

замерзании незначительно и составляет всего 0,1 % (у этиленгликоля – 1,5 %). Использование пропиленгликоля также оправдывается минимальными затратами на него при ремонте системы, низкими эксплуатационными расходами и т. д.

Список литературы

1. СП 60.13330.2012 Отопление, вентиляция и кондиционирование. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. Введ. 2013-10-01. М. : Госстрой, 2012. 28 с.
2. ГОСТ 159-52. Жидкость охлаждающая низкотемпературная. Введ. 1952-10-01. М. : Изд-во стандартов, 1952. 9 с.
3. Теплоносители для систем отопления [Электронный ресурс]. URL: <http://www.teplonositel.com>. (дата обращения: 09.11.2014).

УДК 662.925

Иванова А. А., Гильметдинова Ю. Р., Микула В. А., Вальцев Н. В.
Уральский федеральный университет,
tes.urfu@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА СЖАТОГО ВОЗДУХА

В настоящее время возрастает интерес к использованию твердых топлив в энергетике. Это связано, во-первых, со значительным сокращением запасов природного газа и нефти, во-вторых, с достаточно высокой ценой этих энерго-ресурсов. Перспективным направлением является ПГУ на твердом топливе. В схеме гибридной ПГУ на основе процессов термообработки угля и «внешнего» сжигания топлива одним из ключевых элементов является высокотемпературный воздухонагреватель, в нем нагревается сжатый воздух, направляемый затем в камеру сгорания газовой турбины.

В качестве основного конструктивного элемента рекуперативного устройства нагрева воздуха (воздухонагревателя) чаще всего используется трубный металлический элемент. Для описания интенсивности теплообмена по воздуху в таком элементе при турбулентном режиме течения существует много критериальных зависимостей, наиболее распространенные из них приведены ниже:

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,021 Re_{дж}^{0,80} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж} / Pr_{с})^{0,25}, \quad (1)$$

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,023 Pr_{ж}^{0,4} Re_{дж}^{0,8}. \quad (2)$$

Разница между ними составляет ~10 %.

Очевидно, что для данных зависимостей наибольшее влияние на теплообмен оказывает плотность жидкости пропорционально $\rho^{0,8}$ (определяется T и p) и ее скорость пропорционально $w^{0,8}$. Менее заметно теплоотдача зависит от $\lambda^{0,57}$, $c_p^{0,43}$, $\mu^{-0,37}$. Влияние геометрического размера канала на теплоотдачу также оказывается относительно слабым $\alpha \sim d_{эк}^{-0,2}$. Опираясь на (1), получим $\alpha \sim p^{0,8}$ и $\alpha \sim T^{-0,53}$.

Для воздухонагревателя гибридной ПГУ основные параметры, влияющие на теплообмен, изменяются в следующих пределах: скорость потока – 10–25 м/с (согласно рекомендациям по проектированию воздухонагревателей), температура воздуха – 400–1000 °С, давление воздуха – 1,5–3 МПа, диаметр трубопровода – 30–150 мм. Расчет по зависимостям (1) и (2) показал, что коэффициент теплоотдачи с изменением параметров теплообмена меняется в значительных пределах от 150 до 800 Вт/(м²·К), причем диапазон расширяется с ростом давления. При проектировании промышленных установок с факельным обогревом компромисс между α_1 и α_2 может быть достигнут путем подбора режимных параметров факела (α_1) и интенсификации внутреннего теплообмена (α_2).

Рекуперативный нагрев воздуха до высоких температур может быть произведен различными способами, из которых наиболее применимый в технике – факельный (либо нагрев высокотемпературными продуктами сгорания). В качестве альтернативной технологии можно привести разрабатываемые за рубежом приемники солнечной энергии, позволяющие использовать ее в различных установках, в том числе работающих по циклу Брайтона, где внутри ресивера протекает сжатый воздух, направляемый после подогрева до 800–1000 °С (в перспективе до 1500 °С) в камеру сгорания газовой турбины.

Рассмотрим нагрев воздуха от факела в топке энергетического котла. Интервал изменения температуры продуктов сгорания здесь лежит в пределах 1000–1900 °С, что соответствует α_1 в 120–300 Вт/(м²·К). В зависимости от давления воздуха (с известным набором параметров воздуха и геометрических параметров) существует граничное значение давления $p_{гр}$, условно разделяющее поле на две области:

- область преобладания внешнего теплообмена над внутренним ($\alpha_2 < \alpha_1$) при $p < p_{гр}$;
- область преобладания внутреннего теплообмена над внешним ($\alpha_2 > \alpha_1$) при $p > p_{гр}$.

Основным ограничением при разработке устройств высокотемпературного нагрева воздуха является допустимая температура стенки рекуператора, который может быть изготовлен как из металла, так и из керамики. Металлические конструкции более устойчивы к динамическим нагрузкам и позволяют обеспечить лучшую газоплотность, в силу чего представляются предпочтительными. Наибольшей жаропрочностью обладают стали, легированные хромом, при содержании его 25–30 %. Максимальная температура для жаропрочных сталей достигает 1100–1200 °С. В газовых турбинах предельным уровнем температур металла рабочих лопаток, выполненных из жаропрочных сталей, считается 850–900 °С, однако они испытывают большие динамические нагрузки, в отличие от трубных элементов воздухонагревателя. С учетом запаса была принята максимальная рабочая температура металла – не более 1000 °С.

Для решения задачи интенсификации внутреннего теплообмена используется огромное количество конструкций, из которых применительно к задаче нагрева низконапорного воздуха до высоких (~ 800–1000 °С) температур был выбран способ с использованием стержневых вставок. В результате их применения увеличивается внутренняя поверхность теплообмена, нагрев которой

идет за счет переизлучения от внутренней поверхности трубы на вставку. Эффективность способа повышается с ростом температуры греющей среды.

