

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛОВ С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕМ С ПРЯМОЙ ПОДАЧЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В. В. Логвиненко, А. В. Калюжная

Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Выполнено расчетное исследование трубчатого низкотемпературного воздухоподогревателя традиционной компоновки с прямой подачей наружного воздуха при отрицательных температурах. Разработана модель поэлементного расчета такого воздухоподогревателя и выполнены расчеты температур газа, воздуха, стенки трубы со стороны газа, влагосодержания газов в каждом элементе. При одностороннем подводе холодного воздуха низкотемпературного воздухоподогревателя для котла. Для НТВ ППВ котла Е-75-3,8-350 ГМ при температуре наружного воздуха -20°C потери тепла составят 3,2%, КПД по низшей теплоте сгорания топлива 101,95%. Экономический эффект за отопительный период 219 дней может быть оценен в 14,3 млн. руб./год.

Ключевые слова: низкотемпературный воздухоподогреватель с прямой подачей холодного воздуха, конденсация водяных паров дымовых газов, расчетное исследование полей температур воздуха, газов, температуры стенки трубы, влагосодержания газа в трубчатом воздухоподогревателе, увеличение коэффициента полезного действия котла.

Для повышения коэффициента полезного действия котлов, работающих на природном газе, за котлами устанавливаются теплообменники-утилизаторы, причем как понижения температуры уходящих газов, так и для глубокого охлаждения газов с утилизацией теплоты водяных паров. Наиболее подробно исследованы контактные теплообменники, есть исследования и для регенеративных теплообменников, обзор работ приведен в [1-6]. Охлаждение дымовых газов осуществляется водой с низкой температурой. Как правило, такой воды на станциях немного, это, в основном подпиточная вода.

Одна из новых технологии, повышающая КПД котлов, – это конденсация водяных паров в дополнительном низкотемпературном воздухоподогревателе с прямой подачей наружного воздуха (далее в НТВ ППНВ) в том числе и в холодные периоды года. Такая возможность появилась с широким внедрением в конструкции теплообменников коррозионноустойчивых материалов, снимающих вопросы коррозии теплообменников. При использовании НТВ ППНВ решается и вопрос среды с низкой температурой. В работах [7-9] исследовались элементы НТВ ППНВ в пластинчатых воздухоподогревателях. Теоретически и на лабораторных установках, в том числе и непосредственно на станции, показана

на эффективность НТВ ППНВ. Установлено, что в промышленной установке при коэффициенте равновесности процесса конденсации водяных паров равно 0,8 можно получить количество тепла на подогрев холодного воздуха, эквивалентное 10...15% тепловой мощности котла [9]. Подобных исследований для ТВП традиционной конструкции не обнаружено.

Разработана математическая модель НТВ ППНВ, в том числе для режимов с отрицательными температурами воздуха на входе. Далее определены допущения математической модели и на этой базе разработана блок-схема расчета НТВ ППНВ. В программе «Поэлементный расчет НТВ ППНВ» выполнены поэлементные тепловые расчеты НТВ ППНВ с учетом конденсации водяных паров при охлаждении дымовых газов на примере котла Е-75-3,8-350 ГМ.

Как следует из приведенного обзора, конденсация водяных паров существенно повышает КПД котла и чем ниже температура среды, охлаждающей дымовые газы, тем большая часть водяных паров конденсируется, тем больше повышение КПД котла. Наиболее низкая температура среды, охлаждающей дымовые газы, в котле наблюдается в воздухоподогревателе, в зимний период она может теоретически достигать темпера-

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛОВ С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕМ С ПРЯМОЙ ПОДАЧЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

тур, например в Алтайском крае, до -40°C . В отопительный период средняя температура составляет $-7,8^{\circ}\text{C}$, среднегодовая – около 0°C . Поэтому холодный воздух является подходящей средой для конденсации водяных паров уходящих газов, как по температурному уровню, так и по используемым объемам среды. Соответственно, данная проблема является актуальной, но мало изученной.

