

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ СМЕСИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Недобуга П.Ю., Стулов В.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва*

Ключевые слова: цилиндрический кристаллизатор, объемная модель, система охлаждения, циркуляция смеси, расчет в Ansys Fluent, модель смеси, значения скоростей смеси.

Аннотация. Выполнен расчет циркуляции пароводяной смеси в изготовленной и испытанной на алюминиевом сплаве цилиндрическом кристаллизаторе с двухконтурной системой охлаждения пароводяной смесью при среднем значении плотности подводимого теплового потока $0,1 \text{ МВт/м}^2$. Исследование выполнено в программном модуле Ansys Fluent и принятой моделью пароводяной смеси Mixture. Принималось, что температура смеси равняется 213°C . Установлены значения векторов и скоростей пароводяной смеси и конденсата в первом контуре кристаллизатора.

STUDY OF MIXTURE CIRCULATION IN A CYLINDRICAL CRYSTALLIZER WITH A TWO-CIRCUIT COOLING SYSTEM

Nedobuga P.Yu., Stulov V.V.

*Moscow State Technical University named after N.E. Bauman
(National Research University), Moscow*

Keywords: cylindrical crystallizer, volumetric model, cooling system, mixture circulation, calculation in Ansys Fluent, mixture model, mixture velocity values.

Abstract. The calculation of the steam-water mixture circulation in a manufactured and tested aluminum alloy cylindrical crystallizer with a two-circuit steam-water mixture cooling system at an average value of the supplied heat flux density of $0,1 \text{ MW/m}^2$ was performed. The study was carried out in the Ansys Fluent software module and the adopted Mixture steam-water mixture model. It was assumed that the mixture temperature was 213°C . The values of the vectors and velocities of the steam-water mixture and condensate in the first circuit of the crystallizer were determined.

В работах [1-3] приведены результаты испытаний опытного кристаллизатора с двухконтурной системой охлаждения пароводяной смесью. Необходимость изготовления опытного кристаллизатора для разливки стали вызывает необходимость исследования циркуляции смеси в первом замкнутом контуре уже испытанного кристаллизатора при разливке алюминиевого сплава и среднем значении плотности теплового потока $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$ [3].

Исследование выполняется в программном модуле Ansys Fluent и принятой моделью пароводяной смеси Mixture. Модель смеси (Mixture) используется для моделирования пароводяной смеси. Она решает уравнения неразрывности, сохранения импульса, энергии и сохранения объема вторичной фазы.

Объемная модель цилиндрического кристаллизатора приведена на рисунке 1.

Геометрическая форма кристаллизатора представляет собой две концентрично расположенные цилиндрические стенки высотой 500 мм,

ограниченные сверху и снизу крышками с образованием контура циркуляции теплоносителя. Диаметры внешнего и внутреннего цилиндров равны, соответственно $D = 118$ мм и $d = 75$ мм. Толщина никелевых стенок равна 5 мм. В начальный момент заполнения кристаллизатора количество тепла, передающегося через стенку, растет пропорционально количеству расплава, поступающего в кристаллизатор. Тем временем в конденсаторе с верхней и боковой поверхности (рис. 1) происходит отвод тепла проточной водой. Принимаем, что в момент времени (в соответствии с экспериментом [3]) температура пароводяной смеси равна температуре насыщения $483,15^\circ\text{K}$ при давлении 18 атм.

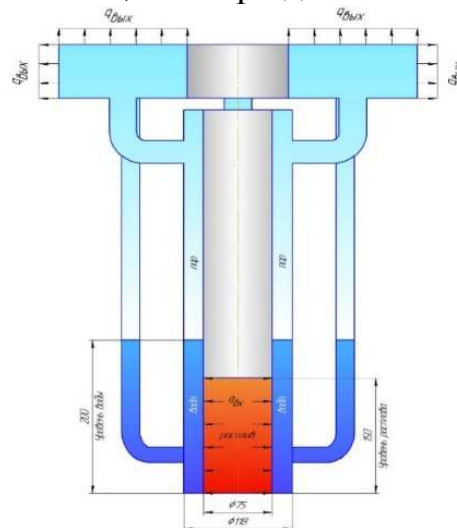


Рис. 1. Общий вид и расчетные параметры модели кристаллизатора

Предварительно выполняются расчеты коэффициентов теплоотдачи смеси у стенок кристаллизатора. Установлено, что максимальные значения коэффициента теплоотдачи $3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ приходятся на область приложения тепловой нагрузки.