Проведенные расчеты показали, что использование вставки «крест» при давлениях воздуха 1,5–3 МПа увеличивать тепловой поток в 1,5–1,7 раза.

При разработке устройств высокотемпературного нагрева компримированного воздуха вопрос поддержания температуры стенки рекуператора в допустимых пределах стоит менее остро благодаря большим внутренним коэффициентам теплоотдачи.

В то же время задача повышения компактности агрегата требует интенсификации внешнего теплообмена до значений, соответствующих теплообмену внутри трубных нагревательных элементов.

Для интенсификации внешнего теплообмена существует несколько основных способов:

1. Повышение температуры факела за счет:

- применения обогащенного кислородом дутья;
- повышения сверх стандартной температуры подогрева низконапорного воздуха, подаваемого для сжигания угольной пыли в топку;

2. Повышение давления греющей среды.

3. Увеличение наружной поверхности за счет оребрения.

Задача высокотемпературного нагрева компримированного воздуха решалась при разработке агрегата высокотемпературного нагрева воздуха для работы в схеме гибридной угольной ПГУ. Двухступенчатая подготовка рабочего тела для газовой турбины (нагретого воздуха) позволяет объединить в одной установке схемы ПГУ с внутрицикловой газификацией и «внешним» сжиганием, заметно уменьшая присущие им в отдельности недостатки, что повышает энергетическую эффективность в целом.

В рассматриваемой схеме в качестве устройства высокотемпературного нагрева воздуха использован котел с типичной пылеугольной топкой, лишь с тем отличием, что в ее поверхности нагрева подается цикловый воздух под давлением, который после нагрева до 800–1000 °С направляется в камеру сгорания газовой турбины и догревается там до рабочей температуры за счет сжигания синтез-газа.

С учетом особенностей разрабатываемого агрегата интенсифицировать внешний теплообмен 2-м и 3-м способами достаточно сложно. Повышение давления продуктов сгорания целесообразно, если они после котла не выбрасываются в атмосферу, а поступают на вход газовой турбины, что оказалось малоэкономичным, в том числе в связи с проблемами очистки газов. Развитие внешней поверхности с помощью различных ребер также затруднено из-за возможности заноса и шлакования поверхностей. Остается повышение температуры факела.

При увеличении температуры факела до предельных значений ~ 1900 °С разница между температурами факела и стенки – 900 °С, а разница между температурами стенки и воздуха – 200–600 °С (при температуре воздуха 800–400 °С). В результате, для обеспечения допустимой температуры металлической стенки трубы соотношение α_1/α_2 должно быть 1,5–4,5, а α_2 должно быть

порядка 600–1500 Вт/(м²·К), т. е. необходимо использовать переизлучающие вставки, что требует дальнейшей проработки.

УДК 621.438

Исянгильдина Л. Х., Демин Ю. К., Картавец С. В.
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
dyomin.ura@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ПЕРЕД ОБЖИГОВЫМИ ПЕЧАМИ

В настоящее время мы сталкиваемся с проблемой повышения цен на энергетические ресурсы, что приводит к увеличению их доли в себестоимости конечного продукта. Таким образом, возникает задача наиболее эффективно и полно использовать потенциал сжигаемых топлив.

Обжиговые печи в промышленности являются незаменимыми помощниками при термообработке металла. Обжиг производится продуктами сгорания топлив (природный газ), при этом температура, необходимая для термообработки, часто бывает значительно ниже температуры горения топлива. Для охлаждения продуктов сгорания их разбавляют холодным воздухом. Однако при разбавлении продуктов сгорания происходит рост потерь теплоты с уходящими газами и потеря изначального температурного потенциала.

Данную проблему можно решить охлаждая дымовые газы путем их расширения в газовой турбине (ГТ) с выработкой электрической энергии. Произведенную энергию предприятие может потратить на собственные нужды. Также сокращаются объемы дымовых газов, а следовательно, и потери с дымовыми газами при выходе из печи.

Принципиальная схема с применением газовой турбины (рис. 1).

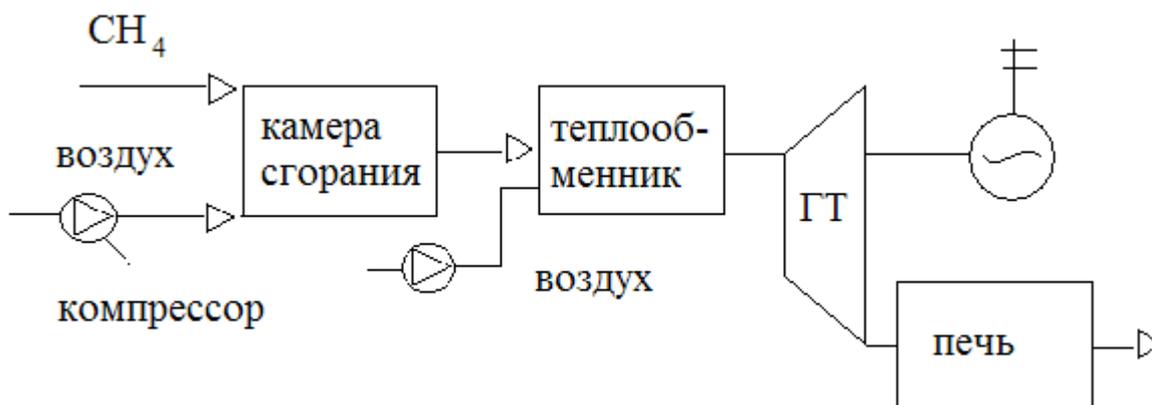


Рис. 1. Принципиальная схема с применением газовой турбины