

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОНДЕНСАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

Тутукин А.В., Морозов А.В. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия),
Кудрявцев А.Ю., Шулепов К.В., Баринев А.А., Кальясов П.С.,
Чистяков О.А., Рязанов А.В. (ООО «Саровский Инженерный Центр»,
г. Саров, Нижегородская обл., Россия)

Введение

В настоящее время в системах локализации аварий на АЭС применяются барботажные конденсаторы [1]. В состав такого устройства входят бассейн с охлаждающей водой и каналы подвода горячего пара в воду. Пар конденсируется при контакте с водой. При этом возникают вопросы реализации эффективной схемы конденсации, использующей весь объем жидкости в бассейне. Одним из вариантов такой схемы являются конденсаторы, работающие по принципу пароводяного эжектора [2]. Эжектор позволяет захватывать холодную жидкость со дна бассейна, обеспечивая постоянно эффективную конденсацию в зоне смешения. В бассейне, в свою очередь, реализуется циркуляционное течение, подводящее к пассивному входу эжектора холодную воду.

Эффективность работы устройства определяется не только скоростью конденсации пара, но и величиной пульсаций давления. Пульсации давления связаны с наличием неустойчивых режимов работы и гидроударов при конденсации пара. Работа по определению и улучшению характеристик конденсационного устройства связана с организацией гидроаэродинамического течения.

Проектирование конденсационных устройств проводится на базе стендовых модельных испытаний и современных методов теплогидравлических расчетов. В данной работе рассмотрены возможности компьютерного моделирования циркуляционно-барботажного конденсационного устройств (ЦБУ). Моделирование проводится с использованием методов вычислительной гидроаэродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics) в ПО STAR-CCM+.

1. Физическая постановка задачи

ЦБУ представляет собой пароводяной эжектор (рис. 1). Устройство расположено в конденсационной камере (бассейне). В камере задана исходная температура воды. На активный вход эжектора подается горячий водяной пар с заданной скоростью и температурой. В зоне смешения эжектора пар обеспечивает вертикальное перемещение воды. В этой же зоне происходит активная конденсация пара. Забор воды реализуется со дна бассейна на пассивном входе эжектора.

Контрольными параметрами являются:

1. Коэффициент эжекции, равный отношению массовых расходов эжектируемой воды и подаваемого пара. Коэффициент эжекции в эксперименте вычисляется по формуле

$$\eta = \frac{r + c_p(T_s - T_{\text{вых}})}{c_p(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})} \quad (1)$$

где c_p – коэффициент теплоемкости воды при постоянном давлении, Дж/(кг·К); r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; T_s – температура насыщения воды, соответствующая заданному давлению в бассейне, °С.

2. Температура воды на пассивном входе в эжектор $T_{\text{вх}}$.
3. Температура воды на выходе из эжектора $T_{\text{вых}}$.
4. Частоты и амплитуды пульсаций давления в контрольной точке (в районе выхода и эжектора).

Экспериментальные данные представлены в таблице.

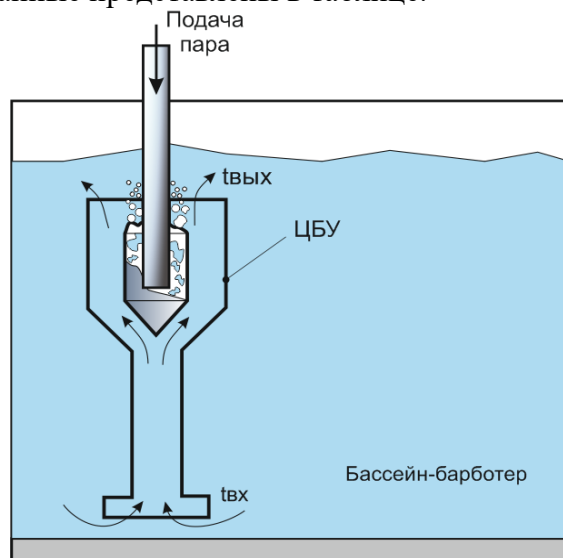


Рис. 1. Конденсационное устройство

Режимы работы ЦБУ в эксперименте

Режим	Скорость пара на активном входе $W_{\text{пар}}, \text{м/с}$	Массовый расход пара на активном входе $G_{\text{пар}}, \text{кг/с}$	Давление пара на активном входе $P_{\text{пар}}, \text{Па}$	Температура воды на пассивном входе $T_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	Температура воды на выходе $T_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	Коэффициент эжекции η
3-3-1	34	0,168	110000	17	30	49
3-3-1	34	0,168	110000	35	50	39
3-3-1	34	0,168	110000	71	80	62
3-3-3	63	0,32	115000	12	30	34
3-3-3	63	0,32	115000	37	50	45
3-3-3	63	0,32	115000	72	80	70
3-3-7	98	0,56	130000	15	30	41
3-3-7	98	0,56	130000	35	50	40
3-3-7	98	0,56	130000	69	80	51

