

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ОСАЖДЕНИЯ ДЕБРИСА ПРИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКЕ К ФИЛЬТРАМ САОЗ ДЛЯ АЭС С РЕАКТОРАМИ ТИПА ВВЭР

Л.А. Матюшев

ORCID: 0009-0009-0030-9490 e-mail: LAMatyushev@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

А.А. Игнатьев

ORCID: 0009-0000-9963-7754 e-mail: aaignatev@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

А.Г. Митрюхин

ORCID: 0009-0001-6904-420X e-mail: AGMitryukhin@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

А.А. Фиськов

ORCID: 0000-0003-0160-954X e-mail: aafiskov@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

Е.Л. Шамрай

ORCID: 0009-0008-3382-319X e-mail: elshamray@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

К.Ю. Коробейников

ORCID: 0009-0009-6518-7666 e-mail: kyukorobeynikov@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

Н.А. Осмаков

ORCID: 0009-0006-3806-1636 e-mail: naosmakov@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена возможность применения CFD-пакета STAR-CCM+ для расчета процессов движения жидкости с твердыми частицами и процесса осаждения последних. Расчеты проводятся применительно к условиям аварии с потерей теплоносителя для реакторной установки с реактором типа ВВЭР. Показано, что на процесс осаждения твердых частиц дебриса на дно бака-приямка хранения запаса раствора борной кислоты при транспортировке от входного устройства к фильтру оказывает существенное влияние вертикальная составляющая амплитуды турбулентных пульсаций. Проведена валидация CFD-пакета STAR-CCM+ по результатам, полученным на экспериментальном стенде, показано, что предложенная последовательность проведения расчетов обеспечивает приемлемую сходимость результатов расчета с экспериментом. Это позволяет провести расчеты для бака-

приямка и определить эффективность осаждения частиц дебриса и, соответственно, долю дебриса, приходящего на фильтр. Прделанная работа показала возможность применения CFD-пакета STAR-CCM+ для задач, связанных с процессами, возникающими в баках-приямках при аварии с потерей теплоносителя.

Ключевые слова: CFD-пакет STAR-CCM+; авария с потерей теплоносителя; ВВЭР; дебрис; бак-приямок; входное устройство; фильтр; САОЗ; активная зона.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Матюшев, Л.А. Расчетный анализ осаждения дебриса при его транспортировке к фильтрам САОЗ для АЭС с реакторами типа ВВЭР / Л.А. Матюшев, А.А. Игнатъев, А.Г. Митрюхин, А.А. Фиськов, Е.Л. Шамрай, К.Ю. Коробейников, Н.А. Осмаков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 52-66. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_52 EDN: XROJEB

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF DEBRIS DEPOSITION DURING ITS TRANSPORTATION TO ECCS FILTERS FOR WWER NUCLEAR POWER PLANTS

L.A. Matyushev

ORCID: **0009-0009-0030-9490** e-mail: **LAMatyushev@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

A.A. Ignatyev

ORCID: **0009-0000-9963-7754** e-mail: **aaignatev@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

A.G. Mitryukhin

ORCID: **0009-0001-6904-420X** e-mail: **AGMitryukhin@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

A.A. Fis'kov

ORCID: **0000-0003-0160-954X** e-mail: **aafiskov@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

E.L. Shamray

ORCID: **0009-0008-3382-319X** e-mail: **elshamray@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

K.Yu. Korobeynikov

ORCID: **0009-0009-6518-7666** e-mail: **kyukorobeynikov@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

N.A. Osmakov

ORCID: **0009-0006-3806-1636** e-mail: **naosmakov@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

Abstract. The article considers the possibility of using the STAR-CCM+ CFD package for calculating the processes of fluid motion with solid particles and the process of their deposition. The calculations are performed in relation to the conditions of a loss-of-coolant accident for a WWER type reactor plant. It is shown, that the process of deposition of solid debris particles on the bottom of the sump tank for the reserve of boric acid solution storage during transportation from the inlet device to the filter is significantly influenced by the vertical component of the amplitude of turbulent pulsations. The STAR-CCM+ CFD package was validated using the results obtained on the experimental bench. It is

shown that the proposed sequence of calculations provides acceptable convergence of the calculation results with the experiment. This allows to perform calculations for the sump tank and to determine the efficiency of debris particle deposition and, consequently, the proportion of debris that reaches the filter. The performed work demonstrated the possibility of using the STAR-CCM+ CFD package for a wide range of tasks related to the processes occurring during a loss-of-coolant accident.

Key words: STAR-CCM+ CFD package; loss-of-coolant accident; WWER; debris; sump tank; inlet device; filter; ECCS; reactor core.

FOR CITATION: L.A. Matyushev, A.A. Ignatyev, A.G. Mitryukhin, A.A. Fis'kov, E.L. Shamray, K.Yu. Korobeynikov, N.A. Osmakov. Computational analysis of debris deposition during its transportation to ECCS filters for WWER nuclear power plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 52-66.
DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_52 EDN: XROJEB

Введение

В процессе аварий, связанных с потерей теплоносителя первого контура, в объеме герметичного ограждения атомных электростанций (ГО АЭС) формируется значительное количество дебриса от разрушения конструкций и сооружений [1, 2]. Образовавшийся дебрис смешивается с теплоносителем, истекающим из разрыва, и раствором борной кислоты, который используется системой аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) для длительного охлаждения реакторной установки. Его составляющие могут привести к ухудшению условий работы оборудования САОЗ и снижению эффективности охлаждения активной зоны ядерного реактора. Попадание частиц дебриса в трущиеся части насосов и арматуры приводит к их эрозионному износу, возможны осаждение в теплообменниках САОЗ, забивание сопел спринклера, а также блокировка расхода теплоносителя через тепловыделяющие сборки и формирование отложений на поверхности ТВЭЛОВ.

Для исключения отрицательного влияния дебриса на работу оборудования САОЗ, спринклерной системы и теплоотвода от активной зоны используется система фильтрации, состоящая из двух основных узлов: входного устройства (ВУ) и устройства защиты приемков (УЗП) забора раствора теплоносителя в САОЗ и спринклерную систему. ВУ и УЗП расположены в баках-приямках таким образом, чтобы между ними было как можно большее расстояние для формирования между ними зоны гравитационного осаждения дебриса. Кроме того, выход из ВУ направлен в сторону, противоположную УЗП, за счет этого образуется зона смешения, в которой происходит гашение кинетической энергии падающей струи и направление струи раствора в бак по оптимальной траектории для увеличения осаждения частиц на дно. Зона смешения характеризуется также как зона торможения и разворота потока в бак-приямке, включающая возникновение стратификации. Таким образом, образуется система фильтрации, состоящая из трех зон: зоны смешения, зоны гравитационного осаждения и зоны фильтрации на УЗП, представляющем собой механический фильтр.

