

## УЧЕТ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ПРИ ПАРОВОДЯНОМ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ

канд. физ.–мат. наук А.Я. Шаршанов  
(представлено докт. физ.-мат. наук С.В. Яковлевым)

На основе анализа уравнений тепломассопереноса показана доминирующая роль в определении величины расхода пара процесса его диффузии в парогазовой смеси. Указано на определяющее влияние этого обстоятельства на расчет расхода пара при пароводяном тушении пожаров.

Одним из способов тушения пожаров, развивающихся в ограниченных объемах, является нагнетание в эти объемы водяного пара.

Обычно тушащий эффект достигается, если удается в течение нескольких минут поддерживать в газовой среде 30 % объемную концентрацию водяного пара. Расчет количества пара, необходимого для этих целей, не составляет труда. Так, если объем, в котором создается огнегасящая концентрация, составляет величину  $V$  ( $\text{м}^3$ ), газообмен этого объема с внешней средой –  $G_v$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), а время тушения –  $\tau$  (с), то соответствующий расход пара оценивается по формуле

$$G_m = 0.3 \cdot \left( \frac{V}{\tau} + G_v \right) \cdot \rho_{\text{п}}, \quad \text{кг/с}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{п}}$  – плотность сухого пара при средней температуре среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Известно, что формула (1) дает хорошую оценку величины расхода только в том случае, когда нет конденсации водяного пара на поверхностях, ограждающих объем  $V$ . В противном случае из-за конденсации требуется дополнительная подача пара для поддержания огнегасящей концентрации его в объеме.

Конденсация пара отсутствует, когда температура ограждающих поверхностей  $t_w$  превышает точку росы  $t_s(P_{\text{п}})$  – температуру насыщения пара при заданном значении его парциального давления  $P_{\text{п}}$ . Если для оценок взять полное давление газовой среды в объеме равным нормальному, то есть  $P = 101.3$  кПа, то при принятой огнегасящей концентрации парциальное давление

пара будет составлять  $P_{\text{п}} = 0.3 P = 30.4$  кПа, что согласно справочным таблицам дает  $t_s(P_{\text{п}}) = 69$  °С. Таким образом, конденсация будет наблюдаться только на поверхностях с температурой менее 69 °С.

Для оценки вклада конденсации в общий расход пара часто применяют формулу, описывающую конденсацию чистого пара на наклонной плоской поверхности. В ней на основании анализа ламинарного течения пленки конденсата показано, что зависимость плотности потока пара, конденсирующегося на стенке, от температур имеет вид

$$j = A \cdot (t' - t_w)^{\frac{3}{4}}, \text{ моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (2)$$

где,  $A$  – слабо зависящий от температуры размерный множитель, определяемый физическими характеристиками конденсата;

$t'$  – температура на обращенной к пару поверхности пленки (в случае чистого пара она совпадает с  $t_s(P_{\text{п0}})$  – точкой росы, определяемой при давлении пара вдали от поверхностей конденсации ( $P_{\text{п0}}$ )).

Оценки расхода пара, сделанные на основании формулы (2), указывают на необходимость увеличения расхода пара в десятки раз по сравнению с результатом, получаемым по формуле (1).

В данной работе указывается на то, что соотношение (2) дает завышенную величину расхода пара. Дело в том, что наличие другого газа, в качестве которого мы будем рассматривать воздух (что не принципиально), меняет не только давление пара (что учтено в формуле (2)). Меняется характер движения пара в приповерхностной области. Конденсация пара на стенках означает его уход из пристенной области. При неизменности общего давления газовой смеси, последнее явление приводит к избытку воздуха у стенок. Пару, чтобы конденсироваться на стенке, приходится по пути к ней преодолевать дополнительный барьер. На языке теплопередачи отличие заключается в следующем: в случае чистого пара преодолевается только теплосопrotивление пленки конденсата, в случае смеси появляется дополнительное последовательное теплосопrotивление диффузии пара сквозь обогащенную воздухом пристенную область. Как показывает опыт, при содержании воздуха в

смеси свыше нескольких процентов второе сопротивление является доминирующим.

Таким образом, при расчете массопереноса пара основным является диффузия пара через воздушный барьер в пристенной области, и расчеты, берущие за основу формулу (2) (см.[1]), являются методологически неверными.

Проиллюстрируем сделанное утверждение на основе уравнений тепломассопереноса. Одновременно будет указано направление решения данной задачи.

Задачу будем рассматривать как одномерную. В качестве независимой пространственной переменной "у" возьмем расстояние от поверхности стенки вдоль внешней нормали к ней. Будем интересоваться стационарной концентрацией пара  $c_{\text{п}}(y)$  (моль/м<sup>3</sup>) и воздуха  $c_{\text{в}}(y)$  (моль/м<sup>3</sup>) в пространстве. В рассматриваемом диапазоне давлений они с хорошей точностью удовлетворяют уравнению состояния идеального газа

$$P_{\text{п}} = c_{\text{п}}(y) \cdot R \cdot T(y), \quad P_{\text{в}}(y) = c_{\text{в}}(y) \cdot R \cdot T(y), \quad (3)$$

где,  $R = 8.314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;

$P_{\text{п}}(y)$  и  $P_{\text{в}}(y)$  – парциальные давления пара и воздуха в точке с координатами "у", Па;

$T(y)$  – абсолютная температура паровоздушной смеси в этой точке, К.

