

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ИЗ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Н.В. Тиунова, Ю.О. Афанасьев

Исследования, направленные на повышение эффективности тепловых электрических станций, проводятся уже много лет. В последнее время более остро встала проблема сбережения энергоресурсов. Тепловые станции являются самыми крупными потребителями энергоресурсов и повышения КПД ТЭС всего на десятые доли процента дает экономию в миллионы тонн условного топлива. Известно, что большую долю потерь тепла, бесполезно теряемую в атмосферу, вносят котельные агрегаты.

При сжигании топлива в котлоагрегатах ТЭС и котельных энергетике часто сталкиваются с вредными явлениями конденсации пара из дымовых газов на стенках теплообменных труб воздухонагревателей или на трубах водяных экономайзеров и на дымовых трубах. Конденсат, образующийся в теплообменниках, является смесью слабых кислот, вызывающих интенсивную язвенную коррозию поверхностей теплообмена. Для предотвращения конденсации пара, температуру теплообменных поверхностей труб со стороны дымовых газов необходимо поддерживать на 10-15⁰С выше температуры точки росы. Что же касается температуры точки росы дымовых газов, то этот параметр зависит от множества факторов, главный из которых является вид и качество сжигаемого топлива. Поэтому температура точки росы колеблется от 50-60⁰С при оптимальных условиях и 100-150⁰С при плохом качестве топлива (например, при сжигании коксового газа плохой очистки)[1]. Для безаварийной работы котлоагрегатов энергетике вынуждены выбрасывать в атмосферу дымовые газы с температурой около 110⁰С. Таким образом, теряется в атмосферу большое количество тепла.

В ряде развитых стран, при проектировании котлоагрегатов, для повышения эффективности установок, их снабжают хвостовыми теплообменниками – конденсаторами. Эти аппараты позволяют снизить температуру уходящих дымовых газов до 50-60⁰С и сконденсировать часть водяного пара с примесью кислот. В результате теряется меньше тепла, а конденсат после ректификации используют в промышленности. Кроме того, снижаются выбросы вредных веществ в атмосферу. В работе [2] показано, что применение хвостовых

теплообменников позволяет экономить до 5% топлива в год.

При проектировании хвостовых теплообменников следует учитывать коррозионную активность конденсата. Поэтому, материал для теплообменных труб должен обладать хорошими антикоррозионными свойствами. Такими свойствами обладает, в частности, свинец, стекло, некоторые сплавы и т.д. Поэтому, стоимость теплообменника может оказаться достаточно высокой и для расчета необходимой поверхности теплообмена нужно обладать достаточно точными значениями коэффициентов тепломассообмена при конденсации дымовых газов.

Процесс конденсации дымовых газов на твердой поверхности определяется как диффузионным сопротивлением пограничного слоя для пара, так и термическим сопротивлением этого слоя. Тепломассообменные процессы, протекающие в диффузионном пограничном слое, взаимосвязаны и аналитическое решение этого явления представляет собой достаточно сложное численное решение уравнений движения, энергии и диффузии.

Анализ уравнений энергии и диффузии, проведенными многими авторами, показывает, что коэффициент теплоотдачи α в уравнении энергии аналогичен $\beta(1-y_{1n})$ в уравнении диффузии. Плотность потока массы определяется по уравнению:

$$j_{1n} = \beta \frac{P_{\infty}}{R_1 T} (y_{1\infty} - y_{1n}),$$

где P_{∞} и T_{∞} – давление и температура в ядре потока ПГС, y – мольная доля пара.

Плотность конвективного теплового потока к поверхности пленки конденсата составит:

$$q_{конв} = \alpha (t_{\infty} - t_n),$$

где индекс ∞ относится к ядру потока, а индекс n соответствует параметрам на поверхности пленки конденсата, индексы 1 и 0 – соответственно пар и неконденсирующийся компонент.