2. Математическая постановка задачи

Движение вязкой теплопроводной среды описывается системой уравнений Навье–Стокса, уравнением энергии и уравнением состояния [3]. Жидкость считается несжимаемой. Для моделирования границы раздела сред вода/пар решается уравнение переноса концентрации фаз (модель VoF [4]). Фазовый переход описывается моделью кавитации Шнеллера–Сауэра (Schnerr–Sauer [5]).

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$

Уравнения импульсов

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right)$$

где g_i – ускорение свободного падения.

Уравнение энергии

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j h}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right)$$

где энтальпия $h = c_p T$, число Прандтля $Pr = \frac{\nu c_p \rho}{\alpha}$, α – теплопроводность, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, ν – кинематическая вязкость, ρ – плотность. Модель учитывает перенос тепла в процессе фазового перехода через задание теплоты парообразования как физического свойства сплошных сред (воды и пара).

Вода считается несжимаемой жидкостью. Уравнение состояния для пара

$$p = \rho R T$$

Уравнение переноса концентрации (VoF [4])

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \frac{\partial a u_j}{\partial x_j} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

где a – объемная концентрация фазы. Значение $a = 1$ соответствует воде, $a = 0$ водяному пару, $\dot{m}$ – источник массы на единицу объема, определяемый фазовым переходом. Свойства многофазной среды определяются пропорционально объемным долям фаз как

$$\rho = a \rho_w + (1 - a) \rho_a$$

$$\mu = a \mu_w + (1 - a) \mu_a$$

$$C_p = C_{pw} \frac{\rho_w}{\rho} a + C_{pa} \frac{\rho_a}{\rho} (1 - a)$$

Скорость фазового перехода (массовый поток)

$$\dot{m} = n_0 a 4 \pi \rho_w R^2 V_r$$

где $n_0 = 1 \text{e}12 \text{ м}^{-3}$ – количество пузырьков пара в кубическом метре жидкости, $R = \sqrt[3]{\frac{1-a}{n_0 \frac{4}{3} \pi a}}$

– радиус пузырька пара (минимальное значение 1 мкм), $V_r^2 = \text{ScalingFac}^2 \frac{2}{3} \frac{p_{sat} - p}{\rho_w}$ – скорость роста пузырьков согласно модели Шнерра–Сауэра, p_{sat} – давление насыщенных паров в жидкости (в зависимости от температуры, согласно уравнению Антуана).

Неизвестными являются компоненты скорости, u_i , давление p , температура T , плотность ρ и концентрация a .

Математическая модель содержит две эмпирические константы, определяющие положительную и отрицательную скорость роста пузырьков пара в жидкости ScalingFac^+ и ScalingFac^- соответственно. По серии отладочных расчетов выбраны значение эмпирической константы $\text{ScalingFac}^+ = 0$, таким образом, испарение воды в модели запрещено. Задание эмпирической константы ScalingFac^- определяется калибровкой по результатам экспериментальных данных.

Задача решается в осесимметричной постановке. Расчетная область представляет собой сектор с углом раскрытия 1° . На входе в расчетную область задается подача пара с фиксированным расходом и температурой. Температура горячего пара определяется величиной входного давления из экспериментальных данных. В частности, при давлении 110 кПа температура пара составляет 107°C . Проточная часть эжектора ограничена твердыми стенками с реализацией условий прилипания и непротекания. На стенках бассейна и внешней поверхности эжектора задано условие непротекания. Все стенки являются теплонепроницаемыми. Верхняя граница совпадает с невозмущенным уровнем воды в бассейне. На ней задано нулевое избыточное давление (относительно атмосферного) и температура воды. На границах сектора реализовано условие симметрии.

Особенности гидродинамического течения приводят к тому, что через выходную границу в расчетную область постоянно подмешивается вода заданной температуры. Данная математическая постановка не позволяет оценить изменение температур на длинных временных реализациях и нацелена на моделирование работы устройства на заданном режиме, характеризующимся температурой воды в бассейне и расходом пара.

