

В.Г. ПЕТРОСЯН, О.А. ОГАНЕСЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НАСОСОВ СИСТЕМ  
БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА №2 АРМЯНСКОЙ АЭС ПРИ ПРОЕКТНОЙ  
АВАРИИ**

На примере Армянской АЭС исследовано функционирование систем безопасности в случае проектной аварии с потерей теплоносителя. Определено влияние внедрения сетчатого фильтра приемка герметических помещений на кавитационный запас насосов высокого давления системы аварийного охлаждения активной зоны и спринклерной системы. Выявлено, что непрерывная работа спринклерной системы уменьшает давление в герметических помещениях ниже атмосферного, что вкуче с установкой сетчатого фильтра приводит к снижению кавитационного запаса насосов систем безопасности ниже допустимого значения.

**Ключевые слова:** сетчатый фильтр, система аварийного охлаждения активной зоны, спринклерная система.

**Введение.** Программа повышения безопасности Армянской АЭС предусматривает увеличение максимальной проектной аварии до разрыва трубопровода первого контура диаметром 2x209 мм [1,2]. Для достижения данной цели планируется внедрение мероприятий по модернизации существующих систем безопасности, в том числе системы аварийного охлаждения зоны (САОЗ) и спринклерной системы. После модернизации САОЗ система сможет обеспечить долгосрочное охлаждение активной зоны в условиях низкого давления в первом контуре. Данный эффект будет достигнут установкой трехходовых клапанов с линиями рециркуляции. Планируемая модернизация спринклерной системы призвана увеличить резервирование и пропускную способность системы добавлением дополнительного насоса и разделением на два независимых канала. Однако для должной работоспособности вышеупомянутых систем прежде всего необходимо произвести рециркуляцию через приемок герметических помещений. Для решения данной задачи был установлен сетчатый фильтр приемка герметических помещений, который должен обеспечить необходимый для рециркуляции расход, даже в условиях засорения мусором.

В данной работе рассмотрены вопросы, связанные с функционированием насосов САОЗ высокого давления (ВД) и спринклерной системы Армянской АЭС при новой проектной аварии с разрывом дыхательного трубопровода компенсатора давления (КД) после внедрения сетчатого фильтра приемка герметических помещений.

**Методика расчетов.** Для проведения расчетов была разработана расчетная схема герметических помещений ААЭС для кода COCOSYS [3,4]. Помещения были смоделированы при помощи 26 узлов, соединенных между собой 56 атмосферными и дренажными соединениями. Для моделирования облицовки стен были использованы 53 тепловые структуры. Модель отражает состояние герметических помещений 2-го блока ААЭС после планируемых модернизаций, т.е. с улучшенной плотностью, модифицированной системой САОЗ и установленным фильтром прямка (рис. 1).

Основываясь на консервативном подходе, были выбраны начальные и граничные условия в герметических помещениях ААЭС.

Для расчетов была выбрана авария с двусторонним разрывом дыхательного трубопровода компенсатора давления диаметром 2х209 мм.

Выбросы энергии и массы для данной аварии были рассчитаны при помощи кода RELAP5 MOD3 [5].

