

УДК 536.423.4, 621.1.013, 697.326

Ю. О. Афанасьев, П. Т. Петрик, Н.В. Тиунова

## ТЕПЛОМАССООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ИЗ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Исследования, направленные на повышение эффективности тепловых электрических станций, проводятся уже много лет. В последнее время более остро всталла 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 энергетики 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  $10-15^{\circ}\text{C}$  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  $50-60^{\circ}\text{C}$  при оптимальных условиях и  $100-150^{\circ}\text{C}$  при плохом качестве топлива (например, при сжигании коксового газа плохой очистки)[1]. Для безаварийной работы котлоагрегатов энергетики вынуждены выбрасывать в атмосферу дымовые газы с температурой около  $110^{\circ}\text{C}$ . 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  $50-60^{\circ}\text{C}$  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  $\alpha$  в уравнении энергии аналогичен  $\beta(1-y_{10})$  в уравнении диффузии. Плотность потока массы определяется по уравнению

$$j_{10} = \beta \frac{P_{\infty}}{R_i T} (y_{1\infty} - y_n),$$

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  $\infty$  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 значительным и в этих условиях должна соблюдаться аналогия тепломассообмена. При наличии аналогии, для соответствующей геометрии уравнение теплоотдачи в форме

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

совпадает с уравнением массоотдачи

$$\begin{aligned} NuD(1 - y_n) &= \\ &= \frac{\beta d}{D} (1 - y_{10}) = f(\text{Re} Pr_D) \end{aligned}$$

и решение сложного процесса тепломассообмена сводится к определению коэффициентов теплоотдачи по уравнениям конвективного теплообмена.

Целью этой работы является экспериментальное определение коэффициентов тепломассообмена в диффузационном 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 приведена в [3], а опытного конденсатора, тарировочных опытов и экспериментов по теплообмену представлены в работе [9].

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 Р – Т- зависимость водяного пара;  $P_\infty$  - давление смеси.

Отмечена капельная конденсация на полированной поверхности опытного цилиндра. Опыты проводились при температурах ПГС  $100^\circ\text{C}$  и  $Re = 900-1200$ . Общий тепловой поток к стенке цилиндра рассматривался как сумма тепла, отдаваемого конденсирующимся паром  $m \cdot r$ , и конвективного теплового потока  $Q_{конв}$ .

$$Q = m \cdot r + Q_{конв},$$

где  $m$  – расход конденсата, измеряемого в сборнике.

Коэффициент массоотдачи определялся по уравнению

$$\beta_p = \frac{j}{P_{1\infty} - P_n},$$

где  $j = \frac{m}{F}$  - плотность потока

массы,  $P_{1\infty}$ ,  $P_{10}$  – парциальное давление пара в ядре потока и на поверхности конденсации,  $F$  – площадь поверхности опытного цилиндра. Температура поверхности конденсата рассчитывалась по уравнению [4]

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

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  $P_{10}$  определялось при помощи Р-Т зависимости по температуре поверхности конденсата  $P_{10}=f(T_{нов})$ .

Опыты проводились при температуре точки росы от  $40$  до  $60^\circ\text{C}$  при среднем температурном напоре  $\Delta T=60-70^\circ\text{C}$ . Результаты экспериментов по средней массоотдаче представлены на рис.1 в виде

$$\frac{Nu_D \Pi_D}{Nu_0} = f\left(\frac{\varepsilon_r}{\Pi_D}\right),$$

где  $\Pi_D = \frac{P_{1\infty} - P_n}{P_\infty}$  - безразмерная разность парциальных

давлений,  $\varepsilon_r = \frac{1 - P_{1\infty}}{P_\infty}$  - моль-

ная доля неконденсирующегося компонента. Методика обобщения опытных данных в этих координатах предложена в [5]. На графике представлены опытные данные по конденсации парогазовых смесей  $\text{H}_2\text{O}$ -воздух [6,7], R12-азот [8] (точки 1). Эти данные получены при высокой концентрации пара в ПГС ( $y=1-0,5$ ). Из рис. 1 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 и для расчета коэффициентов массоотдачи можно воспользоваться зависимостями, предложенными в [8].

