

Повышение эффективности вращающихся регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов

Кудинов А. А., доктор техн. наук, Губарев А. Ю., инж.

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»

Предложена конструкция вращающегося регенеративного воздухоподогревателя (РВП) в форме усеченного конуса. Представлены результаты тепловых и аэродинамических расчетов воздухоподогревателя типа РВП-54, установленного за энергетическим котлом БКЗ-420-140 НГМ. Приведены графики распределения коэффициентов теплоотдачи по высоте набивки РВП.

Ключевые слова: воздухоподогреватель, энергетический котел, теплообмен, температура, сечение, поток, воздух, газоздушный тракт.

Подогрев воздуха перед подачей в топку энергетических котлов ТЭС — важный процесс обеспечения надежной, эффективной и экономичной работы оборудования. Подогрев воздуха за счет охлаждения продуктов сгорания позволяет повышать КПД котельных установок на 10 – 20 %. Для эффективной и экономичной работы котлов воздух необходимо нагревать до 250 – 400 °С, при этом температура уходящих газов снижается с 300 – 350 °С до 120 – 140 °С. Очевидно, что воздухоподогреватели работают в области с низкими температурными напорами, а значит, требуются большие площади теплообменной поверхности для передачи необходимого количества теплоты.

Для нагрева дутьевого воздуха в энергетике применяют рекуперативные трубчатые и вращающиеся регенеративные воздухоподогреватели, причем последние наиболее широко распространены как у нас, так и за рубежом. Производителями разработан модельный ряд этого вида воздухоподогревателей, отличающихся габаритами в зависимости от производительности котла, за которым их устанавливают [1]. Вращающиеся РВП данного модельного ряда обладают высокой металлоемкостью и большими габаритами. Эти главные недостатки обусловлены низкими коэффициентами теплоотдачи α от продуктов сгорания к теплообменной поверхности и от теплообменной поверхности к воздуху. Особенно низкие коэффициенты теплоотдачи наблюдаются в холодных пакетах теплообменной набивки РВП. А поскольку для обеспечения передачи заданного количества теплоты требуемая площадь теплообмена обратно пропорциональна коэффициентам теплоотдачи, то низкие значения последних определяют повышенную металлоемкость РВП.

Большие габариты и масса являются причинами завышенных эксплуатационных и ре-

монтных затрат. Периодичность замены пакетов набивки составляет около 5 лет, уменьшение общего объема набивки позволит снизить ремонтные затраты. Кроме того, уменьшение габаритных размеров, в частности диаметра, приведет к снижению температурной деформации ротора и перетоков воздуха в газовую часть РВП. Понизятся нагрузки на опорные подшипники. Для уменьшения теплообменной поверхности следует интенсифицировать процессы теплообмена, что позволит уменьшить площадь, необходимую для передачи теплоты, повысит компактность установки. Интенсифицировать теплообмен возможно путем совершенствования характеристик теплообменной поверхности набивки или, как предложено в [2], применения новой конструкции вращающегося РВП в форме усеченного конуса.

В настоящей статье представлены результаты теплового и аэродинамического расчетов воздухоподогревателя в форме усеченного конуса [2] (рис. 1). Конусности $K_{гор}$ и $K_{хол}$ данной конструкции определяются по формулам:

$$K_{гор} = (D_1 - D_2)/H_{гор}; \quad (1)$$

$$K_{хол} = (D_2 - D_3)/H_{хол}. \quad (2)$$

В регенеративных воздухоподогревателях в процессе охлаждения уменьшается удельный объем газов. Для РВП цилиндрической формы это приводит к снижению скоростей движения потоков газов в каналах теплообменной набивки, чисел Re и коэффициентов теплоотдачи. То же самое происходит и по воздушной стороне. Имея малый удельный объем на входе, холодный воздух движется по каналам с низкой скоростью. При этом проходное сечение холодной набивки — не самое оптимальное с точки зрения эффективности процесса теплообмена. Поэтому в

