

УДК 66.045.1

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ДЛЯ НАГРЕВА CO₂

А. Е. Алексеев¹, П. Ю. Худяков²

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ artyom97evg@gmail.com

Аннотация. В ходе работы была построена 3D-модель теплообменного аппарата. Произведен теплофизический расчет. Смоделирован поток CO₂ в трубе. Выполнен подбор перспективных материалов для изготовления конструкции. Подобраны методы снижения температуры стенки.

Ключевые слова: керамический теплообменник, CO₂, высокая температура, температура стенки

DEVELOPMENT OF HIGH-TEMPERATURE HEAT EXCHANGER FOR CO₂ HEATING

A. E. Alekseev¹, P. Yu. Khudyakov²

^{1,2} Ural Federal University named after the first
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ artyom97evg@gmail.com

Abstract. During the work, a 3D-model of the heat exchanger was built. Thermophysical calculation was made. Simulated CO₂ flow in a tube. Selection of advanced materials for making the structure is made. Methods of wall temperature reduction are selected.

Keywords: ceramic heat exchanger, CO₂, high temperature, wall temperature

В нагревателе в качестве рабочего тела используется углекислый газ; в качестве нагревателя выступают дымовые газы, поступающие после сжигания метана в горелочных устройствах. Температура, рабочее давление, расход сред приведены в таблице.

На основании указанных параметров в программе HTRI Xchanger Suite 8.1 просчитана теплофизика процесса. Теплообменник разбит на три части, в каждую из которых в равных частях поступает поток углекислого газа.

Такой прием был выбран для снижения перепада давления по трубной стороне и для более быстрого снижения температуры по ходу движения дымовых газов. По результатам расчета температура дымовых газов после первой части составила 1002,7 °С, после второй — 787,5 °С, после третьей — 562,6 °С. Количество труб — 1464 шт. Длина эффективной части — 1400 мм. Диаметр трубы — 20 мм, толщина — 2 мм. Поверхность теплообмена — 107 м². Коэффициент теплопередачи первой части — 141,3 Вт/(м² · К), второй — 128,3 Вт/(м² · К), третьей — 132,9 Вт/(м² · К).

Таблица

Исходные данные для расчета

Параметр	Единица измерения	Углекислый газ	Дымовые газы
Расход	кг/с	12,578	2,904
Температура на входе	°С	478,000	1211,000
Температура на выходе	°С	642,000	562,600
Рабочее давление	бар	64,610	1,075

В программе ANSYS Fluid было смоделировано течение CO₂ в теплообменной трубе первого хода первой части подогревателя рабочего тела. Контур скоростей приведен на рис. 1.

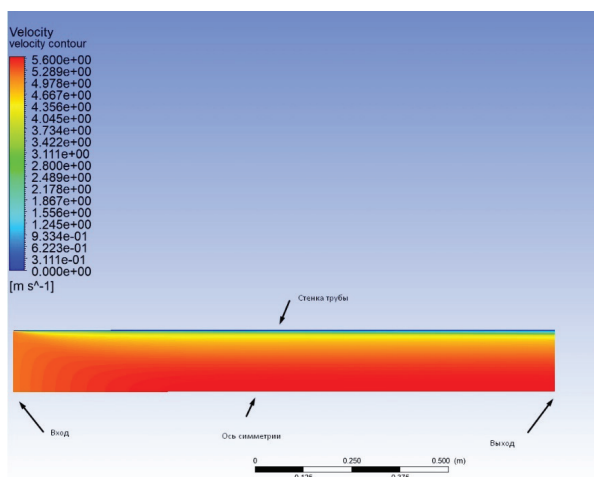


Рис. 1. Контур скоростей CO₂

Поскольку условия равны, рассматривалась половина диаметра трубы. На входе температура потока — 478 °С, на выходе — 553 °С. С ростом температуры и, как следствие, изменением теплофизических условий на выходе наблюдается рост скорости. Для визуализации и последующих расчетов в программах, способных рассчитать теплообменный аппарат на прочность методом конечных элементов (МКЭ), была построена 3D-модель в программе Autodesk Inventor. Эскиз приведен на рис. 2.

