

Список использованных источников

1. Описание технологии цеха. Технологическая инструкция. ЦОИ ОЭМК. ТИ 00186573. – 46 – ОИ – 79 – 2001. ЦОИ ОЭМК.
2. Производство извести. Технологическая инструкция. ТИ 00187895. – 46 – ОИ – 81 – 2000. ЦОИ ОЭМК.
3. Предварительный нагрев известняка в шахтном противоточном подогревателе карбонатного сырья. Технологическая инструкция. ТИ 04–402–2004, СНПП «Известа».
4. Шахтный подогреватель кускового материала: пат. F27B 1/00/ Зуев В.И. Правообладатель Общество с ограниченной ответственностью Внедренческое производственное предприятие «Известа». – № 2 568 806 С1; заявление 11.06.2014; опубликовано 20.11.2015.
5. Технический отчёт по теплотехническим испытаниям вращающейся печи цеха обжига извести, ТТЛ ОЭМК.

УДК 621.184

К. А. Симбирцев, К. Э. Аронсон, Н. В. Желонкин
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С НЕРЕГУЛЯРНЫМ ТРУБНЫМ ПУЧКОМ ИЗ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ТРУБОК

Аннотация. Проведены исследования теплообменного аппарата с нерегулярным трубным пучком из профилированных трубок и серийных горизонтальных кожухотрубных подогревателей. Разработана схема измерений для определения температуры, давления и расхода теплоносителей. Для оценки эффективности профилированных поверхностей применены относительные коэффициенты гидравлического сопротивления и теплоотдачи. Разработана методика для определения показателей эффективности. Определены и проанализированы такие показатели как, фактический и расчетный коэффициент теплопередачи, гидравлическое сопротивление, тепловая производительность. Получены сравнительные характеристики: расчетного и экспериментального гидравлического сопротивления, тепловой эффективности и тепловой производительности подогревателей. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений показателей эффективности подогревателей. Сведены тепловые и материальные балансы по нагреваемому и греющему теплоносителю. Определены среднеквадратичные относительные погрешности определения основных величин. Получено, что теплообменник из профилированных трубок имеет в 3,3-4,2 раза больший коэффициент теплопередачи, чем серийный подогреватель.

Ключевые слова: Теплообменник, интенсификация, профилированная трубка, эффективность, коэффициент теплопередачи, гидравлическое сопротивление, трубный пучок.

Abstract. Research has been carried out on a heat exchanger with an irregular tube bundle of profiled tubes and serial horizontal shell-and-tube heaters. A measurement scheme has been

developed to determine the temperature, pressure and flow rate of heat carriers. To assess the efficiency of profiled surfaces, special relative coefficients of hydraulic resistance and heat transfer are used. A methodology has been developed for determining performance indicators. Indicators such as actual and standard heat transfer coefficient, hydraulic resistance, thermal performance have been calculated and analyzed. Comparative characteristics were obtained: calculated and experimental hydraulic resistance, thermal efficiency and thermal performance of heaters. Comparative analysis of experimental and calculated values of heaters efficiency indicators is carried out. Heat and material balances for the heated and heating coolant have been reduced. The root-mean-square relative errors in the determination of the basic quantities have been determined. It was found that a heat exchanger made of profiled tubes has a 3.3-4.2 times higher heat transfer coefficient than a serial heater.

Key words: *Heat exchanger, intensification, profiled tube, efficiency, heat transfer coefficient, hydraulic resistance, tube bundle.*

