

стью может нести вред студенту. В равной степени, как технология помогает избежать опасности на цифровом производстве, так и заставляет терять ощущение реальности этой опасности на настоящем производстве.

На данный момент сложно утверждать, что тренировки инженеров на VR-тренажерах после приводили к негативным последствиям при работе на реальном производстве. Технология использовалась недостаточно долго, и необходимых исследований еще не было сделано. Однако можно обратиться к случаю с пожарными из США, которые при использовании VR-тренажеров, демонстрировали отличный результат по итоговому тестированию. Но в жизни, столкнувшись с реальным пожаром, они терялись [5]. Постоянная отработка навыков на определенном производстве «в цифре» не даёт гарантии, что студент так же слаженно работает в реальности, поэтому любой VR-тренажер после себя требует инструктаж и прохождения практики в реальности.

В заключении хочется отметить, что виртуальная реальность – это крайне эффективная обучающая среда, которая способна в краткие сроки предоставить студенту все необходимые условия для взаимодействия с «реальными» объектами производствами. Что важно, для отечественного образования внедрение VR-тренажеров повысит увлеченность и самостоятельность студентов в обучении. Но при этом у данной технологии есть два ключевых недостатка: стоимость и влияние на оценку реальных ситуаций. Как и любое нововведение, виртуальная реальность открывает новые возможности в обучении, и существенно влияет, как и на сам процесс, так и на его участников. А об долгосрочных последствиях этого влияния мы сможем судить через неопределенное время, надеюсь, не слишком долгое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровков А.И. и др. Глобальные тренды в инженерном образовании // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки. – Т. 9, № 4. – С. 58–76.
2. Rakhmonov A.B. The introduction of virtual reality In the educational process: advantages and disadvantages // European science. – 2020. – Vol. 5 (54). – P. 39–41.
3. Ленсу Я.Ю. На пути к виртуальной реальности // Инновационные образовательные технологии. – 2014. – № 1. – С. 71–76.
4. Monaha T. Virtual Reality for Collaborative E-learning // T. Monaha, G. McArdle, M. Bertolotto // Computers and Education. – 2006.
5. Bobby Carlton US Fire Administration Advocates The Use Of VR For Firefighter Training (July 27, 2020). URL: <https://vrscout.com/news/us-fire-administration-vr-firefighter-training/> (дата обращения 07.11.2022)

СРАВНЕНИЕ ДВУ- И ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗАМКНУТЫХ ОБЛАСТЯХ ПРИ НАЛИЧИИ РЕБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ

Суан Хоанг Кхоа Лэ

*Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А0-11*

Научный руководитель: М.А. Шеремет, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова, ТПУ

Введение

Естественная конвекция в замкнутых областях становится интересом многих ученых благодаря ее широкому применению во многих областях, таких как отопление и вентиляция жилых помещений, охлаждение электронного оборудования, солнечная энергетика, хранение

радиоактивных отходов и т. д. Интенсификация естественной конвекции является одной из самых важных задач для ученых. Одним из методов интенсификации конвективного теплообмена является применение реберной структуры. Он получает широкое применение в таких важных областях, как энергетика, электроника, энергетическое приборостроение и т. д. Большое количество работ по естественной конвекции в двумерных замкнутых областях при наличии реберной структуры было изучено за прошедшие десятки лет, например, Vilgen [1] численно изучал естественную конвекцию в квадратной полости с одним тонким ребром на левой стенке; Kiwan [2] представил простой метод анализа характеристик пористого ребра.

Естественная конвекция в трехмерных областях также была изучена интенсивно, но в меньшем количестве: естественная конвекция в трехмерной кубической полости с одним ребром на горячей грани была численно исследована Frederick и Moraga [3]; da Silva и Gosselin [4] численно нашли идеальную конфигурацию прямоугольного ребра на горячей стенке кубической полости и т. д.

В данной работе проводится сравнение двумерной и трехмерной моделей естественной конвекции в замкнутых областях при наличии реберной структурой (твердых и пористых ребер) при большом диапазоне числа Рэлея ($Ra = 10^4 - 10^6$). Ключевые параметры для сравнения являются схемой движения жидкости и распределением температуры внутри полости, а также интенсивность теплообмена.

Постановка задачи

Область решения в двумерной постановке задачи показывается на рис. 1. Она представляет собой квадратную полость с размером сторон L с двумя вертикальными стенками, имеющими разные температуры T_h и T_c ($T_h > T_c$) и двумя адиабатическими горизонтальными стенками. На левой стенке располагается одно ребро (твердое или пористое), имеющее высоту $h=0,1L$ и длину $l=0,4L$. Ребро находится на высоте $d=0,4L$ от нижней стенки полости.

