

Влияние теплоемкости стенки на рост давления и температурное расслоение при тепловой конвекции паров водорода в вертикальной цилиндрической емкости

Городнов А.О.^{1,2*} Лаптев И.В.^{1,2}**

¹ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», ул. Онежская, 8, Москва, 125438, Россия

²Московский физико-технический институт, Институтский переулок, 9,
Долгопрудный, Московская область, 141701, Россия

*e-mail: an.ol.gorodnov@gmail.com

**e-mail: laptev.iv.kerc@gmail.com

Статья поступила 24.12.2020

Аннотация

В работе рассматривается проблема влияния теплоемкости и теплопроводности стенки на температурное расслоение и рост давления при тепловой конвекции газообразного водорода в замкнутом сосуде в условиях, приближенно моделирующих паровую подушку криогенного топливного бака при хранении. Для описания процессов тепломассопереноса в газе применяется модель на основе приближения малых чисел Маха. В результате серии численных экспериментов получены оценки степени влияния стенки на скорость роста давления и величину температурного расслоения для случая вертикального цилиндрического сосуда с изотермической нижней границей.

Ключевые слова: естественная конвекция, приближение малых чисел Маха, приближение гомобаричности, бездренажное хранение, паровая подушка.

Введение

Известно, что наличие перегрузки и внешнего теплопритока в криогенные топливные баки ракет приводит к возникновению свободно-конвективных течений как в жидкой фазе хранимого компонента топлива, так и в его паровой подушке. Кондуктивный перенос тепла и указанные конвективные течения формируют температурное расслоение в направлении действия перегрузки, которое, в свою очередь, повышает скорость роста давления в баке, а также увеличивает незабираемые остатки топлива. Данные эффекты наблюдались как в наземных, так и в летных экспериментах по хранению криогенных жидкостей [1-5]. Указанные проблемы особенно актуальны в связи с развертыванием в России и за рубежом работ по созданию ракет тяжелого класса на криогенных компонентах [6]. При этом, в последнее время все большее значение при создании новых ракет-носителей приобретают средства математического моделирования, которые позволяют существенно сократить затраты на экспериментальную отработку различных систем [7].

Характеристики конвекции и температурного расслоения в жидкости и газе при малых перепадах температур достаточно подробно изучены при помощи модели на основе приближения Буссинеска [8-15]. С использованием данной модели также проводились исследования тепловой конвекции в замкнутых объемах в сопряженной постановке с учетом внутренних источников тепла и теплопереноса в стенках [16-17]. Однако температурные перепады, реализовывающиеся в паровой подушке баков в известных опытах по хранению криогенных жидкостей, достигают весьма

значительных величин по сравнению с жидкой фазой. Например, в опытах по хранению водорода [2, 3] температура жидкости не выходила за диапазон 20-25 К, тогда как в паровой подушке бака отличие между максимальной и минимальной температурами достигало десятков градусов. В таких условиях применимость приближения Буссинеска для описания процессов тепломассообмена в паре является весьма сомнительной [18-19].

В работах [20-21] для тепловой конвекции при больших перепадах температуры с существенно дозвуковыми скоростями движения было предложено использовать модель на основе уравнений Навье-Стокса в приближении малых чисел Маха, также называемую приближением гомобаричности. Данная модель успешно применялась для учета влияния поршневого эффекта при тепломассопереносе [22-23], а также для исследований отличий тепловой конвекции при значительных перепадах температур от случая слабо сжимаемой среды, описываемого моделью Буссинеска [24-28]. При этом для случая конвекции газа в условиях, близких к реализуемым при хранении в паровой подушке бака, систематических исследований физических процессов практически не проводилось.

Экспериментальное моделирование внутрибаковых процессов на моделях меньших масштабов, как правило, учитывает геометрическое подобие внутренней полости бака, подобие по тепловым потокам, времени хранения и числу Рэлея. При этом, подобие по толщине стенки не воспроизводится в силу конструктивных ограничений модели – толщина стенки в опытах значительно превосходит толщины, требующиеся для точного соблюдения условий подобия. Естественно возникает

вопрос о влиянии этой составляющей «неподобия» модельного эксперимента на значения скорости роста давления в баке при переносе на натурные изделия. Кроме того, при исследовании тепломассопереноса при конвекции газа в условиях, приближенно моделирующих паровую подушку бака без учета влияния стенки и фазовых переходов [28], полученные в результате расчетов градиенты температуры в газе в несколько раз превышали наблюдаемые в экспериментах величины.