1. Описание объекта

В котельной г. Екатеринбурга для подогрева технической воды используются серийные кожухотрубные теплообменники (ПТВ), один из теплообменных аппаратов для проведения исследования был заменен на теплообменник с тонкостенными профилированными трубками с нерегулярной разбивкой трубного пучка (ТТАИ). Подогреватели типа ПТВ представляют собой горизонтальные 3-х или 5-ти секционные кожухотрубные водо-водяные подогреватели с площадью поверхности теплообмена 79 и 131,5 м², соответственно. ТТАИ является кожухотрубным с высоко компактным нерегулярным трубным пучком теплообменным аппаратом, собранным из особо тонкостенных трубок, на которые нанесена однозаходная винтообразная канавка. ТТАИ состоит из двух секции с площадью поверхности теплообмена – 19 м² [1]. Трубки заделаны в трубные доски, выполненные по специальной технологии из компаундных материалов, что позволяет обеспечить герметичность теплообменных пространств, достичь очень высокой компактности поверхности с нерегулярной разбивкой трубок в пучке. Трубный пучок ТТАИ помещается в корпусе с патрубками, где уплотняется с помощью кольцевых резиновых прокладок, закрываемых снаружи съемным фиксирующим металлическим кольцом. Нагреваемая (холодная) вода в ТТАИ и ПТВ подается в трубки, а греющая (горячая) – в межтрубное пространство, схема движения теплоносителей противоточная. Описание основных характеристик теплообменников приведены в таблице.

2. Схема измерений

Для подогревателя ТТАИ производились замеры следующий величин: температуры нагреваемой воды на входе и выходе из теплообменника термометрами с ценой деления 1 °С; давления греющей и нагреваемой воды на входе и выходе из теплообменника контрольными манометрами с ценой деления 0,1 кгс/см²; расхода греющей и нагреваемой воды поверенным ультразвуковым расходомером «Portaflow».

На теплообменниках ПТВ-1, 2, 3, 4 измерялась температура греющей и нагреваемой воды на входе и выходе из секций с помощью оптического пирометра, а также расход греющей и нагреваемой воды с помощью ультразвукового расходомера «Portaflow». Среднеквадратичные относительные

погрешности определения основных параметров составляли: расход воды – 1,8 %; давление воды – 2 %; температура воды – 5 %; гидравлическое сопротивление – 20 %; тепловая производительность – 6 %; коэффициент теплопередачи – 16 %. Схема измерений ТТАИ представлена на рисунке 1.

Таблица

Основные характеристики секций ПТВ и ТТАИ

Наименование	Размерность	Секция ПТВ	Секция ТТАИ
Наружный диаметр корпуса	м	0,325	0,203
Число трубок	шт.	108	344
Наружный диаметр теплообменной трубки	м	0,019	0,008
Толщина стенки трубки	м	0,001	0,0003
Длина секции	м	4,08	1,095
Площадь поверхности теплообмена	м ²	26,3	9,5
Материал теплообменных трубок	-	AISI 316L (03X17H14M3)	12X18H10T

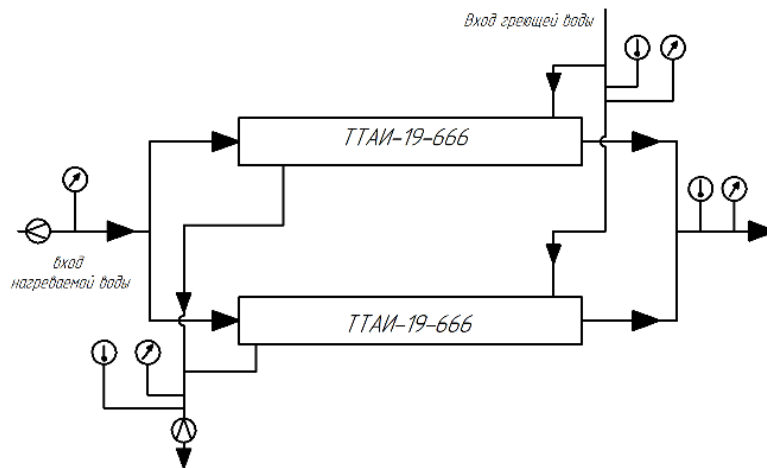


Рис. 1. Схема измерений ТТАИ

3. Обработка результатов исследования

Оценка эффективности теплообменных аппаратов производилась по следующим величинам: расчетный и фактический коэффициент теплопередачи; тепловая производительность на 1 °С располагаемого температурного напора [2]; гидравлическое сопротивление. Для расчета гидравлического сопротивления ТТАИ выделен ряд характерных участков. Данное разделение участков связано с различным проходным сечением трубопроводов и соответствующими скоростями воды.