Отметим, что полное давление смеси во всем объеме остается неизменным, то есть выполняется соотношение

$$P_{\text{п}}(y) + P_{\text{в}}(y) = P = \text{const}, \quad (4)$$

В такой ситуации, пренебрегая малыми эффектами типа термодиффузии, систему уравнений тепломассопереноса в паровоздушной смеси можно представить в виде

$$j_{\text{п}} = -D \cdot \frac{dc_{\text{п}}}{dy} + w(y) \cdot c_{\text{п}} = 0, \quad (5)$$

$$j_{\text{в}} = -D \cdot \frac{dc_{\text{в}}}{dy} + w(y) \cdot c_{\text{в}} = 0, \quad (6)$$

$$q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dy} + j_{\text{п}} \cdot H_{\text{п}}(t) = \text{const} \quad (7)$$

Здесь  $j_{\text{п}}$ ,  $j_{\text{в}}$  – нормальные к плоскости конденсации плотности потока сухих пара и воздуха, соответственно, моль/(м<sup>2</sup>·с);  $q$  – плотность теплового потока через паровоздушную смесь, Вт/м<sup>2</sup>;  $D(y)$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности смеси, Вт/(м·К);  $H_{\text{п}}(t)$  – удельная энтальпия пара, Дж/моль.

Величина  $w(y)$  представляет собой возникающую в таких ситуациях общую скорость движения потока смеси, м/с.

При написании граничных условий к уравнениям (5), (6) предполагается, что у поверхности конденсата, которую можно принять за начало отсчета ( $y=0$ ), формируется диффузионный слой толщиной  $\delta_{\text{Д}}$ , за пределами которого состав смеси принимает свои объемные значения. Кроме того, сохраняется поток вещества и тепла. Это и является условием на границе с однородной смесью.

Граничным условием со стороны пленки также является сохранение потока воды (то есть  $j_{\text{п}}$ ) и плотности потока тепла ( $q$ ). Для написания этих условий необходимо решить двумерную задачу о стекании конденсата вдоль поверхности ограждения. В результате получается, что в качестве граничного условия к системе (5)–(7) должно выступать равенство  $j = j_{\text{п}}$ , в котором величина  $j$  определяется при помощи соотношения (2) с неопределенной температурой  $t'$ . При этом из-за учета (в процессе вывода формулы (2)) связи потоков пара и тепла при конденсации условие непрерывности теплового потока также выполняется. Еще одним условием является заданное значение парциального давления пара на поверхности пленки конденсата:  $P_{\text{п}} = P_{\text{с}}(t')$ , где  $P_{\text{с}}(t)$  представляет собой известную зависимость давления насыщенного пара от температуры  $t$ .

Решая систему (3)–(6), несложно получить, что плотность потока пара имеет значение

$$j_{\text{п}} = -j_{\text{Д}} \cdot \ln \frac{P - P_{\text{п0}}}{P - P_{\text{с}}(t')}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{п0}}$  – парциальное давление пара за пределами диффузионного слоя.

Величина  $j_D$  вычисляется по формуле

$$j_D = \frac{P}{R\left(\frac{T}{D}\right)_{cp}} \cdot \frac{1}{\delta_D}, \quad (9)$$

где  $(T/D)_{cp}$  – среднее по диффузионному слою значение отношения  $T/D$ .

Для дальнейшего продвижения совместно (с учетом равенства  $j = j_n$ ) решаются уравнения (2) и (8). Это позволяет определиться с температурой поверхности пленки  $t'$ . Необходимо воспользоваться тем, что конденсация чистого пара проходит значительно интенсивнее конденсации пара из смеси. Формально, последнее утверждение означает наличие в системе малого параметра  $j_n/j_D$ .

Данное обстоятельство позволяет для расчета потока пара использовать формулу (8), беря в ней в качестве температуры наружной поверхности конденсата  $t'$  температуру ограждения  $t_w$ . В результате в (8) остается один не определенный параметр (см.(9)) – толщина диффузионного слоя  $\delta_D$ . Последняя тесно связана с характером обтекания холодных поверхностей ограждений паровоздушной смесью. Величина  $\delta_D$  зависит как от геометрии этих тел, так и от вида конвекции. Для ее определения необходимо либо, используя аппарат теории подобия, привлекать экспериментальные данные, либо решать (как минимум) двумерные нелинейные задачи тепломассопереноса в бинарной смеси "пар–воздух". Определенный материал на этом пути накоплен для часто встречающегося в технических приложениях случая вынужденной конвекции (см., например, [2]). При пароводяном тушении пожара, однако, естественнее рассматривать свободную конвекцию. Задача определения  $\delta_D$  в этом случае будет рассмотрена в дальнейшем.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1987. – 444 с.

2 Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.