

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ ТИПОВ НАБИВОК РВП ПАРОВЫХ КОТЛОВ

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты расчетно-экспериментального исследования эффективности новых типов набивок регенеративных вращающихся воздухоподогревателей (РВП) паровых котлов. Анализируется влияние типа поверхности в горячей и холодной частях РВП на эффективность работы парового котла.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные набивки регенеративных вращающихся воздухоподогревателей мощных паровых котлов имеют достаточно сложную конфигурацию поверхности и структуру. Вопросы выбора оптимального типа набивки по тепловым и аэродинамическим характеристикам всегда актуальны, так как эффективность работы РВП в значительной мере определяет КПД котла, что при высокой стоимости топлива является одним из главных показателей. На кафедре промышленной теплоэнергетики АГТУ проведены многочисленные опыты по определению тепловых и аэродинамических характеристик различных типов набивок РВП [1,2]. Исследования проводились на образцах промышленного производства, поэтому имеют особую ценность для практического использования.

Анализ работы РВП паровых котлов показывает, что тепловая нагрузка горячей части примерно в три раза больше, чем холодной, хотя занимаемый ею объём в роторе лишь в два раза меньше. Обычно считают, что в холодной части ротора должен использоваться упрощенный профиль набивки, чтобы уменьшить опасность сернокислотной коррозии и заноса загрязнениями при сжигании в котле высокосернистого мазута. В горячей части, как правило, используется более сложный профиль набивки, но часто выбор типа поверхности определяется не её эффективностью и качеством изготовления, а ценой. Поэтому целью данной работы является определение роли и степени влияния типа набивки в горячей и холодной частях ротора на эффективность работы РВП и котла в целом. До настоящего времени мало внимания уделялось набивкам холодного слоя, так как считалось их влияние незначительным. Поэтому оценка влияния холодной части на работу РВП и парового котла является актуальной задачей.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования новых типов набивок проводились на аэродинамической трубе разомкнутого типа сечением 300×300 мм. При обработке эксперимента

использовался метод нестационарного теплового режима.

Оценку эффективности различных типов набивок проводили на основе теплового и аэродинамического расчетов РВП по программе, составленной в среде Delphi, что позволяет моделировать различные режимы работы воздухоподогревателя парового котла. Работа программы полностью соответствует типовой методике [3] и заводскому расчету котла ТМ-84"Б". В расчетах принимали, что в котле сжигается мазут марки М-100 с содержанием серы $S^p = 2,8\%$ и низкой теплотой сгорания $38,77$ МДж/кг. Ротор РВП диаметром $5,4$ м имеет 24 сектора, из которых 13 секторов включены в газовый тракт, а 9 – в воздушный. Два сектора перекрываются уплотнительными плитами и выключены из работы. Весь ротор заполнен набивкой с общей высотой $1,8$ м. Высота набивки горячей части составляет $1,2$ м, а холодной части – $0,6$ м. Температура дымовых газов на входе в РВП принималась во всех вариантах 320 °С, а воздуха на входе в РВП – 80 °С. Теплофизические свойства теплоносителей рассчитывались по средней температуре [3]. Коэффициенты теплоотдачи и аэродинамическое сопротивление определялись по уравнениям подобия общепринятого вида [3,4]:

$$Nu = A \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l; \quad (1)$$

$$\lambda = C \cdot Re^{-0,25}, \quad (2)$$

где Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; C_t – поправка, зависящая от температуры потока и стенки; C_l – поправка на относительную длину канала.

В расчетах использовались результаты теплоаэродинамических исследований рассматриваемых типов набивок, проводимые на кафедре промышленной теплоэнергетики. Коэффициенты A , C в уравнениях (1), (2) для каждого типа набивки, полученные экспериментально, приведены в табл. 1.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАБИВОК

Для анализа выберем шесть набивок горячего слоя из числа исследованных, относящихся к трем принципиально различным типам (табл. 1). Первый тип – это волнистые набивки 2.0 и 3.0, состоящие из заполняющего волнистого листа, имеющего наклонные волны под углом 30° к потоку, и дистанционирующего листа интенсифицированного профиля. Набивки 2.0 и 3.0 отличаются между собой высотой дистанционирующих гофр и имеют эквивалентные диаметры соответственно $9,9$ и $11,4$ мм. Второй тип – это просечные набивки 4.0 и 5.0, в которых заполняющим является просечно-вытяжной

