

КОНДЕНСАЦИЯ ПАРА ИЗ БИНАРНОЙ СМЕСИ В ПОРИСТОЙ ТРУБЕ

С конденсацией пара из смеси с инертным неконденсирующимся газом часто приходится встречаться в энергетике и в ряде процессов химической технологии. Наличие неконденсирующегося газа и образование на теплообменной поверхности пленки конденсата снижает интенсивность процесса совместного тепло- и массообмена при конденсации пара из бинарной парогазовой смеси.

Одним из методов интенсификации процессов переноса тепла и массы вещества является использование центробежных сил при завихрении потока различными устройствами [1]. Кроме того, для уменьшения толщины конденсатной пленки и быстрого отвода конденсата с поверхности конденсации применяют аппараты, снабженные пористыми элементами [2].

Данная статья посвящена изложению некоторых результатов экспериментального исследования процесса конденсации водяного пара из смеси с воздухом на внутренней поверхности пористой металлической трубы с установкой в ней шнекового завихрителя. Для сравнения проведены опыты без установки завихрителя при тех же режимных и гигротермических параметрах смеси.

Скорость смеси на входе в конденсатор составляла $W_{см} = 0,475 - 2,6$ м/с, что соответствовало диапазону числа $Re = 850-5000$. Температура поддерживалась в диапазоне $313-333^{\circ}K$. Влажностное содержание насыщенной паровоздушной смеси $0,02-0,151$ кг/кг с.в.; давление смеси $(0,95-1,05) \times 10^5$ н/м²; среднелогарифмический температурный напор $15-20^{\circ}C$.

Эксперименты проведены сериями при постоянных гигротермических параметрах бинарной смеси на входе в канал и переменных скоростных режимах. В каждой серии опытов поддерживался постоянный перепад температур между потоком смеси и поверхностью трубы.

Исследование проведено на экспериментальном стенде, описанном в [3]. На стенде был установлен новый рабочий участок, который представляет собой конденсатор, состоящий из трех конденсатных смонтированных секций. Конденсатная секция включает пористую трубу из титана с пористостью материала стенок порядка 50%, длиной 200 мм и внутренним диаметром 34 мм. Толщина стенки трубы 3 мм. Общая длина рабочего участка 648 мм.

На глубине 2 мм в стенку трубы по ее длине зачеканены медьконстантановые термопары. Такие же термопары установлены на входе и выходе опытного конденсатора для измерения температуры и влажности парогазовой смеси. Все термопары предварительно тарировались по лабораторным термометрам и психрометрам марки ТЛ с ценой деления 0,1 град.

Пористые трубы помещались в цилиндрические камеры сбора конденсата, которые соединялись штуцерами с бюретками для учета количества сконденсированного пара. В свою очередь камеры сбора конденсата были

вмонтированы в охлаждающие камеры, имеющие штуцера для подвода и отвода охлаждающей воды.

Отсос конденсата с поверхности пористой трубы осуществлялся путем создания разрежения в камерах сбора конденсата под пористой поверхностью, а его количество учитывалось путем взвешивания массы конденсата, собираемой в мерных бюретках за время опыта. Время эксперимента колебалось от 10 и 20 мин в зависимости от концентрации конденсирующегося пара в паровоздушной смеси. Механизм действия мерных отсасывающих бюреток описан в [4].

В качестве турбулизатора потока смеси использовался однозаходный шнековый завихритель с отношением шага к диаметру 0,8. Шаг винта 27,2 мм. Такая конструкция завихрителя является наиболее энергетически выгодной при работе с потоками, находящимися под давлением, близким к атмосферному [5].

