

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИНЖЕКЦИИ НА ДВИЖЕНИЕ КАПЛИ В ПОТОКЕ НАСЫЩЕННОГО ПАРА

Е.А. Маслов^{1,2}, А.Б. Бадмаев²

Томский политехнический университет, ЭНИН, АТЭС

²Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета

Повышение эффективности энергетического оборудования, включающего течение рабочего тела в виде гетерогенного многофазного потока, (в частности, потока пара) связано с новыми конструктивными решениями, обеспечивающими минимальные гидравлические потери, быстрое охлаждение рабочего тела до необходимой температуры. Один из способов увеличения эксплуатационного ресурса таких энергосистем – инжектирование в поток капель жидкости. При этом для предотвращения коррозии стенок канала условия инжекции должны удовлетворять требованию исключения возможности образования водяной пленки вследствие осаждения капель на стенке проточных трактов. В связи с этим возникает необходимость детального изучения основных динамических характеристик капель при движении в потоке пара в зависимости от условий их инжекции.

В настоящей работе приведены результаты численного исследования влияния условий инжекции на характеристики капли воды при инжектировании в поток перегретого пара в цилиндрическом канале. Предполагалось, что в поток пара инжектируется сферическая капля воды, причем в процессе движения в канале форма капли не изменяется. В численных экспериментах варьировались начальный размер, скорость, температура и пространственные координаты инжектируемой капли. Схема области решения представлена на рис. 1.

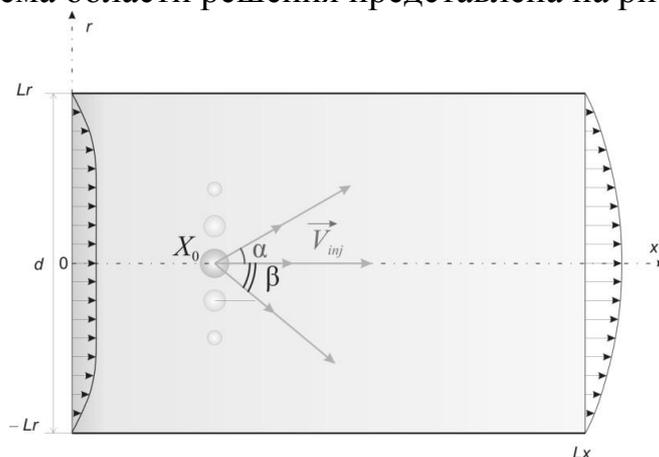


Рис. 1. Область решения задачи

Математически течение пара в канале описывалось системой стационарных уравнений Навье–Стокса. Во входном сечении канала течение считалось безвихревым с параболическим профилем скорости u_{in} и постоянной температурой T_{in} . На выходе из канала задавались «мягкие» граничные условия; на стенках канала – условия «прилипания» и адиабатичности.

При движении капли в потоке перегретого пара учитывалось, что ее размер изменяется вследствие испарения. Динамика капли переменного размера моделировалась уравнением движения в поле скоростей установившегося течения пара с учетом сил вязкого сопротивления и силы тяжести. Тепловое состояние капли описывалось нестационарным одномерным уравнением теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Скорость испарения с поверхности капли определялась соотношением Кнудсена–Ленгмюра.

Численное решение задачи реализовано методом контрольных объемов [1]. При реализации граничного условия на поверхности канала использовались пристеночные функции с эмпирическими зависимостями для течений с малыми числами Рейнольдса [2]. Дифференциальные уравнения аппроксимировались неявной пятиточечной схемой. При аппроксимации конвективных членов использовалась противопоточная схема QUICK, для расчета поля течения – процедура PISO. Диффузионные члены аппроксимировались центральной схемой второго порядка.

Численный анализ проведен при следующих условиях: длина канала $L_x = 2$ м; радиус сечения канала $L_r = 0.25$ м; температура потока паровоздушной смеси $T_f = 100$ °С; начальная скорость потока $u_{in} = 10$ м/с; начальная температура инжектируемой капли воды $T_{inj} = 20$ °С. В параметрических исследованиях варьировались начальный диаметр каплей в диапазоне $d_0 = (1 \div 7) \cdot 10^{-3}$ м, начальные координаты $X_0 = \{0; (-0.2 \div 0.2)\}$ м и компоненты вектора начальной скорости частиц $\mathbf{V}_{inj} = \{1; (-0.5 \div 3)\}$ м/с. На рис. 2 представлены траектории движения испаряющихся каплей с различным начальным диаметром при постоянных значениях начальных координат $X_0 = \{0; 0\}$ м и скорости $\mathbf{V}_{inj} = \{1; 1\}$ м/с. На рис. 3 приведены траектории движения капли начального диаметра 5 мм в зависимости от скорости инъекции.