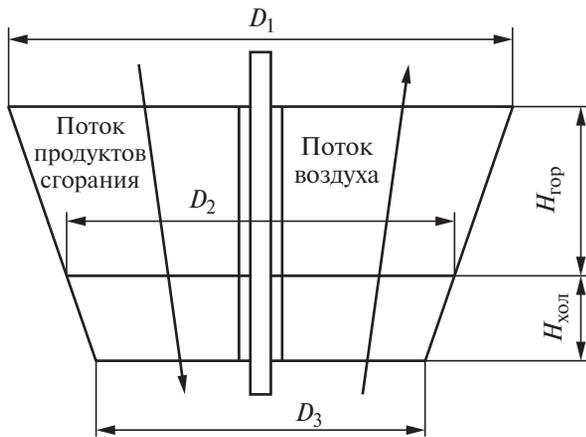


Рис. 1. Схема однопоточного РВП с набивкой в форме усеченного конуса

холодной части регенеративного воздухоподогревателя наблюдаются низкие значения коэффициентов теплоотдачи.

Применение вращающегося РВП в форме усеченного конуса повышает эффективность теплообмена как в холодной, так и в горячей части набивки. Уменьшение диаметра регенеративного воздухоподогревателя на выходе потока газов и на входе потока воздуха обуславливает возрастание скоростей обоих потоков. Повышение скоростей движения теплоносителей приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи и позволяет уменьшить суммарную площадь теплообменной поверхности. В результате сокращаются металлоемкость РВП и его стоимость.

Обоснованием применения предложенной конструкции должны быть результаты анализа процессов, протекающих в сравниваемых видах воздухоподогревателей. Это обуславливает необходимость проведения тепловых и аэродинамических расчетов РВП. Методика проведения исследования основана на использовании критериального уравнения, характеризующего процесс теплообмена для определенного типа теплообменной набивки [1, 3]:

$$\alpha = A \frac{\lambda}{d_{\text{ЭКВ}}} \text{Re}^a \text{Pr}^b C_t C_l, \quad (3)$$

где A , a , b — коэффициенты, определяемые типом набивки [3]; λ — теплопроводность теплоносителя; $d_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентный диаметр набивки; Re и Pr — числа Рейнольдса и Прандтля; C_t и C_l — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние температурного фактора и относительной длины канала.

Интенсивность теплообмена α зависит от числа Re . Коэффициент a в уравнении (3)

характеризует степень влияния числа Re на интенсивность теплообмена и определяется типом теплообменной набивки.

На основе указанной методики разработана математическая модель, реализованная в программе теплового и аэродинамического расчетов. Были выполнены расчеты для определения параметров, характеризующих процессы теплообмена. В качестве исходных взяли данные экспериментального обследования энергетических котлов (станционные № 3, 5) типа БКЗ-420-140 НГМ Самарской ТЭЦ, оборудованных воздухоподогревателями типа РВП-54. Экспериментальное обследование проводили в рамках испытаний с целью корректировки режимных карт котлов. Были выполнены замеры температур потоков воздуха и продуктов сгорания в характерных точках газовоздушного тракта, а также давлений воздуха и продуктов сгорания в трактах от дутьевого вентилятора до газохода после РВП (табл. 1).

На первом этапе на основе экспериментальных исходных данных был смоделирован фактический режим работы воздухоподогревателя РВП-54 цилиндрической формы и получены результаты, характеризующие теплообмен в набивке. Объемные расходы продуктов сгорания и воздуха определены расчетным путем по известным расходу природного газа и коэффициентам избытка воздуха. Конструктивные характеристики РВП-54, а также теплообменной набивки взяты из [1, 3]. Ниже приведены исходные данные для выполнения теплового и аэродинамического расчетов:

Температура, °С:	
воздуха перед РВП	29
уходящих газов	114
Объемный расход, м ³ /с:	
продуктов сгорания	40,67
воздуха	40,26
Коэффициент сохранения теплоты	0,94
Высота РВП, м:	
горячей части	1,31
холодной части	0,71
Площадь поверхности, м ² :	
холодной набивки	4380
горячей набивки	9078
Площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания, м ² :	
в холодной набивке	8,86
в горячей набивке	9,7
Площадь живого сечения для прохода воздуха, м ² :	
в холодной набивке	6,1
в горячей набивке	6,7