Из-за большой сложности массообменных и теплообменных процессов в НТВ ППНВ расчетная модель разработана с целым рядом допущений. Основные из них: теплопередача от дымовых газов к воздуху рассчитывается по обычным зависимостям нормативного метода исходя из предположения о незначительном влиянии капелек конденсата на этот процесс; конденсат условно движется в газе, тепло и массообменном конденсата с газами пренебрегаем; конденсация водяных паров начинается при достижении температуры на стенке со стороны уходящих газов точки россы. Самое неизученное допущение – это что при достижении температуры на стенке со стороны уходящих газов точки россы температура уходящих газов остается постоянной и равной температуре точки россы, при этом вся теплота выделяется за счет конденсации водяных паров и приводит к уменьшению влагосодержания водных паров в уходящих газах. При определении влагосодержания и температуры точки россы на входе в расчетный элемент НТВ ППНВ вся теплота от газа к воздуху относится к уменьшению температуры газов при температуре стенки со стороны газа больше точки россы или к уменьшению влагосодержания газа при температуре стенки со стороны газа меньше точки россы. Указанные допущения значительно отличаются от процессов массо- и теплообмена в реальных НТВ, поэтому они рассчитаны на первых этапах только для оценки характеристик НТВ, требуются экспериментальные исследования на моделях и опытных образцах.

Расчетная модель НТВ приведена на рисунке 1. Выделены по 10 рядов (слоев) по высоте, ширине и глубине НТВ, модель содержит 1000 расчетных элементов. Однако в слоях по глубине НТВ параметры будут одинаковыми и расчеты проводились по 100 элементам.

Блок-схема расчетной модели для расчетного блока ТНТ приведена рисунке 2. В ней реализован подход: в зависимости от температуры точки россы на входе в элемент вся теплопередача от газа к воздуху относит-

ся к уменьшению температуры газов при температуре стенки со стороны газа больше точки россы или к уменьшению влагосодержания газа при температуре стенки со стороны газа меньше точки россы. По разработанной программе «Поэлементный расчет НТВ ППНВ» выполнены расчеты температур газа, воздуха, стенки трубы со стороны газа для НТВ ППНВ котла Е-75-3,8-350 ГМ. Результаты расчета температурных полей газа приведены в таблице 1.

По объему НТВ температура газов в перекрестном НТВ ППНВ неравномерная, наибольшая в левом верхнем элементе (124°C), минимальная – в правом нижнем элементе (66°C). Кроме этого принятые допущения обусловили отступления от монотонности распределения температуры газов в ряде по ходу газов. Например, во втором ряду по ходу газов температура газов монотонно уменьшается от 119°C до 113°C в 4 ряде по воздуху.

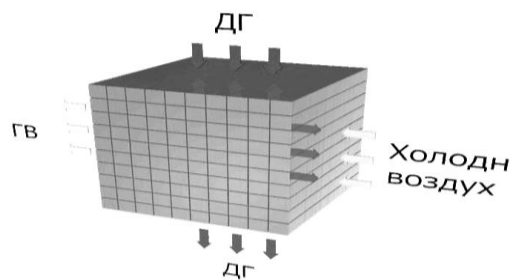


Рисунок 1 – Схема НТВ с 10 слоями по высоте, ширине и глубине, с направлениями движения газа и односторонним подводом воздуха

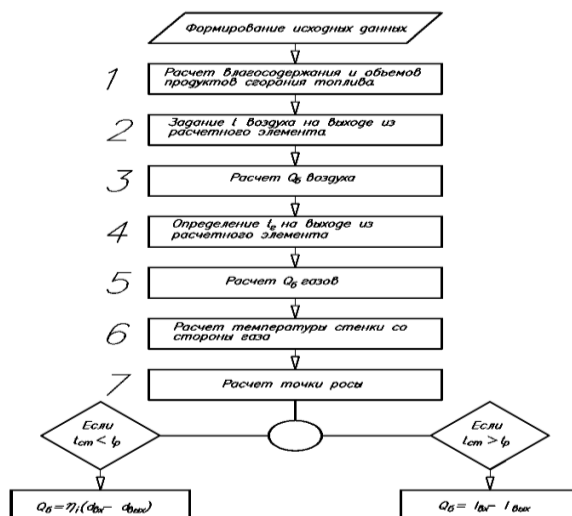


Рисунок 2 – Алгоритм расчетов НТВ ППНВ

Таблица 1 – Температуры уходящих газов при отрицательной температуре воздуха на входе -20°C и одностороннем подводе воздуха