Область решения в трехмерной постановке задачи показывается на рис. 2. Она является кубической полостью с размером сторон L . На двух боковых стенках поддерживаются постоянные, но разные температуры T_h (при $y = 0$) и T_c (при $y = L$) ($T_h > T_c$). Другие стенки делаются теплоизолированными. На горячей стенке на высоте $d=0,4L$ от нижнего основания полости располагается одно ребро (твердое и пористое), имеющее высоту $h=0,1L$, длину $l=0,4L$ и ширину L .

Нестационарный процесс конвективного теплообмена в двумерной постановке с учетом приближения Буссинеска описывается системой дифференциальных уравнений, состоящих из трех уравнений: уравнения Пуассона, уравнения завихренности и уравнения энергии. В безразмерных переменных в системе «функция тока–завихренность» они принимают вид:

- внутри жидкой полости:

$$\nabla^2 \psi = -\omega$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \nabla) \omega = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \omega + \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

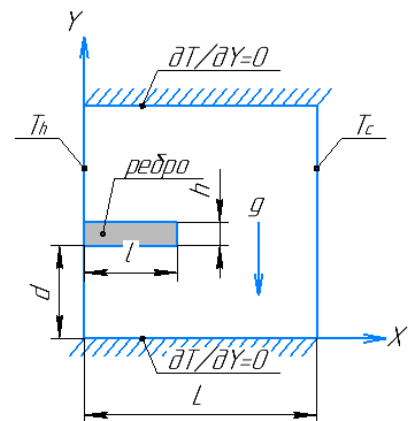


Рис. 1. Квадратная полость с одним твердым или пористым ребром

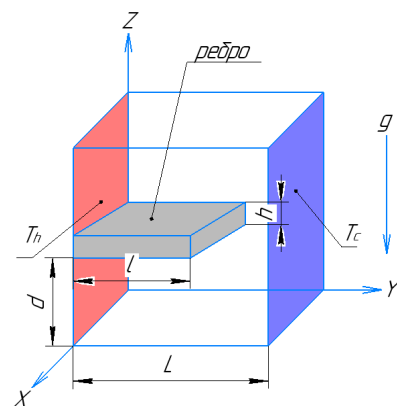


Рис. 2. Кубическая полость с одним твердым и пористым ребром

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \theta = \frac{1}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \nabla^2 \theta.$$

- внутри твердых ребер:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{a_s/a_f}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \nabla^2 \theta$$

- внутри пористых ребер:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \psi &= -\omega \\ \varepsilon \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \omega &= \varepsilon \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \omega - \frac{\varepsilon^2}{Da} \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \omega + \varepsilon^2 \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ \gamma \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \theta &= \frac{a_{eff}/a_f}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \nabla^2 \theta. \end{aligned}$$

Начальные и граничные условия:

$$\tau = 0 \rightarrow \psi = \omega = 0, \theta = 0,5$$

$$\tau > 0 \rightarrow x = 0, 0 \leq y \leq 1, \psi = 0, \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \theta = 1$$

$$x = 1, 0 \leq y \leq 1, \psi = 0, \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \theta = 0$$

$$y = 0 \text{ и } y = 1, 0 \leq x \leq 1, \psi = 0, \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$$

- на поверхности твердых ребер:

$$\psi = 0, \frac{\partial \psi}{\partial n} = 0, \theta_s = \theta_f, \frac{\partial \theta_f}{\partial n} = \frac{\lambda_s}{\lambda_f} \frac{\partial \theta_s}{\partial n}$$

- на поверхности пористых ребер:

$$\psi_p = \psi_f, \frac{\partial \psi_p}{\partial n} = \frac{\partial \psi_f}{\partial n}, \omega_p = \omega_f, \frac{\partial \omega_p}{\partial n} = \frac{\partial \omega_f}{\partial n}, \theta_p = \theta_f, \frac{\partial \theta_f}{\partial n} = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f} \frac{\partial \theta_p}{\partial n}$$

Нестационарный процесс конвективного теплопереноса в приближении Буссинеска внутри кубической полости описывается тремя же уравнениями, как и в случае с двумерной полостью. В безразмерных преобразованных переменных «скорость–вектор завихренности» эти уравнения записываются как:

- внутри жидкой полости:

