

УДК 621.74.04

Расчет первого контура кристаллизатора с испарительно - конденсационной системой охлаждения

Стулов Вячеслав Викторович

stuvv@inbox.ru

Иванов Андрей Владимирович

avivanov1969@gmail.com

Шафиев Олег Михайлович

oleg.shafiev2016@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Приведены результаты сравнительных расчетов первого замкнутого контура кристаллизатора при средних значениях плотностей тепловых потоков 0,5 и 1,0 МВт/м² в программе Floefd. Подробно рассмотрена циркуляция пароводяной смеси в первом контуре цилиндрического кристаллизатора. При принятых средних значениях коэффициентов теплоотдачи, размеров элементов первого контура кристаллизатора и его конструктивного исполнения получены значения массовой концентрации теплоносителя, температуры смеси, температуры стенок, скорости циркуляции смеси для двух сравниваемых вариантов. Максимальное значение температуры смеси 140–150 °С наблюдается в пристеночной области. Максимальное значение температуры стенки 340–350 °С во втором варианте. Наибольшие скорости смеси 0,9–1,0 м/с в пристеночном слое, а пара 1,5–2,5 м/с в паропроводе. Полученные результаты расчета используются при модернизации кристаллизатора с целью устранения неравномерности охлаждения по периметру цилиндрической стальной заготовки.

Ключевые слова: первый контур кристаллизатора, плотности тепловых потоков, расчет циркуляции смеси, температуры стенок, температура смеси, скорости смеси

Calculation of the first circuit of a crystallizer with an evaporative - condensation cooling system

Stulov Vyacheslav Viktorovich

stuvv@inbox.ru

Ivanov Andrey Vladimirovich

avivanov1969@gmail.com

Shafiev Oleg Mikhailovich

oleg.shafiev2016@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the results of comparative calculations of the first closed circuit of a crystallizer at average heat flux densities of 0.5 and 1.0 MW/m² in the Floefd program. The circulation of the steam-water mixture in the first circuit of a cylindrical crystallizer is considered in detail. With the adopted average values of the heat transfer coefficients, dimensions of the elements of the first circuit of the crystallizer and its design, the values of the mass concentration of the coolant, mixture temperature, wall temperature, and mixture circulation rate for two compared options are obtained. The maximum value of the mixture temperature of 140–150 °C is observed in the near-wall region. The maximum value of the wall temperature is 340–350 °C in the second option. The highest mixture ve-

locities are 0.9–1 m/s in the near-wall layer, and steam 1.5–2.5 m/s in the steam pipeline. The obtained calculation results are used in the modernization of the crystallizer in order to eliminate uneven cooling along the perimeter of the cylindrical steel blank.

Keywords: crystallizer first circuit, heat flux densities, mixture circulation calculation, wall temperatures, mixture temperature, mixture velocities

В настоящее время стоит актуальная задача повышения эффективности процессов в конструкциях, в частности при фазовых переходах теплоносителя (испарение, кипение, конденсация) с целью уменьшения их габаритов и увеличения передаваемого теплового потока. Свидетельством этому являются публикации и доклады авторов на конференциях [1–6]. В работе [1] Л.В. Булановым с соавторами приведены результаты расчета охлаждения существующего кристаллизатора с водяной системой охлаждения на основании полученных численных значений коэффициентов теплоотдачи при конвективном течении воды. Показано, что скорости воды в каналах охлаждения превышают 6–8 м/с при перепаде температуры воды $\Delta T \leq 10$ °С. В работе [2] приведены результаты расчета теплообмена в кристаллизаторе при получении цилиндрической стальной заготовки диаметром 150 мм и средних плотностях тепловых потоков 1,5; 2,5 и 3,3 МВт/м². Значения коэффициентов теплоотдачи определены при кипении теплоносителя на пористой структуре. В работе не приводится расчет первого контура циркуляции смеси.

