

УДК 621.039.58

Моделирование системы фильтрации раствора теплоносителя для реакторной установки с ВВЭР-1200

¹И.А. Магола, ¹Л.А. Матюшев, ¹Е.Л. Шамрай, ¹А.Г. Митрюхин, ¹А.А. Фиськов,
²П.А. Арсеньев, ²В.Б. Штильман

1. АО «Атомэнергoproект» СПбАЭП, г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина, 82
afiskov@mail.ru, elshamray@spbaep.ru

2. АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Санкт-Петербург
ArsenjevPA@vniig.ru, ShtilmanVB@vniig.ru

Работа посвящена выбору экспериментальной установки для обоснования работоспособности фильтра баков-прямоков CAO3 для реакторной установки ВВЭР-1200.

Статья содержит возможные пути обеспечения подобия элементов системы фильтрации раствора теплоносителя реакторной установки и модели, используемой для экспериментального обоснования.

Ключевые слова: система фильтрации, дебрис, экспериментальная установка, бак-прямоков CAO3, раствор борной кислоты, АЭС, ВВЭР, безопасность.

Modeling of a coolant solution filtration system for a reactor installation with WWER-1200

¹I. Magola, ¹L. Matyushev, ¹E. Shamray, ¹A. Mitryukhin, ¹A. Fiskov,
²P. Arsenyev, ²V. Shtilman.

1. JSC Atomenergoproekt SPbAEP, St.-Peterburg, Savushkina st. 82
afiskov@mail.ru, elshamray@spbaep.ru

2. JSC Vedeneev VNIIG, St.Petersburg, 195220, Gzhatskaya st.21
ArsenjevPA@vniig.ru, ShtilmanVB@vniig.ru

This article is devoted to the selection of an experimental installation to substantiate the filter operability of the ECCS sump tank for the WWER-1200 reactor plant.

The article contains possible ways to ensure the similarity of the elements of the filtration system of the coolant solution of the reactor installation and the model used for experimental substantiation.

Keywords: rhenium, sorption, composition, activated carbon, carbon nanotubes, isotherm, rate constant.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обеспечение безопасности атомных электростанций (АЭС) – одна из важнейших задач, решаемая в том числе и на этапе проектирования. Для этого в проекте предусматриваются системы безопасности, в состав которых должны входить системы для аварийного отвода тепла от реактора к конечному поглотителю (п. 3.5.4 [1]). В общепринятой мировой практике для АЭС с ВВЭР (PWR) применяются три системы аварийного охлаждения активной зоны (CAOЗ): CAOЗ высокого и низкого давления, а также гид-

роемкости CAOЗ - пассивная система, выполняющая свою функцию при среднем давлении и имеющая собственный запас борной кислоты. CAOЗ высокого и низкого давления должны быть подключены к емкостям, содержащим аварийный запас раствора борной кислоты, откуда насосами систем этот раствор подается в реакторную установку при авариях с потерей теплоносителя. К этой же емкости подключается спринклерная система.

При возникновении течи теплоноситель из реакторной установки вытекает через разрыв в помещении контейнента и собирается в баках

в нижней части контейнента, которые называются приемками или баками-приемками в зависимости от компоновки здания. Потеря теплоносителя восполняется работой САОЗ. По мере истощения исходного запаса раствора происходит переключение насосов систем с емкостей аварийного запаса раствора борной кислоты на приемки (в случае если это баки-приемки, такого переключения не требуется; насосы САОЗ подключены к бакам-приемкам, и именно такой вариант мы будем рассматривать). Таким образом формируется контур циркуляции: бак-приемок – САОЗ – реакторная установка – течь – бак-приемок.

В соответствии с НП-010-16 [2] к бакам-приемкам САОЗ выдвигается ряд требований:

- в проекте АЭС должны быть предусмотрены меры по исключению неоднородности раствора в баках-приемках, средств очистки и поддержания химического состава раствора (п. 97 [2]);

- конструкция баков-приемков должна предусматривать очистку воды, подаваемой на насосы, от механических загрязнений, в том числе от теплоизоляции трубопроводов, смываемой с трубопроводов при возникновении разрыва (п. 99 [2]).

С целью выполнения требований нормативной документации для ряда проектов в АО "АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ" была спроектирована система фильтрации. Используется понятие «система фильтрации», поскольку для очистки раствора теплоносителя от дебриса используются несколько устройств и соответствующих зон, располагаемых в баках-приемках САОЗ (см. рис. 1):

- входное устройство (ВУ) – предназначено для подачи раствора теплоносителя в бак-приемок таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение дебриса и подать его как можно ближе к полу бака-приемка и в сторону от устройства защиты приемков (УЗП), для чего выход из ВУ направлен в тупиковую часть бака-приемка, противоположную местам расположения УЗП. Таким образом ВУ вместе с частью бака-приемка, в которую направлена струя из него, образуют зону смешения;

- зона осаждения – участок бака-приемка от ВУ до УЗП, в котором происходит осаждение частиц и волокон дебриса под действием гравитационной силы;

- УЗП, из которых осуществляется забор раствора теплоносителя системой аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ), представляющее собой устройство, собранное из четырех

фильтрующих модулей, каждый из которых, в свою очередь, состоит из 33 фильтрующих элементов. УЗП, таким образом, представляет собой фильтр, и вместе с тем участком бака-приемка, в котором они расположены, образует зону фильтрации.