В случае тепломассообмена при конденсации парогазовой смеси (ПГС) с большим содержанием неконденсирующихся газов из-за малого поперечного потока массы, искажение основного течения не может быть значитель-

ным и в этих условиях должна соблюдаться аналогия тепломассообмена. При наличии аналогии, для соответствующей геометрии уравнение теплоотдачи в форме

$$Nu_0 = \frac{\alpha_0 d}{\lambda} = cf(Re Pr)$$

совпадает с уравнением массоотдачи $Nu_D(1-y_{in}) = \frac{\beta d}{D}(1-y_{in}) = f(Re Pr_D)$

и решение сложного процесса тепломассообмена сводится к определению коэффициентов теплоотдачи, используя уравнения конвективного теплообмена.

Целью этой работы является экспериментальное определение коэффициентов тепломассообмена в диффузионном пограничном слое при постоянной температуре ПГС в условиях вынужденного движения потока с массовой концентрацией пара $y_{1\infty} = 0,07-0,2$ при давлении близкому к атмосферному.

Конструкция экспериментального стенда, изготовленного для этих целей, представлена на рис 1.

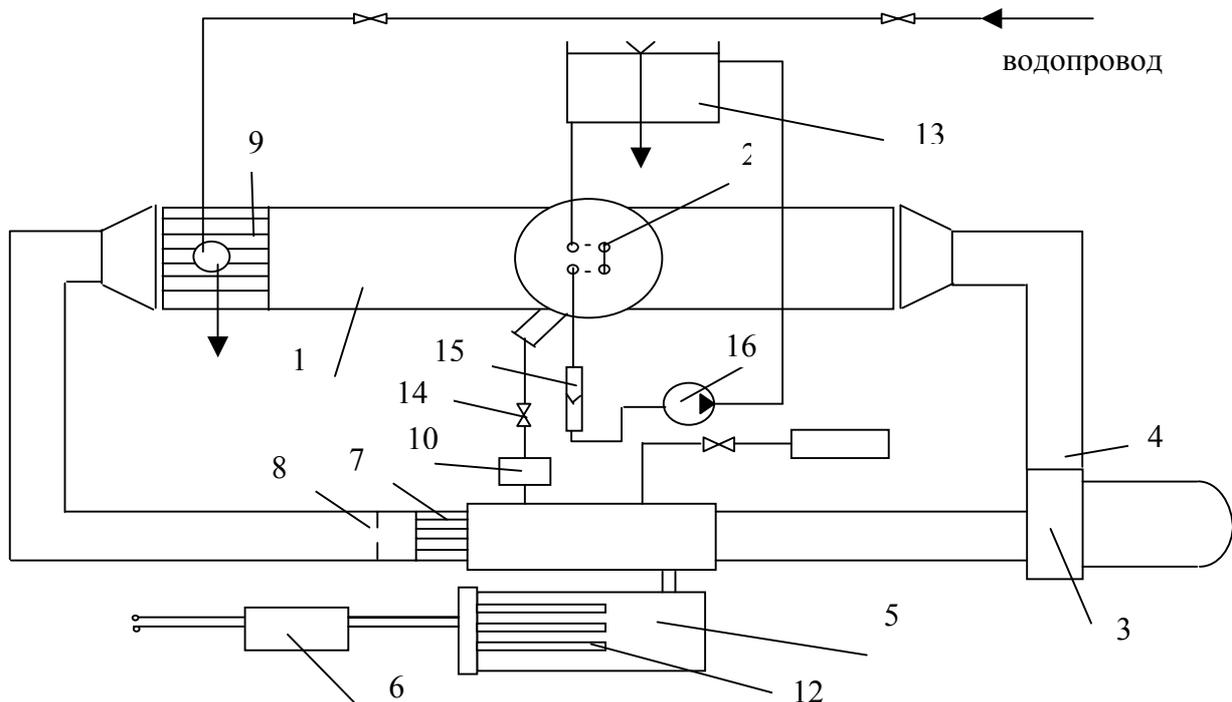


Рис.1. Принципиальная схема стенда

Стенд предназначен для исследования процессов тепломассообмена при конденсации пара из парогазовой смеси (ПГС) содержащей 5-15% водяного пара с химическими добавками, имитирующими состав дымовых газов. Скорость парогазовой смеси составляет ~10 м/с.

