РЕЖИМЫ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Астанина М.С.
Научный руководитель: д.ф.-м.н., доцент Шеремет М.А.
Томский государственный университет
e-mail: astanina.marina@bk.ru

Введение

При современном уровне развития промышленности, энергетики и приборостроения все большее значение приобретают разработки систем охлаждения. Исследования в данной области позволяют предсказывать поведение систем с тепловыделяющими элементами и предотвращать их преждевременный выход из строя [1]. Особый интерес вызывают задачи, в которых свойства среды (жидкости) зависят от внешних параметров (температура, давление и т.п.).

Постановка задачи

В настоящей работе моделируется процесс охлаждения источника энергии в горизонтальном канале (рис. 1).

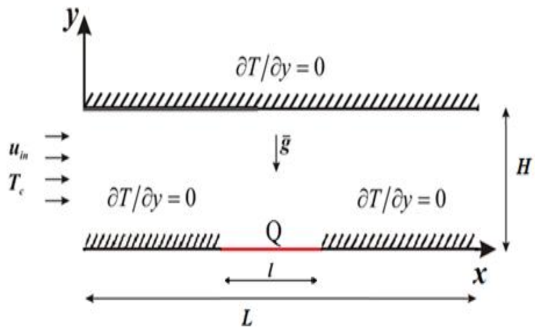

Рис. 1. Область решения задачи

Рассматривается прямоугольная область (L = 10H). В прямоугольную полость через входное отверстие поступает ньютоновская несжимаемая жидкость с постоянной температурой охлаждения T_c и постоянной горизонтальной скоростью u_{in}. Вязкость жидкости зависит от температуры по экспоненциальному закону: $\mu = \mu_0 \exp\left[-C\dfrac{T-T_0}{\Delta T}\right]$.

Считается, что рабочая среда удовлетворяет приближению Буссинеска, а режим течения и теплопереноса является ламинарным. Тепловыделяющий элемент располагается в центре нижней стенки; выделение тепла на нем моделируется на основе закона Фурье $Q = -\lambda\dfrac{\partial T}{\partial y}$.

Верхняя и нижние стенки, исключая источник, теплоизолированы. Сила тяжести направлена вертикально вниз по оси y.

Математическая модель

Для описания гидродинамики внутри полости используются дифференциальные уравнения в безразмерных преобразованных переменных «функция тока – завихренность – температура»:

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial Y^2}=-\Omega \qquad (1)$$

$$\frac{\partial\Omega}{\partial\tau}+U\frac{\partial\Omega}{\partial X}+V\frac{\partial\Omega}{\partial Y}=\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2(\mathrm{M}\Omega)}{\partial X^2}+\frac{\partial^2(\mathrm{M}\Omega)}{\partial Y^2}\right)+$$
$$+Ri\cdot\frac{\partial\Theta}{\partial X}+\frac{2}{\mathrm{Re}}\left[\frac{\partial^2\mathrm{M}}{\partial X^2}\frac{\partial U}{\partial Y}-\frac{\partial^2\mathrm{M}}{\partial Y^2}\frac{\partial V}{\partial X}+\right. \qquad (2)$$
$$\left.+\frac{\partial^2\mathrm{M}}{\partial X\partial Y}\left(\frac{\partial V}{\partial Y}-\frac{\partial U}{\partial X}\right)\right],$$

$$\frac{\partial\Theta}{\partial\tau}+U\frac{\partial\Theta}{\partial X}+V\frac{\partial\Theta}{\partial Y}=\frac{1}{\mathrm{Re}\cdot\mathrm{Pr}}\left(\frac{\partial^2\Theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\Theta}{\partial Y^2}\right). \qquad (3)$$

Здесь X, Y – безразмерные декартовы координаты; U, V – безразмерные составляющие скорости в проекции на оси; Θ – безразмерная температура; Ψ – безразмерная функция тока; Ω – безразмерная завихрённости скорости, $\mathrm{Re}=\dfrac{u_{in}L}{\nu}$ – число Рейнольдса, $\mathrm{Pr}=\dfrac{\nu}{a}$ – число Прандтля, $\mathrm{Ri}=\dfrac{\mathrm{Ra}}{\mathrm{Pr}\cdot\mathrm{Re}^2}$ – число Ричардсона.

Граничные условия для системы (1)–(3) запишем в безразмерном виде:

- на стенке Y = 0:
  $$\Psi=0,\ \partial\Psi/\partial Y=0,\ \partial\Theta/\partial Y=0,$$
- на стенке Y = 1:
  $$\Psi=1,\ \partial\Psi/\partial Y=0,\ \partial\Theta/\partial Y=0,$$
- на входе в канал X = 0:
  $$\Theta=0,\ \Omega=0,\ \Psi=Y,$$
- на выходе из канала X = 1:
  $$\partial\Psi/\partial X=\partial\Omega/\partial X=\partial\Theta/\partial X=0,$$
- на источнике:
  $$\Psi=0,\ \partial\Psi/\partial Y=0,\ \partial\Theta/\partial Y=-\mathrm{Ki}$$

Здесь $\mathrm{Ki}=-\dfrac{QL}{\lambda\Delta T}$ – число Кирпичёва.