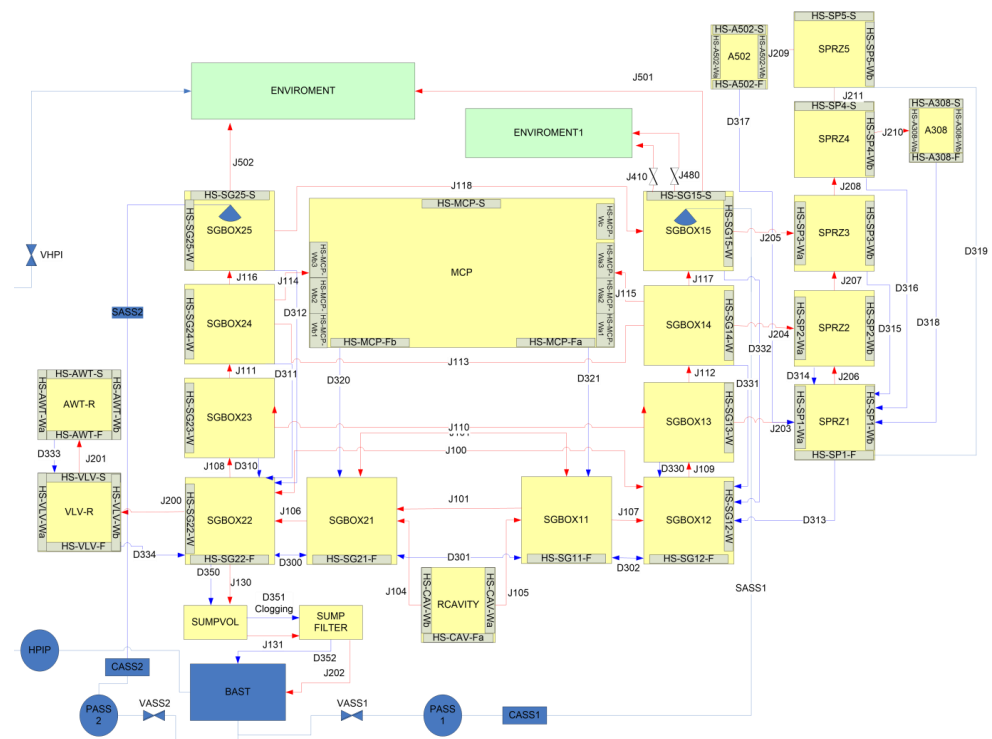


Рис. 1. Схема моделирования гермозоны

**Расчетная модель модернизированного прямка.** Для корректного моделирования эффектов рециркуляции была внедрена модель модернизированного прямка гермозоны с сетчатым фильтром [6].

Для достижения большой фильтрационной площади были установлены фильтрационные модули с прямоугольным сечением, число и размер которых были определены, основываясь на:

- количестве генерируемого мусора;
- оценке эффектов потока;
- расчетах гидравлического сопротивления фильтра и предварительных гидравлических тестов.

Проект предусматривает 65 м<sup>2</sup> фильтрационной поверхности. Фильтрационная поверхность состоит из стальных перфорированных листов толщиной 4 мм с отверстиями диаметром 10 мм. Внешняя поверхность перфорированных листов покрывается сеткой с размером стороны ячейки 0,7 мм.

Приямок и фильтры были смоделированы при помощи двух объемов. Первый из них представляет нефилтруемый объем приямка, второй – объем внутри фильтрующих модулей. Эти два объема разделены сеткой (рис. 2).

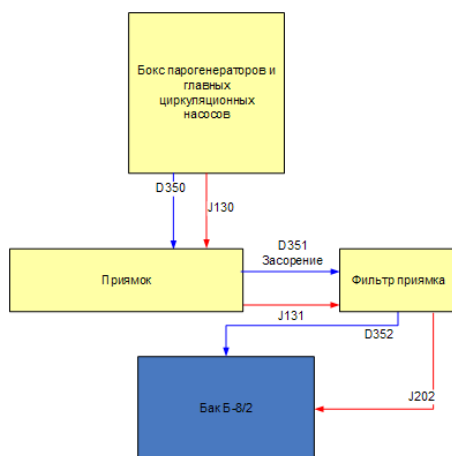


Рис. 2. Схема моделирования приямка гермозоны

Для моделирования эффекта засорения фильтра была использована специальная модель COCOSYS. Данная модель решает следующее уравнение для расчета гидравлического сопротивления вследствие накопления мусора:

$$\Delta p = \pm(K\gamma\eta)|v|^{0.5}, \quad (1)$$

где  $\Delta p$  – дополнительные потери давления;  $K$  – коэффициент потерь;  $\eta$  – плотность покрытия;  $v$  – скорость потока.