Экспериментальная установка включает в себя два замкнутых контура, парогазовый контур и контур охлаждения опытного участка. Парогазовый контур состоит из экспериментального сосуда 1 со струевыпрямителем потока 9 и опытного участка 2, газодувки ВД-2, смесителя 4, парогенератора 5, соединенных между собой газопроводом. Парогазовая смесь циркулирует по контуру со скоростью 1-3 м/с. Через струевыпрямитель 9, придающий потоку парогазовой смеси симметричность,

смесь попадает на опытный участок 2, где непосредственно происходит конденсация пара. Обедненная паром смесь поступает на всасывающий патрубок газодувки и через напорный вывод, нагнетается в смеситель, где обогащается паром из парогенератора 5, затем парогазовая смесь подается через струевыпрямитель 7 на измерительную диафрагму 8, которая служит для определения расхода парогазовой смеси. Пар конденсируется на опытном участке, состоящем из одной медной трубки 16x1,5. Конденсат стекает в сборник конденсата 10, откуда стекает в парогенератор 5. Сборник конденсата предусмотрен для эксперимента с ПГС содержащих добавки слабых кислот, имитирующих состав дымовых газов. Парогенератор снабжен электрическими нагревателями 12 мощностью 2кВт, питание ко-

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ИЗ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

торых осуществляется от регулируемого источника напряжения 6 РНО-250-10.

Контур охлаждения опытного участка служит для поддержания температуры стенки трубы опытного участка на заданном уровне. Он состоит из бака постоянного уровня, связанного с водопроводом вихревого насоса 16, вентиля 14, ротаметра РМ-40Г для измерения расхода охлаждающей воды и нагревателя 17.

Температура стенки трубы опытного участка определяется по температуре воды в водопроводе. Для увеличения температуры стенки включают нагреватель 17 и устанавливают режим с помощью источника регулируемого напряжения 18. Для предотвращения утечки тепла в окружающую среду стенд снабжен охранными нагревателями и тщательно изолирован. Температура охранных нагревателей поддерживается равной температуре ПГС.

Опытный участок представляет собой медную трубку, в двух сечениях которой выфрезерованы по 5 пазов, длиной по 1,5 см, глубиной 1 мм и толщиной 1 мм, как показано на рисунке 3.1.2. Королек термопары (спай) обматывают шелковой ниткой и укладывают в выфрезерованный паз. Сверху термопары укладывают медную проволоку диаметром 1 мм и зачеканивают ее. Наружную поверхность трубы зашлифовывают и полируют. Участок готов к эксперименту.

На рис. 2 приведена схема опытного конденсатора. Исследуется процесс тепло-массопереноса к горизонтальному цилиндру $d = 16$ мм и $L = 200$ мм при поперечном обтекании паровоздушной смесью (ПВС). Для равномерного распределения потока по сечению опытного участка, на входе в конденсатор установлен струевыпрямитель 3. Температура потока ПВС измеряется 3-мя ХК – термопарами 7. После струевыпрямителя 3 установлен датчик точки росы 6 для определения концентрации пара в ПВС.

