

УДК 62-681

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ НАСЫЩЕННОГО ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА К ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКЕ ТЕПЛООБМЕННИКА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ

Беспалов Виктор Владимирович¹,
vic@tpu.ru

Туболев Александр Анатольевич¹,
tubolev@tpu.ru

Галашов Николай Никитович¹,
gal@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования определяется необходимостью применения универсальной методики конструкторского расчета при проектировании установок глубокой утилизации тепла в системах вентиляции или отведения дымовых газов газовых котлов. Использование теплоутилизаторов значительно повышает КПД котла. Наиболее проблемной задачей является определение коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности теплообмена при конденсации водяных паров, который влияет на ее площадь. Проведение экспериментальных исследований рассматриваемого процесса необходимо для совершенствования методик расчета в различных диапазонах изменения параметров парогазовой смеси.

Целью настоящего исследования является получение критериального уравнения подобия для вычисления коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности теплообмена при конденсации водяных паров в определенном диапазоне изменения параметров смеси.

Объекты: теплообменный аппарат поверхностного типа (конденсатор), парогазовая смесь, парогенератор.

Методы: энергетический баланс, конструкторский расчет теплообменного аппарата, термодинамика, теплопередача, метод подобия, метод анализа размерностей, эксперименты по теплопередаче, анализ погрешности.

Результаты. Проведены экспериментальные исследования процесса теплообмена при конденсации водяных паров из газовой смеси на лабораторной установке, и выполнена обработка результатов с оценкой погрешности измерений и вычислений. На основе теории подобия получено критериальное уравнение для вычисления коэффициента теплоотдачи от паровоздушной смеси к поверхности теплообмена в определенном диапазоне изменения критериев. Отклонение вычисленных коэффициентов теплоотдачи от полученных экспериментально не превысило 13 % при разных направлениях движения потока парогазовой смеси. Критериальное уравнение может быть использовано при проектировании теплообменных аппаратов, предназначенных для утилизации теплоты.

Ключевые слова:

Конденсатор, утилизация теплоты, парогазовая смесь, критериальное уравнение, коэффициент теплоотдачи, конденсация паров.

Введение

Экспериментальное исследование тепло-массообмена при конденсации водяных паров из газовой смеси представляет определенный теоретический и практический интерес [1, 2]. Такой процесс происходит в конденсационных котлах малой мощности [3], а также в контактных [4] и поверхностных теплообменных аппаратах, предназначенных для утилизации теплоты в системах вентиляции или отведения дымовых газов газовых котлов [5]. Актуальность полезного использования теплоты уходящих газов обусловлена тем, что это основная доля потеря тепла и ее снижение напрямую влияет на расход топлива и, как следствие, на уменьшение углеводородного следа [6]. Определение коэффициента теплопередачи – одна из задач конструкторского расчета проектируемых теплообменных аппаратов. В научных трудах можно выделить два основных подхода к решению подобных задач. Первый подход основан на построении классической математической модели процесса [7–11] и решении системы дифференциальных уравнений численными методами с применением универсального или специализированного программного обеспечения [12].

Второй подход основан на теории подобия и предполагает использование в расчетах критериальных уравнений [13]. В работе [14] предлагается использовать известные соотношения расчета коэффициента теплоотдачи для сухой паровоздушной смеси без конденсации и поправочный коэффициент, зависящий от объемной доли водяного пара.

Такой подход имеет как преимущества, так и недостатки. Основным преимуществом является простота и универсальность использования соответствующего критериального уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи при конструировании теплообменников. К недостаткам такой методики можно отнести достаточно узкие диапазоны изменения критериев уравнений, определяемые, как правило, по результатам обработки экспериментальных данных.

В лабораторных условиях вместо влажных дымовых газов целесообразно использовать паровоздушную смесь [15]. При переходе к дымовым газам требуется только пересчет значений их влагосодержания, который может быть вычислен согласно соотношению, полученному в публикации [16]. Подобные

лабораторные исследования проводились для конденсации на вертикальной пластине и горизонтальных трубках [17], однако с другими целями эксперимента. Опубликованы исследования конденсации внутри трубок [18, 19] и на вертикальных решетках [20] контактного конденсационного теплообменного аппарата.

Целью экспериментального исследования является получение критериального уравнения для вычисления коэффициента теплоотдачи в вертикальном канале прямоугольного сечения от парогазовой смеси к поверхности теплообмена при конденсации водяных паров в определенном диапазоне изменения параметров смеси.

Методика экспериментального исследования

Эксперименты проводились на лабораторной установке (рис. 1), состоящей из конденсатора С, электрического парогенератора SG, смесителя М, трубы Вентури Т для измерения скорости потока и электрического нагревателя воздуха Н.