В работе [3] П.Ю. Недобугой выполнено исследование циркуляции смеси в первом замкнутом контуре кристаллизатора при среднем значении плотности теплового потока $q = 0,1$ МВт/м². Исследование выполняется в программном модуле Ansys Fluent и принятой моделью пароводяной смеси Mixture. Модель смеси (Mixture) используется для моделирования пароводяной смеси. Недостаток работы заключается в сравнительно малом значении плотности теплового потока 0,1 МВт/м² и скоростей циркуляции смеси.

М.А. Перепелицей [4] выполнен численный расчет распределения температур в широкой стенке опытного кристаллизатора, пароводяной смеси и конденсата в программе NX FloEFD при средней плотности подводимого от стали теплового потока 0,5 МВт/м², который показал согласование с результатами конструктивного расчета. Наблюдаемая при расчете температура на рабочей поверхности широкой стенки 185–226 °С может быть скорректирована за счет устранения сопротивления потоку пароводяной смеси в верхней части стенки путем конструктивного изменения крепления паропроводов.

В работе [5] отмечается, что коэффициенты теплообмена при кипении достаточно велики 10–100 кВт/(м² К). Однако в случае перехода от пузырькового кипения к пленочному (при кризисе кипения) коэффициент теплоотдачи может уменьшиться в 10 и более раз. Чтобы недопустить перегрева поверхности при сохранении теплового потока применяются устройства и методы интенсификации теплообмена.

В работе [6] приведены результаты расчета коэффициентов теплоотдачи при испарении воды с пористой поверхности. Показано, что максимальное

значение коэффициента теплоотдачи $500 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ наблюдается при размерах пор 5–10 мкм. С увеличением размера пор до 100 мкм значение указанного коэффициента уменьшается до $120 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

Цель работы — расчет первого контура циркуляции теплоносителя в кристаллизаторе с двухконтурной системой охлаждения при средней плотности подводимого теплового потока 0,5 и 1,0 МВт/м² и диаметре получаемых стальных заготовок 120 мм.

Численное исследование циркуляции смеси в первом контуре кристаллизатора. Исследование термодинамических параметров в первом контуре охлаждения кристаллизатора проводится в среде программы моделирования течений и тепловых процессов FloEFD [7]. Программа, основанная на методе конечных объемов, позволяет проводить трехмерные вычисления в области гидродинамики и анализировать показатели теплопередачи при стационарном и нестационарном анализе в сжимаемых и несжимаемых жидкостях, исследовать течение водяного пара с конденсацией.

Решение осуществляется относительно уравнений неразрывности, движения среды и сохранения энергии с учетом уравнений энергии турбулентности и диссипации турбулентности.

Преимуществом программы является то, что уравнения решаются на неструктурированных адаптированных к телу прямоугольных сетках, что дает возможность описывать геометрию любой сложности и организовывать автоматическое построение сетки. Недостатком технологии сеточного процесса является сложность расчета течения жидкостей в пристеночных областях. Для расчета пароводяной смеси используется двухпараметрическое уравнение состояния Редлиха — Квонга (Redlich — Kwong).

Постановка задачи моделирования работы кристаллизатора. Исследование состояния пароводяной смеси и стенок элементов кристаллизатора проводилось на объемной модели кристаллизатора, показанной на рис. 1.

Исходные данные кристаллизатора: диаметр получаемой заготовки $d_3 = 120 \text{ мм}$, высота рабочих стенок $H = 1080 \text{ мм}$, толщина стенки $\delta_c = 15 \text{ мм}$, щелевой зазор $\delta_3 = 68 \text{ мм}$, диаметр конденсатора $d_{\text{кд}} = 180 \text{ мм}$, длина конденсатора $L = 600 \text{ мм}$, диаметр паропровода $d_{\text{п}} = 50 \text{ мм}$, диаметр наружной стенки кристаллизатора $d_{\text{н}} = 355 \text{ мм}$, диаметр конденсатопровода $d_{\text{кд}} = 32 \text{ мм}$, число паропроводов $n_{\text{п}} = 6$, число конденсатопроводов $n_{\text{кд}} = 2$.