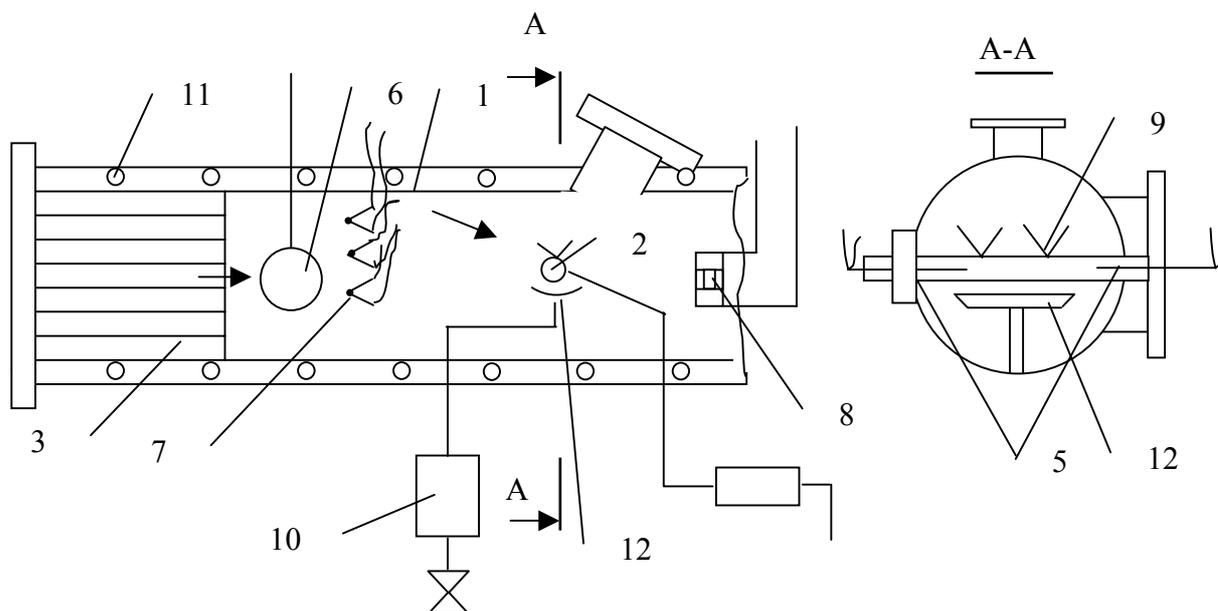


Рис.2. Схема экспериментального конденсатора: 1-сосуд; 2- опытный участок; 3- струевыпрямитель; 4- датчик расхода охлаждающей воды; 5-дифференциальная термопара; 6-датчик точки росы; 7,9-термопары; 8- электронагреватель; 10- сборник конденсата; 11- охранный нагреватель; 12- лоток

Давление в конденсаторе измерялось U – образным манометром. На выходе из конденсатора установлен электронагреватель ПВС 8, для поддержания температуры потока 95-100⁰С. На стенке сосуда намотан охранный нагреватель 11. Стенд снабжен термоизоляцией. Пар конденсируется на опытном цилиндре 2, а конденсат стекает из лотка 12 в сборник конденсатора 10 и возвращается в парогенератор.

Опыты по конденсации ПГС на горизонтальном цилиндре проводили в следующей последовательности. Включали нагрев воздуха, охранные нагреватели стенда, циркуляцию воздуха и охлаждающей воды. Когда устанавливалась заданная температура потока, проводили измерения теплообмена и сравнивали с ранее полученными данными. Затем включали парогенератор и повышали концентрацию водяного пара в смеси.

При повышении концентрации пара автоматически включался датчик точки росы, и по температуре точки росы определялась концентрация пара в ПГС:

$$y = \frac{P(T_{T.P.})}{P_{\infty}}$$

где P(T_{T.P.}) – парциальное давление водяного пара, определяемое по температуре точки росы, используя P - T зависимость водяного пара; P[∞] - давление смеси.

Была отмечена капельная конденсация на полированной поверхности опытного цилиндра. Опыты проводились при температурах ПГС 100⁰С и Re=900-1200. Общий тепловой поток к стенке цилиндра рассматривался

как сумма тепла отдаваемого конденсирующимся паром m·r и конвективного теплового потока Q_{конв}

$$Q = m \cdot r + Q_{конв}$$

где m – расход конденсата, измеряемого в сборнике.

Коэффициент массоотдачи определялся по уравнению $\beta_p = \frac{j}{P_{1\infty} - P_{1n}}$, где $j = \frac{m}{F}$ -

плотность потока массы, P_{1∞}, P₁ – парциальное давление пара в ядре потока и на поверхности конденсации, F – площадь поверхности опытного цилиндра. Температура поверхности конденсата рассчитывалась по уравнению [4]

$$T_{пов} = T_{cm} + \frac{q_{конд}}{\alpha_n}$$

$$\text{где } \alpha_n = 2,79 \cdot 10^4 \cdot t_n^{0,5} (t_n - t_c)^{-0,57}$$

коэффициент теплоотдачи, с использованием данных по капельной конденсации чистого пара. Парциальное давление пара на поверхности конденсата P_{1n} определялось при помощи P-T зависимости по температуре поверхности конденсата P_{1n}=f(T_{пов}). Опыты проводились при температуре точки росы от 40⁰С до 60⁰С при среднем температурном напоре ΔT=60-70⁰С. Результаты экспериментов по средней массоотдаче представлены