Аналогичные исследования [21] проводились автором статьи в работе [22]. Геометрия канала конденсатора была обусловлена конструкцией предложенного теплоутилизатора. Экспериментальных исследований конденсации водяных паров в вертикальном канале прямоугольного сечения в научных публикациях найдено не было, что явилось причиной проведения экспериментов для уточнения методики расчета коэффициента теплоотдачи. В последующем были выявлены ряд недостатков в методике проведения эксперимента. Основным из них было наличие сухой зоны в конденсаторе в следствии того, что температура паровоздушной смеси в ряде случаев была выше точки росы содержащихся в ней водяных паров, а в ряде случаев смесь была переохлажденной с образованием тумана. В общем случае полученное критериальное уравнение адекватно отражало происходящий процесс, однако требовалось проведение дополнительных экспериментов с соблюдением новых требований.

Для проведения экспериментального исследования были установлены определенные требования.

1. Скорость потока паровоздушной смеси должна меняться в диапазоне 2,5–4 м/с. Меньшая скорость существенно снижает эффективность теплообмена в теплоутилизаторе, а большая может привести к отрыву образовавшейся пленки конденсата в канале при движении смеси снизу вверх.
2. Для каждого значения скорости потока должно меняться влагосодержание смеси в диапазоне 0,02–0,1 кг/кг с.г. (килограмм на килограмм сухих газов). Как отмечалось выше, увлажненным воздухом моделируются дымовые газы от сгорания природного газа, которые имеют аналогичный диапазон влагосодержания.
3. Для каждого измеряемого режима паровоздушная смесь должна на входе в конденсатор иметь температуру точки росы водяных паров (относительная влажность 100 %), но без начала объемной конденсации (образования тумана). Процесс конденсации должен начинаться на стенках канала конденсатора по всей его поверхности. Именно

такой режим работы теплоутилизатора обеспечивает наиболее эффективное использование поверхности теплообмена.

4. Стенка канала должна иметь постоянную температуру по всей поверхности охлаждения, что значительно упрощает обработку результатов и снижает косвенную погрешность вычислений.

С целью обеспечения требования 1 воздух подавался в установку при помощи нескольких последовательно установленных канальных вентиляторов. Включались 1, 2, 3 и в одной из серий опытов 4 вентилятора. Скорость потока рассчитывалась двумя способами: по измеряемому динамическому давлению в суженной части и по разнице статических давлений в широкой и узкой части трубы Вентури. Измерения проводились при помощи дифференциального микроманометра МКВ-250-0,02 (класс точности 0,02). Для измерения динамического давления использовалась вмонтированная трубка Пито. Относительная косвенная погрешность вычисления скорости воздуха при малых ее значениях составила 10 %.

Влагосодержание исходного воздуха d_0 оценивалось по показаниям сухого и мокрого термометра психрометрическим методом согласно ГОСТ 8.524-85. Относительная погрешность измерения температур составила 0,2 % (цена деления термометров 0,2 °С). Относительная косвенная погрешность вычисления влагосодержания исходного воздуха составила 2,8 %.

Для увлажнения воздуха использовался электрический парогенератор SG с подводом пара в смеситель М. Массовый расход пара, подмешанного к воздуху, определялся количеством испаренной воды из соотношения $Gp = U \cdot I \cdot R \cdot \eta$ (кг/с), где U , I – показания вольтметра и амперметра (класс точности 1,5), R – удельная теплота парообразования (Дж/кг), η – КПД. Мощность парогенератора регулировалась с помощью реостата, при этом учитывалось изменение его КПД. Относительная погрешность измерений расхода испаренной воды оценивается в 2,5 %.

Процесс подмеса водяных паров к воздуху имеет важную особенность. Температура воздуха должна быть не ниже определенного значения t_h . При этом после подмеса пара температура смеси будет выше или равной температуре точки росы водяных паров. Вычислить температуру t_h можно из уравнений теплового баланса для смешения потока воздуха и пара. Подробнее этот вопрос рассматривался в публикации [15]. Исходя из вышесказанного перед смесителем воздух нагревался в электрическом воздухонагревателе Н до необходимой температуры. Измерение температуры смеси при помощи сухого и мокрого термометра (погрешность измерения 0,5 °С) показало их близкие значения к температуре точки росы водяных паров при текущем влагосодержании, что обусловило выполнение третьего требования проведения экспериментов. Относительная косвенная погрешность вычисления начального влагосодержания паровоздушной смеси d_0 оценивается в 9 %. Скорость смеси w непосредственно в канале конденсатора вычислялась отношением объемного расхода к площади поперечного сечения канала.

