

Рис. 2. Компоновка газоохладителя по схеме «двойной корпус»: 1 – газогенератор; 2, 3 – потоки синтез-газа на входе и выходе; 4 – охладительные блоки ВД; 5 – охладительные блоки СД; 6 – внутренний корпус секции ВД; 7 – наружный корпус

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

#### Список использованных источников

1. Гибридные ПГУ на твердом топливе / Т.Ф. Богатова, А.Ф. Рыжков, Н.В. Вальцев, П.В. Осипов, С.И. Гордеев // Энергетик. 2014. №12. С. 12–16.
2. Modeling and analysis of a syngas cooler with concentric evaporator channels in a coal gasification process / J. Oh, In-S. Ye, S. Park, C. Ryu, S. Ku Park // Korean J. Chem. Eng.– 2014. – №31(12). – P. 2136–2144.
3. Gas and particleflow characteristics in the gas reversing chamber of a syngas cooler for a 300 MWe IGCC process/ P. Sangbin, Y. In-Soo, O. Junho, R. Changkook, K. Ja Hyung // Applied Thermal Engineering. – 2014. – №70. – P. 388–396.
4. Convective heat transfer characteristics of high-pressure gas in heat exchanger with membrane helical coils and membrane serpentine tubes / Z. Yang, Z. Zhao, Y. Liu, Y. Chang, Z. Cao // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2011. – №35. – P. 1427–1434.

УДК 536.4;66.045.12

**Е. И. Мешков, Н. П. Герасименко**

ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», г. Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания

#### УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

##### Аннотация

*В докладе приведена лабораторная установка, разработанная на кафедре теории и автоматизации металлургических процессов и печей ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ) и описан принцип её работы. Данная установка даёт возможность получить значительное количество теплофизических параметров, необходимых для исследования и моделирования процес-*

са теплообмена. Конструкцией установки предусмотрена возможность быстрого переоборудования её из прямоточного режима работы в противоточный режим. Установка оснащена системой автоматического контроля и регулирования и позволяет получить наглядное представление о теплопередаче, тепловых потоках, закономерностях, имеющих место при теплообмене, и является практическим учебным пособием при подготовке кадров высшей квалификации.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, исследование теплообмена, лабораторные установки, рекуператоры.

### Abstract

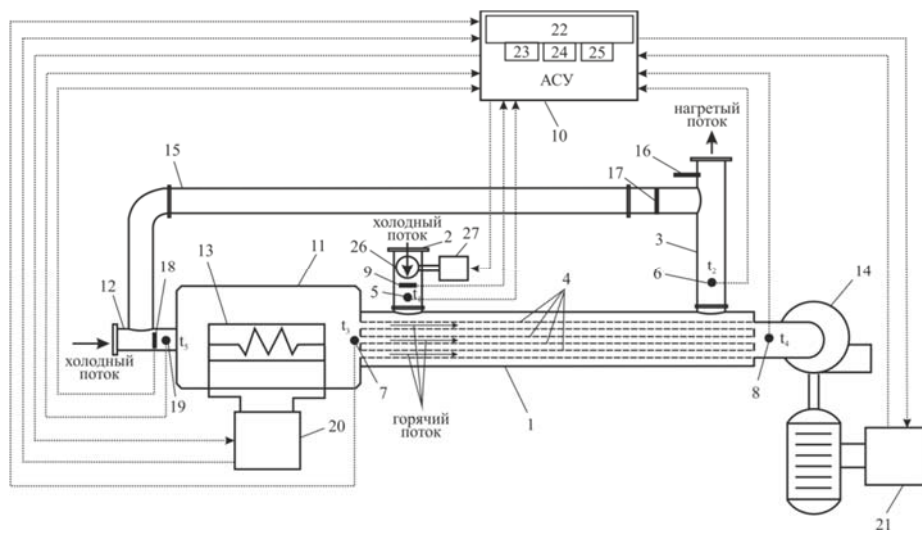
*The report shows a laboratory installation developed at the Department of theory and automation of metallurgical processes and furnaces North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (the State Technological University) and describes the principle of its work. This setting makes it possible to obtain a significant amount of thermal parameters required for the study and simulation of heat transfer process. The design of the installation provides the ability to quickly re-equipment of its once-through mode of operation in counter mode. The installation is equipped with an automatic control and regulation and provides a visual representation of heat transfer, heat flow, the regularities that occur during the heat exchange, and is a practical tutorial in the preparation of highly qualified personnel.*

*Keywords:* mathematical modeling, heat transfer research, laboratory units, recuperators.

