с максимальной температурой, распыляется душирующим устройством и

возвращается в реактор (Рис. 1.б). При этом в ПГКД создаётся давление пара, равное давлению насыщения при температуре выхода из активной зоны. Для создания запаса до кипения в ПГКД подается газ. Общее давление в ПГКД и в контуре определяется, как сумма парциальных давлений газа и пара  $P_{1к} = P_s + P_r$ . Для снижения давления парогазовой смеси в переходных режимах в неё через распылительное устройство может подаваться вода с пониженной температурой, как в паровой системе.

Основные достоинства: не требует для работы энергии, меньший по сравнению с газовой системой компенсации давления объём.

Основные недостатки системы: зависимость давления от температуры на выходе из активной зоны в переходных режимах, высокая растворимость газа, что вызывает более интенсивное, чем при газовой системе, газовыделение в оборудовании, снижая надёжность его работы.

## 4. Паровая система компенсации давления

Паровая система компенсации давления (ПКД) характеризуется тем, что в качестве рабочего тела используется пар, генерируемый электронагревателями (Рис. 1.в). Для получения избыточного давления температура в ПКД выше температуры на выходе из активной зоны.

Основные достоинства системы: высокая точность поддержания, значительно меньшие объёмы системы по сравнению с ГКД, отсутствие значительных термодинамических напряжений в трубопроводах, соединяющих ПКД с реактором, отсутствие влияния на водно-газовый режим.

Основные недостатки: большое энергопотребление в режиме разогрева, управление сложнее газовой.

## 5. Заключение

В ходе исследования систем компенсации давления для водо-водяных реакторов было выполнено:

1. Произведен сравнительный анализ и выявлены достоинства и недостатки.
2. Разработана методика и произведен расчёт основных параметров каждого типа системы при

одинаковых начальных условиях, а именно  $V_1 = 30 \text{ м}^3$ ;  $P_{1к} = 16 \text{ МПа}$   $T_{\text{вых}} = 325 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{вх}} = 270 \text{ }^\circ\text{C}$ , скорость разогрева ПКД до давления 16 МПа составляет  $50^\circ\text{C/ч}$ , температура в ГКД, в ПГКД и ПКД составляет 50, 325 и  $347 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно.

3. Проведен сравнительный анализ полученных результатов, доказывающий эффективность предложенной модернизированной паровой системы. Результаты представлены на рис. 3 и 4 и в таблице 1.

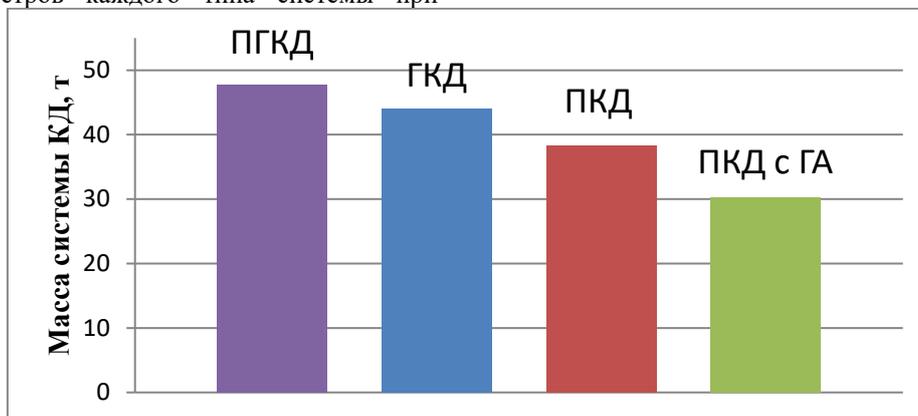


Рис. 3. Зависимость массы от типа системы

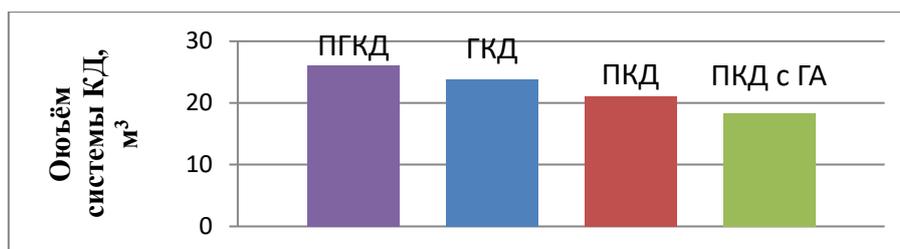


Рис. 4. Зависимость объёма от типа системы

Таблица 1. Результаты расчётов

Тип системы	Объём системы КД, м³	Масса системы КД, т	Мощность эл/наг в режиме пуска, кВт	Равновесная концентрация газа, нсм³/кг	Мощность эл/наг при работе, кВт
ГКД	26,4	45,9	0	1700	0
ПКД	21,1	38,3	886,1	0	39,9
ПКД с ГА	18,3	30,3	418,4	0	19,6
ПГКД	26,1	45,5	0	3800	0

Как видно из диаграмм, предложенная система имеет наилучшие массогабаритные показатели, связано это с уменьшением размеров и количества компенсаторов. Сравнивая энергопотребление

традиционной ПКД и модернизированной, очевидно значительное преимущество предложенного варианта, результаты отображены ниже на Рис. 5 и 6.