На рисунке 2 приведены расчетные значения температуры смеси в первом контуре кристаллизатора. Из рисунка 2 следует, что температура пароводяной смеси в первом контуре циркуляции теплоносителя изменяется в интервале $484\text{--}485^\circ\text{K}$, то есть практически постоянная.

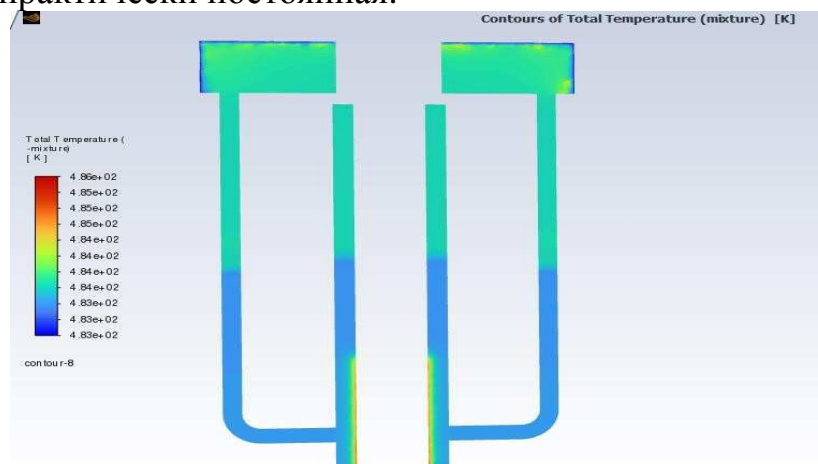


Рис. 2. Температура смеси у стенок кристаллизатора

На рисунке 3 приведены векторы скоростей пароводяной смеси и конденсата в нижней части кристаллизатора.

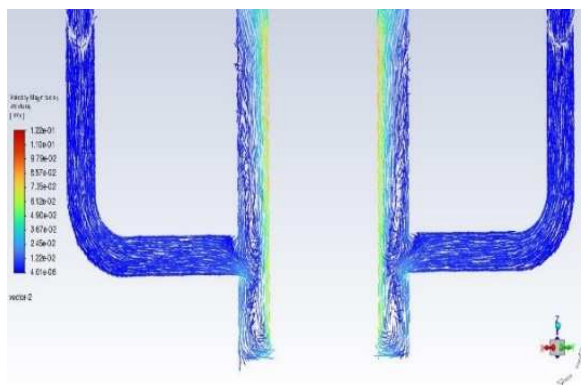


Рис. 3. Векторы и значения скорости смеси в нижней части кристаллизатора

Из рисунка 3 следует, что максимальные значения скорости смеси 0,06-0,075 м/с относятся к области приложения тепловой нагрузки $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$, а минимальные значения скоростей 0,015-0,025 м/с соответствуют течению конденсата в конденсатопроводе.

На рисунке 4 приведены векторы и значения скоростей пароводяной смеси в рабочей полости кристаллизатора, в паропроводах и в конденсаторе.