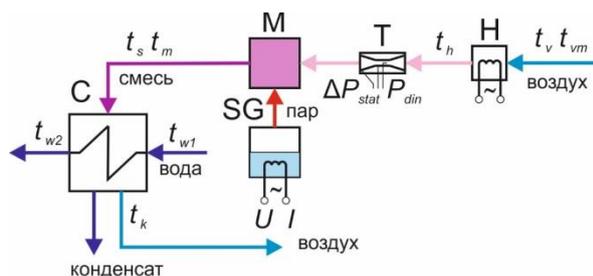


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Fig. 1. Scheme of the laboratory setup

Конденсатор выполнен в виде канала длиной 1 м прямоугольного сечения 2 на 10 см. Эквивалентный диаметр канала 0,033 м, площадь теплообмена 0,24 м². Стенки канала, выполненные из стального оцинкованного листа толщиной 0,5 мм, интенсивно охлаждались водой с температурой 10 °С. Расход воды обеспечивал ее турбулентное движение, при этом температура воды на входе t_{w1} и выходе из конденсатора t_{w2} была одинаковой, что позволяет считать стенки канала изотермическими, так как термическое сопротивление стенки пренебрежительно мало. В этом случае коэффициент теплоотдачи от смеси к поверхности стенки канала α можно считать равным общему коэффициенту теплопередачи от смеси к воде. Конденсация водяных паров происходила на всей поверхности теплообмена. Конечное влагосодержание смеси d_k вычислялось по показаниям термометра, установленного на выхлопе, так как в процессе конденсации водяных паров смесь имеет температуру точки росы t_k . Большая часть конденсата стекала в емкость сбора конденсата, однако оставшая его часть уносилась потоком в окружающую среду.

Таким образом были выполнены поставленные условия эксперимента. Все измерения проводились после стабилизации параметров каждого режима. Результаты экспериментов и расчетные величины параметров процесса теплообмена при конденсации водяных паров для одного включенного вентилятора и вертикальном движении смеси снизу вверх приведены в табл. 1. Как видно по результатам расчетов, скорость потока в канале немного увеличивалась при добавлении пара к воздуху.

Таблица 1. Результаты экспериментов при включении одного вентилятора

Table 1. Experimental results with one fan on

Скорость смеси в канале, w , м/с Mixture velocity in the channel, w , m/s	2,6	2,6	2,9	3,1
Входная температура смеси, t_s , °С Mixture inlet temperature t_s , °C	30,3	40,7	47,1	53,7
Входное влагосодержание d_s , кг/кг с.г. Input moisture content d_s , kg/kg d.g.	0,028	0,051	0,073	0,107
Выходная температура смеси t_k , °С Mixture outlet temperature t_k , °C	21,4	28	33	38,5
Выходное влагосодержание d_k , кг/кг с.г. Output moisture content d_k , kg/kg d.g.	0,016	0,024	0,032	0,045
Тепловая мощность конденсатора Q , Вт Condenser thermal power Q , W	206	415	621	886
Коэффициент теплоотдачи от смеси к поверхности теплообмена α , Вт/(м ² ·К) Heat transfer coefficient from the mixture to the heat exchange surface α , W/(m ² ·K)	96	136	184	243

Аналогично были получены результаты при других скоростях смеси включением большего числа вентиляторов. Результаты экспериментов отмечены точками (рис. 2). По анализу результатов видно, что коэффициент теплоотдачи от смеси к стенке зависит как от скорости потока, так и от влагосодержания смеси.

Обработка результатов эксперимента

В инженерных расчетах при проектировании теплообменных аппаратов для определения коэффициентов теплоотдачи принято использовать критериальные уравнения, основанные на теории подобия. Обработка результатов эксперимента проведена с целью получения критериального уравнения в исследуемом диапазоне изменения параметров паровоздушной смеси при конденсации водяных паров.

При таком теплообмене коэффициент теплоотдачи α является функцией нескольких физических величин

$$\alpha = f(w, D, c, \lambda, \rho, \nu, W),$$

где w , м/с – скорость потока смеси в канале; D , м – эквивалентный диаметр канала; $W = G_k/F$, кг/(м²·с) – плотность орошения поверхности теплообмена водяными парами, где G_k , кг/с – расход конденсата; F , м² – площадь теплообмена. Параметры паровоздушной смеси: c , Дж/(кг·К) – теплоемкость; λ , Вт/(м·К) – теплопроводность; ρ , кг/м³ – плотность; ν , м²/с – кинематическая вязкость; μ , Па·с – динамическая вязкость; a , м²/с – температуропроводность.

Критериальное уравнение подобия выглядит следующим образом

$$Nu = A \cdot Re^{m1} \cdot Pr^{m2} \cdot K^{m3}. \quad (1)$$

Безразмерные критерии определяются по методу анализа размерностей.

$$\text{Критерий Нуссельта } Nu = \alpha \cdot D / \lambda;$$

$$\text{Критерий Рейнольдса } Re = w \cdot D / \nu;$$

$$\text{Критерий Прандтля } Pr = \nu / a;$$

$$\text{Критерий орошения } K = W \cdot D / \mu.$$

По результатам экспериментов и табличным данным теплофизических свойств паровоздушной смеси вычислялись значения критериев.

