

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ В ЗАМКНУТОЙ ЕМКОСТИ

А.В. Федоров, С.А. Лаврук

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск

На современном этапе развития ракетно-космической деятельности одной из главных проблем является экологическая безопасность, как околоземного пространства, так и непосредственно районов запуска и падения ступеней ракет. Рассматривая околоземное пространство, следует помнить о космическом мусоре [1]. Отработанные ступени и спутники, различные осколки, образующиеся в результате столкновения этих объектов, несут опасность для действующих спутников, а так же для Международной Космической Станции. Если говорить о районах падения, то в результате удара о землю может происходить разрушение топливных баков и в результате проливы топлива в почвогрунт и грунтовые воды. Для предотвращения проливов, а так же для создания импульса для спуска с орбиты предлагается газифицировать топливо после отделения ступени от ракеты и сбрасывать полученный газ через сопла сброса или сжигать в специальном ракетном двигателе.

Для моделирования процесса испарения в подобных технических устройствах были созданы экспериментальные установки [2], на которых получены результаты, связанные с испарением различных модельных жидкостей (вода, спиртовые смеси и т.д.), а так же с их различным геометрическим состоянием: - пленочное и капельное расположение [3]. Здесь же была предложена математическая модель процесса испарения жидкости, в которой учитывалась изменение температуры различных элементов технических устройств.

В качестве следующего шага нами было проведено моделирование течений вязкого теплопроводного газа в некоторой емкости в программном комплексе ANSYS. Для моделирования течения в объеме емкости используем метод численного решения уравнений Навье - Стокса осредненных по Рейнольдсу, использовалась модель турбулентности $k-\omega$ SST.

Итак, рассматривается некоторый объем технического устройства, заполненный газом и пленкой жидкости, прилегающей к поверхностям объема. С одной стороны устройства (бака) расположено входное сечение, через которое поступает нагретый газ. В нижней части емкости расположена пластина, на которой, вообще говоря, будет расположена пленка жидкости. В данной статье пренебрежем этой фазой. Газ обтекает поверхность пластины и вытекает через выходное сечение, расположенное на противоположной от входного сечения стенке (Рис.1.).

Вне зависимости от угла ввода, на входе в ёмкость поток теплоносителя имеет следующие параметры. Массовый расход $\dot{m}_{TH} = 0,01 \text{ г/с}$, давление $p = 210 \text{ кПа}$, температура $T_{TH} = 373 \text{ К}$. Начальные условия: температура всех поверхностей емкости равна $T = 290 \text{ К}$, температура воздуха в емкости $T = 290 \text{ К}$, давление в емкости равна $p = 100 \text{ кПа}$. Температура поверхностей в ходе моделирования постоянна и не меняется. На выходе из емкости давление равно $p = 100 \text{ кПа}$. Рассматриваемый процесс предполагает установление потоком в емкости. Исследовалась картина течения газа в емкости без учета испарения.

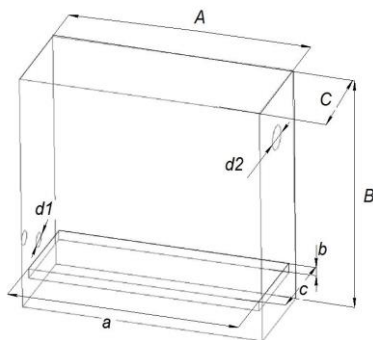


Рис.1. 3-ех мерная расчетная модель емкости. $A=0.5\text{м}$; $B=0.5\text{м}$; $C=0.2\text{м}$; $d1=0.03\text{м}$; $d2=0.05\text{м}$; $a=0.48\text{м}$; $b=0,02\text{м}$; $c=0,18\text{м}$. (параметры пластины)

На рис. 2. представлены поля скоростей в емкости в плоскости симметрии $z = 0.1\text{м}$ при различных углах ввода теплоносителя. Течение симметричное относительно плоскости симметрии. Сравнение полей скоростей газа проводилось для углов ввода, используемых в экспериментальной установке [2].