Принципиальным вопросом для данной задачи является задание начальных условий (рис. 2). По-видимому, выход на режим в эксперименте сопровождается пульсациями скоростей и давлений, либо реализуется в течении относительно длительного времени. Математически, моделирование выхода на режим может потребовать длительного времени счета или привести к неустойчивости задачи. В предлагаемой методике реализованы следующие начальные условия: задан уровень столба пара и вертикальная граница раздела сред в зоне смешения эжектора. Температура воды соответствует заданной. Температура пара в активном канале эжектора и в зоне смешения составляет 107 °С. Задано начальное распределение скоростей в воде, реализующее циркуляционное движение (вверх в эжекторе и вниз в бассейне). Значение скорости составляет 1 м/с.

Решение уравнений реализовано численно с использованием метода конечных объемов. В окружном направлении используется 1 ячейка. Для описания проточной части эжектора используется не менее 20 ячеек по ширине каналов. Реализовано сгущение сетки в районе зеркала воды в конденсационной камере. У внутренних стенок конденсационной камеры реализовано сгущение элементов для детального описания пограничного слоя. Фрагменты сеточной модели представлены на рис. 3. Общее количество ячеек составляет 37 000. Шаг интегрирования по времени dt в зависимости от скорости подачи пара меняется в диапазоне 0,5...0,1 мс с реализацией пяти итераций на каждом временном шаге.

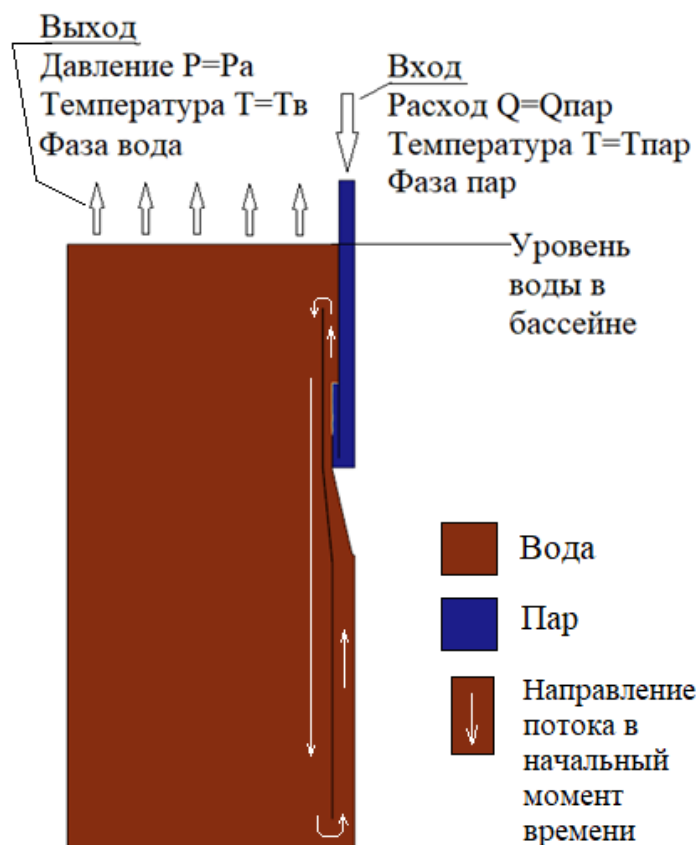


Рис. 2. Начальные и граничные условия

Параметры дискретизации выбирались в первую очередь исходя из сокращения времени счета для оперативного получения и анализа результатов при отладке методики решения. Число Куранта локально (в активном канале эжектора в зоне поворота потока на 180°) превышает 200. Шаг по времени обеспечивает устойчивость численного счета задачи. Проведена проверка влияния параметров дискретизации на результаты моделирования. Установлено, что уменьшение размера ячейки (в 4 раза) и шага по времени (в 10 раз) приводит к изменению осредненных во времени параметров не более чем на 5 %, что на данном этапе рассмотрения задачи считается приемлемым. Изменение амплитудно-частотных характеристик нестационарного потока так же несущественно.

В численной реализации используется алгоритм Segregated Flow с релаксацией по скорости 0,8, по давлению 0,2 по температуре 0,9, по переносу концентрации 0,9. Установлен первый порядок интегрирования переменных по времени и второй по пространственным координатам. Выбрана схема с высоким порядком разрешения границы раздела сред (Modified HRIC) [6].

Время расчета реализации 10 секунд физического времени при распараллеливании задачи на 45 ядер составляет 4–12 часов в зависимости от шага интегрирования по времени, определяемого скоростным режимом.