Полученные уравнения (1)–(3) с соответствующими начальными и граничными условиями решались методом конечных разностей. Значения завихренности скорости на твердых стенках и на источнике энергии определялись на основе формулы Пирсона [2]. Для численного решения уравнений параболического типа (2) и (3) применялась локально-одномерная схема Самарского, позволяющая плоскую задачу свести к системе одномерных задач. Дискретизация уравнения Пуассона (1) проводилась на основе формул симметричной аппроксимации вторых производных. При этом полученное разностное уравнение разрешалось методом последовательной верхней релаксации. Разработанный метод решения тестировалась ранее на других задачах [3,4].

Для выявления основных закономерностей тепломассопереноса в условиях смешанной конвекции был проведен анализ влияния интенсивности тепловыделения источника (Ki = 1–5), параметра изменения вязкости C в законе $\mu = \mu_0 \exp\left[-C\dfrac{T-T_0}{\Delta T}\right]$, а также числа Прандтля и Рэлея.

Результаты

Моделирование было проведено для широкого диапазона изменения определяющих параметров. При рассмотрении задачи активного охлаждения важнейшее влияние на процесс оказывает интенсивность тепловыделения на источнике. В свете этого были рассмотрены различные значения числа Кирпичёва (Ki = 1–5). Рассмотрим некоторые полученные результаты.

На рисунке 2 показаны поля изолиний функции тока и температуры при Ki = 1 и фиксированных параметрах Ra = 10^4, Pr = 0.7, C = 1, Re = 100.

По распределению изолиний видно, что в полости образуется насквозь проходящее течение. Тепловой факел, формирующийся над источником, «выдувается из канала» за счет действия активного потока.

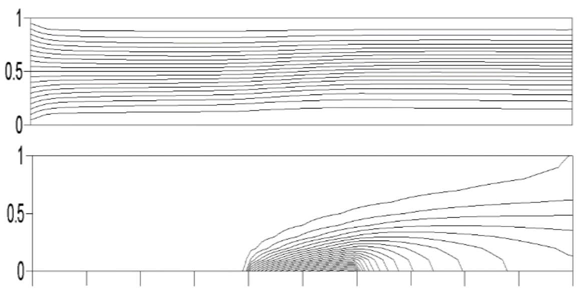

Рис. 2 Изолинии и поле температуры при (Ki = 1)

При увеличении числа Кирпичёва наблюдается усложнение картины течения в полости (рис. 3). Над источником энергии образуются дополнительные вихри. Теплосъем с поверхности нагревателя при этом увеличивается.

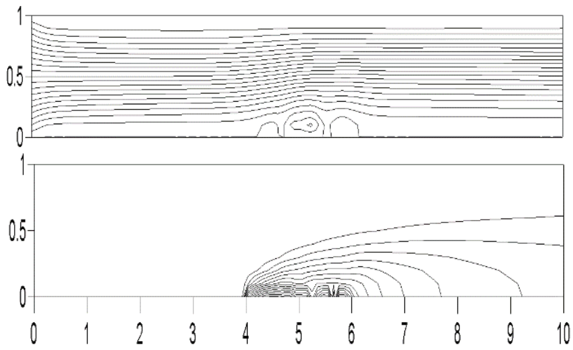

Рис. 3. Линии тока и изотермы при Ki = 3

При дальнейшем увеличении числа Кирпичёва наблюдается ещё более сильное возмущение течения у источника. Теплосъём с поверхности источника при этом увеличивается.

Заключение

Было проведено математическое моделирование системы активного охлаждения источника тепловыделения. Теплоперенос в данном случае происходит за счёт смешанной конвекции. По приведенным результатам можно отметить, что увеличение мощности источника приводит к значительному изменению течения в канале.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки России (задание № 13.9724.2017/8.9).

Список использованных источников

1. Salma Gharbi, Souad Harmand, Sadok Ben Jabrallah. Experimental comparison between different configurations of PCM based heat sinks for cooling electronic components // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 87. – P. 454–462.
2. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
3. Astanina M.S., Sheremet M.A., Umavathi J.C. Unsteady natural convection with temperature-dependent viscosity in a square cavity filled with a porous medium // Transport in Porous Media. – 2015. – Vol. 110. – No. 1. – P. 113–126.
4. Astanina M.S., Sheremet M.A. A transient free convection study with temperature-dependent viscosity in a square cavity with a local heat source// IOP Conf. – Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2016. – 124 012039.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания 13.9724.2017/БЧ