Ряды по ходу воздуха										г а з
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
124	123	123	122	122	121	120	120	119	118	1
120	119	118	117	116	114	113	120	119	117	2
116	115	114	112	110	108	113	111	110	108	3
113	111	109	107	105	108	106	103	110	108	4
109	107	105	102	105	102	106	103	101	98	5
105	103	100	102	99	102	99	96	93	89	6
101	98	100	97	99	96	92	88	86	81	7
98,0	98	95	97	93	89	92	81	79	73	8
94,3	94	91	97	87	89	85	81	79	73	9
94	94	86	92	87	83	79	75	72	66	10

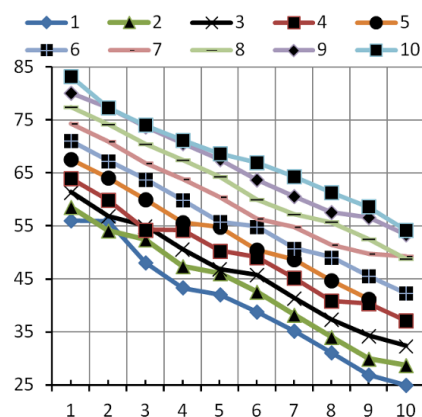


Рисунок 3 – Средняя температура воздуха в элементах НТВ

Таблица 2 – Влажностное содержание продуктов сгорания (d) на выходе из расчетного элемента при отрицательной температуре воздуха на входе -20°C

Ряды по ходу воздуха									
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Влажностное содержание продуктов сгорания (d) на выходе из расчетного элемента, кг/кг с.г., двх. = 0,139 кг/кг.с.г.									
0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,0139	0,174
0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,085	0,109	0,074
0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,091	0,085	0,081	0,074
0,139	0,139	0,139	0,139	0,139	0,095	0,091	0,085	0,028	0,022
0,139	0,139	0,139	0,139	0,100	0,095	0,045	0,037	0,028	0,022
0,139	0,139	0,139	0,101	0,100	0,063	0,045	0,037	0,028	0,022
0,139	0,139	0,104	0,101	0,061	0,053	0,045	0,037	0,028	0,022
0,106	0,104	0,064	0,064	0,061	0,053	0,045	0,037	0,028	0,022
0,139	0,106	0,069	0,064	0,061	0,015	0,045			
	0,073	0,069	0,064	0,026	0,015	0,007			

А в соседнем элементе (3-ий ряд по воздуху), температура 120°C , что связано с принятой моделью, когда температура стенки со стороны газа опустилась до точки россы и вся теплопередача от газа к воздуху относится к уменьшению влажностного содержания газа. Результаты расчета температуры воздуха приведены на рисунке 3.

Здесь так же отслеживаются элементы только с конденсацией водяных паров или только с охлаждением дымовых газов. Профили не монотонны. Результаты расчета влажностного содержания в расчетных элементах НТВ газа приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, входное влажностное содержание дымовых газов двх. = 0,139 кг/кг.с.г. сохраняется во всех элементах верхнего ряда, за исключением крайнего правого элемента. В нем уже достигается температура стенки трубы со стороны газа ниже точки россы. В элементе (вторые ряды по ходу газа и воздуха) так же происходит конденсация водяных паров, причем больше, чем в соседнем элементе (второй ряд по ходу газа и тре-

тий ряд по ходу воздуха). Что касается левого 10-го ряда, то здесь конденсация будет наблюдаться только в 10-ом ряду по ходу газа.