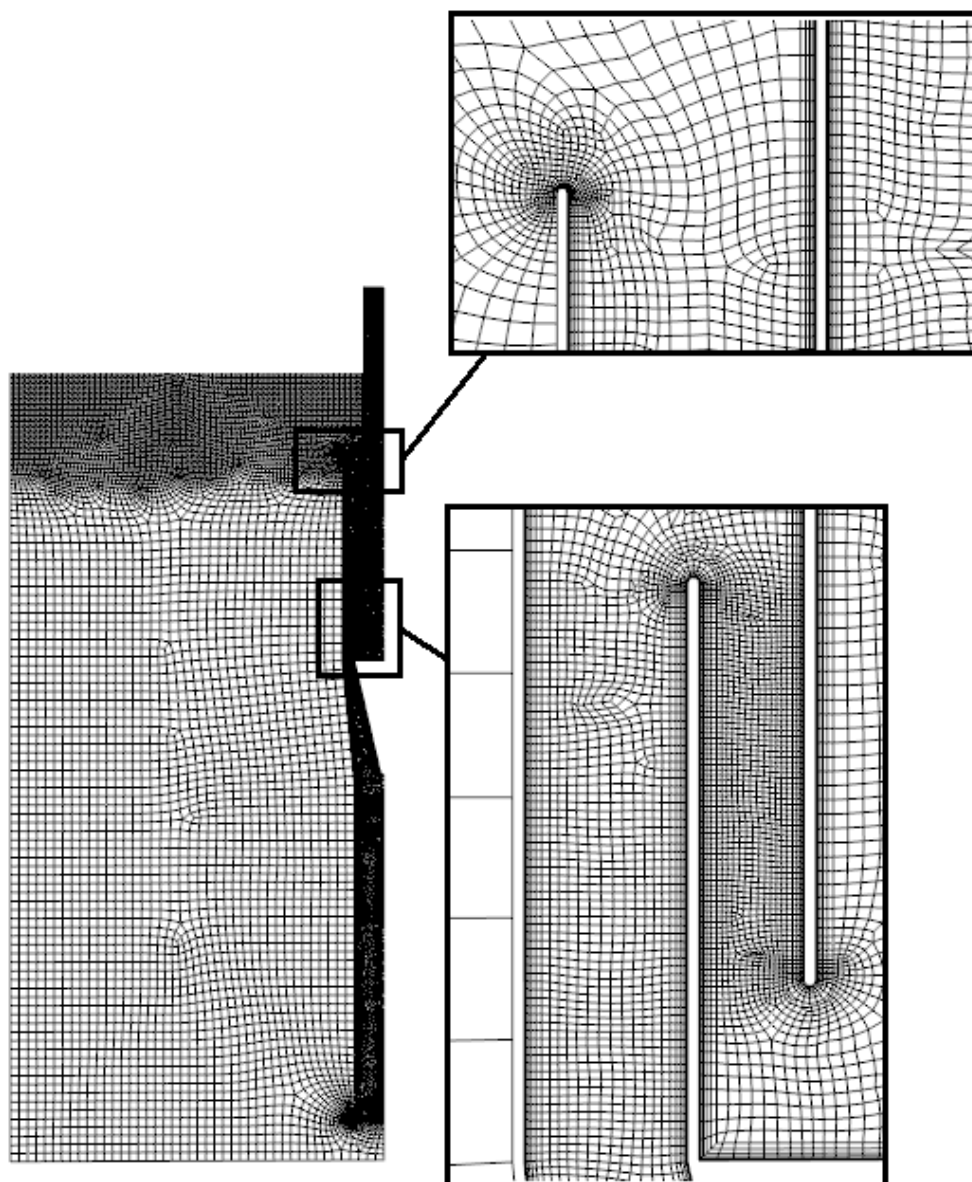


Рис. 3 Фрагменты сеточной модели

Требуется отметить, что используемая математическая модель не учитывает турбулентный характер течения. На данном этапе вводится допущение о том, что силами, определяющими структуру потока, являются массовые силы. Учет турбулентного режима течения с использованием полуэмпирических моделей турбулентности (RANS модели [7]) не обоснован. Противоречия заключаются в одновременном разрешении вихревого течения, связанного с колебаниями формы поверхности раздела сред и моделировании турбулентного вихревого течения тех же масштабов через энергетические характеристики. Для учета турбулентного режима течения, по-видимому, необходимо использовать вихреразрешающие модели турбулентности с разрешением вихревых структур до масштабов, сопоставимых с масштабами волн на границе раздела сред. Такой подход существенно повысит требования к вычислительным ресурсам вследствие необходимости реализации трехмерной постановки и уточнения параметров дискретизации. Рациональность такой постановки в контексте прикладного применения требует обоснования.