На рис. 1 упрощенно показаны здание реактора (ГО) с реакторной установкой и здание безопасности с оборудованием САОЗ и спринклерной системы. В нижней части ГО расположен бак-приямок запаса раствора борной кислоты. В полу отметки, расположенной над баком-приямком, имеется отверстие, через которое в бак-приямок сливается раствор теплоносителя из разрыва трубопровода первого контура. Отверстие снабжено входным устройством, в противоположной стороне от ВУ расположено отверстие (приямок) для забора очищенного теплоносителя, над которым расположены УЗП. Очищенный раствор теплоносителя подается через теплообменник в САОЗ и спринклерную систему. Оборудование системы фильтрации и его компоновка в бак-приямке описаны более подробно в [3-6]. Как показали исследования [7], в экспериментальном стенде на пути от ВУ до УЗП оседает до 75 % частиц дебриса, что позволяет значительно уменьшить величину фильтрующей поверхности УЗП. Однако реальный бак-приямок отличается намного большими размерами и, следовательно, масштабом турбулентных пульсаций, которые влияют на процесс осаждения частиц дебриса.

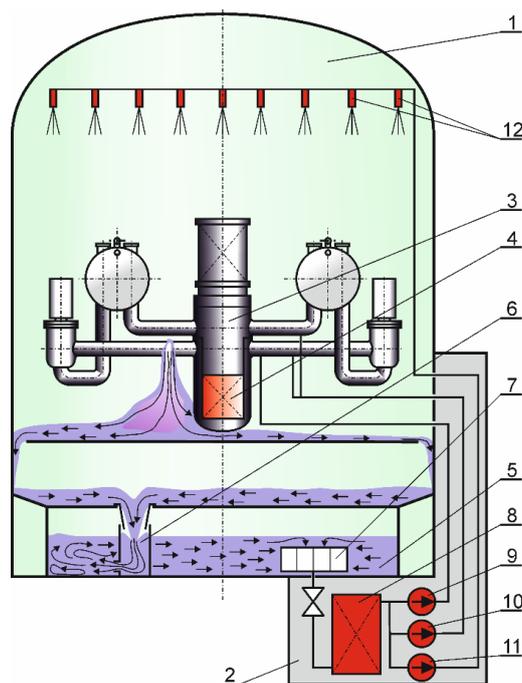


Рис. 1. Авария с потерей теплоносителя:

1 – здание реактора (ГО); 2 – здание безопасности; 3 – реакторная установка (реактор, парогенераторы, главные циркуляционные насосы, трубопроводы главного циркуляционного контура); 4 – активная зона ядерного реактора; 5 – бак-приямок; 6 – входное устройство; 7 – устройство защиты приямков; 8 – теплообменник САОЗ; 9 – насос САОЗ высокого давления; 10 – насос САОЗ низкого давления; 11 – спринклерный насос; 12 – форсунки спринклерной системы (красным обозначены оборудование и устройства, на функционирование которых оказывает влияние дебрис)

Fig. 1. Loss-of-coolant accident:

1 – reactor building (containment building); 2 – safety building; 3 – reactor assembly (reactor, steam generators, main circulation pumps, main circulation circuit pipelines); 4 – nuclear reactor core; 5 – sump tank; 6 – inlet device; 7 – sump protection device; 8 – ECCS heat exchanger; 9 – high-pressure ECCS pump; 10 – low-pressure ECCS pump; 11 – sprinkler pump; 12 – sprinkler system nozzles. (equipment and devices whose functioning is affected by debris are highlighted in red)

Задачами данной работы являются:

- исследования влияния турбулентных пульсаций на процесс осаждения частиц дебриса;
- валидация расчетной модели на основе данных, полученных на экспериментальном стенде;
- расчет осаждения частиц дебриса в реальном баке-приямке.

Исследование влияния турбулентных пульсаций на осаждение частиц

Процесс фильтрации происходит в два последовательных этапа: 1) гравитационное осаждение частиц в зонах смешения и осаждения; 2) фильтрация на фильтрующей поверхности УЗП. Первый этап представляет особый интерес, так как турбулентные пульсации оказывают существенное влияние на процесс осаждения частиц и должны быть учтены при проектировании. Покажем это на модельной задаче осаждения частиц в турбулентном потоке воды, текущей в прямоугольном канале с параметрами, близкими к реальным условиям. На свободную поверхность потока равномерно по поверхности вносится некоторое число частиц (N_0), которые осаждаются под действием силы тяжести и силы сопротивления в турбулентном потоке.

В процессе расчета контролируется число частиц, которые достигли дна в определенный момент времени. Параметры модельной задачи следующие. Размеры канала: глубина 3.5 м, ширина 6.8 м и длина 30 м; расход воды 0.81 м³/с; число Рейнольдса 300 000.

Расчет проводился с помощью CFD-пакета STAR-CCM+. Физика расчета: нестационарное течение несжимаемой вязкой жидкости с привлечением турбулентной LES-модели, позволяющей явно моделировать крупномасштабные турбулентные пульсации. На входной и выходной границах канала ставились периодические граничные условия. Постоянный расход поддерживался за счет постоянного продольного градиента давления как источника в уравнении импульсов. Частицы моделировались в лагранжевом приближении как материальные точки, на которые действовала сила тяжести и сила сопротивления, рассчитываемая на основе корреляции Шиллера-Неймана [8]. Для частиц на дне канала ставились условия прилипания, на периодических границах, соответственно, периодические условия, на остальных границах – условия отскока. Расчетная сетка содержала 12.2 млн ячеек, шаг по времени 0.6 с. В центре канала была расположена точка мониторинга вертикальной (U_y) и продольной (U_z) канала скорости. В начальный момент поток ламинарный. По мере движения воды в канале в потоке нарастают гидродинамические неустойчивости, которые переходят в реальные турбулентные пульсации. На рис. 2 и 3 показаны графики скоростей U_y и U_z в точке мониторинга.