Методика определения показателей степени $m1$, $m2$, $m3$ и коэффициента A описана в [23]. Для нахождения показателя $m1$ уравнение (1) преобразовано логарифмированием к следующему виду

$$\lg(Nu) = \lg(A \cdot Pr^{m2} \cdot K^{m3}) + m1 \cdot \lg(Re)$$

$$\text{или } Y = C1 + m1 \cdot X,$$

где $Y = \lg(Nu)$, $X = \lg(Re)$ и $C1 = \lg(A \cdot Pr^{m2} \cdot K^{m3})$.

По результатам экспериментов (табл. 2) определялось значение показателя $m1$ как тангенс угла наклона прямой $Y = C1 + m1 \cdot X$ к оси абсцисс.

$$m1 = (Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1) = (2,295 - 2,272) / (3,831 - 3,788) = 0,55.$$

Усреднив значения показателя $m1$, вычисленные для других значений критерия орошения K , было принято $m1 = 0,6$.

Для нахождения показателя $m3$ уравнение (1) преобразовано к следующему виду

$$\text{Nu}/\text{Re}^{m_1} = (A \cdot \text{Pr}^{m_2}) \cdot K^{m_3}, \lg(\text{Nu}/\text{Re}^{m_1}) = \lg(A \cdot \text{Pr}^{m_2}) + m_3 \cdot \lg(K),$$

$$J = C_3 + m_3 \cdot I,$$

где $J = \lg(\text{Nu}/\text{Re}^{m_1})$, $I = \lg(K)$ и $C_3 = \lg(A \cdot \text{Pr}^{m_2})$.

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные данные для нахождения m_1 при критерии орошения $K=0,8 \pm 0,1$

Table 2. Experimental and calculated data for finding m_1 with irrigation criterion $K=0,8 \pm 0,1$

Скорость паровоздушной смеси w , м/с / Vapor-air mixture velocity w , m/s	2,7	3,5	3,9	5,1
Средняя температура смеси, °С / Average mixture temperature, °С	34	30	29	29
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К) / Heat transfer coefficient α , W/(m ² ·K)	136	152	160	167
Re	4580	6143	6778	8866
Nu	165	187	197	206
Pr	0,687	0,695	0,695	0,693
X , $\lg(\text{Re})$	3,661	3,788	3,731	3,948
Y , $\lg(\text{Nu})$	2,218	2,272	2,295	2,314

По результатам экспериментов (табл. 3) определялось значение показателя m_3 как тангенс угла наклона прямой $J=C_3+m_3 \cdot I$ к оси абсцисс.

Таблица 3. Экспериментальные и расчетные данные для нахождения m_3 при скорости потока паровоздушной смеси $w=3,9 \pm 0,1$ м/с

Table 3. Experimental and calculated data for finding m_3 at the flow rate of the vapor-air mixture $w=3,9 \pm 0,1$ m/s

Плотность орошения W , г/(м ² ·с) / Irrigation density W , g/(m ² ·s)	0,276	0,496	0,771	1,191
Средняя температура смеси / Average mixture temperature, °С	24	29	34	41
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К) / Heat transfer coefficient α , W/(m ² ·K)	133	160	198	258
Re	6705	6778	6803	6978
Nu	167	197	241	309
Pr	0,7	0,695	0,689	0,683
Критерий орошения K / Irrigation criterion K	0,414	0,750	1,177	1,842
J , $\lg(\text{Nu}/\text{Re}^{m_1})$	-0,0742	-0,0032	0,0830	0,1837
I , $\lg(K)$	-0,3825	-0,1247	0,0708	0,2653

$$m_3 = (J_2 - J_1) / (I_2 - I_1) = (0,1837 + 0,0032) / (0,2653 + 0,1247) = 0,479.$$

Усреднив значения показателя m_3 , вычисленные для других значений скорости потока, было принято $m_3=0,47$.

Показатель степени при слабо меняющемся в исследуемых диапазонах температур критерии Прандтля m_2 принят равным 2/3. Целесообразность выбора такого показателя при этом критерии поясняется в примененной методике [23].

Для определения последнего коэффициента A в уравнение (1) подставлены значения критериев из табл. 2, 3, принятые выше показатели и выражен искомым коэффициент.

$$A = \text{Nu} / (\text{Re}^{0,6} \cdot \text{Pr}^{2/3} \cdot K^{0,47}) = 309 / (6778^{0,6} \cdot 0,7^{2/3} \cdot 1,842^{0,47}) = 1,44.$$

Коэффициент A принимает значения от 1,3 до 1,6 при подстановке разных значений плотности орошения и скорости потока паровоздушной смеси, взятых

за основу расчета показателей степеней критериев. Принято усредненное значение $A=1,47$.

Критериальное уравнение (1) приобрело окончательный вид

$$\text{Nu} = 1,47 \cdot \text{Re}^{0,6} \cdot \text{Pr}^{2/3} \cdot K^{0,47}. \quad (2)$$

Уравнение получено при $4580 \leq \text{Re} \leq 9000$; $0,4 \leq K \leq 2,2$; $0,67 \leq \text{Pr} \leq 0,71$.