3. Калибровка эмпирической константы

Рассматриваемая математическая модель имеет эмпирические параметры и требует их калибровки по экспериментальным данным. В связи с этим проводится серия калибровочных расчетов. Калибровка проводится по коэффициенту эжекции. Зависимость коэффициента эжекции от значения эмпирической константы для режима « $G_{пар} = 0,168$ кг/с, $T_{ex} = 17^\circ\text{C}$ » представлена на рис. 4. Результатам можно дать физическую интерпретацию. При низкой скорости конденсации пар выходит на поверхность бассейна. Этот режим соответствует максимальному значению коэффициента эжекции. Граница режимов выхода пара на поверхность бассейна определяется из соотношения расходов подаваемого и конденсирующегося пара (рис. 5). При увеличении количества пара (уменьшении скорости конденсации) эжекция снижается, так как пар заполняет большой объем в зоне смешения эжектора. При уменьшении количества пара (увеличении скорости конденсации) факел пара становится меньше, уменьшается зона смешения воды и пара и, как следствие, количество эжектируемой воды. В пределе пар не будет доходить до зоны смешения, а коэффициент эжекции будет равен 0. Опираясь на экспериментальные данные, можно однозначно определить значение эмпирической константы.

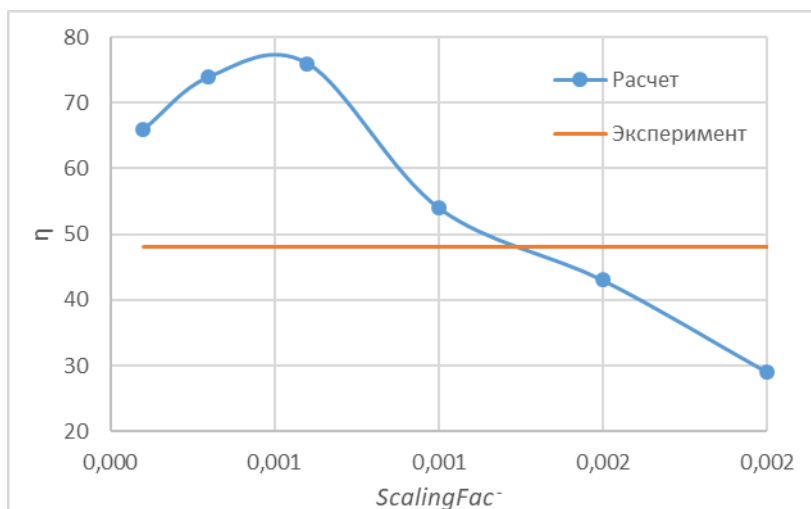


Рис. 4. Зависимость коэффициента эжекции от эмпирической константы

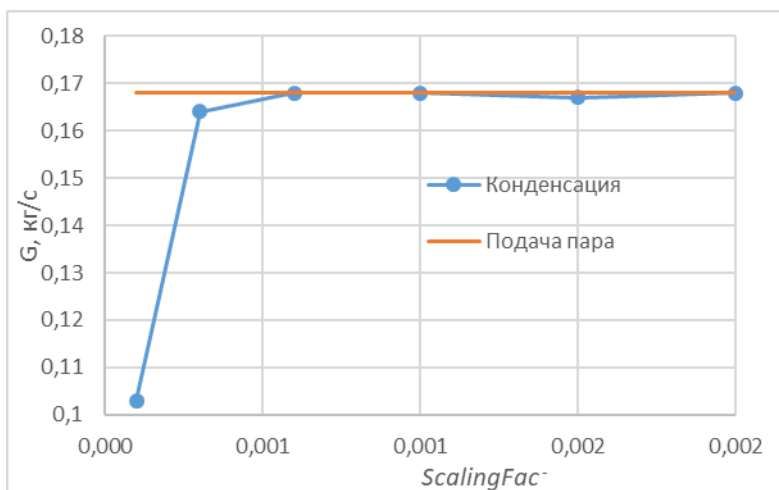


Рис. 5. Массовые потоки пара

По экспериментальным данным (см. табл.) проведена калибровка эмпирической константы и ее экстраполяция за границы экспериментальных режимов. Результаты представлены на рис. 6, 7.