Относительное гидравлическое сопротивление секции ТТАИ определено по данным [3].

$$\frac{\lambda_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{гл}}} = 1 + 13 \left(\frac{3h}{zs} \right) + 94 \left(\frac{3h}{zs} \right)^2 \quad (1)$$

где, h – глубина канавки; s – шаг канавки; z – число заходов профилирования.

Для определения коэффициента теплоотдачи ТТАИ использовался относительный коэффициент теплоотдачи профилированных трубок [3].

$$\frac{Nu_{\text{пр}}}{Nu_{\text{гл}}} = \left(1 + 338,6 * \left(\frac{h}{s} \left(1 - \frac{2h}{d_{\text{вн}}} \right) \right) - 1863,2 * \left(\frac{h}{s} \left(1 - \frac{2h}{d_{\text{вн}}} \right) \right)^2 \right) * Re^{-0,43} \left(\frac{h}{\sqrt{(zs^2) + (\pi d_{\text{вн}})^2}} \right)^{0,143}, \quad (2)$$

где, $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр теплообменной трубки; Re – число Рейнольдса.

При расчете коэффициентов теплопередачи учтено влияние сопротивления оксидной пленки, которая образуется на внутренней поверхности теплообменных трубок.

4. Результаты исследования

В процессе испытаний расход нагреваемой воды через теплообменники составил 105...290 т/ч, греющей – 235...330 т/ч. Большой диапазон изменения расхода нагреваемой воды связан с необходимостью оценить эффективность теплообменника во всех эксплуатационных режимах работы. Температура нагреваемой воды на входе в теплообменники составляла 4...6 °С, греющей – 90...95 °С. Тепловой небаланс по греющей и нагреваемой воде не превышал 10 % для всех теплообменников, небаланс расходов – 5 %. На рисунке 2 приведено сопоставление расчетных значений гидравлического сопротивления ПТВ и ТТАИ. Отметим, что расчетное сопротивление ТТАИ, с погрешность 20 % согласуется с экспериментальными данными.

Из рисунка видно, что расчетное гидравлическое сопротивление по греющей воде (пунктирные линии) ПТВ в 2...2.5 раза ниже, чем сопротивление ТТАИ. В свою очередь, гидравлическое сопротивление ПТВ по нагреваемой воде в 2...2.5 раза выше, чем сопротивление ТТАИ.

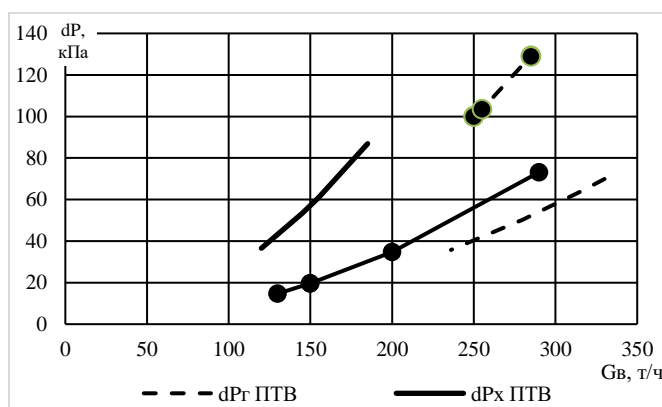


Рис. 2. Расчетное сопротивление ПТВ и ТТАИ

На рисунке 3 представлены данные по коэффициенту теплопередачи в зависимости от расхода нагреваемой воды в аппаратах. Из рисунка видно, что коэффициент теплопередачи ТТАИ в 3,3-4,2 раза выше коэффициента

теплопередачи серийных теплообменников (ПТВ). Расчетный коэффициент теплопередачи ТТАИ, с погрешность 9% согласуется с фактическим. Такая высокая эффективность достигается за счет очень плотной нерегулярной компоновки трубок в трубном пучке (расстояние между трубками составляет от 1 до 2(3) мм), профилирования трубок винтообразной канавкой, малой толщины стенок трубок ($\delta_{ст} = 0,3$ мм).