Как следует из уравнения, потери давления вследствие накопления мусора зависят от плотности покрытия мусора и коэффициента потерь. Данный коэффициент определяется экспериментальным путем. Для ААЭС данный коэффициент был определен на экспериментальной установке, эксплуатируемой VUEZ, и

согласно полученным результатам для разрыва трубопровода эквивалентным диаметром 200 мм плотность покрытия мусором составляет  $2,1 \text{ кг/м}^2$ , а потери давления –  $3,3 \text{ кПа}$ . Исходя из этого значения, был рассчитан коэффициент потерь для расхода  $1550 \text{ м}^3/\text{час}$  (максимальный проектный поток), который равен  $4 \cdot 10^9$ .

**Интерпретация и анализ результатов расчетов.** Во время расчетов были оценены возможности спринклерной системы и взрывных клапанов поддерживать давление в герметических помещениях ниже атмосферного для предотвращения выхода радионуклидов за пределы герметической оболочки. Кроме того, на основе результатов расчета был оценен допустимый кавитационный запас (ДКЗ) насосов спринклерной системы и САОЗ.

Вследствие разрыва и поступления пароводяной смеси в герметические помещения давление начинает повышаться и на 5-й секунде от начала аварии доходит до уставки открытия взрывных клапанов. Однако из-за сопротивления клапанов их полное открытие происходит с задержкой, и давление продолжает повышаться, достигая на 8-й секунде максимального значения –  $0,195 \text{ МПа}$ . Начиная с этого момента и до 300-й секунды клапаны периодически открываются, и давление в герметических помещениях не превышает значения  $0,2 \text{ МПа}$  (проектный предел). После 300-й секунды давление в герметических помещениях начинает снижаться по причине работающей спринклерной системы (система активируется на 48-й секунде) и на 940-й секунде от начала аварии достигает атмосферного. Поскольку спринклерная система непрерывно конденсирует пар, давление продолжает снижаться и достигает значения  $0,061 \text{ МПа}$  на 3260-й секунде. Необходимо отметить, что на ААЭС отсутствует уставка автоматического отключения спринклерной системы, и система продолжает работать, несмотря на сильное разрежение. Начиная с 3260-й секунды давление в герметических помещениях медленно повышается и на 37000-й секунде достигает атмосферного (рис. 3).

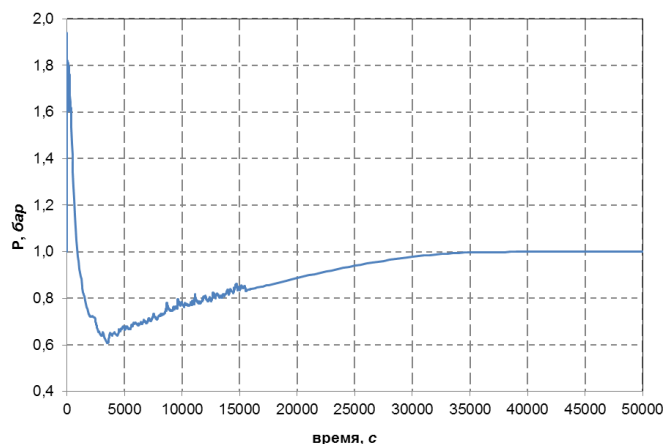


Рис. 3. Изменение давления в гермозоне во время аварии

В данных расчетах было учтено засорение сетчатого фильтра приемка гермозоны мусором, сгенерированным при разрыве дыхательного трубопровода, на 300-й секунде с начала аварии. Как было указано выше, при засорении фильтра приемка создается дополнительное гидравлическое сопротивление, которое приводит к снижению расхода в приемок и, следовательно, к уменьшению количества поступающей воды в бак аварийного запаса борной кислоты. После засорения фильтра начинается заполнение объема фильтра, и на 2978-й секунде уровень воды в приемке сравнивается с уровнем воды на полу гермозоны. Дальнейший рост уровня воды в герметических помещениях продолжается до 10000-й секунды. К этому времени гидростатическое давление, образующееся за счет уровня воды, компенсирует сопротивление, создаваемое засорением поверхности фильтра, и расход воды в бак аварийного запаса борной кислоты сравнивается с количеством воды, подаваемой на всас насосов САОЗ и спринклерной системы. Начиная с этого момента уровень воды в баке аварийного запаса борной кислоты остается на уровне 3,91 м (рис. 4).