Конструкция фильтра САОЗ описана также в [3].

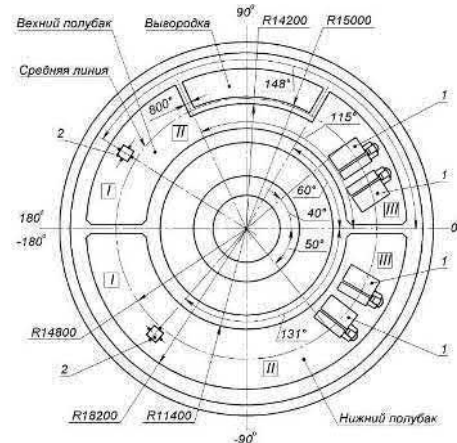


Рис. 1. Бак-приемок АЭС: 1 – устройство защиты приемков; 2 – входное устройство. I – зона смешения; II – зона осаждения; III – зона фильтрации

Входное устройство показано на рис. 2, в его состав входят два узла: воронка и сливной канал. Воронка устанавливается на отметке, расположенной над баком-приемком в сливном отверстии, а сливной канал обеспечивает подачу раствора теплоносителя с дебрисом в зону смешения.

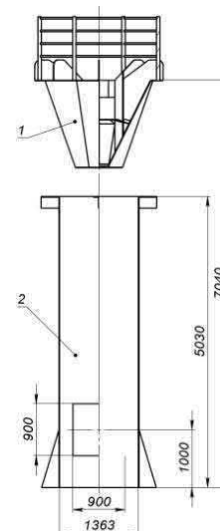


Рис. 2. Входное устройство: 1 – воронка; 2 – сливной канал.

Устройство защиты прямков (УЗП) показано на рис. 3. Основным узлом УЗП является фильтрующий элемент со щелевой решеткой [3]. УЗП собирается из блоков, каждый из которых состоит из 4 фильтрующих модулей по 33 фильтрующих элемента в каждом. Блоки устанавливаются на общий собирающий коллектор.

Использование принципа модульности позволяет обеспечивать необходимую площадь фильтрации простым соединением УЗП в единое устройство, а также менять конфигурацию в зависимости от особенностей общей компоновки баков-прямков.

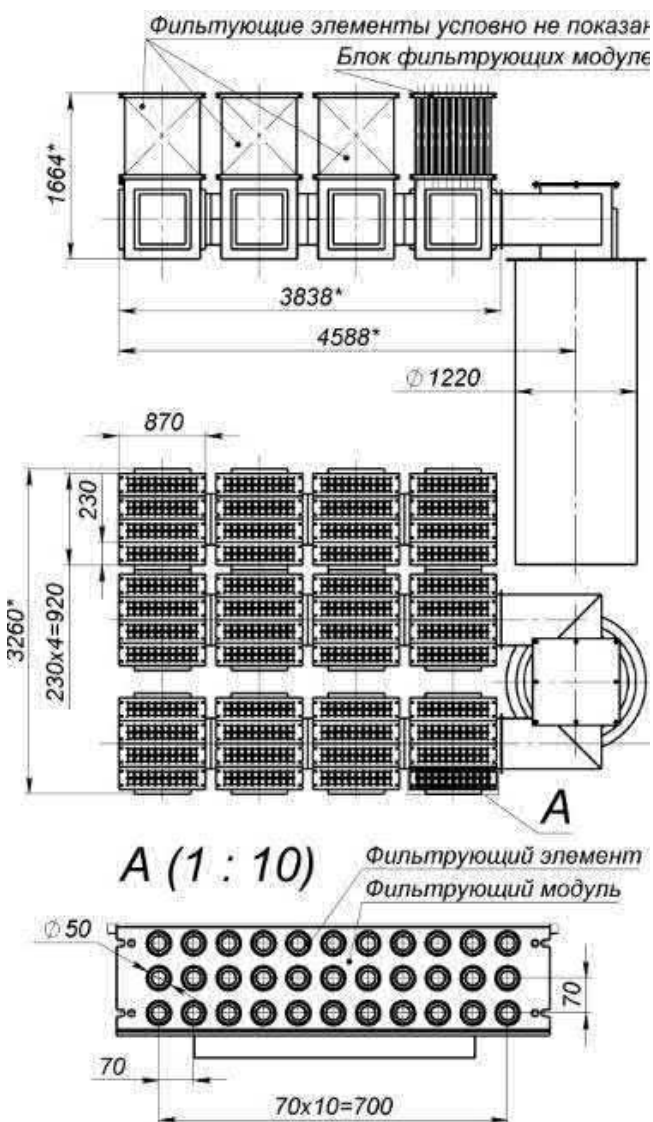


Рис. 3. Устройство защиты прямков

Согласно п. 4.2.2 НП-001-15 [1], до начала физического пуска должны быть готовы и прове-