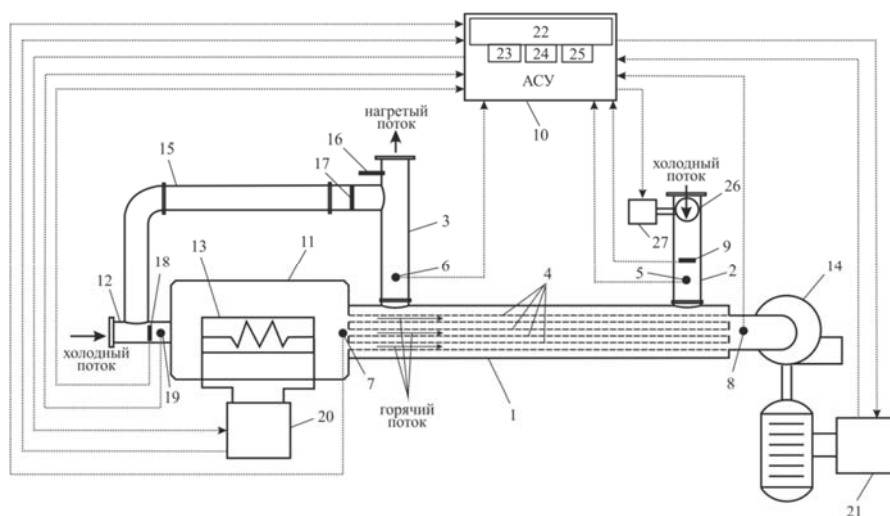
Теплообменные процессы играют важную роль во многих энергетических устройствах и технологической аппаратуре. Metallургия, теплоэнергетика, химические, пищевые и криогенные технологии – лишь некоторые области, использующие теплообменные аппараты. В большинстве теплообменных аппаратов, применяемых во всех этих отраслях, теплота передается от горячего теплоносителя к холодному через стенку, то есть осуществляется теплообмен между теплоносителем и поверхностью теплообмена. Наиболее низкий теплообмен наблюдается в газовых теплообменниках, и его интенсификация является актуальной задачей. К газовым теплообменникам относят аппараты для утилизации тепла газов промышленных печей, применяемые в металлургии. Так как большинство металлургических процессов являются высокотемпературными, то область применения утилизаторов довольно широка. Написано значительное количество работ, посвящённых процессам теплообмена в различных по конструкции аппаратах [1–3], поиску эффективных форм поверхностей и различным способам интенсификации теплообмена [4–7]. Несмотря на это и сегодня продолжается поиск новых конструктивных решений и методов интенсификации теплообменных процессов.

На кафедре «Теория и автоматизация металлургических процессов и печей» ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ) разработана лабораторная установка (рис. 1), позволяющая исследовать различные режимы теплообмена. Установка даёт возможность получить большее количество теплофизических параметров, необходимых для исследования и моделирования теплообмена, по сравнению с существующими аналогами [8, 9].

Лабораторная установка включает кожух 1 с входным 2 и выходным 3 патрубками, размещённые внутри кожуха 1 теплообменные элементы 4, термодары 5, 6, 7 и 8, установленные во входном 2 и выходном 3 патрубках, а также на входе и выходе теплообменных элементов 4, расходомер холодного потока 9 и автоматизированную систему управления 10, соединённую каналами связи с термодарами 5-8 и расходомером 9. Установка снабжена эмульгатором печи 11 с входным каналом 12 и, установленным внутри, электронагревателем 13. Причём эмульгатор печи 11 соединён с теплообменными элементами 4, расположенными рядами, с образованием каналов для прохода горячего потока. На выходе теплообменных элементов 4 установлено тягодутьевое устройство 14. Входной 2 и выходной 3 патрубки кожуха 1 выполнены съёмными, с возможностью направления холодного потока по прямотоку (рис. 1а) или противотоку (рис. 1б) относительно горячего потока.