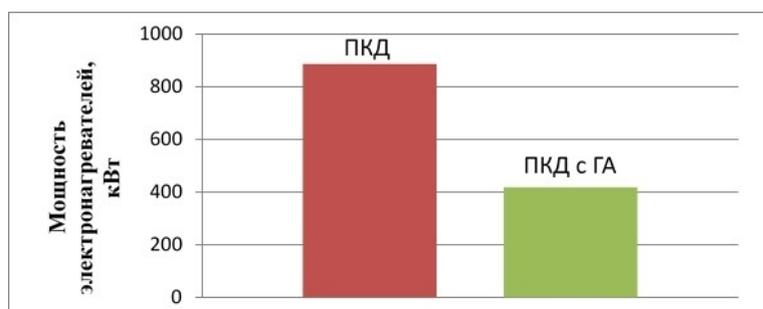


Рис. 5. Энергопотребление традиционной и модернизированной паровой систем в режиме пуска

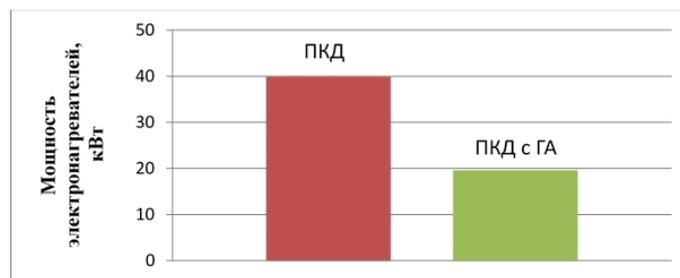


Рис. 6. Энергопотребление традиционной и модернизированной паровой системы во время работы РУ

В режиме пуска экономия достигается за счёт существенного снижения энергопотребления при разогреве поступающего теплоносителя и разогрева металлоконструкций. Во время работы РУ снижение энергопотребления достигается за счёт существенного уменьшения поверхностных потерь из-за уменьшения размеров и количества компенсаторов.

Каждая из систем имеет ряд как положительных, так и отрицательных характеристик. Выполнив оценочный сравнительный анализ основных характеристик трех вариантов систем компенсации следует, что при прочих равных условиях системы существенно отличаются массой и габаритами. Кроме того, принципиальным является их влияние на водно-газовый и химический режим теплоносителя, коррозионные процессы конструкционных материалов оборудования, термодинамическое воздействие и др.

Отечественный и мировой опыт создания и эксплуатации реакторных установок типа ВВЭР с паровой системой компенсации подтвердил их высокую надежность. В рамках данной работы была предложена модернизированный вариант ПКД, который сохраняя её положительные качества, позволяет снизить объём, массу и потребляемую мощность электронагревателей.

### Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00445.

### Библиографический список

- [1] В.И. Полуничев, А.Ф. Филимонов Возможные пути повышения ресурса активных зон с циркониевыми элементами ТВС для перспективных реакторных установок судов и АСММ // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 127.
- [2] В.И. Полуничев, А.Ф. Филимонов, А.Е. Помысухина Газовыделение и газоперенос в оборудовании первого контура реакторной установки с газовой системой компенсации давления // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 126.
- [3] Зверев Д.Л., Пахомов А.Н., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Кабин С.В. «Атомная энергия», т. 113, вып. 6, 2012, С.323-328.
- [4] М.А. Berberova, «Assessment of personnel actions in the most dangerous accidents», E3S Web of Conferences 209, 03007 (2020) ENERGY-21. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903007>

- [5] М.А. Berberova, S.S. Zolotarev, «NPP risk assessments results dependence study on the composition of the population living around the NPP (on the example of Rostov and Kalinin NPP)», GraphiCon 2019 Computer Graphics and Vision. The 29<sup>th</sup> International Conference on Computer Graphics and Vision. Conference Proceedings (2019), Bryansk, Russia, September 23-26, 2019, Vol-2485, urn:nbn:de:0074-2485-1, ISSN 1613-0073, DOI: [10.30987/graphicon-2019-2-285-289](https://doi.org/10.30987/graphicon-2019-2-285-289), <http://ceur-ws.org/Vol-2485/paper66.pdf>, p. 285-289.
- [6] М.А. Berberova, K.I. Chernyavskii, «Comparative assessment of the NPP risk (on the example of Rostov and Kalinin NPP). Development of risk indicators atlas for Russian NPPs», GraphiCon 2019 Computer Graphics and Vision. The 29<sup>th</sup> International Conference on Computer Graphics and Vision. Conference Proceedings (2019), Bryansk, Russia, September 23-26, 2019, Vol-2485, urn:nbn:de:0074-2485-1, ISSN 1613-0073, DOI: [10.30987/graphicon-2019-2-290-294](https://doi.org/10.30987/graphicon-2019-2-290-294), <http://ceur-ws.org/Vol-2485/paper67.pdf>, p. 290-294.
- [7] М.А. Berberova, A.V. Dmitriev, A.V. Golubkov, A.I. Elizarov, «Calculation of the probabilistic safety analysis and reliability by the fault trees and event trees methods», GraphiCon 2019 Computer Graphics and Vision. The 29<sup>th</sup> International Conference on Computer Graphics and Vision. Conference Proceedings (2019), Bryansk, Russia, September 23-26, 2019, Vol-2485, urn:nbn:de:0074-2485-1, ISSN 1613-0073, DOI: [10.30987/graphicon-2019-2-316-320](https://doi.org/10.30987/graphicon-2019-2-316-320), <http://ceur-ws.org/Vol-2485/paper73.pdf>, p. 316-320.
- [8] Vyacheslav Andreev, Olga Andreeva, Vasilii Gai and Maria Berberova «Determining the Resource of Safe Operation for Objects by Images», E3S Web of Conferences 209, 03007 (2020) ENERGY-21. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903003>