рены системы и элементы, важные для безопасности. Соответственно, должны быть представлены экспериментальные данные, подтверждающие работоспособность бака-прямка с учетом тепловой изоляции, смываемой с трубопроводов во время аварии (п. 12.2.3.2.3. [4]). Согласно п. 2.8.2.3.3-0120-L [5], работоспособность фильтрующих устройств должна быть проверена экспериментальным путем. При проектировании следует учитывать любые твердые или химические примеси, которые могут выделяться в воду и препятствовать рециркуляции воды или ухудшать охлаждение реактора. Для контроля твердых примесей система рециркуляции теплоносителя должна быть снабжена фильтрующими конструкциями, работоспособность и адекватные рабочие характеристики которых проверяются испытаниями (п. 5111 [6]). Аналогичные требования о проведении испытаний приведены в п. 1.3.8. в. [7]. Таким образом, нормативная документация РФ и других стран требует экспериментального обоснования фильтров САОЗ, а в ряде проектов АО "АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ" - системы фильтрации в целом.

Для подтверждения работоспособности и рабочих характеристик необходимо спроектировать и реализовать модель системы фильтрации, которая включала бы в себя все три участка – зоны смешения, осаждения и фильтрации. Моделирование гидравлических процессов основано на теории подобия механических систем. Два потока жидкости подобны друг другу, если они схожи геометрически, а также если для всех сходственных точек натурального и модельного потоков соблюдаются условия подобия их кинематических и динамических характеристик [8]. Для достижения достаточной близости натурального потока к модельному необходимо соблюдение:

- геометрического подобия;
- подобия начальных и граничных условий в модели;
- равенства натурального и модельного критериев динамического подобия.

Критерии подобия выбираются в соответствии с основными силами, формирующими натуральный поток. Согласно [8], наиболее часто используемыми являются число Фруда, которое представляет собой соотношение сил инерции и силы тяжести, и число Рейнольдса, представляющее собой соотношение сил инерции и сил вязкости, и ряд других.

МОДЕЛЬ ЗОНЫ ФИЛЬТРАЦИИ

Геометрическое подобие модели натурному объекту (УЗП) достигается за счет применения в модели фильтрующих элементов, идентичных натурным, которые устанавливаются с проектным шагом. В этом случае достаточно просто обеспечить равенство чисел Рейнольдса природы Re_H и модели Re_M . Учитывая, что исследуется щелевое фильтрующее устройство, можно в качестве характерной величины рассматривать скорость в щели, тогда за характерный размер принимается размер щели.

Для того, чтобы обеспечить равенство $Re_H = Re_M$, достаточно выполнить условие

$$q = \frac{n_{\Phi\Omega}^M}{n_{\Phi\Omega}^{УЗП}} \cdot Q = k \cdot Q, \quad (1)$$

где Q и q – объемный расход раствора теплоносителя в натурном объекте и в модели, м³/с;

$n_{\Phi\Omega}^{УЗП}$ и $n_{\Phi\Omega}^M$ – количество фильтрующих элементов в УЗП и в модели;

k – коэффициент масштабирования модели.

Если в модели разместить $n_{\Phi\Omega}^{УЗП} = 11$ фильтрующих элементов (1 ряд модуля), то коэффициент масштабирования составит $k = 0,00347$ (масштаб модели 1:288). Расход раствора теплоносителя в зоне фильтрации модели при этом составит $q = 11$ м³/ч.

Использование в модели реальных фильтрующих элементов требует использования в эксперименте максимально близкого к реальности по составу, размерам и концентрации дебриса на подходе к модели зоны фильтрации, что выдвигает ряд дополнительных условий к моделированию зоны осаждения.

МОДЕЛЬ ЗОНЫ ОСАЖДЕНИЯ

Модель зоны осаждения должна представлять собой прямоугольный бак с размерами, обеспечивающими геометрическое подобие бака-прямяка (натуры) и модели. В данном исполнении можно пренебречь тем обстоятельством, что натурный бак выполнен в виде полукольца, а модель прямоугольная, ввиду большого радиуса кривизны бака.

Геометрическое подобие в данном случае предполагает, что основные размеры в баке-прямяке (длина зоны осаждения L , ширина бака

B и уровень раствора теплоносителя в нем H) относятся друг к другу также, как и в модели.