лист, а в качестве дистанционирующего используется интенсифицированный профиль, аналогичный соответственно набивкам 2.0 и 3.0. Третий тип — это просечные набивки с дистанционирующим листом треугольного профиля типа 6.0 и 7.0, у которых заполняющий просечной лист соответствует набивкам 4.0 и 5.0, а дистанционирующий лист образует каналы треугольного профиля, расположенные параллельно потоку. Набивки 6.0 и 7.0 различаются высотой дистанционирующего листа, поэтому эквивалентные диаметры у них будут равны соответственно 7,66 и 8,62 мм. Для холодного слоя рассмотрим два варианта набивок: гладкую типа 0.1 и интенсифицированную разреженную типа 0.2. Профиль последней подобен набивке 3.0 горячей части, но отличается толщиной листов, равной 1,2 мм, поэтому имеет эквивалентный диаметр 10,53 мм. В данной работе варианты заполнения ротора РВП обозначены двумя цифрами: первая – тип набивки горячей части, а вторая – тип набивки холодного слоя (табл. 1). Например, вариант 3.2 означает, что в горячей части установлена набивка 3.0, а в холодной – набивка 0.2.

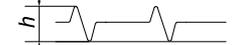
4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим эффективность интенсификации теплообмена в горячей части за счет изменения про-

филя набивки. Сопоставление сначала будем проводить для семи типов набивок горячей части, при одной и той же набивке типа 0.1 в холодном слое, причем набивку 1.1, которая идет в заводской поставке с РВВ-54, примем за базовую при сравнении вариантов. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Интенсификация теплообмена за счет просечных набивок второго типа в горячей части позволяет получить наиболее высокие коэффициенты теплоотдачи (рис. 1). По сравнению с базовой набивкой 1.1, коэффициент теплоотдачи набивок 4.1 и 5.1 увеличился примерно на 35 %. Повышение коэффициента теплоотдачи для волнистых набивок типа 2.1 и 3.1 составило в среднем 18 %, что связано с увеличением высоты промежуточных волн дистанционирующего листа и сокращением расстояния между дистанционирующими гофрами по сравнению с базовой. Набивки с дистанционирующим листом треугольного профиля позволили увеличить коэффициент теплоотдачи только на ~11 % за счет просечного листа. Удельный тепловой поток с одного квадратного метра поверхности увеличился для просечных набивок (4.1 и 5.1) на ~43 %, для волнистых (2.1 и 3.1) на ~14 %, а для треугольных (6.1 и 7.1) снизился соответственно на 20 и 6,5 % (рис. 2).

Таблица 1. Характеристики набивок

Шифр набивки	Профиль	h, мм	d _э , мм	C, м ² /м ³	A	C
Холодный слой, δ = 1,2 мм						
0.1		14,4	9,86	325	0,021	0,35
0.2		15	10,53	309,9	0,038	0,85
Горячий слой, δ = 0,7 мм						
1.0		12	9,6	365	0,037	0,78
2.0		13	9,9	365,7	0,0502	1,13
3.0		15	11,4	320	0,0433	0,956
4.0		11	11,7	300,3	0,0594	1,276
5.0		15	13,9	252	0,0624	1,292
6.0		8	7,66	436	0,0386	0,978
7.0		10	8,62	406,9	0,0403	1,029