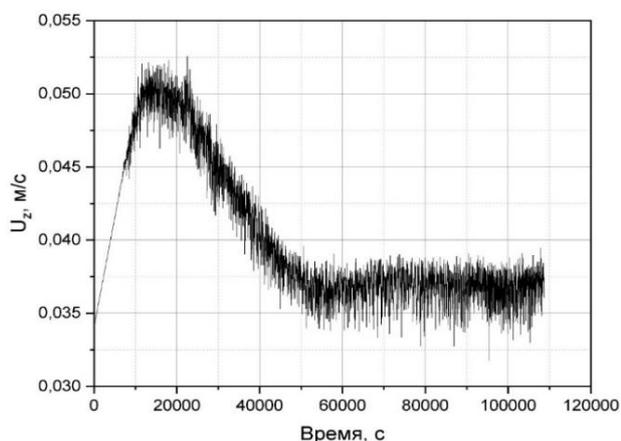


Рис. 2. Продольная скорость в центре канала

Fig. 2. Longitudinal velocity at the center of the channel

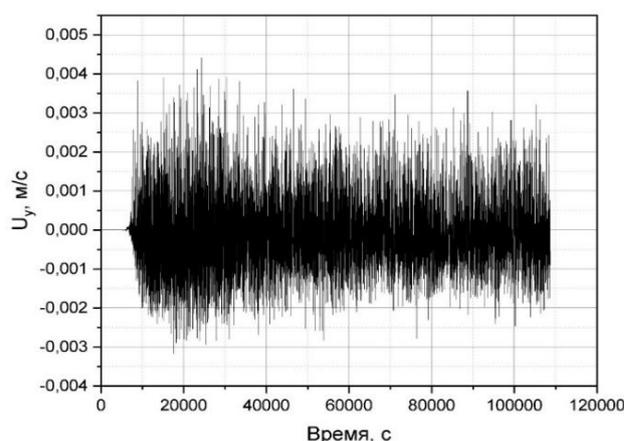


Рис. 3. Вертикальная скорость в центре канала

Fig. 3. Vertical velocity at the center of the channel

После установления турбулентного течения вводились частицы, которые под воздействием силы тяжести постепенно опускались на дно и прилипали к нему. В процессе расчета контролировалось число осевших частиц. На рис. 4 показана доля осевших частиц N/N_0 , где N – число осевших частиц, N_0 – число введенных частиц. Дополнительно показан график осаждения частиц в спокойной воде, который представляет собой ступеньку в момент времени, когда все частицы достигают дна, так как все частицы в спокойной воде двигаются с одинаковой скоростью – скоростью осаждения. Осаждение всех частиц в турбулентном потоке происходит не одновременно (как в спокойной воде), а постепенно (рис. 4). Те частицы, которые большую часть своего пути подвергаются воздействию пульсаций, направленных вниз, осаждаются раньше, и наоборот, частицы, подвергающиеся большую часть своего пути воздействию пульсаций, направленных вверх, осаждаются позже. Это приводит к тому, что график N/N_0 становится гладким и монотонно возрастающим. Данный эффект, очевидно, зависит от диаметра частиц и от величины турбулентных пульсаций. Для нашей модельной задачи частицы с диаметром больше 0.108 мм практически не испытывают заметного влияния турбулентных пульсаций величиной 0.002 м/с (рис. 3). Заметим, что при другой геометрии установки турбулентные пульсации могут иметь заметно большую величину.

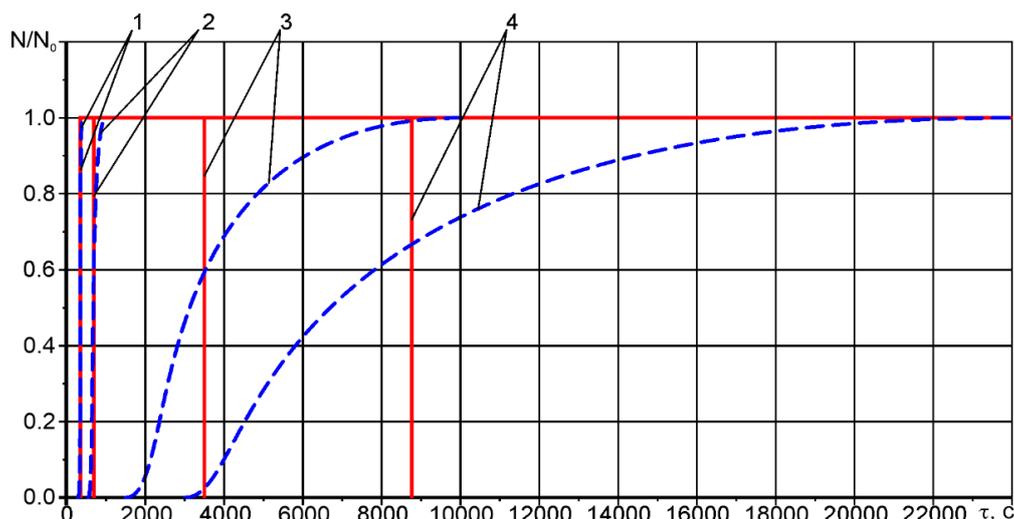


Рис. 4. Доля осевших частиц в условно спокойной воде (красная сплошная линия) и в турбулентном потоке (синяя пунктирная линия) в зависимости от времени:

- 1 – диаметр частицы $d=0.108$ мм, скорость осаждения 10 мм/с;
- 2 – диаметр частицы $d=0.073$ мм, скорость осаждения 5.0 мм/с;
- 3 – диаметр частицы $d=0.031$ мм, скорость осаждения 1.0 мм/с;
- 4 – диаметр частицы $d=0.02$ мм, скорость осаждения 0.4 мм/с

Fig. 4. The proportion of settled particles in relatively calm water (red solid line) and in a turbulent flow (blue dotted line) depending on time:

- 1 – particle diameter $d = 0.108$ mm, deposition rate 10 mm/s;
- 2 – particle diameter $d = 0.073$ mm, deposition rate 5.0 mm/s;
- 3 – particle diameter $d = 0.031$ mm, deposition rate 1.0 mm/s;
- 4 – particle diameter $d = 0.02$ mm, deposition rate 0.4 mm/s

Выводы по разделу. При движении частиц в канале с параметрами, идентичными каналу в баке-приямке, турбулентные пульсации оказывают существенное влияние на время осаждения. При этом степень влияния зависит от скорости осаждения частиц в условно спокойной воде. Крупные частицы практически не реагируют на турбулентные пульсации.

Валидация расчетной модели на основе эксперимента

Валидация описанной выше расчетной модели осаждения частиц в турбулентном потоке жидкости выполнялась на основе ранее полученных результатов испытаний фильтра САОЗ на экспериментальном стенде. Технологическая схема экспериментального стенда для испытаний системы фильтрации САОЗ, методика проведения испытаний и состав вводимого дебриса подробно освещены в [7]. Температура раствора при испытаниях равнялась 33 °С, расход раствора через стенд – 9,7 м³/ч, масса вводимых компонентов дебриса и его общее количество приведены в табл. 1 (столбец 8). Масса дебриса, достигшая фильтрующей поверхности в эксперименте, составила 2060 г.

Фракционный состав частиц вводимого в стенд дебриса для волокон был выполнен с использованием седиментационного метода, для сферических частиц в основном были использованы паспортные данные на поставку. Состав и свойства дебриса для экспериментальной установки приведены в табл. 1 (столбцы 1-6).

Как видно из табл. 1, дебрис состоит из разнородных частиц отличающиеся по форме и плотности. Для однозначной оценки осаждения частиц при расчете, все частицы были приведены к эквивалентным частицам сферической формы с плотностью 2650 кг/м³, со скоростью осаждения равной скорости осаждения реальной частицы. Для частиц реальной плотности 2650 кг/м³ – диаметр эквивалентной частицы равен диаметру реальной частицы. Определение эквивалентного диаметра частицы с фактической плотностью, отличной от 2650 кг/м³, производится в следующей последовательности.

Таблица 1.
Состав и свойства дегриза для экспериментальной установки, результаты расчетов