Для моделирования каналов с открытым уровнем, а именно таким является зона осаждения, определяющим критерием обычно является число Фруда Fr . Одновременное моделирование по числу Фруда Fr и числу Рейнольдса Re при использовании одной и той же жидкости (плотность ρ и вязкость μ - idem) в натуре и модели практически невозможно. Равенство Re природы и модели требует, чтобы

$$\frac{Re_H}{Re_M} = \frac{\rho \cdot w_H \cdot d_H \cdot \mu}{\mu \cdot \rho \cdot w_M \cdot d_M} = k_w \cdot k_d = 1 \text{ или } k_d = \frac{1}{k_w}. \quad (2)$$

где w_H и w_M – скорость раствора теплоносителя в натурном объекте и в модели, м/с;

d_H и d_M – характерный размер (гидравлический диаметр) натурального объекта и модели, м.

И аналогично для Fr (g – ускорение свободного падения, м/с²)

$$\frac{Fr_H}{Fr_M} = \frac{w_H^2 \cdot g \cdot d_M}{g \cdot d_H \cdot w_M^2} = \frac{k_w^2}{k_d} = 1 \text{ или } k_d = k_w^2. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) следует равенство

$$k_d = k_w^2 = \frac{1}{k_w}, \quad (4)$$

которое имеет решение только при условии, что $k_d = k_w = 1$, то есть, когда модель и натуральный объект имеют одинаковые размеры и скорость, что нецелесообразно. В выражениях (2) – (3) k_d , k_w – масштабные коэффициенты гидравлического диаметра и скорости потока соответственно.

При выборе в качестве основного определяющего критерия моделирования числа Рейнольдса получаем, что все геометрические размеры бака модели должны быть равны натурным, умноженным на коэффициент моделирования, уровень раствора в модели при этом будет равен всего 12 мм, а скорость потока в зоне осаждения составит 16 м/с. Модель зоны осаждения с такими размерами не является представительной, а скорость потока в модели недостижимой.

Таким образом, единственным определяющим критерием при моделировании зоны осаждения остается число Фруда. Однако при этом должны учитываться условия автомодельности и инвариантности по числу Рейнольдса при условии $Fr - idem$ [8]:

1. Число Рейнольдса в модели должно быть не менее 900

$$Re_M > 900; \quad (5)$$

2. Если условие (5) не выполняется, т.е. течение потока в модели не находится в автомодельной области, линейный масштаб модели не должен превышать предельного значения, равного

$$k_{\text{апр}} = \left(\frac{Re_H}{Re_M} \right)^{2/3}. \quad (6)$$

Однако число Фруда устанавливает подобие природы и модели только в части скорости потока и его глубины (если за гидравлический диаметр d принять глубину канала [8]). Для того чтобы определиться с размерами модели, используем условие гомохронности (равновременности) Но.

Примем (рис. 4), что в баке-приямке есть некая граничная частица (частица, обладающая характеристиками, позволяющими достигнуть конца зоны осаждения, но не осесть на фильтрующей поверхности), которая перемещается в потоке с горизонтальной скоростью w , равной скорости потока и вертикальной составляющей v , определяемой силой тяжести. Эта частица за одинаковое время проплывает бак по длине и за то же время достигает дна бака, начав движение с поверхности потока, т.е. перемещается от точки 1 до точки 2 на рис. 4.

$$\tau_H = \tau_H^{\text{ГОР}} = \frac{L}{w} = \tau_H^{\text{ВЕРТ}} = \frac{H}{v}. \quad (7)$$

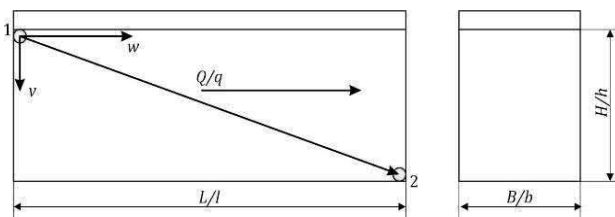


Рис. 4 – Движение граничной частицы

При проведении расчетов сделаны два допущения: частица не отстает от потока, двигаясь в горизонтальном направлении; частица движется вниз с постоянной скоростью, т.е. сила тяжести уравновешена силой сопротивления, неравновесным участком разгона пренебрегаем.

Чтобы в двух баках движение одинаковых частиц по скорости осаждения было подобно, должно выполняться следующее равенство:

$$\frac{Q}{S_{\text{ос}}} = \frac{q}{s_{\text{ос}}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{ос}}, s_{\text{ос}}$ – площадь зоны осаждения природы и модели, м^2 .

В этом случае величина площади зоны осаждения модели равна

$$s_{\text{ос}} = \frac{q \cdot S_{\text{ос}}}{Q} = \frac{k \cdot Q \cdot S_{\text{ос}}}{Q} = k \cdot S_{\text{ос}}. \quad (9)$$

Соблюдение условия равенства времени осаждения граничной частицы в натурном объекте и модели возможно только в случае, если уровни в баке-приямке и модели будут одинаковы, то есть когда натурный объект и модель имеют одинаковые размеры.