На рис. 1 тепловая нагрузка в виде плотности теплового потока q приложена к поверхности внутренней стенке 1 кристаллизатора на уровне нахождения расплава h . В щелевом зазоре между стенками 1 и 2 кристаллизатора находится теплоноситель. В процессе заливки расплава при контакте теплоносителя со стенкой 1 происходит процесс его испарения и кипения, а теплота с паром по паропроводам 4 отводится в конденсаторы 3, где происходит конденсация пара. Конденсатор 3 омывается водой в зазоре между ним и стенкой кожуха 6. Образующийся конденсат по конденсатопроводам 5 стекает вниз и в щелевой зазор кристаллизатора. Процесс повторяется. На поверхностях с граничными условиями показаны обозначения коэффициентов теплоотдачи.

Расчет выполняется для двух вариантов:

– плотность теплового потока $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$; коэффициент теплоотдачи от охлаждающей воды с температурой 22°C к поверхности конденсатора $27\,000 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{K)}$; коэффициент теплоотдачи от пароводяной смеси в кристаллизаторе $27\,871 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{K)}$; коэффициент теплоотдачи при охлаждении пара в конденсаторе $2830 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{K)}$;

– плотность теплового потока $q = 1,0 \text{ МВт/м}^2$; коэффициент теплоотдачи от охлаждающей воды с температурой 22°C к поверхности конденсатора $27\,000 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{K)}$; коэффициент теплоотдачи от пароводяной смеси в кристаллизаторе $100\,000 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{K)}$; коэффициент теплоотдачи при охлаждении пара в конденсаторе $70\,000 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{K)}$.

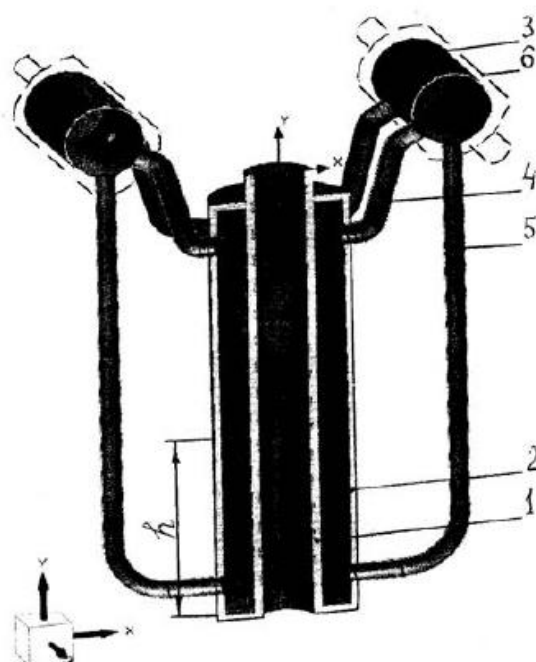


Рис. 1. Объемная модель кристаллизатора:

1 — внутренняя стенка; 2 — наружная стенка; 3 — конденсаторы пара; 4 — паропроводы;
5 — конденсатопроводы; 6 — кожух охлаждения конденсатора (второй контур)

Результаты расчета первого контура кристаллизатора. Массовая концентрация (k): результаты расчета при $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 1) приведены на рис. 2 и при $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2) на рис. 3.

Результаты расчета « k » при $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 1): максимальное значение $k = 0,95\text{--}1,00$ на выходе из конденсатора и в конденсатопроводе ;на входе в кристаллизатор в нижней его части $k = 0,85$; снизу кристаллизатора до половины его высоты $k = 0,75$; выше половины высоты на входе в паропроводы $k = 0,65$; минимальное значение $k = 0,10\text{--}0,25$ в самой верхней части кристаллизатора и частично в паропроводе (связано с захватом смеси из самой верхней части кристаллизатора); в паропроводах $k = 0,35\text{--}0,50$.