По значению критерия Нуссельта вычисляется коэффициент теплоотдачи $\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda / D$.

На рис. 2 приведено сравнение значений коэффициента теплоотдачи α , полученных экспериментально (отмечены точками), с зависимостью $\alpha = f(w, d_s)$ на основе полученного критериального уравнения (2).

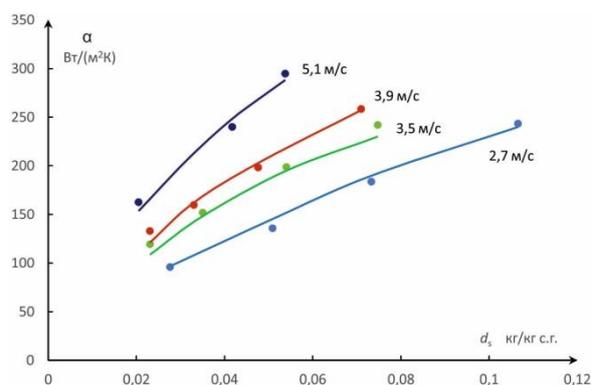


Рис. 2. Сравнение экспериментальных точек с полученной зависимостью при движении смеси снизу вверх

Fig. 2. Comparison of experimental points with the obtained dependence when the mixture moves from bottom to top

Погрешность в исследуемом диапазоне параметров не превышает 10 %.

Далее были проведены аналогичные серии экспериментов при вертикальном движении смеси сверху вниз и проверка соответствия значениям, вычисленным по тому же критериальному уравнению. Результаты сравнения приведены на рис. 3. При смене направления потока полученное критериальное уравнение также применимо. Погрешность не превысила 13 %.

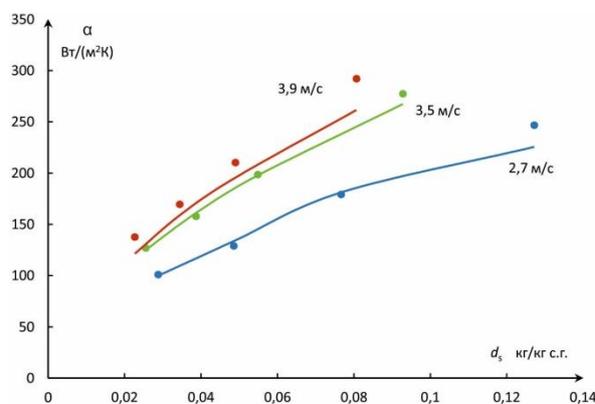


Рис. 3. Сравнение экспериментальных точек с полученной зависимостью при движении смеси сверху вниз

Fig. 3. Comparison of experimental points with the obtained dependence when the mixture moves from top to bottom

Заключение

На основе анализа предыдущих экспериментальных исследований процесса теплообмена при конденсации водяных паров из газовой смеси на лабораторной установке были сформулированы требования для проведения новой серии экспериментов. Проведены эксперименты с соблюдением поставленных требований, и выполнена обработка результатов с оценкой погрешности измерений и вычислений. На основе теории подобия получено критериальное уравнение в определенном диапазоне изменения критериев для вычисления коэффициента теплоотдачи от паровоз-

душной смеси к поверхности теплообмена. Проверка адекватности применения критериального уравнения путем сравнения вычисленных коэффициентов теплоотдачи с полученными экспериментально показала отклонение, не превышающее 13 %, при разных направлениях движения потока парогазовой смеси.