на рис. 3 в виде $\frac{Nu_D \Pi_D}{Nu_0} = f\left(\frac{\varepsilon_r}{\Pi_D}\right)$, где

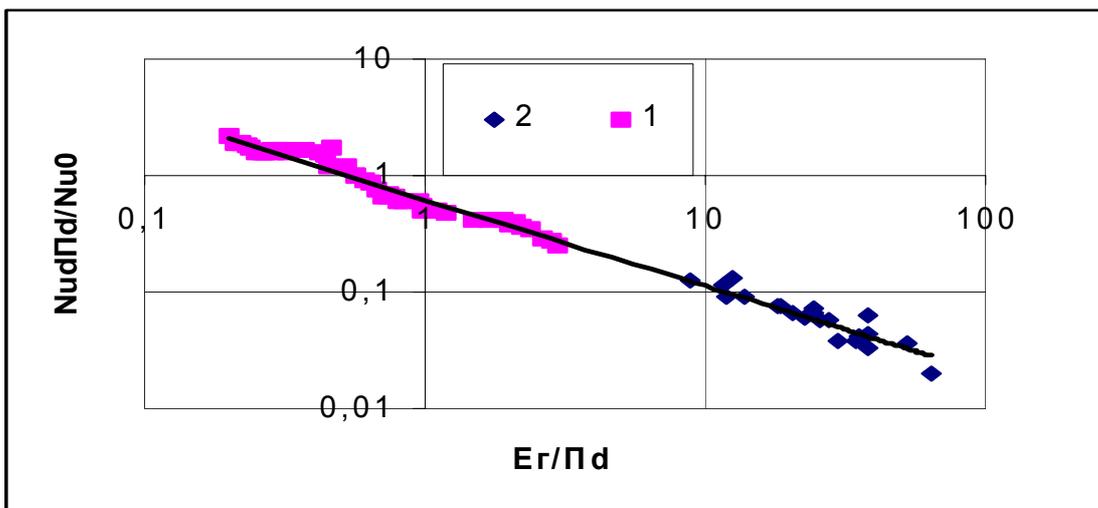


Рис.3. Результаты обобщения опытных данных по средней массоотдаче: 1 – результаты обобщения по работам [6,7,8]; 2- опытные данные, полученные в данном эксперименте

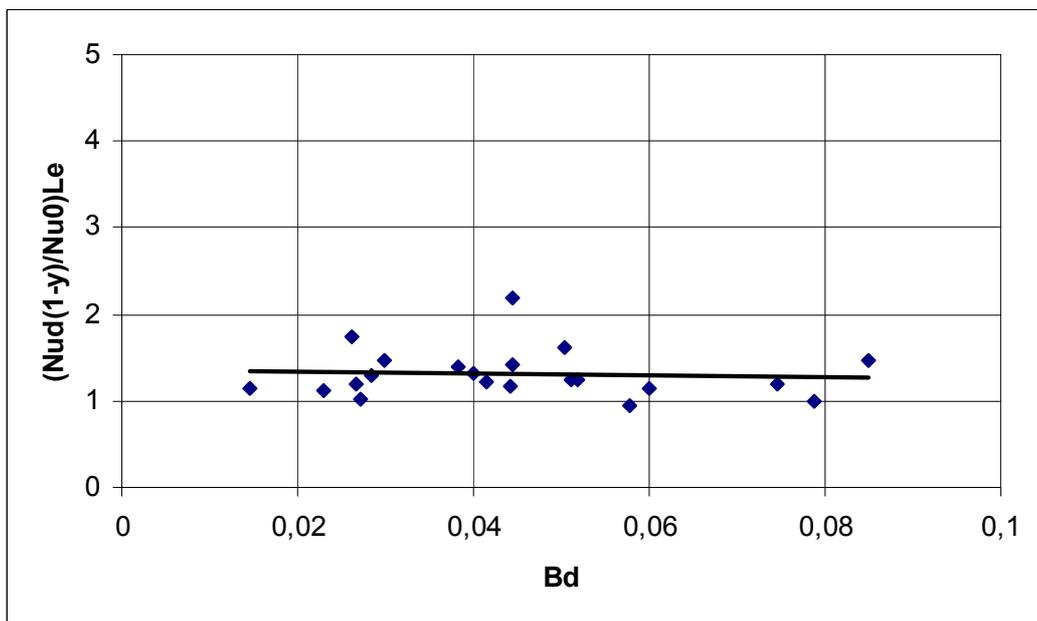


Рис.4. Влияние поперечного потока массы на теплообмен при поперечном обтекании ПГС круглого цилиндра