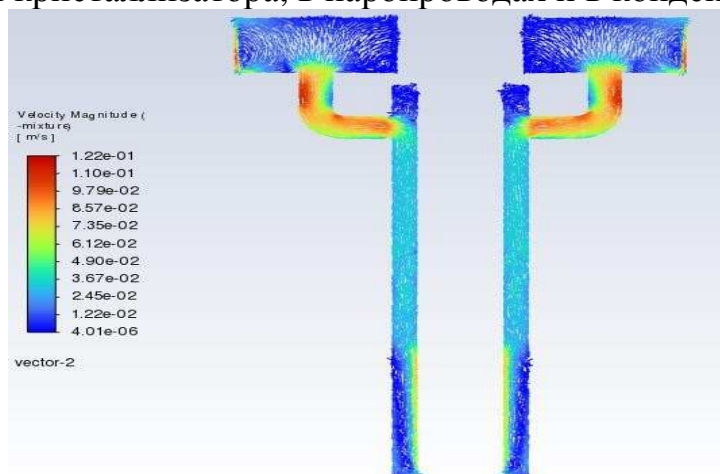


Рис. 4. Векторы и значения скоростей пароводяной смеси в кристаллизаторе

Из рисунка 4 следует, что в паропроводах значения скоростей смеси 0,06-0,085 м/с, то есть такие же, как в области приложения тепловой нагрузки. На входе в конденсатор пара значения скоростей уменьшаются до 0,01-0,03 м/с. На вертикальных стенках конденсатора скорость теплоносителя увеличивается до значений 0,06-0,07 м/с, вероятно, за счет образования и стекания пленки конденсата. На входе в паропроводы значения скоростей смеси 0,025-0,035 м/с. В верхней части кристаллизатора образуются застойные зоны со значениями скоростей смеси $< 0,01 \text{ м/с}$.

На рисунке 5 приведен общий вид векторов и скоростей теплоносителя в объемной модели кристаллизатора.

Из рисунка 5 следует, что максимальные значения скоростей теплоносителя 0,07-0,09 м/с приходятся на области приложения тепловой нагрузки в нижней части кристаллизатора, паропроводах и конденсаторе пара, а минимальные значения скоростей – 0,01-0,025 м/с на область выше приложения теплового потока, донную часть конденсатора пара и конденсатопровод.

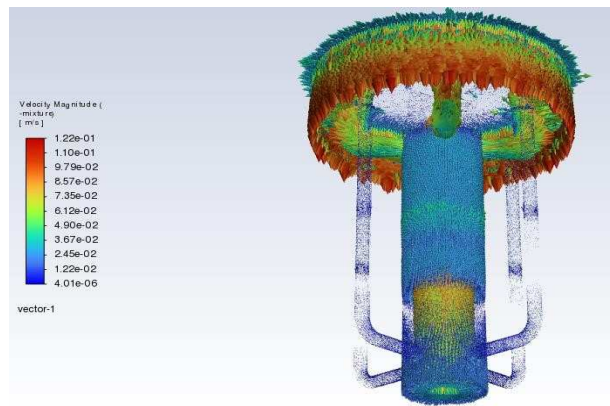


Рис 5. Общий вид векторов и скоростей смеси в кристаллизаторе

По выполненному расчёту в Ansys циркуляции теплоносителя в объемной модели цилиндрического кристаллизатора можно сделать следующие *выводы*.

1). Для повышения эффективности перемешивания смеси в первом контуре охлаждения целесообразно увеличить значение q и уровень заливки расплава h .

2). Пересмотреть методику определения коэффициента теплоотдачи смеси с учётом скорости ее течения, зависящей от плотности теплового потока и учитывая расчетные и экспериментальные значения.

3). Неравномерность расчётных значений скоростей пароводяной смеси по высоте контура циркуляции вызвана различным сопротивлением течению смеси, зависящим от площади сечения щелевого канала стенок, паропроводов, конденсатора. Подбор необходимых площадей сечений и изменение конструктивного исполнения, в частности конденсатора пара, позволит выровнять скорости потоков теплоносителя в первом контуре кристаллизатора.

4). Полученные результаты исследования циркуляции теплоносителя при плотности теплового потока $q = 0,1 \text{ МВт/м}^2$ будут использованы с целью совершенствования системы охлаждения при изготовлении кристаллизатора для разлива стали.

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

Список литературы

1. Стулов В.В., Шафиев О.М. Опытный кристаллизатор для получения непрерывнолитых заготовок из высоколегированных сталей и сплавов Часть 1. Предварительные тепловые испытания кристаллизатора и его расчет // *Металлург.* – 2022. – № 10. – С. 49-55.
2. Стулов В.В., Шафиев О.М. Опытный кристаллизатор для получения непрерывнолитых заготовок из высоколегированных сталей и сплавов Часть 2. Испытание опытного кристаллизатора на низкотемпературном расплаве // *Металлург.* – 2023. – № 5. – С. 28-35.
3. Стулов В.В., Шафиев О.М. Опытный кристаллизатор для получения непрерывнолитых заготовок из высоколегированных сталей и сплавов Часть 3. Испытание опытного кристаллизатора на среднетемпературном алюминиевом сплаве // *Металлург.* – 2024. – № 4. – С. 35-42.

Сведения об авторах:

Недобуга Павел Юрьевич – инженер Научно-исследовательского института конструкционных материалов и технологических процессов;

Стулов Вячеслав Викторович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Оборудование и технологии прокатки».