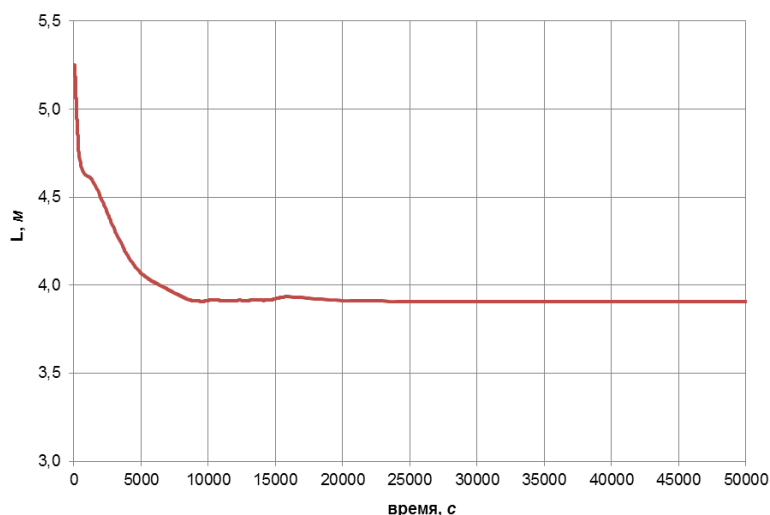


Рис. 4. Изменение уровня воды в баке Б-8/2

Для оценки кавитационного запаса (КЗ) насосов САОЗ и спринклерной системы использовалась формула

$$КЗ = (L_B - L_{всас}) + \frac{P_{атм}}{\rho g} - \frac{P_{нас}}{\rho g} - \frac{P_{пот}}{\rho g}, \quad (2)$$

где  $L_B$  – уровень воды в баке аварийного запаса борной кислоты;  $L_{всас}$  – высотная отметка всаса насоса;  $P_{атм}$  – давление в герметических помещениях;  $P_{нас}$  – давление насыщения на всасе насоса при заданной температуре;  $P_{пот}$  – потери напора на импеллере насоса;  $\rho$  – плотность воды;  $g$  – гравитационная константа.

Согласно техническим характеристикам насосов САОЗ ВД и спринклерной системы, необходимый кавитационный запас должен составлять 6 и 8 м соответственно. Как видно из результатов, кавитационный запас насосов САОЗ ВД ниже необходимого значения начиная с 2500-й секунды и до 5000-й секунды аварии включительно (рис. 5).

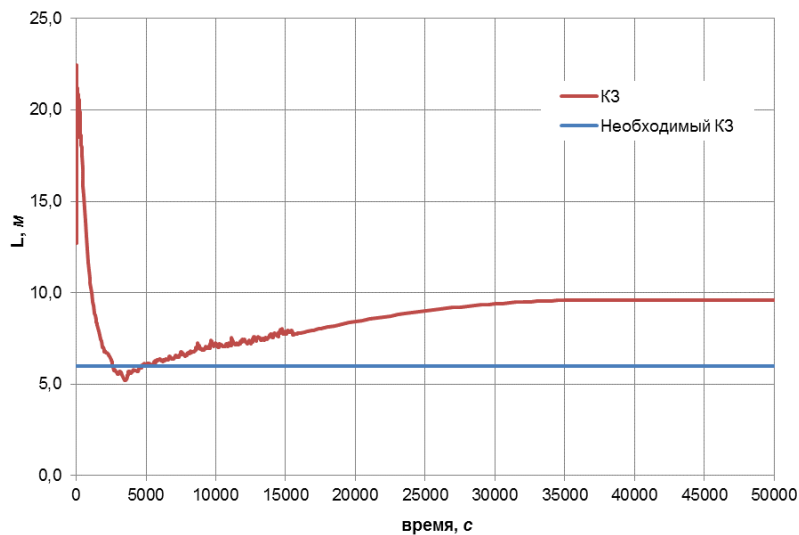


Рис. 5. Значение кавитационного запаса для насосов САОЗ ВД

Для насосов спринклерной системы значение кавитационного запаса ниже допустимого в течение временного отрезка с 1600-й секунды и до 13000-й секунды включительно (рис. 6).