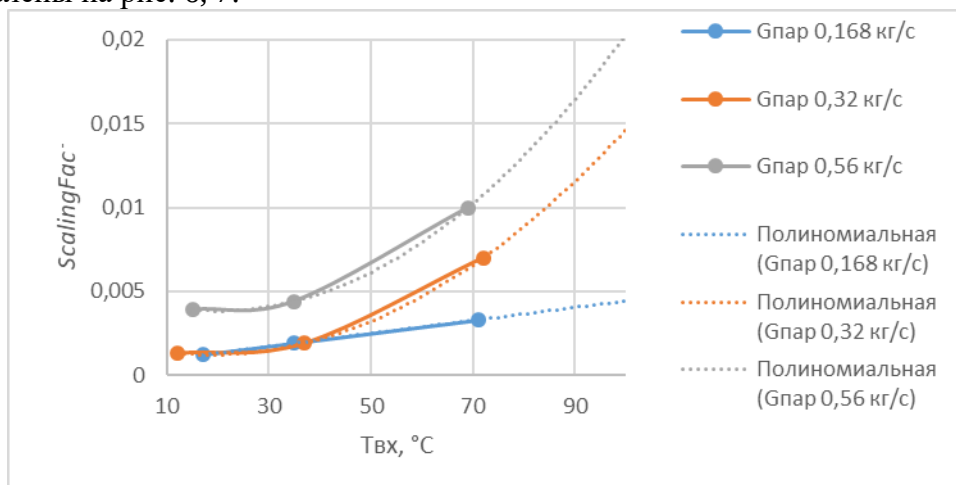


Рис. 6 Экстраполяция эмпирической константы по скорости

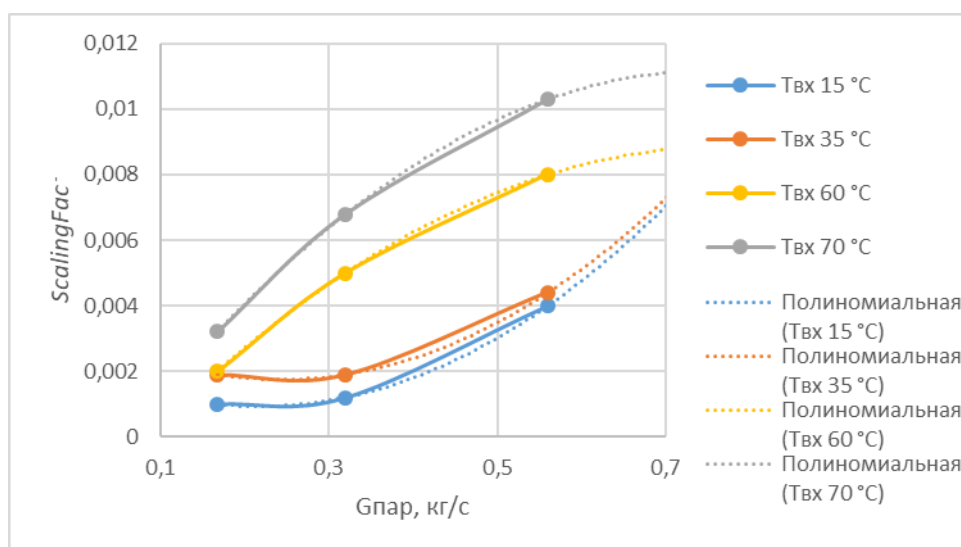


Рис. 7 Экстраполяция эмпирической константы по температуре

4. Моделирование режимов работы ЦБУ

Значения эмпирической константы использовались для моделирования работы ЦБУ в широком диапазоне входных параметров. По результатам моделирования получены нестационарные поля переменных и осредненные во времени характеристики (значения коэффициента эжекции). Для пульсаций давления в контрольной точке проводилась спектральная обработка временных реализаций с определением амплитудно-частотных характеристик. Карта режимов работы эжектора представлена на плоскости «Температура воды – расход пара» (рис. 8). Аналогичное представление используется различными авторами [8].