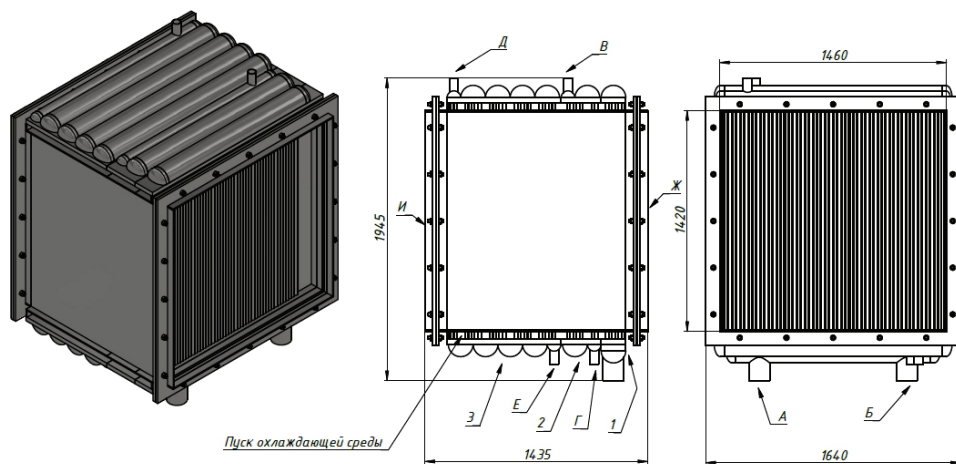


Рис. 2. Эскиз теплообменника

На приведенном рисунке видно, что углекислый газ поступает в патрубки *A*, *B*, *D* и выходит через штуцера *B*, *Г*, *E* соответственно. Дымовые газы входят со стороны *Ж* и выходят со стороны *И*. Выбор геометрии поворотной камеры в виде полутрубы обусловлен восприятием больших нагрузок, в отличие от плоской стенки.

На рис. 3 приведена шахматная разбивка пучка с размерами продольного и поперечного шага (*B*), а также изображены ребра, которые устраняют байпас (*A*).

В качестве уплотнителя используется терморасширенный графит (ТРГ). Материал теплообменных труб — керамика с добавлением цинка. В статье “Ceramic Heat Pipes for High Temperature Application” показано, что такие трубы могут выдерживать температуру до 1250 °С и являются сравнительно дешевыми [1]. Также отмечено, что в ходе эксперимента трубы показали удовлетворительные механические

свойства. В статье «Применение керамических труб в горизонтальной печи до 1600 °С» подтверждается возможность использования таких труб [2].

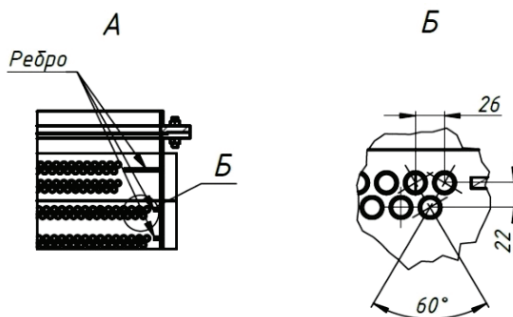


Рис. 3. Схема разбивки пучка:

А — ребра, Б — шахматная разбивка пучка

Если же керамические трубы будут разрушаться под действием высокой температуры и давления, возможно применение сплавов из тантала (рабочая температура до 1500 °С) [3], ниобия (рабочая температура до 1300 °С) [4] либо из стали марки 10ХН45 Ю (температура применения до 1300 °С) [5].

Для снижения температуры корпуса внутренняя его часть по тракту дымовых газов покрыта футеровкой. В статье “FEM simulation of the thermomechanical behaviour of the refractory lining of a blast furnace” исследуется влияние футеровки на металлическую стенку. В результате расчета МКЭ авторы заметили, что температурное расширение происходит в основном в футеровке, и металл подвержен меньшим напряжениям [6].

В пространство, указанное на рис. 2, может подаваться среда для дополнительного теплосъема и охлаждения стенки, к примеру воздух, подаваемый на горение, либо для значительного снижения температуры можно использовать фреон. Для предотвращения охлаждения CO_2 в трубках необходимо их футеровать.

Список источников

1. Hack N., Unz S., Beckmann M. Ceramic Heat Pipes for High Temperature Application [Electronic resource] // Energy Procedia. 2017. Vol. 120. P. 140–148. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.147 (date of access: 15.11.2020).

2. Шевелев Ю., Малышев Ю. Применение керамических труб в горизонтальной печи до 1600 °С // Оборудование. 2007. № 3. С. 32–35.
3. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. М. : Машиностроение, 1990. 528 с.
4. Тугоплавкие материалы в машиностроении / под ред. А. Т. Туманова, К. И. Портного. М. : Машиностроение, 1967. 392 с.
5. ГОСТ 5632–2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные : введ. 2015–01–01. М. : Стандартинформ, 2016. 48 с.
6. Gruber D., Andreev K., Harmuth H. FEM simulation of the thermo-mechanical behaviour of the refractory lining of a blast furnace [Electronic resource] // Journ. of Mater. Proces. Techn. 2004. Vol. 155–156. P. 1539–1543. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.249 (date of access: 15.11.2020).