Полученное критериальное уравнение может быть использовано для определения коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности теплообмена с конденсацией водяных паров в определенном диапазоне изменения параметров смеси при проектировании теплообменных аппаратов, предназначенных для утилизации теплоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирюхина Н.В., Серезкин Л.Н. Обзор экспериментальных и теоретических исследований процессов тепло- и массообмена при конденсации пара из парогазовой смеси с неконденсирующимися примесями // Вестник Калужского университета. – 2018. – № 2. – С. 62–67. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35111172> (дата обращения 15.05.2022).
2. Huang J., Zhang J., Wang L. Review of vapor condensation heat and mass transfer in the presence of non-condensable gas // Applied Thermal Engineering. – 2015. – V. 89. – P. 469–484. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115005943> (дата обращения 15.05.2022).
3. In situ study on the condensate latent heat recovery and its economic impact in the case of a 60 kW condensing boilers system / D.T. Bălănescu, V.M. Homutescu, G. Ianuș, A. Popescu // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 997 [012139]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/997/1/012139> (дата обращения 15.05.2022).
4. Innovative system for heat recovery and combustion gas cleaning / P. Ziembicki, J. Kozioł, J. Bernasinski, I. Nowogonski // Energies. – 2019. – V. 12 [4255]. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/22/4255> (дата обращения 15.05.2022).
5. Ziganshina S.K., Kudinov A.A. Preheating boiler blast air with exhaust gases in cooling them below the dew point // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – V. 92. – № 5. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10891-019-02029-y> (дата обращения 15.05.2022).
6. Беспалов В.В., Беспалов В.И., Мельников Д.В. Исследование и оптимизация глубины утилизации тепла дымовых газов в поверхностных теплообменниках // Теплоэнергетика. – 2017. – № 9. – С. 64–70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?doi=10.1134/S0040363617090028> (дата обращения 15.05.2022).
7. Математическое и физическое моделирование пленочной конденсации в пластинчатых теплообменниках / Ф.Г. Ахмадиев, Р.М. Гильфанов, М.И. Фарахов, А.А. Ахмитшин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2020. – Т. 5. – С. 25–30. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42820063> (дата обращения 15.05.2022).
8. Цыганков А.В., Алешин А.Е. Моделирование процессов конденсации и испарения в канале регенеративного теплоутилизатора // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ. Сборник трудов III Международной научно-технической конференции. – 2015. – С. 168–174. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29311210> (дата обращения 15.05.2022).
9. Цыганков А.В., Алешин А.Е. Моделирование процессов конденсации и испарения в канале регенеративного теплоутилизатора // Вестник Международной академии холода. – 2016. – № 1. – С. 82–85. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25941093> (дата обращения 15.05.2022).
10. Артемов В.И., Минко К.Б., Яньков Г.Г. Модель конденсации пара из парогазовой смеси на поверхности горизонтальной трубы при произвольной ориентации набегающего потока // Труды седьмой российской национальной конференции по теплообмену. В 3х т. – 2018. – С. 11–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36830907> (дата обращения 15.05.2022).
11. О тепловом состоянии конденсационного теплообменника / Ю.С. Теплицкий, Е.А. Пищуха, А.Р. Рослик, Э.К. Бучилко // Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т. 94. – № 3. – С. 590–598. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45848276> (дата обращения 15.05.2022).
12. Горпиняк М.С., Солодов А.П. Конденсация парогазовой смеси в трубах // Теплоэнергетика. – 2019. – № 6. – С. 17–26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37523645> (дата обращения 15.05.2022).
13. Havlik J., Dlouhý T., Krempaský J. The condensation of water vapour in a mixture containing a high concentration of non-condensable gas in a vertical tube // Acta Polytechnica. – 2020. – V. 60. – № 3. – P. 235–242. URL: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/6223> (дата обращения 15.05.2022).
14. Investigation of the heat transfer coefficient during the condensation of small quantities of water vapour from a mixture with a high proportion of non-condensable gas in a horizontal smooth tube / M. Gundermann, F. Raab, D. Raab, T.W. Botsch // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – V. 170 [121016]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931021001198> (дата обращения 15.05.2022).
15. Беспалов В.В. Моделирование продуктов сгорания природного газа увлажненным воздухом // Современные технологии, экономика и образование: сборник трудов Всероссийской научно-методической конференции. – Томск, 27–29 декабря 2019. – Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – С. 34–36. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/58141> (дата обращения 15.05.2022).
16. Flue gas moisture capacity calculation at the outlet of the condensation heat recovery unit / N. Galashov, S. Tsubulskiy, D. Melnikov, A. Kiselev, A. Gabdullina // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 110 [01029]. URL: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2017/24/mateconf_hmt2017_01029/mateconf_hmt2017_01029.html (дата обращения 15.05.2022).
17. Performance of the condensation process for water vapour in the presence of a non-condensable gas on vertical plates and horizontal tubes / P. Poredoš, N. Petelin, T. Žel, B. Vidrih, P. Gataric, A. Kitanovski // Energies. – 2021. – V. 14 [2291]. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/8/2291> (дата обращения 15.05.2022).
18. Combined heat and mass transfer during condensation of vapours mixture and non condensable gas in a vertical tube / A. Charef, M. Feddaoui, A.A. Nait, M. Najim // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2019. – V. 12. – № 2. – P. 515–526. URL: https://www.jafmonline.net/article_771.html (дата обращения 15.05.2022).
19. Camaraza-Medina Y. New perspective for heat transfer evaluation during film condensation inside tubes // International Journal of Heat and Technology. – 2021. – V. 39. – № 2. – P. 390–402. URL: <https://www.iieta.org/journals/ijht/paper/10.18280/ijht.390208> (дата обращения 15.05.2022).
20. Лесухин М.С., Крючков Д.А., Григорян Л.Г. Экспериментальное изучение тепло и массообмена при конденсации водяного пара из паровоздушной смеси в аппарате с вертикальными контактными решетками // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 180–187. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25409424> (дата обращения 15.05.2022).
21. Bepalov V.V., Bepalov V.I., Melnikov D.V. Experimental study of heat transfer from the gas-vapor mixture to the surface in

- rectangular channel with the water vapor condensation // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 754 [042002]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/754/4/042002> (дата обращения 15.05.2022).
22. Беспалов В.В. Повышение эффективности глубокой утилизации тепла дымовых газов ТЭС на природном газе: дисс. ... канд. техн. наук. – Томск, 2017. – 119 с. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/43209> (дата обращения 15.05.2022).
23. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. – М: Машиностроение, 2011. – 374 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20240847> (дата обращения 15.05.2022).