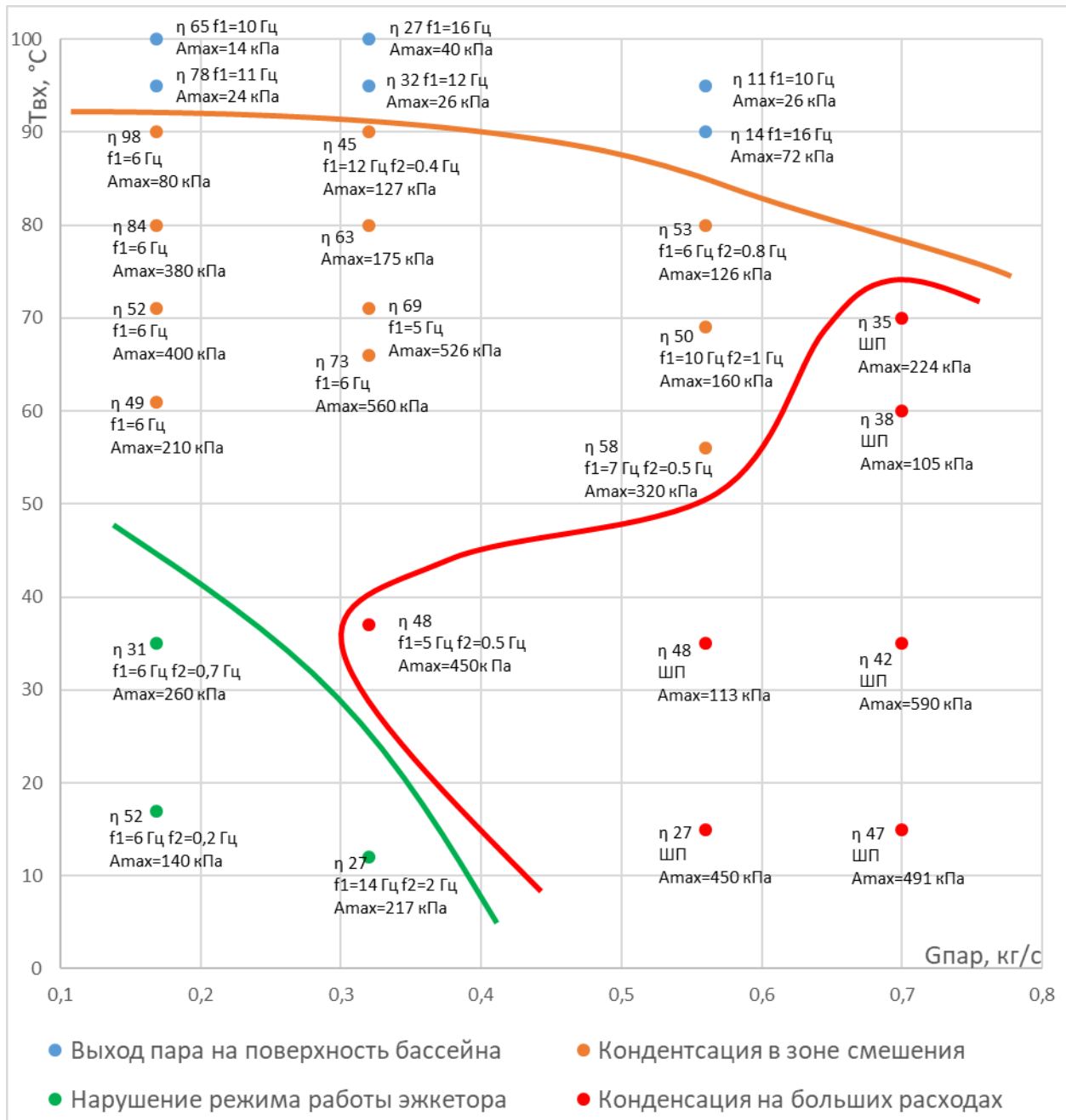


Рис. 8. Карта режимов работы ЦБУ на плоскости «Температура воды – Расход пара»

Анализ результатов по каждому расчетному варианту позволяет выделить ряд характерных режимов работы ЦБУ.

«Выход пара на поверхность бассейна» характерен для высоких температур воды и больших расходов подачи пара. Пульсации давления имеют относительно низкие амплитуды порядка 20 кПа. Характерные частоты пульсаций отсутствуют.

При низких расходах пара и температурах воды наблюдаются периодические нарушения работы эжектора. Часть зоны смешения заполняется паром, а уровень воды в пассивном канале эжектора начинает снижаться. Далее работа эжектора восстанавливается. Нарушение работы эжектора происходит с низкой частотой порядка 1 Гц. Вместе с указанным процессом имеет место высокочастотное (около 6 Гц) колебание пара в зоне смешения. Колебания связаны с периодическим изменением площади поверхности раздела сред и, как следствие, скорости конденсации. Амплитуды пульсаций давления достигают величин порядка 250 кПа. Отметим, что расчетные амплитуды и частоты согласуются с экспериментальными данными. Однако в эксперименте они объясняются «чаггингом» – периодическим попаданием воды в активный канал эжектора при конденсации пара. Моделирование позволяет получить и такие режимы. Они реализуются на малых ($<0,1$ кг/с) расходах пара и на данной диаграмме не представлены.

Характерная зависимость давления от времени в районе выхода из ЦБУ представлена на рис. 9. Графики соответствуют режиму нарушения работы эжектора $T_{вх} = 17^{\circ}\text{C}$, $G_{пар} = 0,168$ кг/с.