а



б

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *а* – прямоток; *б* – противоток; 1 – кожух; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – теплообменные элементы; 5–8 – термопары; 9 – расходомер холодного потока; 10 – автоматизированная система управления; 11 – эмулятор печи; 12 – входной канал; 13 – электронагреватель; 14 – тягодутьевое устройство; 15 – трубопровод; 16, 17 – шиберы; 18 – расходомер; 19 – термопара; 20 – устройством регулирования мощности; 21 – устройство регулирования частоты вращения двигателя; 22 – контроллер; 23 – устройство ввода аналоговых сигналов; 24 – устройство вывода аналоговых сигналов; 25 – устройство вывода дискретных сигналов; 26 – нагнетатель холодного потока; 27 – магнитный пускатель

Выходной патрубок 3 кожуха 1 соединён трубопроводом 15 с входным каналом 12 эмулятора печи 11 с возможностью регулирования расхода теплового потока шиберами 16 и 17, установленными в выходном патрубке 3 кожуха 1 и соединительном трубопроводе 15. Во входном канале 12 эмулятора печи 11 дополнительно установлен расходомер 18 и термопара 19. Электронагреватель 13 снабжён устройством регулирования мощности 20, а тягодутьевое устройство 14 снабжено устройством регулирования частоты вращения двигателя 21, соединёнными каналами связи с автоматизированной системой управления (АСУ) 10.

АСУ 10 снабжена контроллером 22 с устройствами ввода аналоговых сигналов 23, вывода аналоговых сигналов 24 и вывода дискретных сигналов 25. Кожух 1 и его выходной патрубок 3, а также соединительный трубопровод 15 снабжены тепловой изоляцией (на рис.1 не показана), при этом во входном патрубке 2 кожуха 1 установлен нагнетатель холодного потока 26, который соединён через магнитный пускатель 27 с АСУ 10 каналом связи.

Лабораторная установка работает следующим образом. В эмультор печи 11 через входной канал 12 поступает холодный поток, например, воздух или газы, за счёт создания разрежения тягодутьевым устройством 14. В эмульторе печи 11 холодный поток нагревается с помощью электронагревателя 13. Затем горячий поток поступает в теплообменные элементы 4, в которых осуществляется процесс теплообмена. Одновременно во входной патрубок 2 поступает холодный поток, например, воздух, за счёт нагнетателя 26, который движется внутри кожуха 1 в одном направлении с горячим потоком (рис.1а) или навстречу горячему потоку (рис.1б). В результате теплообмена через стенку теплообменных элементов 4 холодный поток нагревается, а горячий поток охлаждается. При этом охлаждённый поток выбрасывается в атмосферу через тягодутьевое устройство 14, а нагретый поток поступает в выходной патрубок 3. Причём нагретый поток может быть в полном объёме выброшен в атмосферу, а может быть направлен полностью или частично через соединительный трубопровод 15 во входной канал 12.

Перераспределение потоков осуществляют за счёт регулирования сечения трубопровода 15 и выходного патрубка 3 шиберами 16 и 17. Использование соединительного трубопровода 15 позволяет исследовать теплообмен, имитирующий работу рекуператора промышленных печей, а выполнение входного 2 и выходного 3 патрубков съёмными, с возможностью перемены их местами, позволяет исследовать теплообмен при противоточном или прямоточном движении потоков, что существенно расширяет функциональные возможности установки.

Измерение входных и выходных значений температур потоков осуществляют с помощью термопар 5–8, а смешанного потока во входном канале 12 с помощью термопары 19. Измерение расходов газоздушных потоков производят расходомерами 9 и 18. Регулирование интенсивности теплообмена и температурного режима осуществляют за счёт изменения частоты вращения двигателя тягодутьевого устройства 14 с помощью регулятора 21, а также за счёт изменения мощности электронагревателя 13 с помощью регулятора 20.