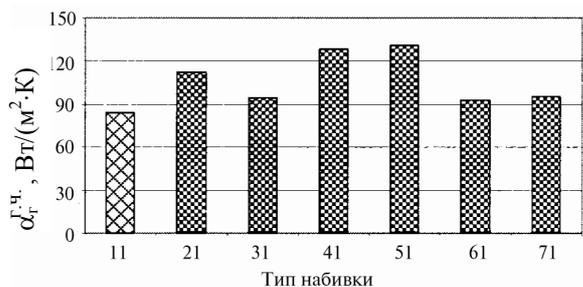


Рис. 1. Влияние типа набивки в горячей части на коэффициент теплоотдачи по газам

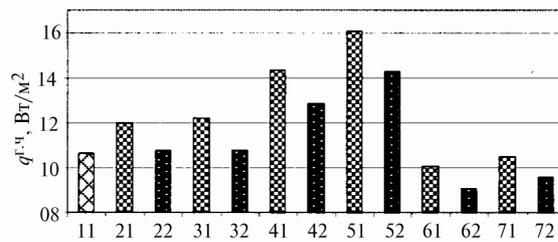


Рис. 2. Влияние типа набивок в РВП на удельное тепловосприятие горячей части

Таблица 2. Сравнение различных типов набивок

Типы набивок холодного слоя	Величина	Обозначение	Единица измерения	Типы набивок горячего слоя						
				1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
0.1	Удельное тепловосприятие: горячего слоя	$q^{г.ч}$	$\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$	1,063	1,202	1,223	1,433	1,607	1,006	1,053
0.2				–	1,081	1,078	1,283	1,432	0,903	0,952
0.1	холодного слоя	$q^{х.ч}$		0,7171	0,632	0,710	0,645	0,688	0,632	0,651
0.2				–	1,053	1,184	1,074	1,142	1,055	1,071
0.1	Относительное полное тепловосприя-	$\frac{Q_i}{Q_{баз}}$	–	1	1,073	1,005	1,046	1,024	1,073	1,059
0.2				–	1,105	1,046	1,096	1,065	1,105	1,098
0.1	Относительное общее сопротивление по газам РВП	$\frac{\Delta P_{г,1}}{\Delta P_{г,баз}}$	–	1	1,281	0,989	1,195	1,025	1,573	1,454
0.2				–	1,524	1,237	1,438	1,269	1,820	1,696
0.1	Относительная теплопередача: горячей части	$\frac{K_i^{г.ч}}{K_{баз}^{г.ч}}$	–	1	1,357	1,131	1,551	1,569	1,129	1,152
0.2				–	1,373	1,148	1,571	1,591	1,142	1,166
0.1	холодной части	$\frac{K_i^{х.ч}}{K_{баз}^{х.ч}}$	–	1	1,002	1,000	1,001	1,000	1,002	1,001
0.2				–	1,825	1,827	1,825	1,826	1,825	1,825
0.1	Температура уходящих газов	$t_{ух}$	°С	162,9	152,8	162,2	154,5	159,6	152,8	154,8
0.2				–	149,1	157,5	150,5	154,8	149,1	150,1
0.1	КПД котла	$\eta_{ка}$	%	92,066	92,601	92,102	92,514	92,242	92,601	92,494
0.2				–	92,799	92,350	92,726	92,495	92,799	92,745
0.1	Экономия топлива	dB	%/год	–	1188	80,4	996	392	1188	951
0.2				–	1624	632	1463	954	1624	1505
0.1	Экономия затрат на топливо	$dЗт$	тыс.руб./год	–	1943	131,5	1629	642	1943	1556
0.2				–	2657	1034	2394	1560	2657	2462

Просечные набивки с дистанционирующим листом треугольного профиля имеют очень небольшое увеличение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи при значительном росте сопротивления (рис. 1, 3 и табл.2). Но за счет большой удельной поверхности теплообмена они достаточно хорошо снижают температуру уходящих газов по сравнению с базовой набивкой 1.1. Следует отметить, что такие набивки ставятся только в РВП паровых котлов, работающих на газовом топливе, так как при сжигании высокосернистого мазута подвержены заносу. Если интенсифициру-



Рис. 3. Влияние типа набивок на относительное общее сопротивление РВП по газам

ется теплообмен в горячей части РВП, то это приводит к снижению тепловой нагрузки холодной части за счет уменьшения средней температуры продуктов сгорания.

Хорошо зарекомендовали себя волнистые набивки, которые отличаются между собой эквивалентными диаметрами, так как тип 2.0 имеет высоту дистанционирующего листа 9 мм, а тип 3.0 – 11 мм. Этот размер определяет скорости потоков воздуха и газов в каналах и влияет на теплообмен и аэродинамическое сопротивление.

Очевидно, увеличение высоты дистанционирующей и промежуточной волн на 1 мм у набивки 2.0 по сравнению с 1.0 является оптимальным, так как дальнейший рост высоты дистанционирующей волны у набивки 3.0 по сравнению с 2.0 приводит к уменьшению коэффициентов теплоотдачи (рис. 1) и повышению температуры уходящих газов (рис. 4).

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что только за счет оптимального профиля набивки горячей части можно повысить КПД па-

рового котла и получить экономию топлива до 1200 т/год (табл. 2).