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{\omega} = (\vec{\omega} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} + \nabla \theta + \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \vec{\omega},$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0,$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \theta = \frac{1}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \nabla^2 \theta.$$

- внутри твердых ребер:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{a_s/a_f}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \nabla^2 \theta$$

- внутри пористых ребер:

$$\varepsilon \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{\omega} = (\vec{\omega} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} + \varepsilon^2 \nabla \theta + \varepsilon \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \vec{\omega} - \frac{\varepsilon^2}{Da} \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \vec{\omega}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0,$$

$$\gamma \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \theta = \frac{a_{eff}/a_f}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \nabla^2 \theta.$$

Начальные и граничные условия:

$$\tau = 0 \rightarrow u = v = w = \omega_x = \omega_y = \omega_z = 0, \theta = 0,5$$

$$\tau > 0 \rightarrow x = const, u = v = w = 0, \omega_x = 0, \omega_y = -\frac{\partial w}{\partial x}, \omega_z = \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$$

$$y = 0, u = v = w = 0, \omega_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \omega_y = 0, \omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y}, \theta = 1$$

$$y = 1, u = v = w = 0, \omega_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \omega_y = 0, \omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y}, \theta = 0$$

$$z = const, u = v = w = 0, \omega_x = -\frac{\partial v}{\partial z}, \omega_y = \frac{\partial u}{\partial z}, \omega_z = 0, \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$$

- на поверхности твердых ребер:

$$u = v = w = 0, \theta_s = \theta_f, \frac{\partial \theta_f}{\partial n} = \frac{\lambda_s}{\lambda_f} \frac{\partial \theta_s}{\partial n}$$

- на поверхности пористых ребер:

$$u_p = u_f, v_p = v_f, w_p = w_f, \omega_{xp} = \omega_{xf}, \frac{\partial \omega_{xp}}{\partial n} = \frac{\partial \omega_{xf}}{\partial n}, \omega_{yp} = \omega_{yf}, \frac{\partial \omega_{yp}}{\partial n} = \frac{\partial \omega_{yf}}{\partial n},$$

$$\omega_{zp} = \omega_{zf}, \frac{\partial \omega_{zp}}{\partial n} = \frac{\partial \omega_{zf}}{\partial n}, \theta_p = \theta_f, \frac{\partial \theta_f}{\partial n} = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f} \frac{\partial \theta_p}{\partial n}.$$

Система дифференциальных уравнений для дву- и трехмерной моделей вместе с их граничными условиями решается методом конечных разностей. Языковая программа для написания кода – Microsoft Visual Studio 2017. Условие сходимости для итерационных методов составляет 10^{-6} , а шаг по времени – 10^{-3} . Верификация правильности написания кода была проведена путем сравнения результатов, полученных в данной работе, с результатами, полученными в работе других авторов для следующих тестовых задач: чистая полость; полость, полностью и частично заполненная пористым материалом; полость при наличии теплопроводной стенки. Анализ влияния сетки также был проведен, чтобы найти наиболее подходящую сетку для расчета. Результаты анализа показывают, что сетки 100×100 и $100 \times 100 \times 100$ являются оптимальными для дву- и трехмерной моделей соответственно.

В ходе решения было проанализировано движение и распределение температуры внутри полости с твердыми и пористыми ребрами в дву- и трехмерном пространстве. После чего были выявлены различия между схемами движения жидкости и распределением температуры, а также среднее число Нуссельта для этих моделей. Результаты показывают, что существенные различия в среднем числе Нуссельта в дву- и трехмерном пространстве наблюдаются в полости с твердыми ребрами. Трехмерная полость с твердыми ребрами лучше интенсифицирует теплообмен на 45–55 % по сравнению с двумерной полостью с твердыми ребрами, в то время эта разница составляет только 8–10 % для полостей с пористыми ребрами. Также было замечено, что разница между дву- и трехмерной моделями растет по мере увеличения числа Рэлея.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bilgen E. Natural convection in cavities with a thin fin on the hot wall // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2005. – Vol. 48. – P. 3493–3505.
2. Kiwan S. Thermal analysis of natural convection porous fins // Transport in Porous Media. – 2007. – Vol. 67. – P. 17–29.
3. Frederick R.L., Moraga S.G. Three-dimensional natural convection in finned cubical enclosures // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2007. Vol. 28. – P. 289–298.
4. Da Silva A.K., Gosselin L. On the thermal performance of an internally finned three-dimensional cubic enclosure in natural convection // International Journal of Thermal Sciences. – 2005. – Vol. 44. – P. 540–546.