Высокое содержание « k » в паропроводах свидетельствует о попадании в них жидкости из щелевого зазора кристаллизатора. Для исключения этого

и уменьшения «к» в паропроводах необходимо ставить перед паропроводами дырчатые/отбивные решетки.

С увеличением $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2) (рис. 3) наблюдается выравнивание «к» в самой верхней части кристаллизатора и в паропроводах до $k = 0,35\text{--}0,50$.

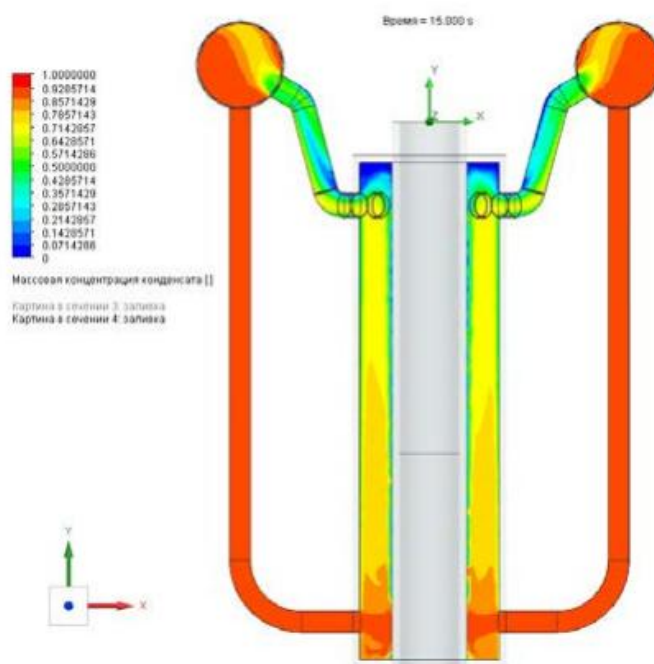


Рис. 2. Массовая концентрация смеси в первом контуре кристаллизатора при $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 1)

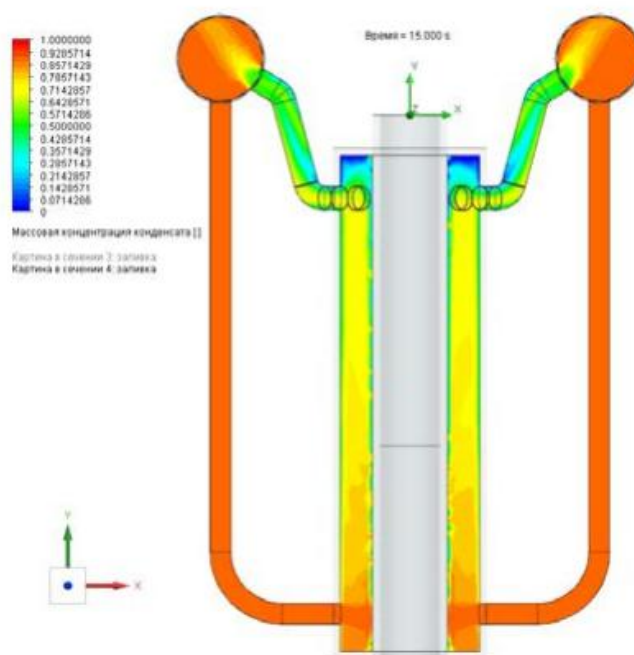


Рис. 3. Массовая концентрация смеси в первом контуре кристаллизатора при $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2)