Данные обстоятельства приводят к необходимости оценки степени влияния теплоемкости и теплопроводности стенки на тепломассообмен при нагреве паровой подушки. В качестве первого шага к решению обозначенных проблем в данной работе проводится численное исследование конвекции в паре с учетом теплообмена со стенкой с использованием упрощенной постановки задачи.

Постановка задачи

Нестационарная тепловая конвекция в паре исследуется в осесимметричной постановке для вертикальной цилиндрической емкости со стенкой постоянной толщины d . Нижняя граница области – изотермическая, к боковой и верхней границам равномерно подводится тепло (рис. 1).

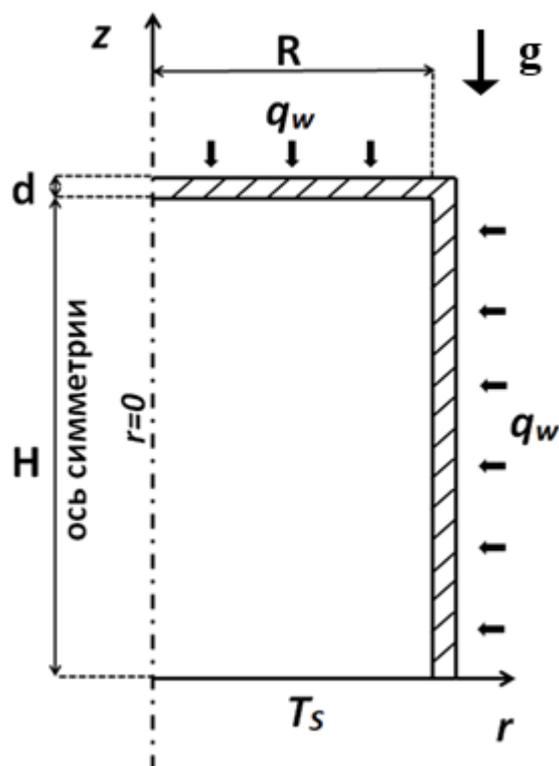


Рис. 1. Схема рассматриваемой модельной задачи

Для описания тепломассообмена в газе используются уравнения Навье-Стокса в приближении гомобаричности. Масштабы температуры, термодинамического давления и плотности задаются по некоторым реперным значениям T_0 , P_0 , ρ_0 . Масштабы для коэффициентов переноса определяются по значениям при температуре T_0 . В качестве масштабов длины, скорости, времени и динамического давления выберем следующие величины: R , a_0/R , R^2/a_0 . Здесь a_0 – коэффициент температуропроводности, заданный при температуре T_0 . Приведем данные уравнения в безразмерном виде в цилиндрических координатах [29]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho u}{\partial r} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho u u}{\partial r} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial r} + Pr \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \left(\frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{3} \frac{u}{r} - \frac{2}{3} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \\ + Pr \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + Pr \frac{\mu}{r} \left(\frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{3} \frac{u}{r} - \frac{2}{3} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho u w}{\partial r} + \frac{\partial \rho w w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + Pr \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{4}{3} \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{3} \frac{u}{r} \right) \right] \\ + Pr \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + Pr \frac{\mu}{r} \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) + (1 - \rho) \frac{Ra \cdot Pr}{A} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\gamma_T} \frac{\partial \rho T}{\partial t} + c_p \left[\frac{1}{r} \frac{\partial r \rho u T}{\partial r} + \frac{\partial \rho w T}{\partial z} \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$P = \rho T \quad (5)$$

Здесь:

$$Ra = \frac{g q_W R^4 \rho_0^2 c_{p0}}{\lambda_0 \mu_0 T_0}; \quad Pr = \frac{\mu_0 c_{p0}}{\lambda_0}; \quad \gamma_T = \frac{\gamma_0}{1 + \gamma_0 (c_p - 1)}; \quad \gamma_0 = \frac{c_{p0}}{c_{v0}}; \quad A = \frac{q_W R}{\lambda_0 T_0}$$

Для описания теплопередачи в стенке емкости воспользуемся уравнением теплопроводности.

$$K_{VW}^E c_w \frac{\partial T}{\partial t} = K_{VW}^\lambda \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_w \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (6)$$