Следует так же обратить внимание, что из-за принятой поэлементной модели расчета и отнесения теплопередачи или на конденсацию водяных паров или на охлаждение газов, наблюдаются разрывы процесса конденсации по элементам рядов по ходу газов. Это обусловлено относительно малым числом рядов по ходу газа и отнесением теплопередачи или только на конденсацию, или только на охлаждение газов.

В дальнейшем следует ввести коэффициент коэффициенты равновесности процесса конденсации водяных паров, тогда уменьшение влажностного содержания будет происходить плавно, а не ступенчато, как сейчас.

Так же следует отметить большую неравномерность конденсации по объему НТВ, которая, как раз, и обусловлена неравномерностью температуры стенки со стороны газа.

В таблице 2 хорошо видно, в каких расчетных элементах происходит конденсация, а

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛОВ С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕМ С ПРЯМОЙ ПОДАЧЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

так же что влагосодержание газа снизилось с 0,139 кг/кг.с.г до 0,0254 кг/кг.с.г, сконденсировалось 82% водяных паров в газах.

Хорошо происходит конденсация в двух диагоналях расчетных элементов, не работают и нижние правые элементы. В верхних левых элементах температура стенки трубы со стороны газа выше температуры точки россы и не происходит конденсация водяных паров. В нижних левых элементах все (или почти все) водяные пары уже сконденсировались и, соответственно, температура стенки трубы со стороны газа выше температуры точки россы и так же не происходит конденсация водяных паров

Температура точки россы определялась по [6] при изменении коэффициента избытка воздуха α_{yx} от 1,0 до 2,0

$$t_p = 37,1 \cdot \lg[d / (3,77 + 0,085 \cdot \alpha_{yx})] \text{ } ^\circ\text{C},$$

где – d- влагосодержание дымовых газов, α_{yx} – коэффициент избытка воздуха.

На рисунке 4 приведена зависимость КПД котла Е-75-3,8-350 ГМ от температуры наружного воздуха. При увеличении температуры наружного воздуха с -20°C до $+5^\circ\text{C}$ КПД котла уменьшается с 101,95% до 96,5% по низшей теплотворной способности газа. Таким образом, установка НТП ППНВ повышает всегда КПД котла, но особенно сильно при низких температурах наружного воздуха. На рисунке 5 приведена зависимость количества сконденсированной воды от температуры наружного воздуха.

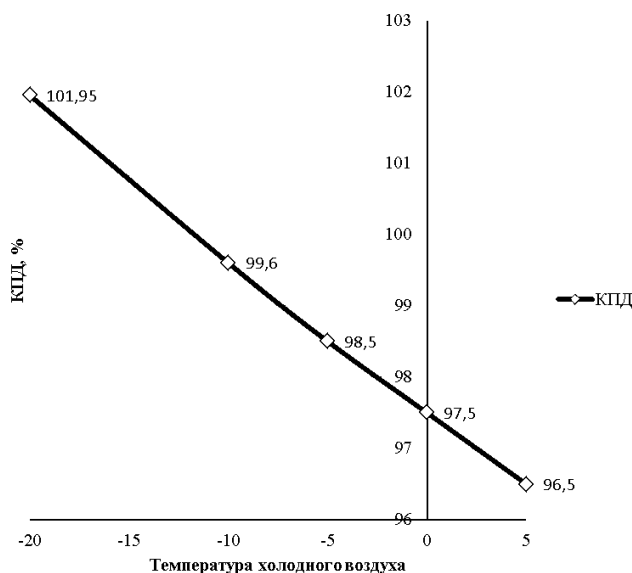


Рисунок 4 – Изменение КПД котла в зависимости от температуры наружного воздуха



Рисунок 5 – Количество сконденсированной воды от температуры наружного воздуха

При увеличении температуры наружного воздуха с -20°C до $+5^{\circ}\text{C}$ количество сконденсированной в НТВ ППНВ воды уменьшается с 8 т/ч до 2,6 т/ч. Эту воду можно после обработки использовать в контурах котельной для ее подпитки.