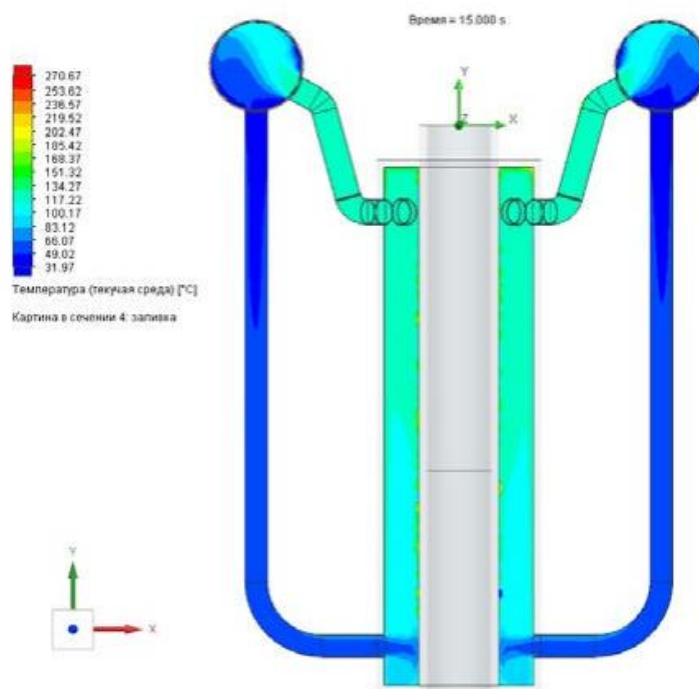


Рис. 4. Температура смеси в первом контуре кристаллизатора при $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 1)

Температура смеси: результаты расчета при $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 1) приведены на рис. 4 и при $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2) на рис. 5.

Результаты расчета при $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 1): максимальное значение $T = 150\text{--}160^\circ\text{C}$ в пристеночном слое (в области приложения тепловой нагрузки); минимальное значение $T = 45\text{--}55^\circ\text{C}$ в нижней части конденсатора и в конденсаторопроводе; $T = 100\text{--}105^\circ\text{C}$ от низа кристаллизатора до половины его высоты; $T = 115\text{--}125^\circ\text{C}$ от середины высоты кристаллизатора до его верхней части и в паропроводах; $T = 70\text{--}100^\circ\text{C}$ — среднее значение в конденсаторе. Температура смеси при $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2) (рис. 5).

Результаты расчета температуры смеси при $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2) (рис. 5): $T = 135\text{--}140^\circ\text{C}$ в щелевом зазоре стенок кристаллизатора и в паропроводе; $T = 80\text{--}110^\circ\text{C}$ — среднее значение в конденсаторе пара.

Температуры стенок (в области приложения тепловой нагрузки): результаты расчета при $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 1) приведены на рис. 6, при $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2) на рис. 7.

Результаты при $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 1) (рис. 6) — максимальное значение $T = 275^\circ\text{C}$ на поверхности контакта с заготовкой; $T = 205\text{--}210^\circ\text{C}$ — в области приложения тепловой нагрузки; $T = 170\text{--}180^\circ\text{C}$ в самой нижней части кристаллизатора в месте входа конденсата из конденсаторопровода.

По результату расчета температуры стенок ($q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$). Для уменьшения неравномерности температуры по высоте рабочей стенки необходимо обеспечить более равномерный подвод конденсата из конденсаторопровода, т. е. не в одной точке, а по периметру стенки кристаллизатора.

Температура стенки при $q = 1,0 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2) (рис. 7).