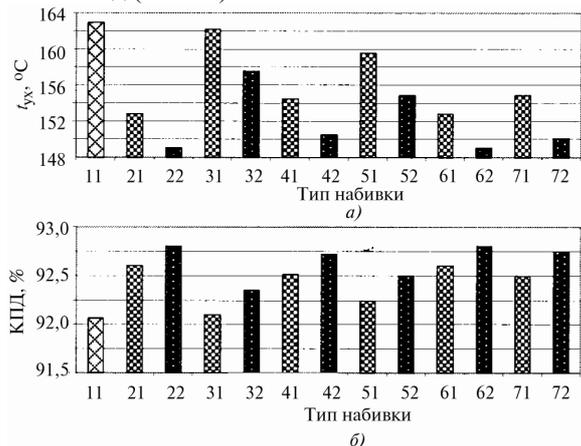


Рис. 4. Влияние типа набивок в РВП: а) на температуры уходящих газов; б) на КПД парового котла

Интенсификация теплообмена в холодной части РВП достигается заменой гладкой набивки 0.1 на интенсифицированную разреженную 0.2. Если такой профиль в горячем слое работает не очень эффективно (набивка 3.0), то в холодном слое её аналог (набивка 0.2) дает хороший эффект. Были проведены сравнительные расчеты всех типов набивок горячего слоя с набивкой 0.2. В результате, удельный теплосъем холодной части возрос во всех вариантах (2.2 – 7.2) примерно на 40 %, что привело к увеличению температуры воздуха на входе в горячую часть, что вызвало некоторое снижение удельного тепловосприятия горячего слоя $q^{г.ч}$, а общий удельный тепловой поток возрос незначительно, всего на 3,6 %. Сопротивление набивки 0.2 больше, чем 0.1, но общее сопротивление РВП повысилось пропорционально по всем вариантам всего на ~16 % (рис. 3). Интенсификация теплообмена в холодной части позволяет в большей степени снизить температуру уходящих газов и повысить КПД котла в целом (рис. 4). В результате этого снижается расход топлива на котел на 1187—1624 т/год, что может составить экономию на топливной составляющей эксплуатационных затрат до 2656 тыс. руб. в год (рис. 5, табл. 2).

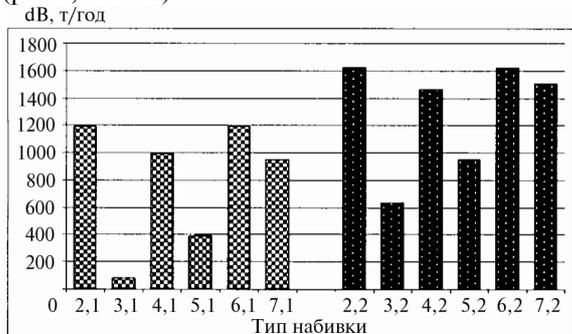


Рис. 5. Экономия топлива при разных типах набивок

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. В волнистых набивках большую роль в интенсификации теплообмена играет профиль и размеры дистанционирующего листа. Оптимальным является профиль 2.0.
2. У просечных набивок определяющим является влияние просечного листа, поэтому для снижения сопротивления можно выбирать набивку с несколько большим эквивалентным диаметром (набивка 5.0).
3. Для просечных набивок с дистанционирующим листом треугольного профиля характерен большой перепад давления из-за наименьших эквивалентных диаметров, но они дают хорошее снижение температуры уходящих газов благодаря большой удельной поверхности.
4. Совершенствование профиля набивок РВП за счет интенсификации теплообмена позволяет снизить температуру уходящих газов на 12–13 °С, что приводит к росту КПД парового котла в целом и экономии топлива до 1624 т/год.
5. Интенсификация теплообмена в холодной части путем установки набивки типа 0.2 позволяет дополнительно снизить температуру уходящих газов на 4–5 °С по сравнению с использованием гладкой набивки 0.1, что приводит к дополнительной экономии топлива 1,5 – 2 т/сутки.
6. Для мазутных котлов тепловых электростанций в горячей части оптимальным является использование волнистых набивок типа 2.0 или просечной типа 4.0, а в холодной – интенсифицированной разреженной набивки типа 0.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Марьина З.Г., Полосин А.В.** Обобщение результатов исследований теплоаэродинамических характеристик перфорированных набивок РВП // Тр.РНТК-3. М.: Изд-во МЭИ, 2002. Т.6. С.148-150.
2. **Марьина З.Г., Полосин А.В., Зайцев В.Г.** Эффективность современных типов набивок регенеративных воздухоподогревателей // Материалы III Междунар. НТК «Повышение эффективности теплообменных процессов и систем». Вологда, 2002. С. 131—137.
3. **Тепловой расчет котлов (Нормативный метод)**. изд. — 3-е, перераб. и дополн. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
4. **Боткачик И.А.** Регенеративные воздухоподогреватели котельных агрегатов. М.: Машиностроение, 1978. 175 с.
5. **Кунтыш В.Б., Бессонный А.Н. и др.** Примеры расчетов нестандартизованных эффективных теплообменников /Под ред. В.Б.Кунтыша, А.Н.Бессонного. СПб.: Недра, 2000. 300 с.