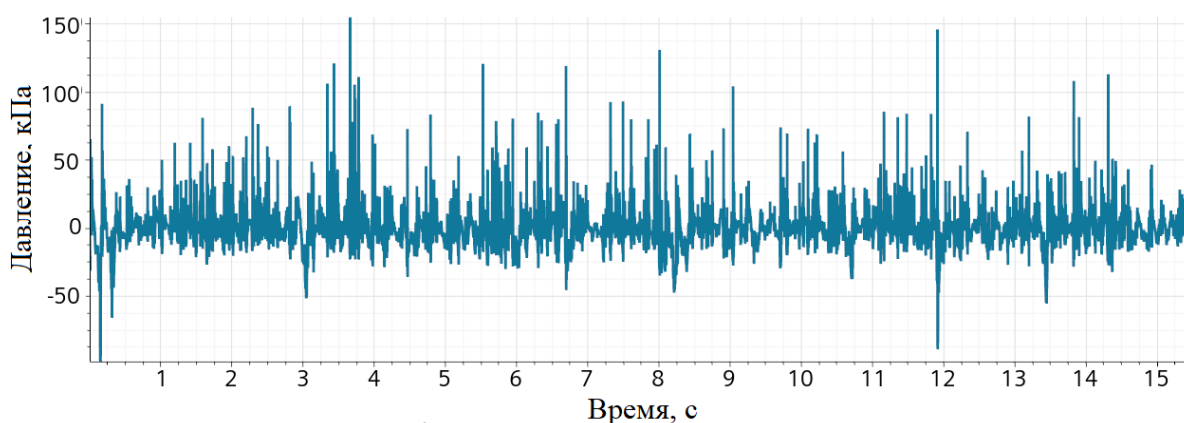


Рис. 9. Давление на стенке ЦБУ в зоне выхода

Следующий режим характеризуется конденсацией пара в зоне смешения и колебаниями столба пара в зоне смешения, аналогичными описанным выше. Частота составляет порядка 5–7 Гц, а амплитуды достигают 500 кПа. На данном режиме столб пара выше вследствие больших расходов и температур воды, и нарушение работы эжектора не происходит.

Наконец, режим «конденсации пара на больших расходах» отличается отсутствием ярко выраженных частот колебаний. Спектр пульсаций сосредоточен в диапазоне частот 4–50 Гц. Амплитуды пульсаций давления при этом достигают 560 кПа (максимальная амплитуда, зафиксированная в эксперименте, равна 535 кПа).

Не исключено, что можно выделить большее количество специфических режимов работы устройства как в границах рассматриваемого диапазона работы входных параметров, так и за их пределами. Для этого требуется рассмотреть больший объем расчетных вариантов.

Заключение

Предложен подход к моделированию конденсационного устройства циркуляционного типа с использованием инструментов вычислительной гидроаэродинамики. Модели, описывающие течение сплошной среды и фазовые

переходы, содержат ряд эмпирических констант. Калибровка констант проводится на базе экспериментальных данных.

Проведена серия расчетов различных режимов работы ЦБУ в т.ч. за пределами экспериментального диапазона входных параметров. Результаты моделирования представлены на плоскости «температура воды – расход пара». Анализ результатов позволяет выделить области качественно различных режимов работы установки.

Методика моделирования может быть использована как для прогнозирования характеристик ЦБУ за пределами возможностей работы экспериментальных установок, так и для поиска конструктивных решений по повышению характеристик.

Список литературы

1. *М.В. Кузнецов, А.М. Букринский.* О механизме неустойчивости процесса барботажной конденсации пара в системах локализации аварий на АЭС. Теплоэнергетика. 1984. №12 с.56–58.
2. А. с. 1060053 СССР, МКИ G21C 9/00 Барботажное устройство для конденсации пара из паровоздушной смеси при аварии АЭС/ *Е.А. Бабенко, М.В. Кузнецов, В.В. Глушко и др.* //Открытия. Изобретения. 1988 №5.
3. *К. Флетчер.* Вычислительные методы в динамике жидкостей: в 2-х т.Т. 2.: Пер. с англ. – М.:Мир, 1991. – 552с.
4. *Butterworth, D. and Hewitt, G.F.* Two-Phase Flow and Heat Transfer. Oxford University Press. Oxford. 1974.
5. *Sauer, J.,* Instationaer kavitierende Stroemungen – Ein neues Modell, basierend auf Front Capturing VOF und Blasendynamik, Dissertation, Universitaet Karlsruhe, 2000.
6. STAR-CCM+ User Guide, 2021
7. *Грабарук А.В.* Современные подходы к моделированию турбулентности: учеб. пособие / А.В. Грабарук [и др.]. – СПб. 2016. – 234 с
8. *Du Y, Yan X, Zang J. and Zhang Y.* (2020) Review of Regime Maps of Steam-Submerged Direct Contact Condensation. Front. Energy Res. 8:119. doi: 10.3389/fenrg.2020.00119