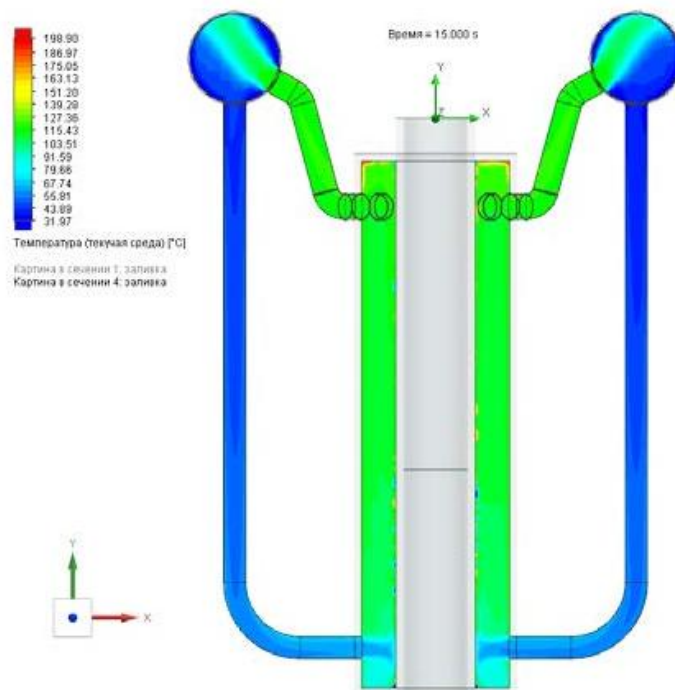


Рис. 5. Температура смеси в первом контуре кристаллизатора при $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2)

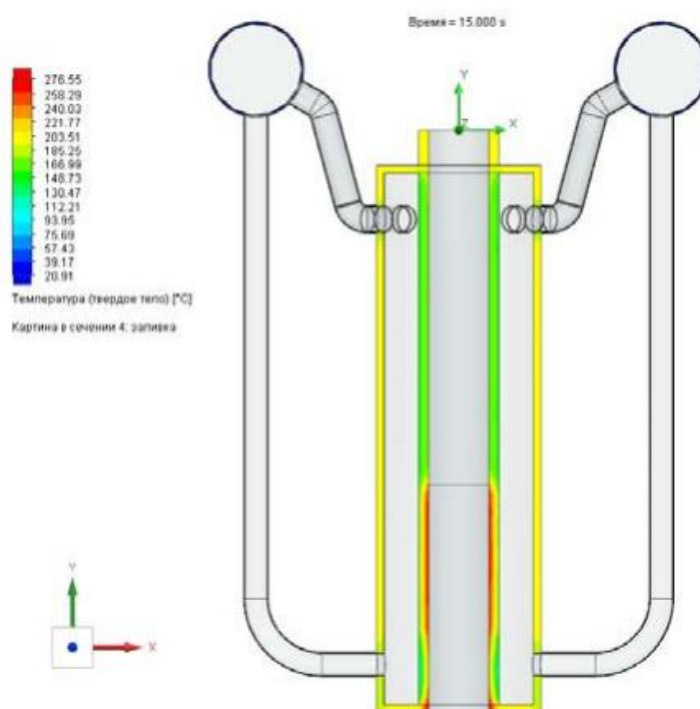


Рис. 6. Температуры стенок в первом контуре кристаллизатора при $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 1)

Результаты температуры стенки при $q = 1,0 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2) (рис. 7): максимальное значение $T = 340\text{--}350 \text{ }^\circ\text{C}$ на поверхности рабочей стенки в месте контакта с заготовкой; $T = 260\text{--}270 \text{ }^\circ\text{C}$ в центральной части металла стен-

ки в области приложения тепловой нагрузки; $T = 200\text{--}220\text{ }^{\circ}\text{C}$ — на поверхности стенки в области контакта с охлаждающей смесью.

Скорости смеси (по вертикальной оси): результаты расчета при $q = 0,5\text{ МВт/м}^2$ (вариант 1) (рис. 8), при $q = 1\text{ МВт/м}^2$ (вариант 2) (рис. 9).