Table 1.
Composition and properties of debris for the experimental bench, calculation results

| Компонент дегриза | Форма | Плотность материала кг/м ³ | Доля фракции | Диаметр частицы, мм | Скорость осаждения при 20 °С (измеренная), мм/с | Диаметр эквивалентной частицы, мм | Масса вводимых компонентов дегриза, кг | Масса фракции, кг (столб. 4 x столб. 8) | Доля массы фракции достигнутой фильтрующей поверхностью (рис. 8) | Масса фракции достигнутой фильтрующей поверхностью, кг (столб. 9 x столб. 10) |
|---------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------|---|-----------------------------------|--|---|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Глина | Сферическая | 2650 | 0.8 | 0.005 | - | 0.005 | 0.073 | 0.0584 | 0.86 | 0.050 |
| | | | 0.2 | 0.025 | - | 0.025 | | 0.0146 | 0.47 | 0.007 |
| Песок | Сферическая | 2650 | 0.2 | 0.025 | - | 0.025 | 0.111 | 0.0222 | 0.47 | 0.010 |
| | | | 0.7 | 0.1 | - | 0.1 | | 0.0777 | 0.755 | 0.059 |
| | | | 0.1 | 0.3 | - | 0.3 | | 0.0111 | 0 | 0.000 |
| Порошок цинка | Сферическая | 7140 | 0.5 | 0.03 | - | 0.058 | 3.722 | 1.861 | 0.025 | 0.047 |
| | | | 0.4 | 0.1 | - | 0.2 | | 1.4888 | 0 | 0.000 |
| | | | 0.1 | 0.2 | - | 0.45 | | 0.3722 | 0 | 0.000 |
| Порошковая краска | Сферическая | 1750 | 0.1 | 0.005 | - | 0.0037 | 2.036 | 0.2036 | 0.21 | 0.043 |
| | | | 0.45 | 0.032 | - | 0.022 | | 0.9162 | 0.48 | 0.440 |
| | | | 0.45 | 0.07 | - | 0.047 | | 0.9162 | 0.08 | 0.073 |
| Гидроксид алюминия | Сферическая | 2400 | 1 | 0.016 | - | 0.019 | 0.307 | 0.307 | 0.445 | 0.137 |
| Волокно | Вытянутая в одном измерении | 2650 | 0.10 | - | 0.14 | 0.013 | 4.742 | 0.4742 | 0.69 | 0.327 |
| | | | 0.14 | - | 0.28 | 0.018 | | 0.66388 | 0.565 | 0.375 |
| | | | 0.06 | - | 0.56 | 0.025 | | 0.28452 | 0.41 | 0.117 |
| | | | 0.40 | - | 1.00 | 0.034 | | 1.8968 | 0.25 | 0.474 |
| | | | 0.30 | - | 20.00 | 0.175 | | 1.4226 | 0 | 0.000 |
| Всего масса дегриза | | | | | | | 10.991 | 10.991 | | 2.158 |

Задаются:

- фактическая плотность ρ_{ϕ} , кг/м³;
- фактический диаметр d_{ϕ} , м.

2. Рассчитывается фактическая скорость осаждения частицы V_{ϕ} по известному диаметру частицы d_{ϕ} и фактической плотности ρ_{ϕ} , кг/м³. Расчеты проводятся на основе корреляции Шиллера-Неймана для коэффициента сопротивления [8], используемой в Star-CCM+:

$$V_{\phi} = \sqrt{\frac{4 \cdot d_{\phi} \cdot g \cdot (\rho_{\phi} - \rho_w)}{3 \cdot C_d \cdot \rho_w}};$$

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1 + 0,15 \cdot Re^{0,687}), & Re \leq 1000; \\ 0,4383, & Re > 1000; \end{cases}$$

$$Re = \frac{\rho_w \cdot d_{\phi} \cdot V_{\phi}}{\mu_w},$$

где: $\rho_w = 998.3$ кг/м³ – плотность жидкости (в данном случае – воды);
 $\mu_w = 0.001003$ Па·с – динамическая вязкость воды.

Рассчитывается диаметр эквивалентной частицы d_3 по известной фактической скорости осаждения частицы V_ϕ и эквивалентной плотности $\rho_3 = 2650 \text{ кг/м}^3$.

$$d_3 = \frac{V_\phi^2 \cdot 3 \cdot C_d \cdot \rho_w}{4 \cdot g \cdot (\rho_3 - \rho_w)}$$

Расчет диаметра эквивалентной сферической частицы для фактической волокнистой проводится аналогично. Результаты расчета диаметров эквивалентных частиц приведены в табл. 1 (столбец 7).

Для расчетов на Star-CCM+ была использована трехмерная модель экспериментального стенда (рис. 5). Стенд имеет размеры в плане 5000x1000 мм, уровень раствора теплоносителя от дна бака 1700 мм, в качестве механического фильтра использован фрагмент фильтрующего модуля из 11 фильтрующих элементов идентичных применяемым в натуре. В расчетной области была построена сетка, содержащая 9.5 млн ячеек.

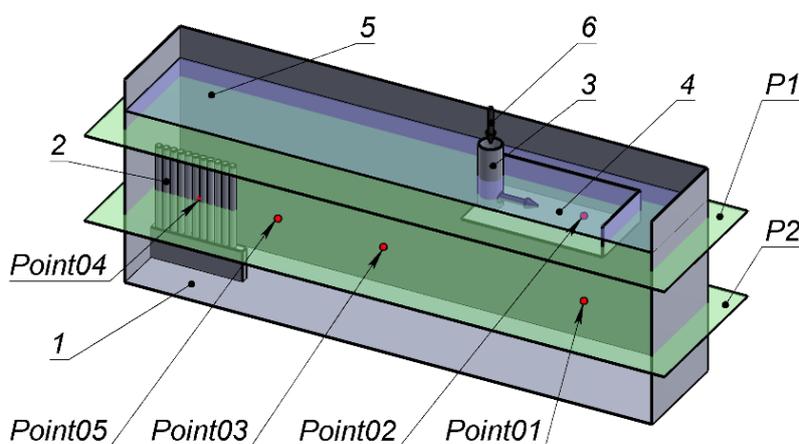


Рис. 5. Модель экспериментального стенда (передние стенки бака и лотка условно не показаны):

1 – дно бака; 2 – фильтрующие элементы; 3 – входное устройство; 4 – лоток;
5 – свободная поверхность раствора теплоносителя; 6 – ввод раствора теплоносителя с дебрисом;
Point01 – Point05 – точки мониторинга пульсации вертикальной составляющей скорости потока в стенде; P1, P2 – сечения, в которых рассматривались поля скоростей в расчете

Fig. 5. Model of the experimental bench (the front walls of the tank and tray are not shown):

1 – tank bottom; 2 – filter elements; 3 – inlet device; 4 – tray;
5 – free surface of the coolant solution;
6 – input of the coolant solution with debris; P01 – P05 – points for pulsation monitoring of the vertical component of the flow velocity in the bench;
P1, P2 – sections in which the velocity fields were considered in the calculation

На первом этапе был проведен расчет течения воды в установке без частиц с привлечением турбулентной LES-модели до квазистационарного состояния. На свободной поверхности ставились условия стенки без прилипания, а на границе втекания (вход ВУ) задавалось давление. В расчете контролировались пульсации вертикальной составляющей скорости потока воды в стенде в пяти точках мониторинга Point01 – Point05 (рис. 5). Графики расчетных пульсации вертикальной составляющей скорости потока воды в стенде в точках мониторинга приведены на рис. 6.