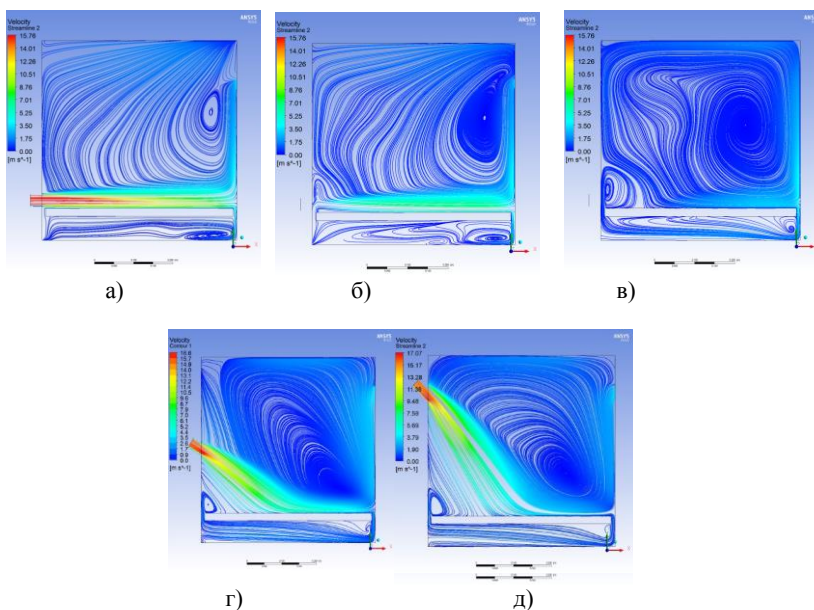


Рис.2. Поля скоростей при различных углах ввода в сечениях: а) 0 градусов в плоскости симметрии; б) 0 градусов на расстоянии 20 мм от оси симметрии; в) 0 градусов на расстоянии 50 мм от оси симметрии; г) 30 градусов в плоскости симметрии, д) 45 градусов в плоскости симметрии.

Горячий газ выходит из входного сечения со скоростью в 15 – 17 м/с, после чего скорость снижается почти в 2-3 раза. Скорость газа вдоль пластины для всех рассмотренных случаев равна примерно 5-7 м/с. В конце пластины поток разделяется на две части,

образуя две области течения, под пластиной и над пластиной. Над пластиной поток газа движется до выходного сечения, где часть потока вытекает из емкости. Газ, оставшийся в емкости, продолжает течение, образуя вихрь, который образуется во всех рассмотренных случаях (Рис. 2). Вихревое образование возникает также перед и под пластиной. При угле ввода в 0 градусов в плоскости симметрии вихрь не образуется. Однако в других сечениях, на расстоянии 0,02 м и 0,05 м от плоскости симметрии, видно, что сначала вихрь образуется, а затем его объем увеличивается. Средняя скорость потока в областях над и под пластиной составляет около 2 м/с.

Поля скоростей внутри емкости были рассмотрены для определения числа Рейнольдса, необходимого для расчета числа Нуссельта пластины. В качестве характерной длины использовалась длина пластины. Вязкость газа рассчитывалась в зависимости от температуры газа вдоль пластины.

Итак, определим зависимость числа Нуссельта от Re при обтекании пластины по известным в литературе представлениям. Для расчета рассматривалась скорость вдоль пластины при угле ввода в 0 град, на высоте в 3 мм от пластины. В качестве таковых рассматривались формулы, представленные в источниках [3] и [4]. Сплошной линией представлено выражение для числа Нуссельта для случая турбулентного течения вдоль пластины, рассчитано по формуле из [3] (Рис. 3):

$$Nu = 0.045 Pr^{0.43} Re^{0.8} \quad (1)$$

Сплошной линией представлено выражение для определения числа Нуссельта при обтекании пластины, полученные из результатов эксперимента, рассчитанное по формуле из [4] (Рис. 3):

$$Nu = 0.035 Pr^{1/3} Re^{0.8} \quad (2)$$

В общем случае кривые имеют одинаковый качественный характер. Так как в рассмотренном объеме течение турбулентное, то при сравнении значений полученных по формуле (1) и (2) различие составляет 19%. Осредненное значение числа Нуссельта пластины, рассчитанные по формулам (1) и (2), равны 501 и 622 соответственно.