Кроме того, по требованиям моделирования размер частиц дебриса для модели должен соответствовать натурным, что не реализуемо ввиду сложности моделирования частиц и волокон.

Были проведены расчеты модели зоны осаждения для бака-приямка, показанного на рис. 1 для 11 и 33 фильтрующих элементов. По результатам расчетов получены как положительные, так и отрицательные выводы.

К положительным выводам можно отнести выполнение условий равенства определяющего критерия подобия $Fr_H = Fr_M$, автомодельности $Re_M > 900$ и условия, обеспечивающего подобие процесса осаждения частицы в натурном объекте и модели, а также отсутствие необходимости выполнения условия (6) по предельному масштабу модели.

К отрицательным выводам можно отнести:

1. Не удастся в полном объеме выполнить условия геометрического подобия, оно выполняется только в части отношения ширины бака модели к его длине ($B/L = b/l$), отношение уровня раствора теплоносителя к ширине и длине бака модели (h/b и h/l) в условиях верховенства Fr выдержать не удастся;

2. Уровень раствора теплоносителя меньше высоты фильтрующего элемента, что делает сборку моделей ЗФ и ЗО в единое целое без промежуточного узла невозможным;

3. По требованию со стороны зоны фильтрации - при расчете не масштабировался размер граничной частицы, что вносит в результаты моделирования зоны осаждения некоторую неопределенность;

Расчет параметров модели зоны осаждения выполнялся при одинаковой температуре раствора теплоносителя в натурном баке-приямке и в модели; таким образом, влияние изменения

плотности и, особенно, вязкости теплоносителя не было учтено, в то время как скорость осаждения граничной частицы в зависимости от температуры раствора теплоносителя в модели, в диапазоне температуры от 20 до 70 оС, изменяется почти в 2,5 раза (см. рис. 5).

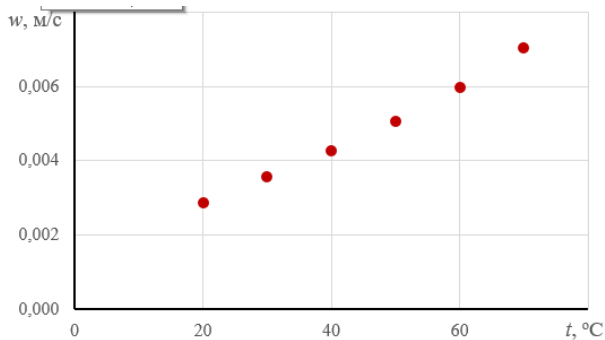


Рис. 5. Зависимость изменения скорости осаждения частицы от температуры раствора теплоносителя

МОДЕЛЬ ЗОНЫ СМЕШЕНИЯ С ВХОДНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Обоснование основных размеров и определяющих критериев для зоны смешения такое же, как и для зоны осаждения. Параметры раствора теплоносителя (давление, температура), а также ширина зоны смешения принимались такими же, как для зоны осаждения.

Расчеты показали, что при моделировании входного устройства число Фруда натурн и модели одинаковы при выборе в качестве характерного размера превышения уровня в сливном канале над уровнем в модели, которое представляет собой необходимый нивелирный напор, обеспечивающий проток раствора теплоносителя через ВУ.

Число Рейнольдса составило величину порядка 104 – 105, т.е. движение потока в опускном канале находится в автомодельной области. Для выбора длины зоны смешения действует условие (9). Выполнить условие геометрического подобия полностью для участка бака-прямоугольника, являющегося зоной осаждения, при принятом подходе не удалось.

ПРОБЛЕМЫ В СОЗДАНИИ МОДЕЛИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

При моделировании системы фильтрации, состоящей из нескольких зон, возник ряд проблемных вопросов:

1. В том случае если зоны смешения и осаждения стыкуются между собой по масштабу, то зона фильтрации требует большей глубины бака модели, такой, чтобы раствор теплоносителя не только покрывал фильтрующие элементы полностью, но и обеспечивал кавитационный запас для них. Т.е. уровень над фильтрующими элементами должен быть больше потери давления над загрязненным фильтром. Если произвольно увеличить глубину бака модели до необходимой для зоны фильтрации, то теряются условия геометрического и гидравлического подобия для зон смешения (частично) и осаждения;

2. В зону фильтрации должен приходиться дебрис со свойствами, включая размеры, близкими к натурным. Для зоны смешения и особенно зоны осаждения дебрис также должен быть отмасштабирован, что для модели, включающей в себя все три зоны, сделать практически невозможно.