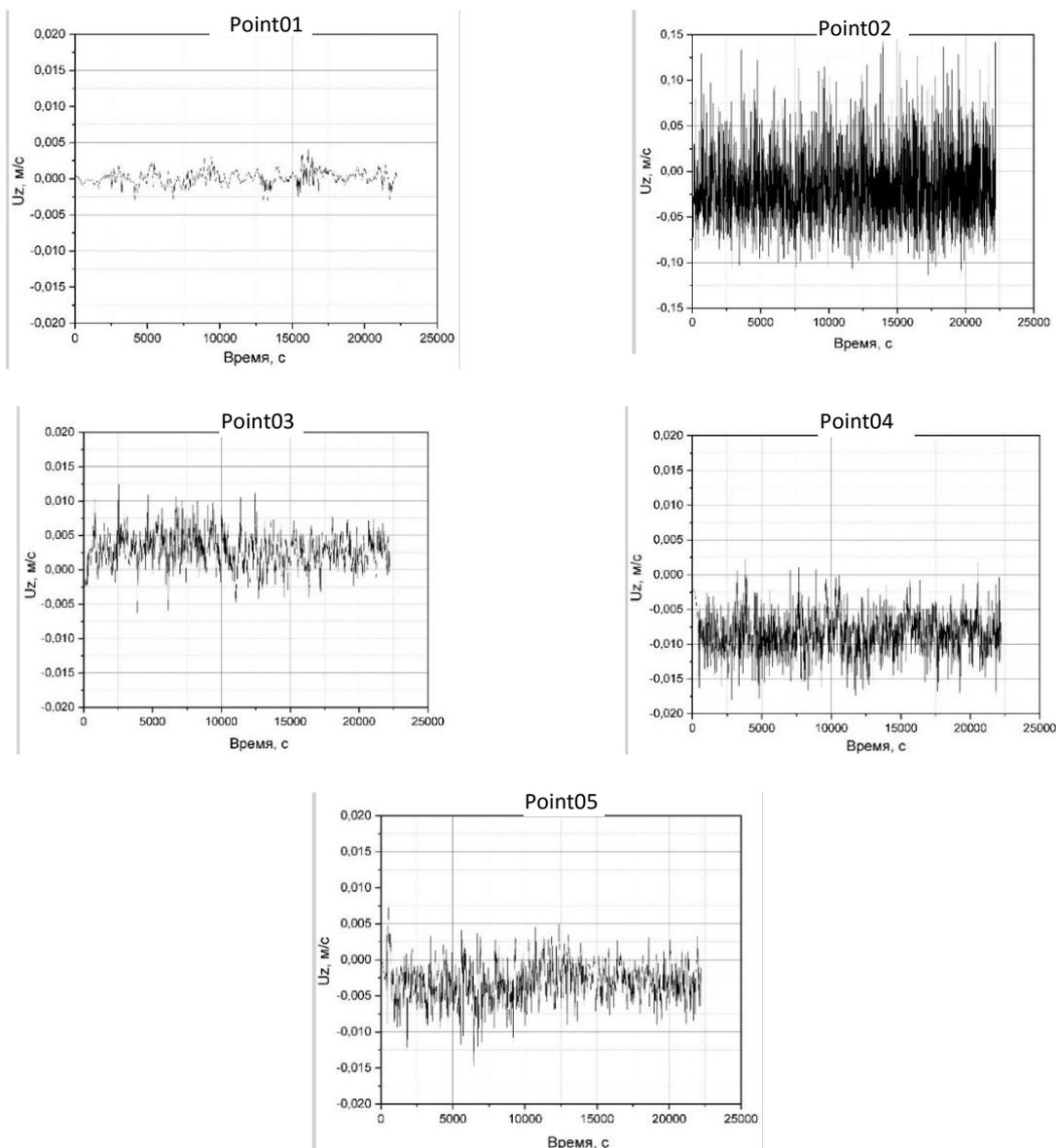


Рис. 6. График пульсации вертикальной составляющей скорости потока в стенде в точках мониторинга

Fig. 6. Graph of the pulsation of the vertical component of the flow velocity in the bench at monitoring points

На рис. 7 представлены поля скорости в двух горизонтальных сечениях P1 и P2 (рис. 5). Сечение P1 соответствует середине выходного окна ВУ, сечение P2 примерно соответствует середине фильтрующего элемента. Видно, что максимальная скорость в сечении P1 (порядка 0.5 м/с) имеет место на выходе из ВУ, в лотке происходит интенсивное перемешивание среды, далее по длине экспериментального стенда скорость менее 0,1 м/с. В сечении P2 максимальные скорости возникают у торцевой стенки бака, в районе фрагмента фильтрующего модуля, где поток разворачивается к нему. Скорости в сечении P2 в целом невысоки, максимальное значение порядка 0.02 м/с.

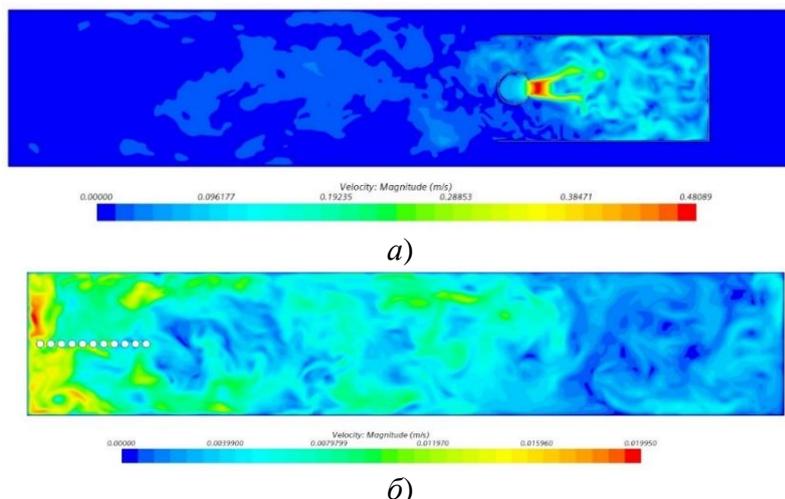


Рис. 7. Поля скорости в двух горизонтальных сечениях стенда:

a) поле скоростей течения воды в сечении P1;

б) поле скоростей течения воды в сечении P2

Fig. 7. Velocity fields in two horizontal sections of the bench:

a) water flow velocity field in section P1; b) water flow velocity field in section P2

На втором этапе выполнялись расчеты с введением частиц во входное устройство. В пределах одного расчета рассматривались частицы с равной скоростью осаждения. Расчеты повторялись для каждой фракции компонентов дебриса. Количество одновременно вводимых частиц составляло $N_0=2286$ штук. На всех стенках и свободной поверхности, кроме дна резервуара и лотка, ставятся условия отскока для частиц. На дне резервуара и дне лотка ставятся условия прилипания частиц. В процессе расчета подсчитывалось число частиц, попадающих на дно бака и дно лотка (N) и фильтра (N_0-N), до момента, когда взвешенных частиц в потоке более не оставалось. После этого подсчитывалась доля всех частиц, достигших фильтрующих поверхностей, для каждой фракции компонентов дебриса. Результаты расчета приведены на рис. 8.