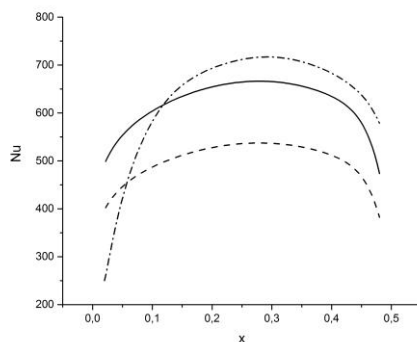


Рис.3. Зависимость Нуссельта от Рейнольдса для представлений (1) и (2). Сплошная линия – формула (1), пунктирная линия – формула (2), штрих - пунктирная линия – моделирование в программе ANSYS Fluent.

При сравнении результатов моделирования в ANSYS Fluent с моделированием по формулам (1) и (2) видно, в среднем на большей части пластины моделирование в ANSYS совпадают с моделированием по формуле (1), однако, в начале пластины, примерно до размера в 0,1 м значения разнятся. Скорее всего, разница в полученных значениях получаются из-за того, что в результаты ANSYS получаются из расчета тепловых

потоков вдоль пластины, в то время как при расчете по формулам (1) и (2) используется скорость потока вдоль пластины.

Дополнительно было проведено сравнение результатов в зависимости от представления числа Рейнольдса. В первом случае Рейнольдс представлялся как зависимость только от скорости на высоте 3мм от пластины (Re_v), во втором как зависимость скорости на высоте 20 мм от пластины (вдоль оси симметрии струи при выходе из входного сечения) и шага вдоль пластины ($Re_{v,x}$). Моделирование числа Нуссельта проводилось по (1). При сравнении видно, что сплошная кривая идет ниже остальных, однако, в конце пластины все три зависимости имеют общий диапазон изменения. В начале пластины наблюдается сильное расхождение результатов. Все три кривые можно сравнить с длины $x=0.2$ м где средняя разница между кривыми составляет около 20%.

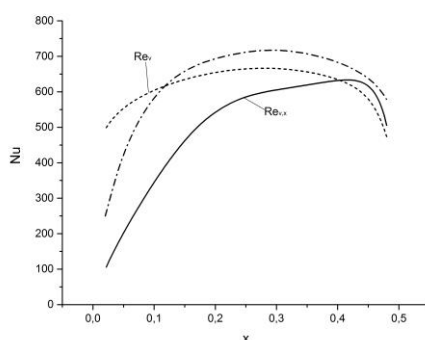


Рис.4. Сравнение числа Нуссельта в зависимости от представления числа Рейнольдса. Сплошная линия – $Re_{v,x}$, пунктирная линия – Re_v , штрих-пунктирная линия – моделирование в программе ANSYS Fluent.

Выводы

В работе проведено математическое моделирование течения газа в емкости при различных углах ввода теплоносителя.

По результатам расчетов определено число Нуссельта для пластины и сопоставлено с данными в рамках его различных представлений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15–08–01947–а) и Минобрнауки РФ (грант по Соглашению № 14.577.21.0157 от 28.11.2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров А.В., Фомин В.М. Математическое моделирование поведения популяции искусственных объектов в околоземном пространстве // ФГВ. 1994. № 5. С. 142 - 148.
2. Трушляков В.И., Куденцов В.Ю., Казаков А.Ю., Курочкин А.С., Лесняк И.Ю. Экспериментальные исследования процесса низкотемпературной газификации жидкости / Омский научный вестник. Омск, 2011. №2 (100). С. 150 – 153.
3. Tryshlyakov V.I., Lavruk S.A. Theoretical and experimental investigations of the interaction of hot gases with liquid in closed volume // Acta Astronautica, 2015, №109, pp. 241 –247.
4. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче // М.: Госэнергоиздат, 1958. С. 417.