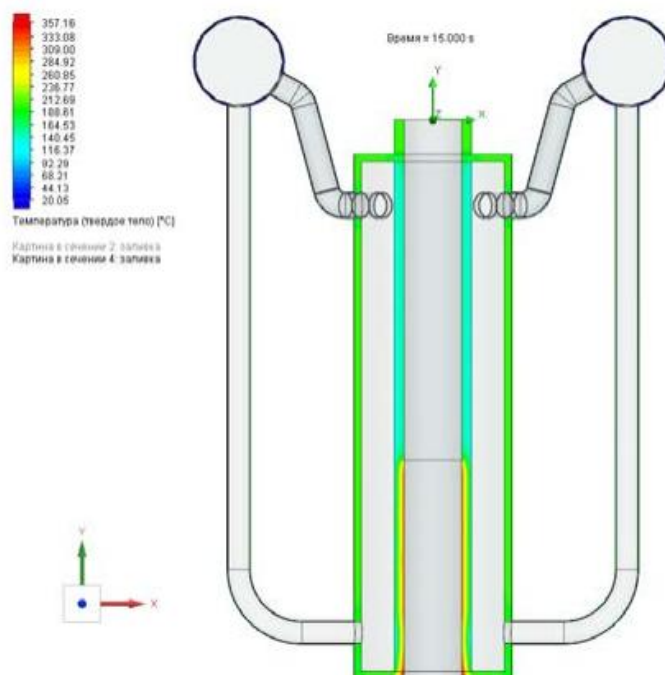


Рис. 7. Температуры стенок в первом контуре кристаллизатора при $q = 1\text{ МВт/м}^2$ (вариант 2)

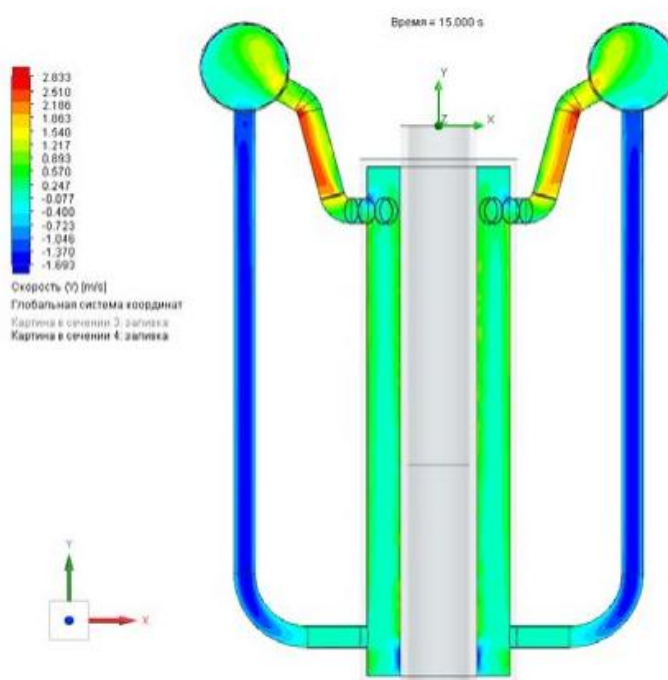


Рис. 8. Скорости смеси в первом контуре кристаллизатора при $q = 0,5\text{ МВт/м}^2$ (вариант 1)

Результаты расчета скорости смеси при $q = 0,5 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 1) (рис. 8): максимальное значение $\omega = 1,5\text{--}2,5 \text{ м/с}$ в паропроводе; минимальное значение $\omega = 0,1\text{--}0,2 \text{ м/с}$ в нижней части конденсатора и внизу кристаллизатора в месте входа смеси из конденсаторопровода; $\omega = 0,6\text{--}0,9 \text{ м/с}$ в пристеночном слое в области приложения тепловой нагрузки; $\omega = 0,1 \text{ м/с}$ в средней части щелевого зазора.