На рис. 2 показано влияние параметра проницаемости  $Bd$  на аналогию процессов теплообмена и массообмена в данных опытах. Фактор проницаемости представляет собой относительный поперечный поток массы, определяемый как

$$Bd = \frac{j \text{Re} \text{Pr}}{\rho_\infty \omega_\infty Nu_0},$$

где  $\rho_\infty$   $\omega_\infty$  - плотность и скорость ПГС,  $\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu c_p}{\lambda}$  -

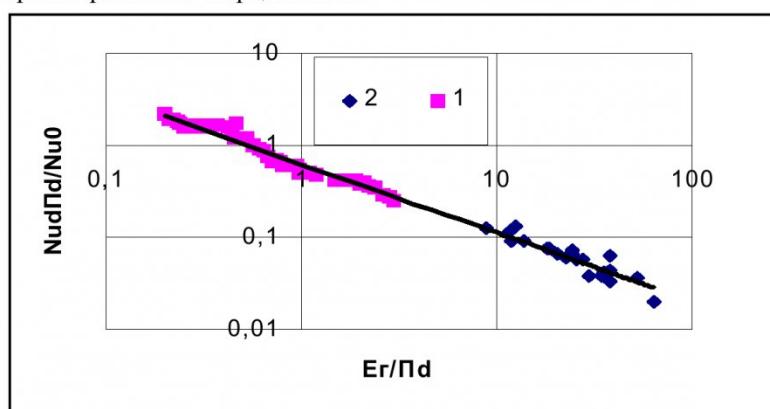
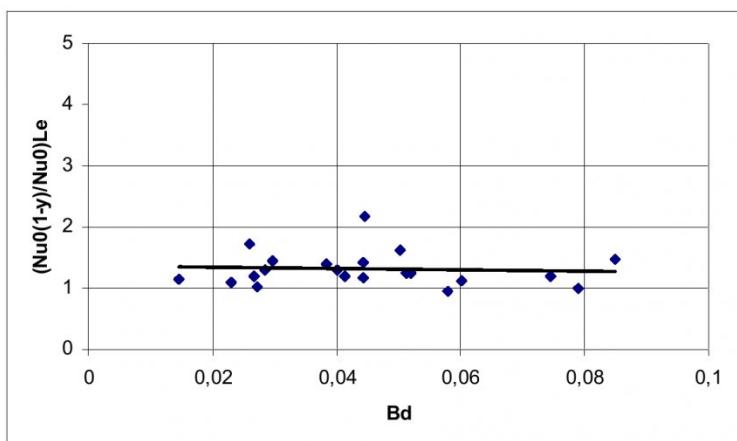


Рис.1. Результаты обобщения опытных данных по средней массоотдаче: 1 – результаты обобщения по работам [6,7,8]; 2 – опытные данные, полученные в данном эксперименте



*Рис.2. Влияние поперечного потока массы на тепломассообмен при поперечном обтекании ПГС круглого цилиндра*

критерий Прандтля.

Экспериментальные точки лежат выше 1 соответствующей аналогии процессов примерно на 50%. Однако с поправкой на

число Льюиса  $Le = \frac{Pr_D}{Pr} = \frac{a}{D}$  неподобие процессов теплообмена и массообмена снижается и составляет около 30% выше линии подобия (рис.2). Эти данные показывают, что даже небольшой поперечный поток

конденсирующегося пара интенсифицирует процессы теплообмена, протекающего в диффузационном 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. Дальнейшее исследования в этой работе планируются при увеличении скорости потока. Так же дальнейшие опыты будут проводиться с парогазовой смесью с добавлением компонентов, содержащихся в дымовых газах, чтобы приблизить условия опытов к конденсации дымовых газов в котлоагрегатах.

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

Работа выполнена при поддержке INTAS – OPEN (Грант 99 – 1107) и интеграционного проекта фундаментальных исследований СО РАН "Процессы переноса перфтоуглеродов и разработка научных основ перфористых соединений с заданными свойствами".

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Афанасьев Ю.О., Петрик П.Т., Тиунова Н.В. Стенд для исследования пара из дымовых газов // Вестн. КузГТУ. 2000. №4. С.30.
4. Исаченко В.П., Богородский А. С. Исследование тепло- и массообмена при капельной конденсации водяного пара из паровоздушной смеси // Теплоэнергетика. 1969. №2. С.79-82.
5. Берман Л.Д. К общению опытных данных по тепло-массообмену при испарении и конденсации // Теплоэнергетика.1980. №4.
6. Бобе Л.С., Солоухин В.А. Тепло-массообмен при конденсации пара из парогазовой смеси при турбулентном течении внутри трубы // Теплоэнергетика. 1972. №9.
7. 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.
8. Афанасьев Ю.О. Тепломассоперенос при конденсации парогазовой смеси на вертикальной поверхности при естественной конвекции // Сибирский физико-технический журнал. 1991. №3.
9. Афанасьев Ю.О., Петрик П.Т., Тиунова Н.В., Калмыков А.С. Исследование конденсации пара из парогазовой смеси // Вестн. КузГТУ. 2002. №3. С.49-53.

□ Авторы статьи:

Афанасьев  
Юрий Олегович  
– канд. техн. наук, доц. каф. про-  
цессов, машин и аппаратов хи-  
мических производств

Петрик  
Павел Трофимович  
– докт. техн. наук, зав. каф. про-  
цессов, машин и аппаратов хи-  
мических производств

Тиунова  
Наталья Владимировна  
– асс. каф. процессов, машин и  
аппаратов химических произ-  
водств