$\Pi_D = \frac{P_{1\infty} - P_{1n}}{P_\infty}$ - безразмерная разность пар-

циальных давлений, $\varepsilon_r = \frac{1 - P_{1\infty}}{P_\infty}$ мольная до-

ля неконденсирующегося компонента. Методика обобщения опытных данных в этих координатах предложена в [5]. На графике представлены опытные данные по конденсации парогазовых смесей H_2O – воздух [6,7], R12-азот [8] (точки 1). Эти данные получены при высокой концентрации пара в ПГС ($y=1-0,5$). Из рис. 3 видно, что результаты опытов, полученные в нашем эксперименте (точки 2) ложатся в неисследованной области изменения концентраций активного компонента в смеси. Из сравнения экспериментальных данных можно сделать вывод, что характер зависимости коэффициента массоотдачи от движущей силы процесса одинаков для точек 1 и 2. Для расчета коэффициентов массоотдачи можно воспользоваться зависимостями, предложенными в [8].

На рис. 4 показано влияние параметра проницаемости Bd на аналогию процессов теплообмена и массообмена в данных опытах.

Фактор проницаемости представляет собой относительный поперечный поток массы, определяемый как $Bd = \frac{j Re Pr}{\rho_\infty \omega_\infty Nu_0}$, где ρ_∞ , ω_∞

- плотность и скорость ПГС, $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ -

критерий Прандтля.

Экспериментальные точки лежат выше 1 соответствующей аналогии процессов примерно на 50%. Однако, с поправкой на число Льюиса наподобие процессов теплообмена и массообмена снижается и составляет около 30% выше линии подобия (рис.3). Эти данные показывают, что даже небольшой поперечный поток конденсирующегося пара интенсифицирует процессы теплообмена, протекающего в диффузионном пограничном слое, в диапазонах исследованных чисел Re_d и концентраций потока ПГС. При проведении опытов по конденсации ПГС при высоком содержании неконденсирующегося компонента во всех опытах наблюдалась капельная конденсация пара. Средняя скорость потока ПГС не превышала 2 м/с, поэтому динамического воздействия потока на капли конденсата отмечено не было.

В заключении нужно отметить, что первые полученные опытные данные являются необходимыми при проектировании хвостовых теплообменников-конденсаторов оптимальных размеров и эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов Г.С., Афанасьев Ю.О., Плотников В.А. Выбросы токсичных и коррозионноактивных компонентов при сжигании коксового газа // Кокс и химия . 1996. №8. -С. 32-35.
2. Binder H. Tieftemperatur Heizkessel // Feuerungstechnik. 1985. № 12. -Р. 46.
3. Исаченко В.П., Богородский А. С. Исследование тепло - и массообмена при капельной конденсации водяного пара из паровоздушной смеси // Теплоэнергетика. 1969. №2. -С.79-82.
4. Берман Л.Д. К обобщению опытных данных по тепло-массообмену при испарении и конденсации // Теплоэнергетика.1980. №4.
5. Бобе Л.С., Солоухин В.А. Тепло-массообмен при конденсации пара из парогазовой смеси при турбулентном течении внутри трубы // Теплоэнергетика. 1972. №9.
6. Бобе Л.С., Лебедев П.Д., Раков В.В., Самсонов Н.М. Исследование тепломассообмена при свободной конвекции у горизонтальной пластины и в горизонтальных прослойках // Теплофизика высших температур. 1972. Т.10. №4.
7. Афанасьев Ю.О. Тепломассоперенос при конденсации парогазовой смеси на вертикальной поверхности при естественной конвекции // Сибирский физико-технический журнал. 1991. №3.
8. Афанасьев Ю.О., Петрик П.Т., Тиунова Н.В., Калмыков А.С. Исследование конденсации пара из парогазовой смеси // Вестник КузГТУ. 2002. №3. -С.49-53.