

ПЛЕНОЧНАЯ КОНДЕНСАЦИЯ ВОДЯНОГО ПАРА ИЗ ПАРОВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ РОЛИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

По сравнению со случаем пленочной конденсации чистого пара, даже небольшое количество неконденсирующегося газа в парогазовой смеси, соприкасающейся с поверхностью конденсации, резко уменьшает интенсивность переноса тепла к этой поверхности (см., например, [1]). Данное обстоятельство необходимо учитывать при создании технических устройств, в частности, пассивных систем безопасности, работа которых основана на отводе тепла через процесс конденсации на охлаждаемой стенке.

Для использования современных гидродинамических подходов к расчетам характеристик теплообмена при конденсации пара из парогазовой смеси необходима разработка эффективных методов учета процессов поверхностной конденсации в рамках гидродинамического решателя. При этом ряд базовых наработок может быть получен при численном решении задачи о ламинарном свободно-конвективном пограничном слое парогазовой среды, формирующемся у вертикальной изотермической поверхности.

В данной работе задача рассматривается в двух постановках. Первая из них (упрощенная) основана на приближении бесконечно тонкой пленки конденсата; в этом случае температура на границе парогазовой смеси и пленки полагается равной температуре стенки, а скорость смеси на межфазной границе принимается равной нулю. Во второй (полной) постановке осуществляется учет термического сопротивления пленки конденсата (переменного по продольной координате) и ненулевой скорости межфазной границы.

В обеих постановках течение и теплоперенос в свободно-конвективном слое рассчитываются численным методом на основе дифференциальных уравнений ламинарного пограничного слоя при полном учете непостоянства параметров парогазовой смеси: зависимости коэффициентов диффузии, динамической вязкости и теплопроводности от температуры, давления и массового отношения фракций смеси. В целом, разработанный метод учета процессов поверхностной конденсации предусматривает аккуратное разрешение динамического, температурного и диффузионного пограничного слоев, образующихся при пленочной конденсации из парогазовой среды, и (в случае полной постановки) использование нелинейных граничных условий, отражающих физику процесса конденсации и переноса тепла через пленку. Ключевым моментом является использование итерационного алгоритма расчета массового потока конденсирующего пара в пленку и непосредственно связанной с этим потоком нормальной компоненты скорости на межфазной границе.

Параметрические расчеты выполнены применительно к проблеме пленочной конденсации водяного пара из паровоздушной среды. Расчеты проведены для условий, которые соответствуют принятым в экспериментальном исследовании [2]: конденсация на охлаждаемой металлической пластине высотой около 100 мм, пластина находится внутри паровой камеры, заполненной паровоздушной смесью при атмосферном давлении и температуре около 100°C. Массовая доля воздуха на удалении от стенки W варьировалась от 0,01 до 0,2, перепад температур ΔT между стенкой и парогазовой средой — от 5°C до 70°C.

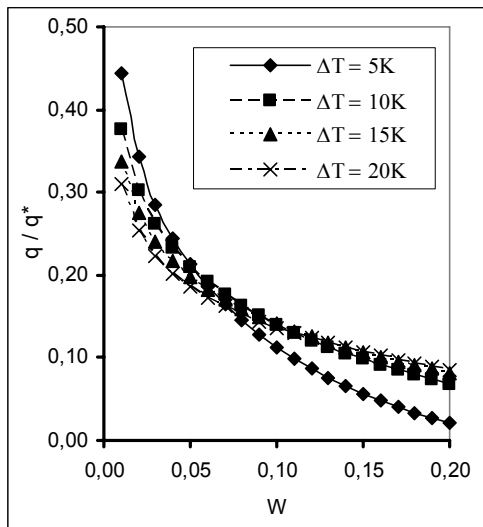


Рис. 1

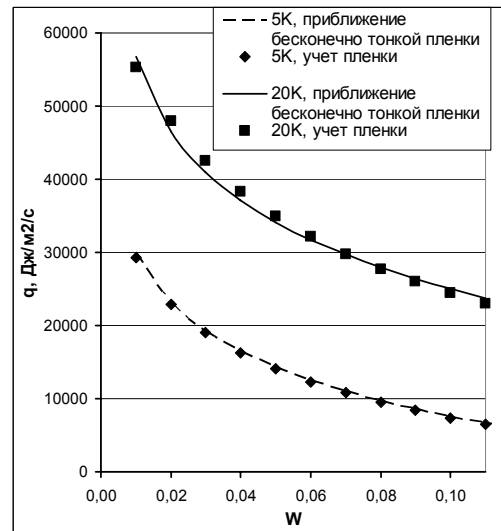


Рис. 2

На рис. 1 представлены результаты расчетов среднего по пластине теплового потока q , который нормирован на значение q^* , соответствующее случаю конденсации неподвижного чистого пара. Видно, что наличие в паре воздуха существенно уменьшает теплоотдачу, это находится в качественном и количественном согласии с измерениями [2].

Исследовано влияние учета пленки конечной толщины на результаты расчета теплового потока в пластину. На рис. 2 представлены значения среднего теплового потока в пластину, полученные в расчетах с учетом пленки и в приближении бесконечно тонкой пленки. Оказалось, что учет пленки весьма слабо влияет на результаты расчетов в широком диапазоне значений массовой доли газа и перепада температур. Данный факт можно объяснить тем, что введение термического сопротивления пленки компенсируется уменьшением диффузионно-термического сопротивления пограничного слоя парогазовой среды — из-за общего утоньшения слоя, обусловленного учетом движения пленки (фактически, ненулевой вертикальной скорости на межфазной границе).

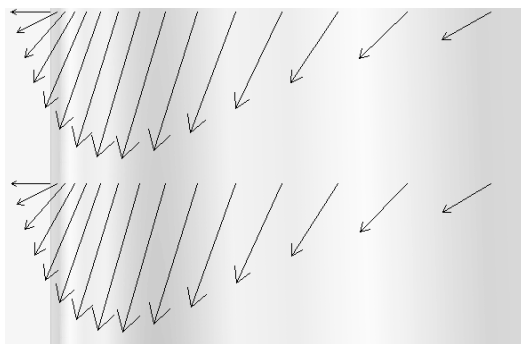


Рис. 3

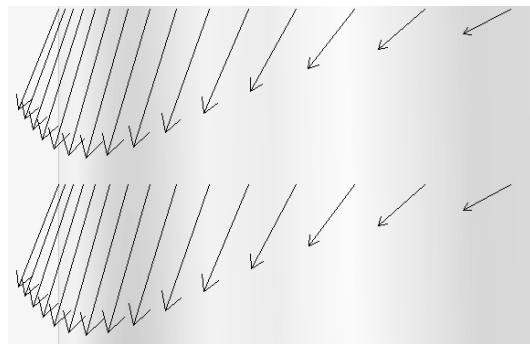


Рис. 4

На рис. 3 и 4 представлены фрагменты поля скорости в нижней части пластины, полученные, соответственно, в приближении бесконечно тонкой пленки и в случае учета пленки при перепаде температур $\Delta T=5^\circ\text{C}$ и массовой доле газа на удалении от стенки $W=0,01$. Видно, что в случае учета пленки профиль скорости существенно отличается от рассчитанного в приближении бесконечно тонкой пленки: при учете пленки профиль скорости в целом сдвигается в сторону стенки, максимум скорости также сдвинут в сторону стенки, все это свидетельствует об утоньшении слоя.

ЛИТЕРАТУРА:

1. В.П.Исаченко. Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1997. – 240с.

2. H.K.Al-Divany, J.W.Rose. F Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16, 1973. P. 1359-1369.