Таблица 1

Показатель	Место измерения показателя	Значение показателя
Расход газа, м ³ /ч	Перед горелками	32 600
Температура воздуха, °С	Перед РВП	29
	За РВП	266
Температура продуктов сгорания, °С	За пароперегревателем	530
	За водяным экономайзером	343
	За РВП	114
Давление воздуха, кгс/м ²	На напоре дутьевого вентилятора	635
	Перед РВП	610
	За РВП	455
Давление продуктов сгорания, кгс/м ²	В топке	290
	Перед РВП	40
	За РВП	– 35
Перетоки воздуха в РВП	За РВП	0,17
Избыток воздуха	В рассечке водяного экономайзера	1,04
	За РВП	1,21

Для анализа эффективности процессов теплообмена установлено распределение коэффициентов теплоотдачи по высоте воздухоподогревателя (рис. 2). Как отмечалось, в холодной части набивки РВП коэффициенты теплоотдачи значительно ниже, чем в горячей. Для РВП-54 цилиндрической формы коэффициенты теплоотдачи от продуктов сгорания к теплообменной поверхности по мере их охлаждения снижаются на 13 %, а по воздуху — на 15 %. Определены расчетные значения гидравлических сопротивлений по воздуху и продуктам сгорания. Выявлено, что расчетные значения гидравлических сопротивлений меньше фактически измеренных, что обусловлено появлением отложений (загрязнений) на поверхностях нагрева в процессе эксплуатации, увеличением шероховатостей в результате коррозионного воздействия агрессивных сред, в которых работают поверхности нагрева РВП. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Применение новой конструкции РВП в форме усеченного конуса позволит избавиться от недостатков, присущих РВП цилиндрической формы (низкие значения коэффициентов теплоотдачи, неравномерность теплообме-

на по высоте набивки, высокая металлоемкость и др.). При использовании РВП в форме усеченного конуса основной задачей является определение конусности, т. е. тангенса угла наклона образующей конуса к нормали. Чем больше угол наклона, тем выше скорости потоков и коэффициенты теплоотдачи. Однако с возрастанием конусности

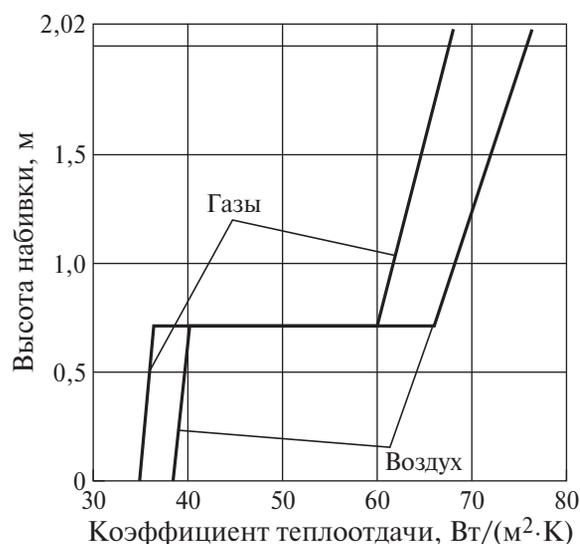


Рис. 2. Распределение коэффициентов теплоотдачи в РВП-54 цилиндрической формы

Таблица 2

Показатель при цилиндрической форме набивки РВП	Значение показателя	
	для холодной набивки	для горячей набивки
Средняя скорость, м/с:		
продуктов сгорания	6,94	8,11
воздуха	7,93	9,81
Среднее число Re для продуктов сгорания	2631,99	1961,33
Среднее число Re для воздуха	4197,07	2985,92
Температура газов, °С:		
на входе	165,1	344,58
на выходе	114	165,1
Температура воздуха, °С:		
на входе	29	80,71
на выходе	80,71	264,89
Средний коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	7,3	13,14
Средний логарифмический температурный напор, °С	84,69	82,01
Теплоотдача продуктов сгорания, кВт	2879,03	10406,26
Тепловосприятие воздуха, кВт	2706,29	9781,88
Площадь поверхности нагрева, м ²	4380,01	9078,48
Средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² · К):		
от продуктов сгорания к набивке	35,67	64,1
от набивки к воздуху	39,35	70,91
Потери давления, кгс/м ² :		
по газовой стороне	8,86	46,84
по воздушной стороне	13,05	67,17