При обработке данных опытов применена система критериев, предложенная Л.Д. Берманом:

$$Nu_D = f(Re, Pr_D, \pi_D, \epsilon_r, \frac{R_{\Pi}}{R_{\Gamma}}) [6]. \quad (1)$$

В нашем случае для насыщенной бинарной смеси воздуха и водяного пара

вместо величины ϵ_r введено отношение $\epsilon_{\Pi} = \frac{P_{\Pi}}{P_{см}}$, показывающее объ-

емное содержание пара в смеси. Небольшое его содержание незначительно влияло на величину диффузионного критерия Прандтля, который изменялся в пределах $Pr_D = 0,58 \div 0,64$. На этом основании величина Pr_D принималась постоянной и равной 0,61 и в явном виде в критериальное уравнение (1) не

вводилась. Отношение $\frac{R_{\Pi}}{R_{\Gamma}}$ для смеси водяной пар — воздух составляет 1,61. Поэтому в дальнейшем рассматривалось влияние на Nu_D критериев $Re, \pi_D, \epsilon_{\Pi}$ в степенном уравнении

$$Nu_D = C Re^m \pi_D^q \epsilon_{\Pi}^p. \quad (2)$$

За определяющий размер при обработке результатов опытов принят внутренний диаметр трубы. Определяющей температурой являлась температура бинарной смеси на входе в канал.

Коэффициент массообмена вычислялся по формуле

$$\beta_p = \frac{g_{\Pi}}{P_{\Pi} - P_{\Gamma}}, \quad (3)$$

где P_{Π} для насыщенной паровоздушной смеси определялась по ее температуре на входе в трубу, а удельный поток пара g_{Π} — по количеству конденсата, отсасываемому за время опыта. Благодаря практически мгновенному отсосу

капель конденсата конденсатная пленка на внутренней поверхности трубы не образовывалась. Это позволило определить величину P_H по температуре поверхности конденсации.

В результате для $Re = 850-5000$; $\epsilon_n = 0,05-0,197$; $\pi_D = 0,02-0,122$ получены две критериальные зависимости по массообмену при конденсации водяного пара из паровоздушной смеси в цилиндрической пористой трубе с установкой и без установки завихрителя на входе в трубу.

Массообмен при установке завихрителя на входе в трубу

$$Nu_D = 0,0353 Re^{0,84} \pi_D^{-0,41} \epsilon_n^{0,6} \quad (4)$$

Массообмен в трубе без завихрителя

$$Nu_D = 0,175 Re^{0,57} \pi_D^{-0,2} \epsilon_n^{0,28} \quad (5)$$

Анализ полученных критериальных зависимостей показывает, что изменение гидродинамических условий путем искусственной завихренности потока ведет к существенной интенсификации тепло- и массообмена. Однако с ростом поперечного потока пара как в прямолинейном, так и в потоке с завихрением коэффициент массообмена уменьшается. На это указывает наличие отрицательного показателя степени у критерия $\pi_D = \frac{\Delta P}{P_{см}}$, учитывающего влияние поперечного потока массы пара на массообмен. С повышением содержания водяного пара в смеси ϵ_n интенсивность массообмена увеличивается.

Сравнение формул (4) и (5) между собой и с результатами работы [7] показывает, что использование центробежных сил для интенсификации тепло- и массообмена при конденсации пара из паровоздушной смеси позволяет получать в завихренных потоках коэффициенты массообмена в 1,4-1,5 раза больше, чем в прямолинейных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щ у к и н В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. - М., 1970. - 300 с.
2. Л е о н т ь е в А.И. Инженерные методы расчета трения и теплообмена на проницаемой поверхности. - Теплоэнергетика, №9, 1972, с. 19.
3. С м о л ь с к и й Б.М., Ч е х о л ь с к и й А.С. Исследование процессов переноса тепла и вещества при конденсации смеси в криволинейном канале. - Изв. вузов. Сер. физ.-энергет. наук, 1978, № 1, с. 67.
4. И с а ч е н к о В.П., В з о р о в В.В., В е р т о г р а д с к и й В.А. Теплоотдача при испарении воды из пористой стенки, омываемой воздухом. - 1961, № 1, с. 65.
5. Ч е х о л ь с к и й А.С., Ч е х о л ь с к и й С.Л. Исследование влияния искусственной турбулизации потока на тепловую эффективность поверхности нагрева. Фазовые и химические превращения при взаимодействии тел с потоком газа. - Минск, 1975, с. 32.
6. Б е р м а н Л.Д. О критериях подобия для совместно протекающих процессов тепло- и массообмена в гетерогенных системах. - ЖТФ, XXVIII, вып. 11, 1958, с. 48.
7. Х о б л е р Т. Массопередача и абсорбция. - М., 1964, с. 132.