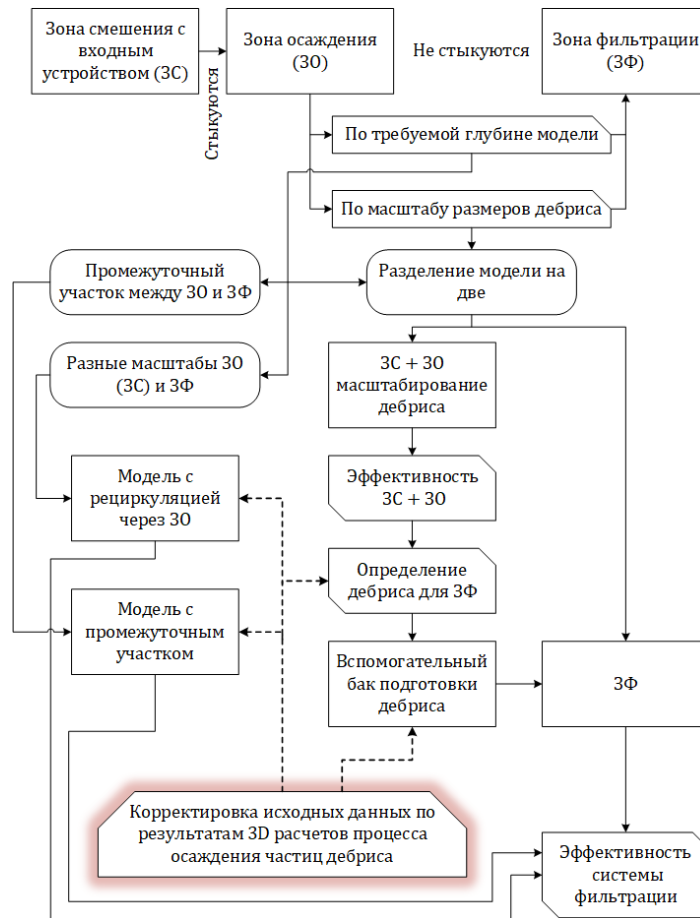


Рис. 6. Схема устранения противоречий при создании модели системы фильтрации

На схеме (рис. 6) показаны возможные пути разрешения возникших проблемных вопросов. Для сохранения единства модели предлагаются несколько вариантов решения:

- установить между зонами осаждения и фильтрации промежуточный участок (см. рисунки 7 и 8), обеспечивающий уровень раствора теплоносителя в зоне фильтрации;

- выполнить модель с нарушением масштаба зоны осаждения (рис. 9), в том числе с рециркуляцией части раствора теплоносителя через зону смещения и осаждения, минуя зону фильтрации, (рис. 9) для смягчения последствий нарушения масштаба зоны осаждения.

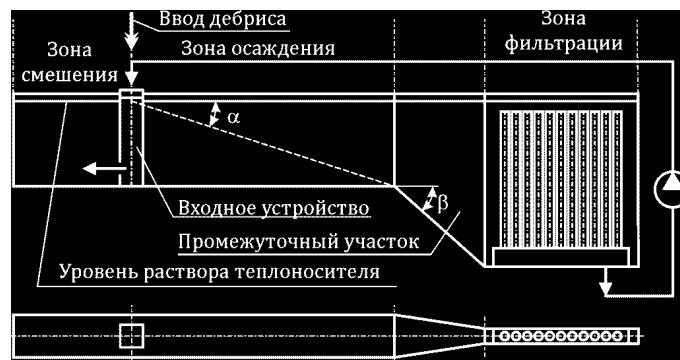


Рис. 7. Модель системы фильтрации с промежуточным диффузорно-конфузорным участком