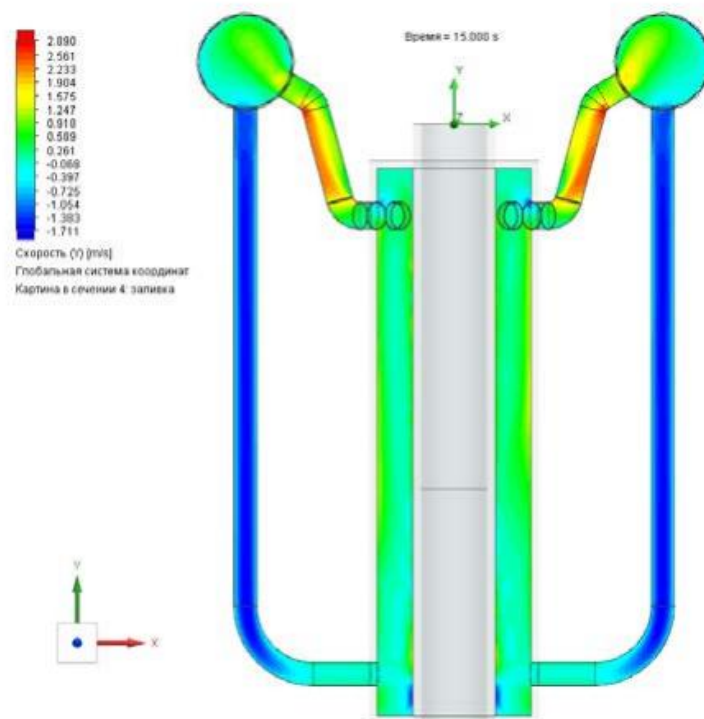


Рис. 9. Скорости смеси в первом контуре кристаллизатора при $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2)

Результаты расчета скорости смеси при $q = 1,0 \text{ МВт/м}^2$ (вариант 2) (рис. 9): максимальное значение $\omega = 1,5\text{--}2,5 \text{ м/с}$ в паропроводе; минимальное значение $\omega = 0,2\text{--}0,4 \text{ м/с}$ внизу кристаллизатора в месте входа смеси из конденсаторопровода и на входе в конденсаторопровод; $\omega = 0,9\text{--}1,0 \text{ м/с}$ в пристеночном слое в области приложения тепловой нагрузки. Основные результаты расчета первого контура кристаллизатора приведены в таблице.

Результаты расчета первого контура кристаллизатора

Средняя плотность теплового потока, МВт/м^2	Максимальная температура смеси, $^{\circ}\text{C}$	Температура смеси в щелевом зазоре, $^{\circ}\text{C}$	Максимальная температура стенки, $^{\circ}\text{C}$	Скорость смеси, пристеночный слой, м/с	Скорость смеси, минимальная, м/с
0,5	140–145	100–125	275	0,6–0,8	0,1–0,2
1,0	150	135–140	340–350	0,9–1,0	0,2–0,4

Закключение. Высокое содержание массовой концентрации смеси в паропроводах свидетельствует о попадании в них жидкости из щелевого зазора кристаллизатора. Для исключения этого необходимо ставить перед паропроводами дырчатые/отбивные решетки. Для уменьшения неравномерности температуры по высоте рабочей стенки необходимо обеспечить более равномерный подвод конденсата из конденсатопровода по периметру стенки кристаллизатора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00055, <https://rscf.ru/project/24-29-00055/>

Список источников

- [1] Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П. и др. *Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет*. Екатеринбург, Уральский центр ПР и рекламы, 2003, 320 с.
- [2] Стулов В.В., Шафиев О.М. Расчет теплообмена в цилиндрическом кристаллизаторе при кипении теплоносителя. *Сталь*, 2018, № 10, с. 18–21.
- [3] Недобуга П.Ю., Стулов В.В. Исследование циркуляции смеси в цилиндрическом кристаллизаторе с двухконтурной системой охлаждения. *Фундаментальные основы механики. IX Междунар. науч.-практ. конф.: сб. тез.* Санкт-Петербург, НИЦ МС, с. 94–97.
- [4] Перепелица М.А. Проектирование широкой стенки кристаллизатора и моделирование ее работы с двухконтурной системой охлаждения. *Будущее машиностроения России. XV Всерос. конф. молодых ученых и специалистов: матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, с. 18–20.
- [5] Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. *Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ*. Москва, ИздАТ, 2010, 776 с.
- [6] Соловьев С.Л. *Кипение и испарение жидкости на пористой поверхности*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, ОИВТ РАН, 1997, 234 с.
- [7] Алямовский А.А. *Solidworks Simulation и FloEFD. Практика, методология, идеология*. Москва, ДМК Пресс, 2020, 658 с.