Управление теплообменом осуществляют автоматизированной системой управления 10, в которой данные с термопар 5-8 и 19, а также расходомеров 9 и 18 поступают на устройство ввода аналоговых сигналов 23. После чего контроллер 22 выполняет анализ поступивших сигналов и, согласно алгоритму управления, производит расчёт управляющих воздействий для нагревателя 13 и тягодутьевого устройства 14 в виде аналоговых сигналов, формируемых устройством 24. После этого управляющий аналоговый сигнал поступает на регулятор мощности 20 электронагревателя 13 и на регулятор 21 частоты вращения двигателя тягодутьевого устройства 14. Устройство вывода дискретных сигналов 25 управляет электрическим пускателем 27 нагнетателя холодного потока 26. АСУ 10 позволяет легко изменять режимные параметры теплообмена и получать данные, позволяющие исследовать и моделировать этот процесс.

Важнейшими параметрами, полученными при моделировании, является распределение температур и изменение температурного напора вдоль поверхности теплообмена. Прямой контроль температуры вдоль поверхности теплообмена практически осуществить трудно, поэтому для исследования процесса вычислительным экспериментом целесообразно создать его математическую модель с использованием зонального метода расчёта теплообмена [10]. Расчёт поля температур в этом случае основан на составлении и решении системы зональных уравнений теплового баланса. Процедура выполняется в следующей последовательности: 1 – задаются первые приближения зональных температур; 2 – составляются зональные уравнения теплового баланса; 3 – решением системы уравнений рассчитываются более точные значения зональных температур; 4 – используя уточнённое значение этих температур, выполняются со второго пункта последующие шаги итерационной процедуры; 5 – расчёт завершается при получении точного решения модели, когда разность значений зональных температур двух последовательных итерационных шагов не превышает требуемой точности решения.

С использованием известных подходов к решению задач теплообмена, приведённых в источнике литературы [11] можно расширять ещё и спектр полученных расчётных парамет-

ров, изучая, тем самым процессы, протекающие в утилизационных установках рекуперативного типа и теплообмен в целом.

Разработанная и приведённая в работе лабораторная установка позволяет решать задачи теплообмена широкого спектра с различными граничными условиями при разнообразных режимах эксплуатации, максимально приближенных к реальному процессу. В связи с этим установка является универсальной для изучения, исследования и моделирования процесса теплообмена. Она позволяет получить наглядное представление о теплопередаче, тепловых потоках, закономерностях, имеющих место при теплообмене, и является практическим учебным пособием при подготовке кадров высшей квалификации.

### Список использованных источников

1. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. – Л.: Энергия, 1980. – 144 с.
2. Справочник по теплообменникам. В 2 томах. Т.1, пер. с англ. / Под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
3. Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) / Теплоэнергетика, 2012, №1. – С. 3–14.
4. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. – М.: Энергия, 1966. – 184 с.
5. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. – М.: Энергия, 1977. – 464 с.
6. Калинин Э.К. Эффективные поверхности теплообмена. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.
7. Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Дикарева А.В. Состояние, проблемы и стимулирование утилизации тепла газов промышленных печей // Цветная металлургия, 2011, №1. – С. 30-35.
8. Авторское свидетельство СССР №1695123. Установка для исследования работы теплообменного аппарата / В.М. Спицин, В.И. Караваев. опубл. 30.11.1991.
9. Патент РФ на полезную модель №65277. Лабораторная установка по теплопередаче / Т.А. Енютина, С.Г. Марченкова, опубл. 27.07.2007.
10. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Под науч. ред. В.А. Арутюнова. – М.: Металлургия, 1990. – 240 с.
11. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Кн. 1, 2: Под науч. ред. Айнштейна В.Г. – М.: Химия, 2000. – 1760 с.

УДК 621.18

*В. А. Муңц<sup>1</sup>, А. И. Папченков<sup>2</sup>, Е. Ю. Павлюк<sup>1</sup>, А. С. Осминкина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ООО «УГМК-Холдинг», г. Екатеринбург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕРМОСИФОНАХ

### Аннотация

*Работа направлена на изучение переходных процессов в термосифонах. Получены расчетные зависимости для определения основных температурных характеристик объекта регулирования. Для этого были определены термические сопротивления основных элементов термосифона. Предложены уравнения для расчета изменения температуры насыщения в термосифоне в зависимости от конструктивных и режимных параметров теплоутилиза-*