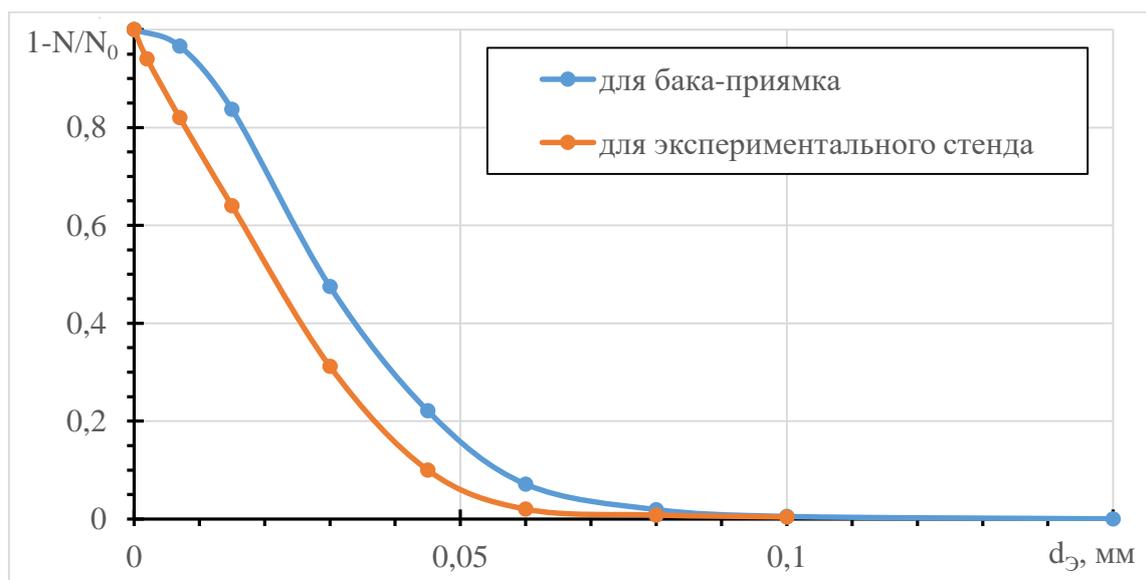


Рис. 8. Результаты расчета доли частиц, достигших фильтрующих поверхностей, для каждой фракции компонентов дебриса

Fig. 8. Results of calculating the proportion of particles that reached the filter surfaces for each fraction of debris components

Используя исходные данные по составу дебриса и расчетные данные по доле частиц, достигших фильтрующих поверхностей, можно определить массу дебриса, достигающего фильтрующей поверхности пофракционно и в сумме. Полученные данные приведены в табл. 1 (столбцы 9, 10 и 11). При введении 10.991 кг дебриса в экспериментальный стенд, фильтрующей поверхности достигло 2.158 кг. В реальном эксперименте при введении в стенд того же количества дебриса фильтрующей поверхности достигло 2.060 кг. Доля дебриса, достигающего фильтрующей поверхности, для расчета составила 19,6 %, для эксперимента – 18,7 %. Погрешность расчета составила, таким образом, $|2.060-2.158|/2.060 \cdot 100 = 5 \%$

Выводы по разделу. Валидация Star-CCM+ для анализа осаждения частиц в потоке жидкости показала, что данный метод можно использовать для расчетов транспортировки частиц к фильтрующей поверхности. Погрешность расчета составляет около 5 %, что вполне достаточно при конструировании фильтра и определении величины его фильтрующей поверхности.

Расчет осаждения дебриса в реальном баке-приямке

Учитывая идентичность и симметричность конструкции бака-приямка, будем анализировать процессы только для полубака, расположенного в углах $180^\circ \dots 270^\circ \dots 360^\circ$. Бак-приямок имеет внутренний радиус 11800 мм, наружный – 18350 мм, более подробно размеры бака-приямка, компоновка оборудования системы фильтрации в нем, размеры оборудования приведены в [3]. Уровень раствора теплоносителя в баке составляет 3.5 м. В соответствии с результатами расчетов параметров защитной оболочки в условиях аварии с потерей теплоносителя температура воды в баке-приямке 85°C . Расход раствора теплоносителя через бак-приямок равен $0.81 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для проведения расчетов была разработана 3D-модель бака-приямка, представленная на рис. 9 в масштабе 1:1. Для расчета, как и в случае экспериментального стенда, используется LES-модель, способная разрешать на сетке крупномасштабные нестационарные турбулентные пульсации скорости. Сетка содержала 15 млн ячеек, шаг по времени 0.25 с. LES-модель позволяет учитывать влияние поля турбулентных пульсаций на движение частиц. Частицы моделируются как лагранжевы, на которые действуют силы сопротивления, силы плавучести и силы тяжести. Запуская на вход N_0 частиц, можно затем определить число попавших на фильтр. На дне и боковых стенках ставились условия с прилипанием. На свободной поверхности ставились условия стенки без прилипания, а на границе вытекания (поверхность фильтров) ставились условия заданного расхода (минус $0.81 \text{ м}^3/\text{с}$).

На первом этапе был проведен расчет течения воды в установке без частиц с привлечением турбулентной LES-модели до квазистационарного состояния. Квазистационарное состояние оценивалось по полю вертикальной составляющей скорости в точках мониторинга (рис. 10). Вертикальная составляющая скорости определена по показаниям в точках мониторинга Point 01 – Point 06, расположение которых показано на рис. 9. Вертикальные пульсации скорости имеют величину до 0.3 м/с (что вдвое больше, чем в экспериментальном стенде) и, следовательно, могут оказывать значительное влияние на движение частиц.

Расчетные поля скорости в горизонтальном (на уровне 0.95 м от пола бака, посередине выходного окна ВУ) и вертикальном сечении по оси бака-приямка (рис. 9) приведены на рис. 10. При сравнении рис. 7 и 10 видно, что поля скорости в экспериментальном стенде и в баке-приямке подобны, максимальные скорости наблюдаются в районе выхода из ВУ и далее в зоне смешения, на участке зоны осаждения скорости значительно ниже, что свидетельствует о создании благоприятных условий для осаждения частиц на этом участке. Турбулентные пульсации (вертикальная составляющая скорости) также в зоне осаждения и для экспериментального стенда и бака-приямка меньше, чем в зоне смешения (рис. 6 и 11).

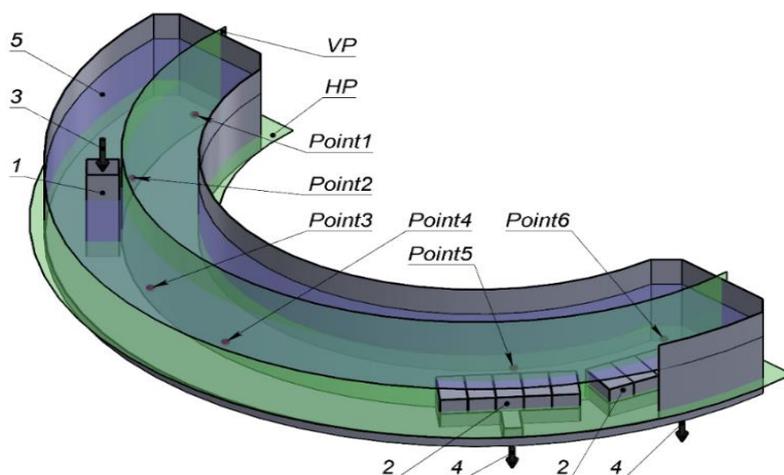


Рис. 9. Модель бака-приямка (железобетонные конструкции условно не показаны, только облицовка, в передней стенке сделан вырез):

1 – входное устройство; 2 – устройство защиты приямков; 3 – вход раствора теплоносителя с дебрисом; 4 – выход раствора теплоносителя из бака-приямка; Point1-Point6 – точки мониторинга пульсации вертикальной составляющей скорости потока в баке-приямке; VP, HP – сечения, в которых рассматривались поля скоростей в расчете

Fig. 9. Model of the sump tank (reinforced concrete structures are not shown, only the lining, a cutout is made in the front wall):