Поступила 04.06.2022 г.

Информация об авторах

Беспалов В.В., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Туболев А.А., старший преподаватель научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Галашов Н.Н., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 62-681

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER FROM SATURATED MOIST AIR TO THE VERTICAL WALL OF A HEAT EXCHANGER WITH WATER VAPOR CONDENSATION

Victor V. Bespalov¹,
vic@tpu.ru

Alexandr A. Tubolev¹,
tubolev@tpu.ru

Nikolay N. Galashov¹,
gal@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the study is determined by the need to apply a universal method of design calculation for deep heat recovery installations in ventilation systems or flue gas removal systems. The use of heat recovery units significantly increases the boiler efficiency. The most problematic task is the calculation of the heat transfer coefficient from the vapor-gas mixture to the heat exchange surface during the condensation of water vapor. Conducting experimental studies of this process is necessary to improve the calculation methods in various ranges of changes in the gas-vapor mixture parameters.

The purpose of this research is to obtain a criterion similarity equation for calculating the heat transfer coefficient from the vapor-gas mixture to the heat exchange surface during condensation of water vapor in a certain range of mixture parameters.

Objects: surface-type heat exchanger (condenser), vapor-gas mixture, steam generator.

Methods: energy balance, design calculation of the heat exchanger, thermodynamics, heat transfer, similarity method, dimensional analysis method, heat transfer experiments, error analysis.

Results. Experimental studies of the heat transfer process during the water vapor condensation from a gas mixture were carried out on a laboratory installation. The results were processed with an estimate of the measurement and calculation errors. On the basis of the similarity theory, a criterion equation is obtained for calculating the heat transfer coefficient from the vapor-air mixture to the heat exchange surface in a certain range of the criteria variation. The deviation of the calculated heat transfer coefficients and those obtained experimentally did not exceed 13 % for different directions of the vapor-gas mixture flow. The criterion equation can be used in the design of heat exchangers for heat recovery.

Key words:

Condenser, heat recovery, gas-vapor mixture, criterion equation, heat transfer coefficient, vapor condensation.

REFERENCES

- Kiryukhina N.V., Seryozhkin L.N. The overview of experimental and theoretical research of heat- and mass exchange during steam condensation from steam-gas mixture with noncondensing admixture. *Bulletin of Kaluga University*, 2018, vol. 2, pp. 62–67. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35111172> (accessed 15 May 2022).
- Huang J., Zhang J., Wang L. Review of vapor condensation heat and mass transfer in the presence of non-condensable gas. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 89, pp. 469–484. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115005943> (accessed 15 May 2022).
- Bălănescu D.T., Homutescu V.M., Ianus G., Popescu A. In situ study on the condensate latent heat recovery and its economic impact in the case of a 60 kW condensing boilers system. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 997, 012139. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/997/1/012139> (accessed 15 May 2022).
- Ziembicki P., Koziol J., Bemasiński J., Nowogonski I. Innovative system for heat recovery and combustion gas cleaning. *Energies*, 2019, vol. 12, 4255. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/22/4255> (accessed 15 May 2022).
- Ziganshina S.K., Kudinov A.A. Preheating boiler blast air with exhaust gases in cooling them below the dew point. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 5. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10891-019-02029-y> (accessed 15 May 2022).
- Bespalov V.V., Bespalov V.I., Melnikov D.V. Investigation and optimization of the depth of flue gas heat recovery in surface heat exchangers. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 9, pp. 680–685. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0040601517090026> (accessed 15 May 2022).
- Akhmadiev F.G., Gilfanov R.M., Farakhov M.I., Akhmitshin A.A. Mathematical and physical modeling of film condensation in plate heat exchangers. *Mathematical methods in engineering and technology – MMTT*, 2020, vol. 5, pp. 25–30. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42820063> (accessed 15 May 2022).
- Tsygankov A.V., Aleshin A.E. Modelirovanie protsessov kondensatsii i ispareniya v kanale regenerativnogo teploutilizatora [Modeling condensation and evaporation in the heat exchanger regenerative channel]. *Sovremennye metody i sredstva issledovaniy teplofizicheskikh svoystv veshchestv. Sbornik trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern methods and means of studying the thermophysical properties of substances. Proc. of the III International Scientific and Technical Conference], 2015, pp. 168–174. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29311210> (accessed 15 May 2022).
- Tsygankov A.V., Aleshin A.E. Simulation of evaporation and condensation processes into the channels of regenerative heat exchangers. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, 2016, no. 1, pp. 82–85. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25941093> (accessed 15 May 2022).
- Artemov V.I., Minko K.B., Yankov G.G. Model kondensatsii para iz parogazovoy smesi na poverkhnosti gorizontальной trubyy pri proizvolnoy orientatsii nabegayushchego potoka [Steam condensation model from a vapor-gas mixture on a horizontal pipe surface with an arbitrary orientation of the oncoming flow]. *Trudy sedmoy rossiyskoy natsionalnoy konferentsii po teploobmenu* [Proc. of the seventh Russian national conference on heat transfer]. 2018, pp. 11–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36830907> (accessed 15 May 2022).
- Teplitskii Y.S., Pitsukha E.A., Roslik A.R., Buchilko É.K. On the thermal state of a condensation heat exchanger. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, no. 3, pp. 571–579.

- Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10891-021-02330-9> (accessed 15 May 2022).
12. Gorpinyak M.S., Solodov A.P. Vapor–gas mixture condensation in tubes. *Thermal Engineering*, 2019, vol. 66, no 6, pp. 388–396. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S004060151906003X> (accessed 15 May 2022).
 13. Havlík J., Dlouhý T., Krempaský J. The condensation of water vapour in a mixture containing a high concentration of non-condensable gas in a vertical tube. *Acta Polytechnica*, 2020, vol. 60, no. 3, pp. 235–242. Available at: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/6223> (accessed 15 May 2022).
 14. Gundermann M., Raab F., Raab D., Botsch T.W. Investigation of the heat transfer coefficient during the condensation of small quantities of water vapour from a mixture with a high proportion of non-condensable gas in a horizontal smooth tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 170, 121016. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931021001198> (accessed 15 May 2022).
 15. Bespalov V.V. Modelirovanie produktov sgoraniya prirodnogo gaza uvlazhnennym vozdukhom [Simulation of natural gas combustion products by humidified air]. *Sovremennye tekhnologii, ekonomika i obrazovanie: sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Modern technologies, economics and education: Proceedings of the All-Russian scientific and methodological conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2019. pp. 34–36. Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/58141> (accessed 15 May 2022).
 16. Galashov N., Tsibulskiy S., Melnikov D., Kiselev A., Gabdullina A. Flue gas moisture capacity calculation at the outlet of the condensation heat recovery unit. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 110, 01029. Available at: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/24/mateconf_hmt2017_01029/mateconf_hmt2017_01029.html (accessed 15 May 2022).
 17. Poredoš P., Petelin N., Žel T., Vidrih B., Gataric P., Kitanovski A. Performance of the condensation process for water vapour in the presence of a non-condensable gas on vertical plates and horizontal tubes. *Energies*, 2021, vol. 14, 2291. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/8/2291> (accessed 15 May 2022).
 18. Charef A., Feddaoui M., Nait A.A., Najim M. Combined heat and mass transfer during condensation of vapours mixture and non condensable gas in a vertical tube. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 515–526. Available at: https://www.jafmonline.net/article_771.html (accessed 15 May 2022).
 19. Camaraza-Medina Y. New perspective for heat transfer evaluation during film condensation inside tubes. *International Journal of Heat and Technology*, 2021, vol. 39, no. 2, pp. 390–402. Available at: <https://www.iieta.org/journals/ijht/paper/10.18280/ijht.390208> (accessed 15 May 2022).
 20. Lesukhin M.S., Kriuchkov D.A., Grigoryan L.G. Experimental study of heat and mass-transfer during condensation of steam out of an air-steam mixture in a vessel with vertical contact grids. *Journal of Samara State Technical University, Ser. Technical Sciences*, 2015, no. 3 (47), pp. 180–187. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25409424> (accessed 15 May 2022).
 21. Bespalov V.V., Bespalov V.I., Melnikov D.V. Experimental study of heat transfer from the gas-vapor mixture to the surface in rectangular channel with the water vapor condensation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 754, 042002. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/754/4/042002> (accessed 15 May 2022).
 22. Bespalov V.V. *Povyshenie effektivnosti glubokoy utilizatsii tepla dymovykh gazov TES na prirodnom gaze*. Diss. Kand. nauk [Improving the efficiency of flue gas deep heat recovery from TPPs operating on natural gas. Cand. Diss.]. Tomsk, 2017. 119 p. Available at: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/43209> (accessed 15 May 2022).
 23. Kudinov A.A., Ziganshina S.K. *Energoberezhenie v teploenergetike i teplotekhnologiyakh* [Energy saving in thermal power engineering and thermal technologies]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 2011. 374 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20240847> (accessed 15 May 2022).

Received: 4 June 2022.

Information about the authors

Victor V. Bespalov, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexandr A. Tubolev, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikolay N. Galashov, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.