Проведенные расчеты показывают, что в периоды с нулевой или отрицательной температурой наружного воздуха, в НТВ ППНВ появляется возможность использовать скрытую теплоту паров воды в дымовых газах, существенно повысить КПД котла.

Расчеты на примере котла Е-75-3,8-350 ГМ показали, что потери тепла с уходящими газами при односторонне подводе холодного воздуха: $q_2 = 3,2\%$, КПД системы по низшей теплоте сгорания топлива $\eta = 101,95\%$.

КПД котла повышается с 94,2% без НТВ ППНВ до 101,95%, т.е. на 7,75% при устройстве НТВ ППНВ при прочих равных условиях.

В таком варианте расход природного газа уменьшается с 5849 м³/ч до 5395,7 м³/ч, то есть на 453,3 м³/ч или на 2 382 532 м³/год. При этом сократятся выбросы вредных веществ. Экономический эффект от применения НТВ ППНВ может быть оценен в 14,3 млн. руб./год.

Применение низкотемпературного воздухоподогревателя с прямой подачей наружного воздуха при современном состоянии производства коррозионноустойчивых теплообменников может существенно повысить КПД и эффективность котлов на газовом топливе в системах теплоснабжения, где как раз большая мощность котлов требуется при низких температурах наружного воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фиалко, Н. М. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа / Н.М. Фиалко, Ю.В. Шеренковский, А. И. Степанова, Р. А. Навродская, П. К. Голубинский, М. А. Новаковский. // Промышленная теплотехника. – 2008. – №3. – С. 68-76.
2. Кудинов, А. А. Энергосбережение в газифицированных котельных установках путем глубокого охлаждения продуктов сгорания / А. А. Кудинов, В. А. Антонов, Ю. Н. Алексеев // Теплоэнергетика. – 2000. – № 1. – С. 59-61.
3. Семенюк, Л. Г. Получение конденсата при глубоком охлаждении продуктов сгорания / Л. Г.

Семенюк, // Промышленная энергетика. – 1987. – № 8. – С. 47-50.

4. Соснин, Ю.П. Высокоэффективные газовые контактные водонагреватели / Ю. П. Соснин, Е. Н. Бухаркин. – М.: Стройиздат, 1988. – 376 с.

5. Климов, Г.М. Повышение эффективности использования природного газа / Г. М. Климов, // Промышленная энергетика. – 1975. – № 8. – С. 20-22.

6. Аронов, И. З., Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И. З. Аронов. – Л.: Недра. Ленинградское отделение. – 1990. – 280 с.

7. Елсуков, В. К. Оценка эффективности технологий утилизации энергии уходящих газов котлов, включающей теплоту конденсации водяных паров / В. К. Елсуков // Системы, методы, технологии: Братский государственный университет. – 2014. – № 1(21).

8. Беспалов, В. В.. Технологии глубокой утилизации тепла дымовых газов [Электронный ресурс] / В. В. Беспалов // Энергетика Татарстана. – 2015. – № 2 (38). – С. 32-36. – Загл. с экрана. – Доступ по договору с организацией-держателем ресурса. – Свободный доступ из сети Интернет. Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23805296>; http://www.tatgencom.ru/netcat_files/gencom/download/magazine-38-2015.pdf#page=38.

9. Беспалов, В. В.. Технология осушения дымовых газов ТЭС с использованием теплоты конденсации водяных паров [Электронный ресурс] / В. В. Беспалов, В. И. Беспалов // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ] / Томский политехнический университет (ТПУ). – 2010. – Т. 316. – № 4: Энергетика. – С. 56-59. – Заглавие с титульного листа. – Электрон. версия печатной публикации. – Свободный доступ из сети Интернет. – Adobe Reader. Режим доступа: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2010/v316/i4/12.pdf.

10. Рекуператоры нового поколения, производства «Термо Северный Поток»: http://www.recuperator-termo.ru/article_rekuperatory_novogo_pokoleniya.php1.

Логвиненко В.В. – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: logvinvv@mail.ru.

Калюжная А.В. – магистрант ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: Kalugnaya_AV@tkz.power-m.ru.