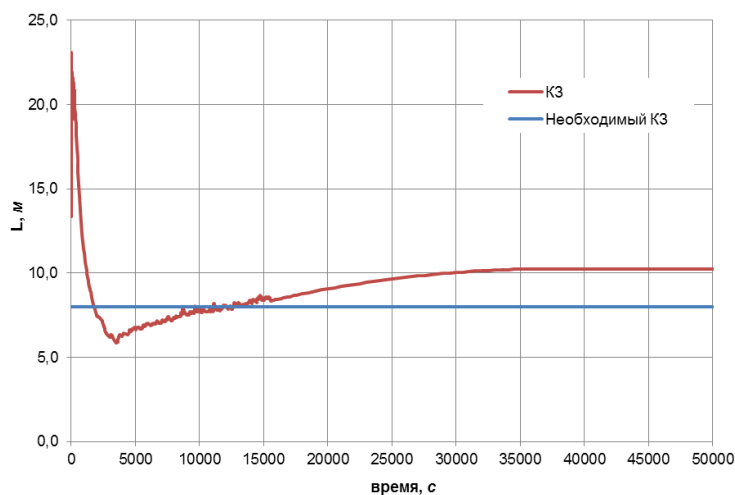


Рис. 6. Значение кавитационного запаса для насосов спринклерной системы

Для определения условий, при которых КЗ насосов был на допустимом уровне, были проведены дополнительные расчеты. Для оценок были выбраны консервативные условия в гермозоне. Поскольку в рамках программы комплексной модернизации ААЭС минимально допустимое значение давления в гермозоне было равно 0,085 МПа, то для оценки ДКЗ было выбрано данное значение.

Для насосов САОЗ ВД при максимальной температуре в баке запаса борного раствора Б-8/2 79<sup>0</sup>С и давлении в гермозоне, равном 0,085 МПа, необходимый кавитационный запас будет достигнут при уровне в баке, равном 2,71 м (таблица 1).

Таблица 1

Кавитационный запас насосов САОЗ ВД

Уровень в баке	dH	P <sub>атм</sub>	P <sub>нас</sub>	P <sub>потери</sub>	КЗ
2,0	1,600	8,673	4,617	0,357	5,299
2,5	2,100	8,673	4,617	0,357	5,799
2,7	2,300	8,673	4,617	0,357	6,000
3,0	2,600	8,673	4,617	0,357	6,299
3,5	3,100	8,673	4,617	0,357	6,799

Для насосов спринклерной системы при тех же консервативных условиях необходимый кавитационный запас будет достигнут при уровне в баке, равном 3,98 м (таблица 2). Отклонение от рассчитанного минимального уровня – 3,91 м составляет 1,8%.

Таблица 2

Кавитационный запас насосов спринклерной системы

Уровень в баке	dH	P <sub>атм</sub>	P <sub>нас</sub>	P <sub>потери</sub>	КЗ
3,5	3,745	8,673	4,542	0,357	7,519
3,91	4,155	8,673	4,542	0,357	7,929
3,98	4,225	8,673	4,542	0,357	8,000
5,2	5,445	8,673	4,542	0,357	9,219
7,0	7,245	8,673	4,542	0,357	11,019

**Выводы.** Основываясь на результатах анализов аварии с двусторонним разрывом дыхательного трубопровода КД, можно сделать следующие выводы:

1. Пиковое давление в гермозоне равно 0,195 МПа, что не превышает максимально допустимого значения 0,2 МПа.