1 – inlet device; 2 – sump protection device; 3 – inlet of the coolant solution with debris; 4 – outlet of the coolant solution from the sump tank; Point1 – Point6 – points for pulsation monitoring of the vertical component of the flow velocity in the sump tank; VP, HP – sections in which the velocity fields were considered in the calculation

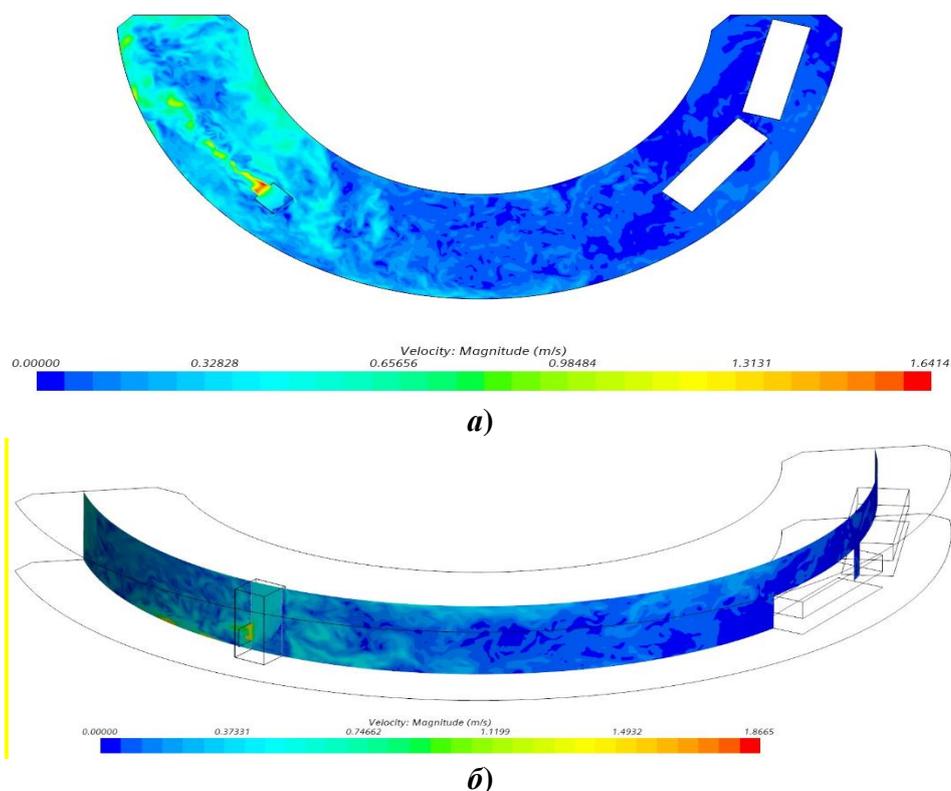


Рис. 10. Поле скоростей:

а) в горизонтальном сечении бака-приямка; б) в вертикальном сечении бака-приямка

Fig. 10. Velocity field:

a) in the horizontal section of the sump tank; b) in the vertical section of the sump tank

На втором этапе расчета на вход бака-приямка через входное устройство подавалось одновременно $N_0=2286$ частиц. На всех стенках и свободной поверхности, кроме дна бака-приямка, ставятся условия отскока для частиц. На дне бака-приямка ставятся условия прилипания частиц. В процессе расчета подсчитывалось число частиц, попадающих на фильтр, дно бака-приямка до момента, когда взвешенных частиц в потоке более не оставалось. После этого подсчитывалась доля всех частиц, достигших фильтрующих поверхностей, для каждой фракции компонентов дебриса. Результаты расчета доли частиц, достигающих фильтрующих поверхностей в баке-приямке, приведены на рис. 8. Сравнивая кривые для экспериментального стенда и для бака-приямка, можно видеть, что кривая для бака-приямка находится правее кривой для стенда. Это связано с большими линейными размерами бака-приямка и, соответственно, с большей амплитудой турбулентных пульсаций.

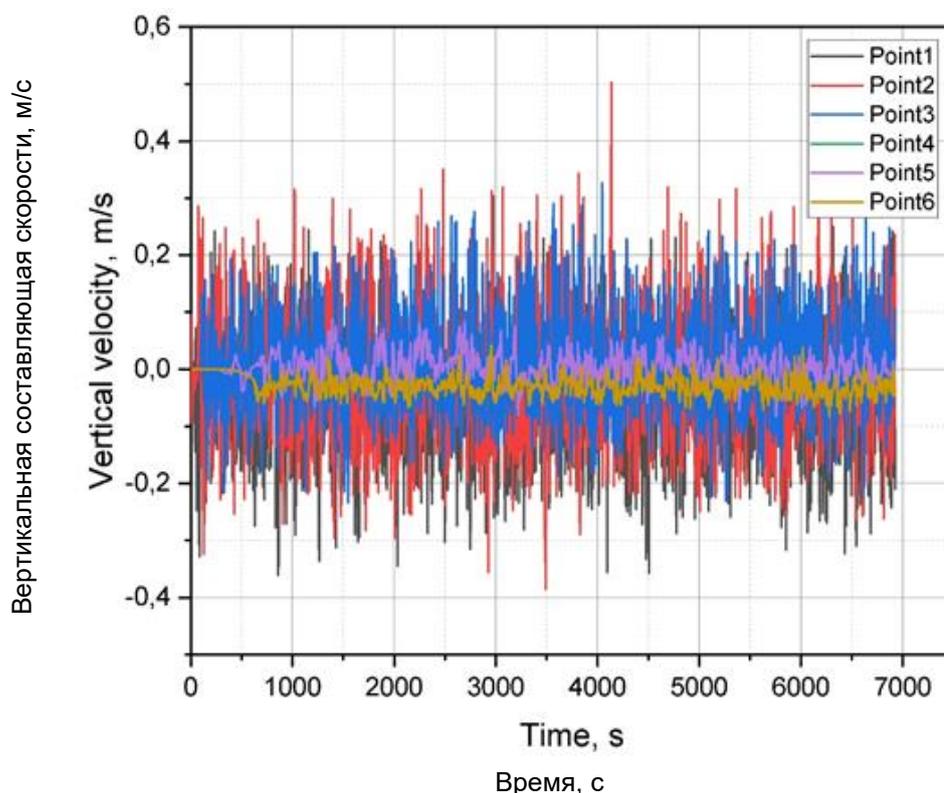


Рис. 11. Зависимость вертикальной составляющей скорости от времени в точках мониторинга

Fig. 11. Dependence of the vertical component of velocity on time at monitoring points

Используя данные по реальному образованию дебриса в защитной оболочке при аварии с потерей теплоносителя при фракционном составе отдельных составляющих в соответствии с табл. 1 (столбец 4) и результаты расчета доли частиц, достигающих фильтрующих поверхностей в баке-приямке, можно определить массу дебриса, достигающего фильтрующих поверхностей в баке-приямке. Результаты расчета показали, что при массе дебриса, формируемого в защитной оболочке под воздействием высокоэнергетической струи из разрыва, равной 2042 кг, фильтрующих поверхностей УЗП достигает 603.2 кг дебриса, т.е. 29,5 %.