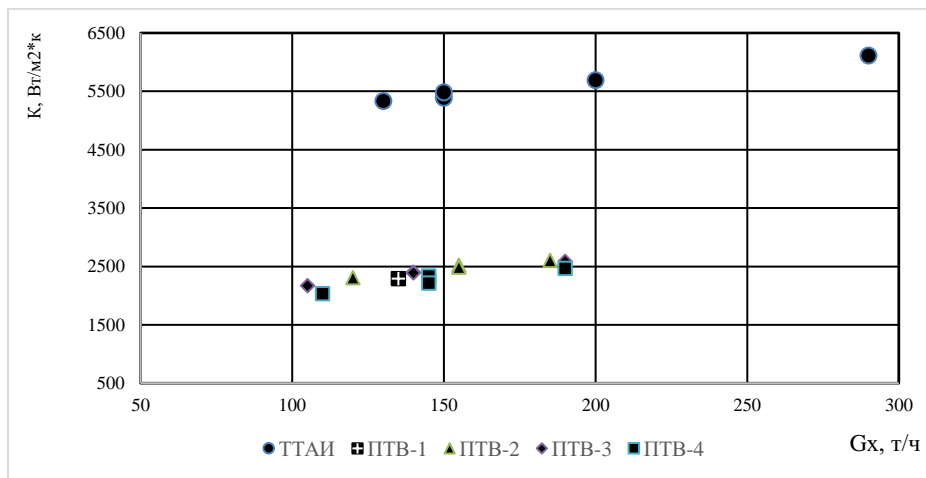


Рис. 3. Тепловая эффективность ПТВ и ТТАИ

Из рисунка 4 видно, что тепловая производительность на $1\text{ }^{\circ}С$ располагаемого температурного напора ТТАИ имеет характеристику близкую с ПТВ-1. ТТАИ был установлен вместо ПТВ-1; из рисунка видно, что он выполняет свои функции. Тепловая производительность у ПТВ-2, 3, 4 выше, чем у ТТАИ. Это связано, с тем, что ТТАИ установлен вместо ПТВ-1, состоявшего из трех теплообменных секций. У ПТВ-2, 3, 4 таких секций – 5.