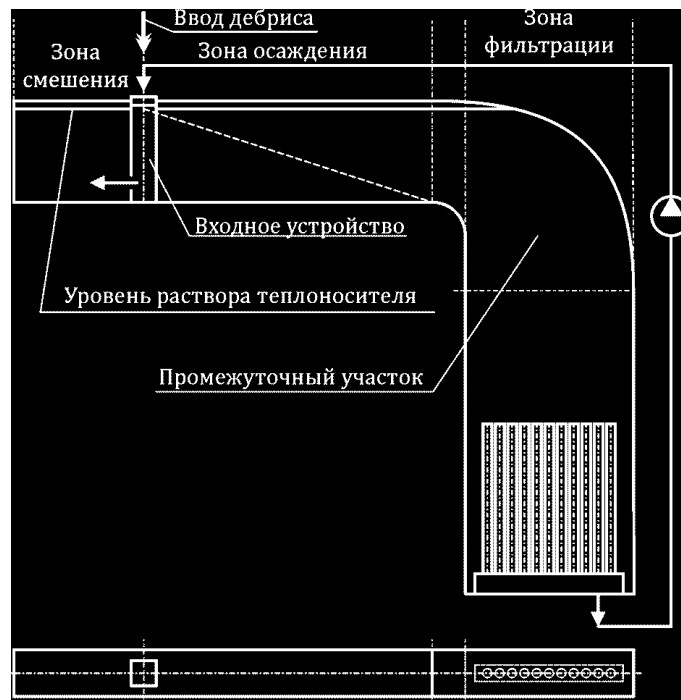


Рис. 8. Модель системы фильтрации с промежуточным поворотным участком

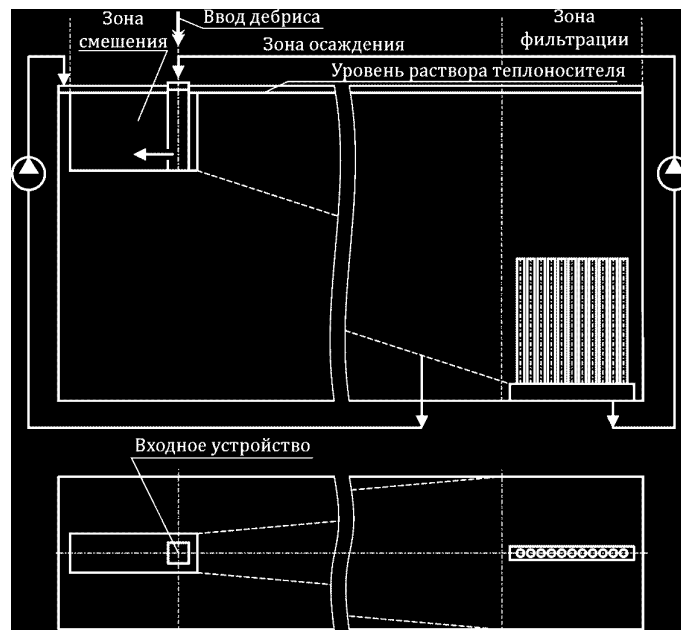


Рис. 9. Модель системы фильтрации с нарушением масштаба зоны осаждения и рециркуляцией раствора теплоносителя в ней

Также можно рассмотреть возможность реализации исследования, разделив процесс смешения и осаждения и процесс фильтрации в отдельные серии экспериментов. Для этого

необходимо разделить модель на две части, выполнить модель зон смешения и осаждения в одном масштабе (Рис. 10), модель зоны фильтрации в другом.

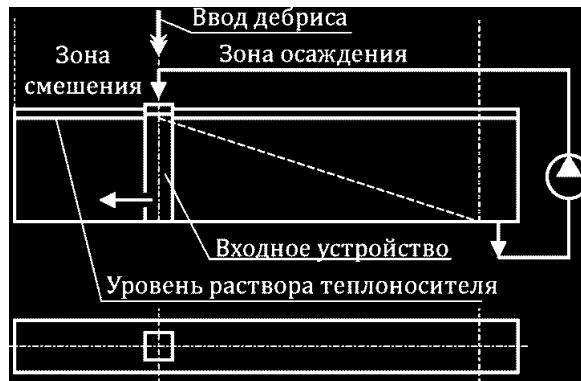


Рис. 10. Модель зон смешения и фильтрации с возможностью масштабирования характеристик дебриса

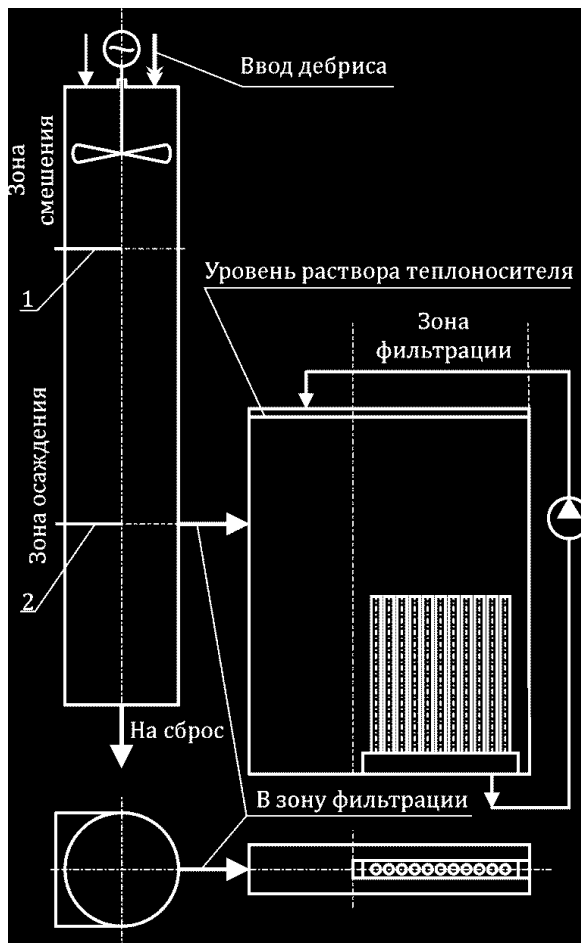


Рис. 11. Модель зоны фильтрации с предварительной подготовкой дебриса:
1 – шандора верхняя; 2 – шандора нижняя

В последнем случае решается также вопрос с масштабированием дебриса. Для модели зон смешения и осаждения размер частиц дебриса будет соответствовать размерам модели. Модель позволит определить эффективность зон смешения и осаждения натуральных участков бака-приямки и тем самым определить исходные данные по размеру и концентрации частиц

дебриса, подходящих непосредственно к фильтрующей поверхности.