происходит уменьшение площади теплообмена и увеличение аэродинамического сопротивления воздухоподогревателя. Аэродинамическое сопротивление — решающий фактор в выборе конусности. Необходимо подобрать ее таким образом, чтобы увеличение гидравлического сопротивления газозвушного тракта не выходило за допустимые пределы, установленные для дутьевых вентиляторов котла. А увеличение затрат электроэнергии на их привод не должно превышать экономию, полученную в результате уменьшения объема теплообменной набивки, перетоков воздуха, эксплуатационных затрат после модернизации РВП.

На котле БКЗ-420-140 НГМ устанавливаются центробежные дутьевые вентиляторы дву-

стороннего всасывания ВДН-25x2 [4]. Анализ характеристик при номинальном расходе воздуха на котел позволяет сделать вывод о том, что дутьевой вентилятор обеспечивает нормальную работу газозвушного тракта при увеличении сопротивления последнего на 150 – 200 кгс/м². Регулирование нагрузки происходит путем изменения угла поворота направляющего аппарата.

На *втором этапе работы* были выполнены расчеты процессов теплообмена и определены гидравлические сопротивления воздухоподогревателя в форме усеченного конуса для разных значений конусности РВП-54. Выявлено, что при увеличении угла наклона обдуваемой снижается количество теплоты, воспринимаемое воздухом (рис. 3). Уменьше-

ние тепловосприятия при увеличении конусности для РВП-54 объясняется уменьшением объема набивки, т. е. площади теплообменной поверхности [5]. Установлено, что уменьшение теплообменной поверхности имеет бóльшую степень влияния на передачу теплоты, чем увеличение коэффициентов теплоотдачи. Для обеспечения сохранения количества передаваемой теплоты необходимо увеличивать площадь теплообменной поверхности до необходимого значения путем повышения высоты набивки.

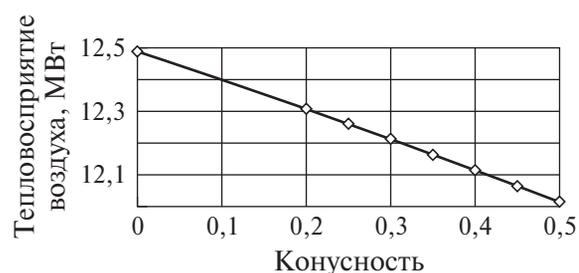


Рис. 3. Зависимость тепловосприятия воздуха от конусности

Результаты расчетов приведены в табл. 3. Выявлены оптимальные значения конусности

Таблица 3

Показатель при конусной форме набивки РВП	Значение показателя	
	для холодной набивки	для горячей набивки
Конусность	0,4	0,7
Средняя скорость, м/с:		
продуктов сгорания	11,11	9,74
воздуха	12,69	11,75
Среднее число Re:		
для продуктов сгорания	4230,93	2418,87
для воздуха	6757,13	3702,21
Температура газов, °С:		
на входе	162,5	344,58
на выходе	114	162,5
Температура воздуха, °С:		
на входе	29	80,7
на выходе	80,7	264,63
Средний коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	10,64	15,27
Средний логарифмический температурный напор, °С	84,69	82,3
Теплопередача продуктов сгорания, кВт	2879,03	10406,26
Тепловосприятие воздуха, кВт	2706,29	9781,88
Площадь поверхности нагрева, м ²	3003,3	7819,05
Средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² · К):		
от продуктов сгорания к набивке	52,02	74,54
от набивки к воздуху	57,4	82,37
Потери давления, кгс/м ² :		
по газовой стороне	22,24	64,6
по воздушной стороне	32,7	96,47
Высота набивки, м	0,78	1,36