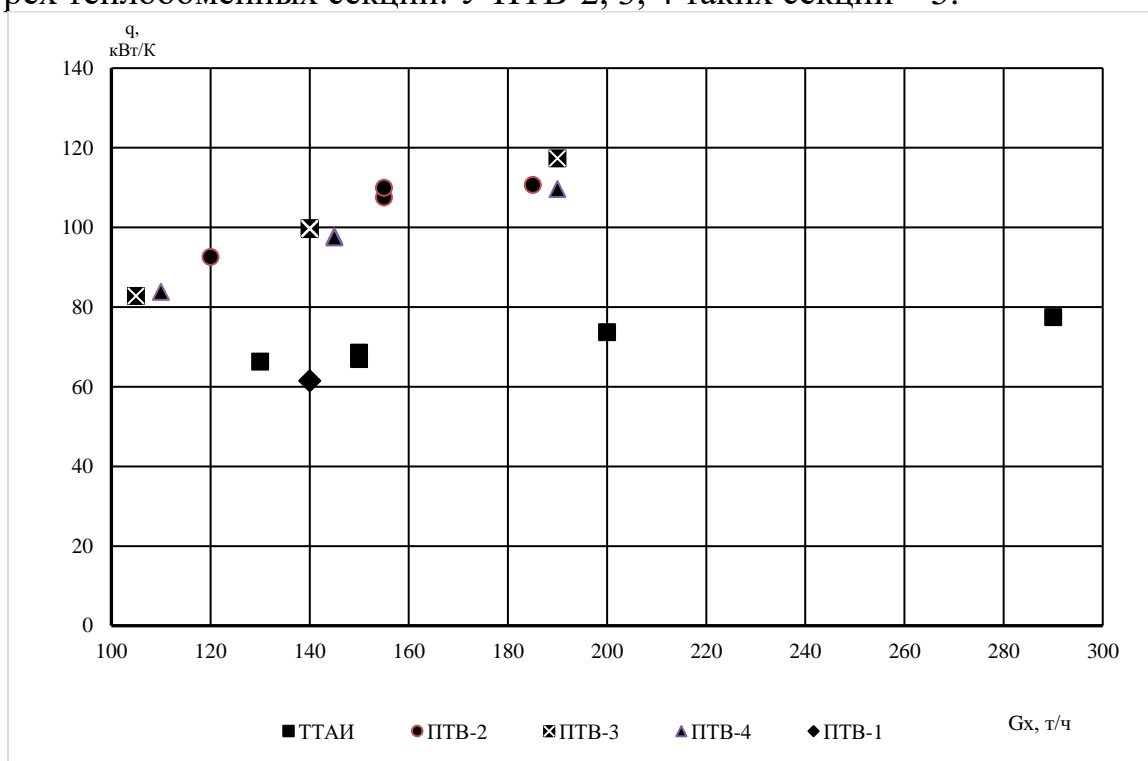


Рис. 4. Тепловая производительность ПТВ и ТТАИ

Заключение

1. Исследование эффективности ТТАИ показало, что он выполняет требуемые функции по замещению 3-х секционного ПТВ-1. При этом поверхность теплообмена ТТАИ составляет $F=19\text{ м}^2$, а ПТВ-1 – $F=79\text{ м}^2$ т.е. величина поверхности ТТАИ примерно в 4 раза меньше, чем у выполняющего такие же функции ПТВ-1.

2. Гидравлическое сопротивление ТТАИ по холодной воде в 2,0...2,5 раза меньше сопротивления ПТВ, напротив, гидравлическое сопротивление ТТАИ по горячей воде в 2,0...2,5 раза больше сопротивления ПТВ.

3. Подогреватель ТТАИ имеет в 3,3-4,2 раза больший фактический коэффициент теплопередачи, чем ПТВ. Данное различие связано, с плотной нерегулярной компоновкой трубного пучка, применением профилированных тонкостенных трубок.

Список использованных источников

1. ООО «Теплообмен». Сайт <https://ttai.ru>.
2. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети // М.-Л.: ГЭИ, 1963. – 360 с.
3. Повышение эффективности и надежности теплообменных аппаратов паротурбинных установок. 4-е изд., перераб. и доп. / Ю.М. Бродов, К.Э. Аронсон [и др.]. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – 570 с.

УДК 620.178.16;66.045.12

И. Д. Суворин, И. Д. Тихонов, В. А. Микула

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ В ПАКЕТЕ CFD

Аннотация. В данной работе проводится численное моделирование участка трубной доски трубчатого воздухоподогревателя энергетического котла с помощью программного пакета CFD. Основной целью является моделирование движения потока газа на входе в трубчатый воздухоподогреватель. В дальнейшем планируется усложнение модели, а также приближение условий протекания процесса к реальным.

Ключевые слова: абразивный износ; трубчатый воздухоподогреватель; эрозионный износ; CFD.

Abstract. Numerical modeling of the tube sheet section of a tubular air heater is carried out using the CFD software. The main scope is to simulate the movement of the gas flow at the inlet to the tubular air heater. In the future, it is planned to complicate the model, as well as to bring the process conditions closer to real ones.

Key words: abrasive wear; CFD; erosion wear; tubular air heater.