Выводы по разделу. Расчеты кодом Star-ССМ+ процессов осаждения частиц дебриса в баке-приямке, валидированные по экспериментальным данным показали, что доля осевшего и, вследствие этого, не достигшая фильтрующих поверхностей УЗП, дебриса составляет около 70 % от количества дебриса, поступившего в бак-приямок при аварии с потерей теплоносителя.

Выводы

Код Star-ССМ+ может применяться в расчетах транспортировки частиц к фильтрующей поверхности. Погрешность расчета составляет около 5 %, что достаточно для анализа поведения частиц дебриса в баке-приямке. При их движении в канале с параметрами, идентичными каналу в баке-приямке, влияние турбулентных пульсаций оказывает существенное влияние на время осаждения. Степень влияния зависит от скорости осаждения частиц в условно спокойной воде. Крупные частицы практически не реагируют на турбулентные пульсации. Расчеты показали, что компоновка бака-приямка ЛАЭС (энергоблок 3 и 4) позволяет сократить количество дебриса, достигающего УЗП, на 70 % от образующегося при аварии с потерей теплоносителя в сравнении с энергоблоками 1 и 2 ЛАЭС-2.

В настоящей работе код Star-ССМ+ успешно использован для расчета осаждения частиц дебриса в баке-приямке защитной оболочки. Валидированный по экспериментальным данным, он может быть применен для решения ряда других задач: определения влияния скорости (расхода) раствора теплоносителя на осаждение частиц дебриса, т.е. на эффективность улавливания дебриса в зоне гравитационного осаждения; влияния температуры раствора теплоносителя на тот же процесс; влияния состава (волокно/частицы) дебриса и др.

С помощью кода Star-ССМ+ возможно решение важной задачи корректировки исходных данных (количества и состава дебриса) при подготовке экспериментального обоснования фильтров баков-приямков, требуемого при проведении прямо-сдаточных работ.

Библиографический список

1. **Магола, И.А.** Источники и виды дебриса, образующегося при аварии с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР / И.А. Магола, В.О. Кухтевич, Н.А. Осмаков [и др.] // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133, вып. 3. – С. 156-164.
2. **Магола, И.А.** Влияние выбора типа и конструкции теплоизоляции на количество дебриса, формирующегося в ходе аварии с потечей теплоносителя на АЭС с ВВЭР / И.А. Магола, Л.А. Матюшев, Е.Л. Шамрай [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2023. – № 2 (32). – С. 74-84.
3. **Магола, И.А.** Моделирование системы фильтрации раствора теплоносителя для реакторной установки с ВВЭР-1200 / И.А. Магола, Л.А. Матюшев, Е.Л. Шамрай [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2025. – Вып. 2(128). – С. 144-154.
4. **Матюшев, Л.А.** Проектирование фильтров, устанавливаемых перед системой аварийного охлаждения активной зоны ядерного реактора / Л.А. Матюшев, Е.Л. Шамрай [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2022. – № 3 (29). – С. 74-84.
5. **Пат. 2686684 С1 Российская Федерация.** Устройство защиты приямков в аварийной системе охлаждения водо-водяного ядерного реактора, фильтрующий модуль устройства защиты приямков / В.В. Безлепкин, А.И. Курчевский, В.О. Кухтевич, Л.А. Матюшев, А.Г. Митрюхин; патентообладатель АО «Атомэнергопроект». – Оpubл. 30.04.2019, Бюл. № 13. – 16 с.
6. **Пат. 2778712 С1 Российская Федерация.** Бак для фильтрации и сбора мусора / Л. А. Матюшев, А.Г. Митрюхин, Е.Л. Шамрай, К.Ю. Коробейников ; патентообладатель АО «Атомэнергопроект». – опубл. 23.08.2022, Бюл. № 24. – [б. с.].
7. **Магола, И.А.** Экспериментальное обоснование фильтров баков-приямков проекта АЭС-2006 / И.А. Магола, Л.А. Матюшев // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133, вып. 3. – С. 164-170.
8. **Kelbaliyev, G. I.** Drag coefficients of variously shaped solid particles, drops and bubbles / G.I. Kelbaliyev // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2011. – Т. 45, № 3. – С. 248-266.

References

1. Magola I.A., Kukhtevich V.O., Osmakov N.A., et al. Istochniki i vidy debrisa, obrazuyushchegosya pri avarii s poterey teplonositelya na AES s VVER [Sources and Types of Debris Generated During a Loss-of-Coolant Accident at a Nuclear Power Plant with VVER]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2022;133(3):156-164 (in Russian).

2. Magola I.A., Matyushev L.A., Shamray E.L., et al. Vliyanie vybora tipa i konstruktsii teploizolyatsii na kolichestvo debrisa, formiruyushchegosya v khode avarii s potechey teplonosatelya na AES s VVER [Influence of the choice of insulation type and design on the amount of debris generated during a loss-of-coolant accident at a NPP with VVER]. Tekhnologii obespecheniya zhiznennogo tsikla yadernykh energeticheskikh ustanovok [Technologies for ensuring the life cycle of nuclear power plants]. 2023;(2(32)):74-84 (in Russian).
3. Magola I.A., Matyushev L.A., Shamray E.L., et al. Modelirovanie sistemy fil'tratsii rastvora teplonosatelya dlya reaktornoy ustanovki s VVER-1200 [Modeling of the coolant solution filtration system for a reactor plant with VVER-1200]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Materialovedenie i novye materialy [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Materials Science and New Materials]. 2025;(2(128)):144-154 (in Russian).
4. Matyushev L.A., Shamray E.L., Mitryukhin A.G., et al. Proektirovanie fil'trov, ustanavlivaemykh pered sistemoy avariynogo okhlazhdeniya aktivnoy zony yadernogo reaktora [Design of filters installed before the emergency core cooling system of a nuclear reactor]. Tekhnologii obespecheniya zhiznennogo tsikla yadernykh energeticheskikh ustanovok [Technologies for ensuring the life cycle of nuclear power plants]. 2022;(3(29)):74-84 (in Russian).
5. Bezlepkin V.V., Kurchevsky A.I., Kukhtevich V.O., Matyushev L.A., Mitryukhin A.G. Ustroystvo zashchity priyamkov v avariynoy sisteme okhlazhdeniya vodo-vodyanogo yadernogo reaktora, fil'truyushchiy modul' ustroystva zashchity priyamkov [Protection device for sumps in the emergency cooling system of a water-cooled water-moderated nuclear reactor, filtering module of the sump protection device]. Russian Federation Patent RU 2686684 C1. 2019 Apr 30. 16 p. (In Russian).
6. Matyushev L.A., Mitryukhin A.G., Shamray E.L., Korobeynikov K.Yu. Bak dlya fil'tratsii i sbora musora [Tank for filtration and debris collection]. Russian Federation Patent RU 2778712 C1. 2022 Aug 23. (In Russian).
7. Magola I.A., Matyushev L.A., Shamray E.L., et al. Eksperimental'noe obosnovanie fil'trov bakov-priyamkov proekta AES-2006 [Experimental validation of sump tank filters for the AES-2006 project]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2022;133(3):164-170 (in Russian).
8. Kelbaliyev G.I. Drag coefficients of variously shaped solid particles, drops and bubbles. Theor Found Chem Eng. 2011;45(3):248-266.

**Дата поступления
в редакцию: 30.09.2025**

**Дата принятия
к публикации: 03.02.2026**