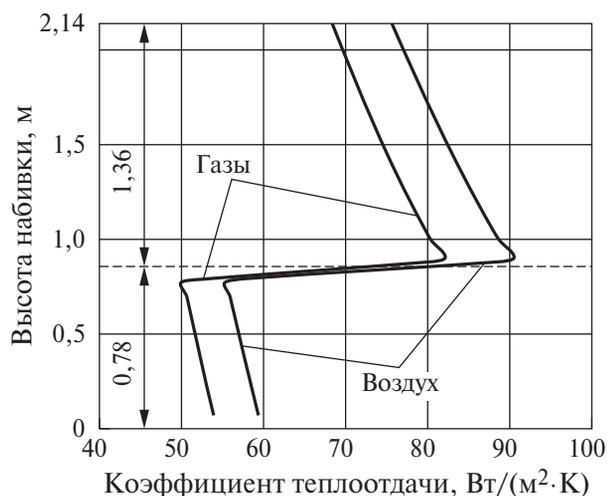


Рис. 4. Распределение коэффициентов теплоотдачи в РВП-54 в форме усеченного конуса

РВП-54: для горячей набивки — 0,7, для холодной набивки — 0,4. На рис. 4 приведены графики распределения коэффициентов теплоотдачи по высоте набивки РВП-54 в форме усеченного конуса. Анализ результатов расчетов показал, что коэффициенты теплоотдачи в холодной части набивки РВП возросли на 48,6 %, в горячей части — на 15,5 % по сравнению с РВП-54 традиционной цилиндрической формы. При этом объем набивки снизился на 19,58 %, или на 13,04 т (с 66,6 до 53,56 т). Для двух РВП-54, устанавливаемых за котлом БКЗ-420-140 НГМ, снижение суммарной массы набивки воздухоподогревателей составляет 26 т. Повышение гидравлического сопротивления РВП по воздуху достигает $48,95 \text{ кгс/м}^2$, по газам — $31,14 \text{ кгс/м}^2$. Суммарное повышение гидравлического сопротивления газозвушного тракта равно $80,09 \text{ кгс/м}^2$ (11 % общего сопротивления). Таким образом, дутьевой вентилятор при таком сопротивлении тракта сможет обеспечить необходимый расход воздуха. В данном случае, судя по характеристике, дуть-

евой вентилятор будет работать в зоне с большим КПД.

Выводы

1. Применение новой конструкции РВП с набивкой в форме усеченного конуса позволит избавиться от недостатков, присущих воздухоподогревателям цилиндрической формы: низких значений коэффициентов теплоотдачи, неравномерности теплообмена по высоте набивки, высокой металлоемкости, больших перетоков воздуха в уходящие газы.

2. Вариантные расчеты процессов теплообмена в набивках вращающихся РВП-54 цилиндрической и конической форм свидетельствуют о повышении интенсивности теплообмена в холодной части конусной набивки почти на 50 % и в горячей части — на 15 % по сравнению с РВП традиционной цилиндрической формы. При этом уменьшается объем набивки примерно на 20 % (для двух РВП-54, устанавливаемых за котлом БКЗ-420-140 НГМ, снижение суммарной массы набивки воздухоподогревателей составляет 26 т).

Список литературы

1. Кудинов А. А., Зиганшина С. К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. — М.: Машиностроение, 2011.
2. Патент 2241907 (RU). МПК F 23 L 15/02. Вращающийся регенеративный подогреватель воздуха / А. А. Кудинов, А. Ю. Абрамова. — Изобретения. Полезные модели, 2004, № 34.
3. Боткачик И. А. Регенеративные воздухоподогреватели парогенераторов. — М.: Машиностроение, 1978.
4. Мочан С. И. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод). 3-е изд. — Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1977.
5. Кудинов А. А., Губарев А. Ю. Исследование процессов теплообмена во вращающихся регенеративных воздухоподогревателях энергетических котлов. — Энергетик, 2012, № 6.

tes@samgtu.ru