2. Непрерывная работа спринклерной системы приводит к снижению давления в гермозоне ниже атмосферного давления. В частности, в данных расчетах было достигнуто значение 0,061 МПа, что ниже минимально допустимого пре-

дела – 0,085 МПа. Следовательно, необходимо внедрение защиты от сильного разрежения.

3. Расчет кавитационного запаса для насосов САОЗ ВД и спринклерной системы показал, что во время аварии значение кавитационного запаса ниже необходимого кавитационного запаса. Были проведены дополнительные исследования по выявлению минимального давления в гермозоне, при котором кавитационный запас будет выше минимально допустимого значения. Из результатов расчетов следует, что значение кавитационного запаса остается в допустимых пределах, если давление в гермозоне выше 0,085 МПа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка комплексной программы модернизации Армянской АЭС - NRI Rez, VUJE a.s, Арматом и НТИЦ ЯРБ контракт МАГАТЭ № ARM9022-86943V.
2. NS-R-2 Safety of Nuclear Power Plants: Operation /J. Clifford, et al. – Vienna; IAEA. – 2000. – 40 p.
3. COCOSYS V2.4 User's Manual /W. Klein-Heßling, S. Arndt, et al. – Koln: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2013. - 793p.
4. State-of-the-Art Report on Containment Thermal-hydraulics and Hydrogen Distribution / H. Karwat, et al. – Paris: OECD/NEA, 1999. – 291 p.
5. RELAP5/MOD3.3 code manual /V.H. Ransom, J.A. Trapp, et al. – Rockville: Information Systems Laboratories, 2010. – 298 p.
6. Final report of the programme on the safety of WWER and RBMK nuclear power plants / C. Benedetti, et al. – Vienna; IAEA. – 1999. – 218 p.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 09.11.2014.

#### Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Հ.Ա. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

#### ՆԱԽԱԳԾԱՅԻՆ ՎԹԱՐԻ ԸՆԹԱՅՔՈՒՄ ՀԱԷԿ 2-ՐԴ ԷՆԵՐԳԱԲԼՈՎԻ ԱՆՎՏԱՆԳՈՒԹՅԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՊՈՄՊԵՐԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱԷԿ-ի օրինակով ուսումնասիրվել է անվտանգության համակարգերի աշխատանքը նախագծային ջերմատարի կորստով վթարի դեպքում: Որոշվել է հերմետիկ գոտու ելարանի գոտիչի ներդրման ազդեցությունը վթարային լրասնման համակարգի և ցայտաջրմուղային համակարգի պոմպերի կավիտացիոն պաշարի վրա: Հետազոտության արդյունքները ցույց տվեցին, որ ցայտաջրմուղային համակարգի անընդհատ աշխատանքը հանգեցնում է հերմետիկ գոտում ճնշման անկմանը մթնոլորտային ճնշումից ցածր, ինչը համակցված գոտիչի տեղադրմանը զուգընթաց հանգեցնում է անվտանգության համակարգերի պոմպերի կավիտացիոն պաշարի նվազմանը թույլատրելի արժեքից ցածր:

**Առանցքային բառեր.** ցանցկեն գոտիչ, ակտիվ գոտու վթարային հովացման համակարգ, ցայտաջրմուղային համակարգ:



**V.G. PETROSYAN, H.A. HOVHANNISYAN**

**INVESTIGATING THE OPERATION OF THE SAFETY SYSTEMS' PUMPS OF THE  
ARMENIAN NPP SECOND UNIT AT DESIGN BASIS ACCIDENT**

Based on Arm. NPP example the operation of the safety systems in case of the design basis loss of coolant accident is investigated. The influence of containment sump strainer implementation on the net positive suction head of high-pressure injection pumps of emergency core cooling system and spray system is determined. It is revealed that the continuous operation of the spray system leads to a decrease in pressure in the containment below atmospheric pressure, what in conjunction with the strainer installation leads to the safety systems' pumps net positive suction head decrease below the allowable value.

**Keywords:** reticulated strainer, emergency core cooling system, spray system.