Модель зоны фильтрации в этом случае потребует бака предварительной подготовки дебриса (рис. 11), в котором будет обеспечено отделение дебриса, достигающего модели зоны фильтрации от дебриса, остающегося в зоне осаждения.

ВЫВОДЫ

Другие варианты моделей, которые возможно использовать в исследовании, также будут сводиться к трем рассмотренным вариантам:

- модели с нарушением масштаба;
- модели с промежуточным участком;
- разделенные модели.

Во всех перечисленных вариантах моделей имеет место неопределенность:

- в первом случае, связанная с нарушением масштаба отдельного участка модели, несоответствию размеров частиц дебриса масштабу модели;

- во втором случае, связанная со сделанными допущениями при определении условия (7) и с наличием в модели промежуточного участка, отсутствующего в натурном баке-прямке;

- в третьем случае, связанная прежде всего с тем, что результаты опытов на модели зон смешения и осаждения (рис. 10) не дадут прямого ответа на вопрос, какое время седиментации необходимо, чтобы в 3Ф пришел дебрис с фракционным составом, соответствующим натурному.

Снизить влияние перечисленных неопределенностей позволяет корректировка исходных

данных по результатам 3D расчетов процесса осаждения частиц дебриса (см. рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При подготовке к экспериментальному обоснованию УЗП и системы фильтрации для АЭС-2006 было принято решение реализовать экспериментальную модель системы фильтрации с 11 фильтрующими элементами и с нарушением масштаба зоны осаждения. Гидравлическая модель системы фильтрации была спроектирована и обоснована на основании теории гидродинамического подобия процессов в баке-прямке и экспериментальной модели.

Использование расчетной 3D модели течения раствора теплоносителя с дебрисом в баке-прямке и экспериментальной модели для зоны смешения и зоны осаждения позволило определить поправочные коэффициенты для исходного количества дебриса, вводимого в экспериментальную установку, тем самым была устранена неопределенность по несоответствию размеров частиц дебриса масштабу модели на этих участках.

Экспериментальная установка реализована на площадке ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [9 – 12]. Результаты одной из серий проведенных экспериментов опубликованы в [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций
2. НП-010-16. Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций
3. Матюшев Л.А., Шамрай Е.Л., Митрюхин А.Г. и др. Проектирование фильтров, устанавливаемых перед системой аварийного охлаждения активной зоны ядерного реактора. Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. № 3 (29) 2022. – с. 74 – 84.
4. НП-006-16. Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности блока атомной станции с реактором типа ВВЭР
5. Governmental Decree No. 118 of 2011 (VII.11.) on nuclear safety requirements of nuclear establishments and on public administrative duties related to it
6. Guide YVL B.1; Safety design of a nuclear power plant
7. Regulatory Guide 1.82. Water sources for long-term recirculation cooling following a loss-of-coolant accident
8. Справочник по гидравлическим расчетам. Под редакцией П.Г. Киселева. Изд. 4-е. М.: «Энергия», 1972. 312 с.
9. Штильман В.Б., Погребняк Б.Н., Арсеньев П.А. и др. Экспериментальная установка для исследования на горячем теплоносителе фильтров баков-прямков АЭС. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 294. С. 96–110
10. Арсеньев П.А., Погребняк Б.Н., Штильман В.Б. и др. Гидравлические исследования на горячем теплоносителе фильтров баков-прямков АЭС. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2020. Т. 298. С. 59–69
11. Арсеньев П.А., Погребняк Б.Н., Штильман В.Б. и др. Модернизация экспериментальной установки для исследований фильтров баков-прямков АЭС. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2021. Т. 301. С. 66–74

12. Арсеньев П.А., Погребняк Б.Н., Штильман В.Б. и др. Исследования применения перфорированных труб фильтрующих модулей на модернизированной экспериментальной установке. *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2021. Т. 302. С. 37–49

13. Магола И.А., Матюшев Л.А., Шамрай Е.Л. и др. Экспериментальное обоснование фильтров баков-прямоков проекта АЭС-2006. *Атомная энергия*, том 133, вып. 3, сентябрь 2022. – с. 164-170

Поступила в редакцию / Received 18.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 26.03.2025

Принята к публикации / Accepted 02.04.2025