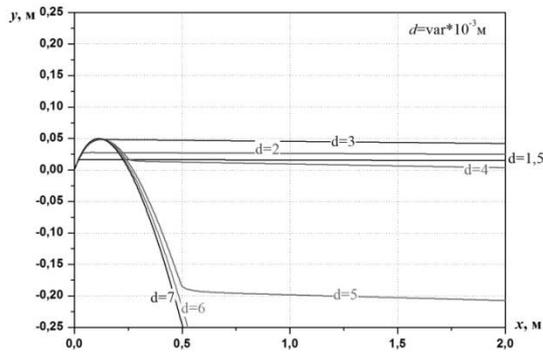


Рис. 2. Траектории движения капли в зависимости от начального диаметра

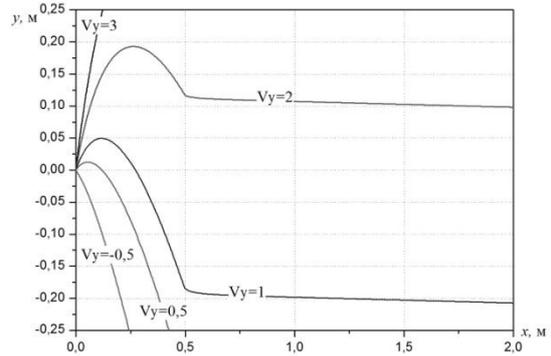
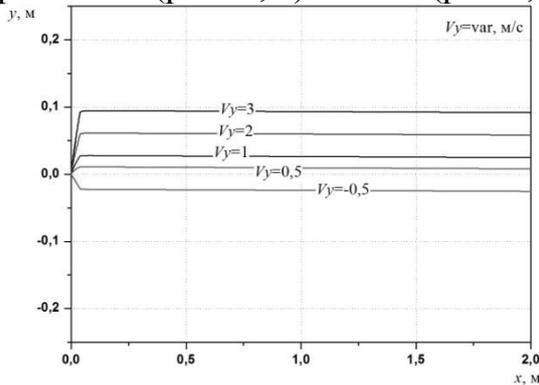
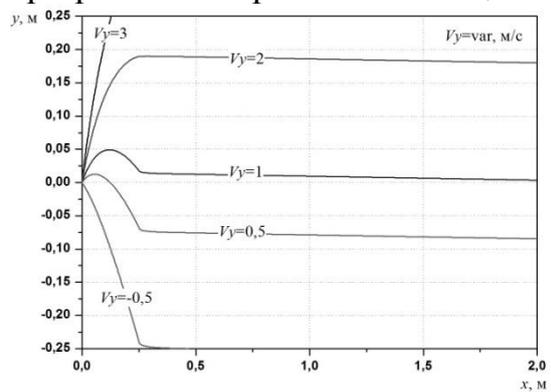


Рис. 3. Траектории движения капли в зависимости от скорости инъекции

При движении капли в потоке перегретого пара основным фактором, влияющим на условия ее осаждения на стенке канала, является испарение. На рис. 4 приведены траектории движения капель диаметром 2 мм (рис. 4, а) и 4 мм (рис. 4, б) при разных скоростях инъекции.



а)



б)

Рис. 4. Траектории движения капель диаметром 2 мм (а) и 4 мм (б) в зависимости от скорости инъекции;

Анализ результатов численного исследования показал, что при заданных параметрах исследования капли воды с начальными диаметрами менее 2 мм полностью испаряются при инъекции в поток перегретого пара на оси симметрии канала. Капли диаметром 5 мм испаряются при начальной инъекции в диапазоне координат $X_0 = \{0; (0 \div 0.2)\}$ м. Протяженность участка испарения одинакова, составляет ~ 0.5 м и в меньшей степени зависит от начального распределения скорости потока. Для исключения осаждения капель большего диаметра на стенке канала с дальнейшим образованием жидкой пленки необходимо увеличить скорость их инъекции в осевом направлении.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Versteeg H.K., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method. – Longman Scientific&Technical, 1995. – P. 258.
2. Maslov Ye.A., Zharova I.K., Fedotova N.S. Fluid dynamics and heat and mass transfer when interacting of heterogeneous jets with surfaces of different shapes // POWER ENGINEERING EFFICIENCY, RELIABILITY, SAFETY. Selected reports of all-Russian scientific and technical Conference. – London: Red Square Scientific. Published: 5 December 2014. – Pp. 40-44.

Научный руководитель: Е.А. Маслов, к.ф.–м.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ГРЕТЦА-НУССЕЛЬТА

В.Г. Милютин, В.С. Логинов
Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ

Задача Гретца-Нуссельта

Задача Гретца-Нуссельта формулируется для ламинарного стабилизированного течения жидкости в круглой трубе при постоянной температуре стенки по длине трубы при заданных расходе жидкости, температурах стенки и на входе в трубу решена с учетом следующих условий:

1. процесс теплообмена принимается стационарным;
2. жидкость считается несжимаемой и ее физические свойства постоянны (не зависящие от температуры);
3. в потоке отсутствуют внутренние источники теплоты, а теплота трения пренебрежимо мала;
4. тепловым потоком вдоль трубы за счет теплопроводности можем пренебречь по сравнению с конвективным тепловым. После преобразований, приведенных в [1] уравнение энергии в безразмерном виде запишется так:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \Theta(X, R)}{\partial R} \right) = (1 - R^2) \frac{\partial \Theta(X, R)}{\partial X}, \quad (1)$$

$$\text{где } \Theta = \frac{g}{g_0} = \frac{t - t_{cm}}{t_0 - t_{cm}}, \quad R = \frac{r}{r_0}, \quad X = \frac{a}{2\pi r_0} \frac{x}{r_0} = \frac{2}{Pe} \frac{x}{d};$$