Здесь λ_w – безразмерный коэффициент теплопроводности стенки, c_w – безразмерный коэффициент теплоемкости стенки. Масштабами для данных величин служат значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости при реперной температуре T_0 . Критерии, задающие отношения теплофизических свойств стенки и пара, введены следующим образом:

$$K_{VW}^E = \frac{\rho_W c_{W0}}{\rho_0 c_{P0}}; K_{VW}^\lambda = \frac{\lambda_W}{\lambda_0}$$

Граничные условия для задачи зададим следующим образом:

$$K_{VW}^\lambda \lambda_W \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=1+\delta} = A; K_{VW}^\lambda \lambda_W \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=B+\delta} = A; T|_{z=0} = 1; \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (7)$$

$$u|_{r=0} = 0; u|_{r=1} = 0; u|_{z=0} = 0; u|_{z=B} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; w|_{r=1} = 0; w|_{z=0} = 0; w|_{z=B} = 0 \quad (9)$$

$$\delta = \frac{d}{R}; B = \frac{H}{R}$$

На поверхности раздела газ-стенка ставиться условие отсутствия теплового сопротивления. Конкретизация начальных условий и температурных зависимостей теплофизических свойств будет приведена в разделе работы, посвященном результатам расчетов.

Метод численного решения уравнений

Для дискретизации расчетной области использовался метод контрольных объемов на разнесенной сетке [30]. Для аппроксимации временных производных использовалась схема Эйлера 1-го порядка, конвективные члены аппроксимировались противопоточной схемой, диффузионные – центральными разностями.

Численный метод для решения полученной системы уравнений строился на основе подходов [30-31] с разделением расчета временного шага на тепловой и

динамический циклы. Для этого уравнение энергии решалось в следующей специальной неконсервативной форме:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\gamma_T} \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{u}{r} \frac{\partial r T}{\partial r} \right)^n + \left(w \frac{\partial T}{\partial z} \right)^n \right) = \\ = \frac{1 - \gamma_0}{\gamma_0} P \nabla U + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\nabla U = \frac{1}{r} \frac{\partial r u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

Необходимо отметить, что конвективные члены в левой части (10) берутся с предыдущего шага по времени.

Для коррекции дивергенции скорости в уравнении энергии используется следующее соотношение:

$$\nabla U = \frac{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{1}{\gamma_T} \frac{dP}{dt}}{c_p P} \quad (11)$$

Для расчета термодинамического давления использовалось интегральное условие сохранения массы:

$$P(t) = \frac{\int_0^1 \int_0^B \rho(r, z, 0) r dr dz}{\int_0^1 \int_0^B \frac{1}{T(r, z, t)} r dr dz} \quad (12)$$

Приведем использовавшийся в расчетах алгоритм решения.

1) Начало расчета, задаем начальные условия.

2) Начало нового $n+1$ временного шага, копируем значения на n временном шаге в значения на m итерации. Рассчитываем потоки массы через грани контрольных объемов на n шаге по времени.

3) **Начало цикла для температуры, термодинамического давления и плотности.**

4) Рассчитываем температуру пара и стенки из дискретных аналогов (10) и (6).

5) Находим термодинамическое давление из (12)

6) Рассчитываем плотность из уравнения состояния.

7) Рассчитываем дивергенцию скорости на новой итерации из дискретного аналога уравнения (11)

8) Проверяем сходимость температуры по следующему условию:

$$\int_0^1 \int_0^B \left| \frac{T^{m+1} - T^m}{T^m} \right| r dr dz \leq \varepsilon$$

Здесь m – номер предыдущей итерации, $m+1$ – номер текущей итерации. Если условие не выполнено - обновляем значения температуры, давления и плотности на m итерации и переходим к п. 3. Если выполнено – переходим к расчету динамического давления и скорости.

9) **Начало цикла для расчета скорости и динамического давления**

10) Рассчитываем динамическое давление и скорость методом SIMPLE с использованием полученных значений температуры и плотности.

11) По достижении сходимости скорости переходим к следующему временному шагу, возвращаясь в п. 2.

12) Продолжаем расчеты временных шагов до достижения максимального времени.

Результаты расчетов

Рассмотрим тепловую конвекцию в цилиндрической емкости в условиях, близких к эксперименту [2]. Значение теплового потока в [2] – 80 Вт/м^2 , характерный размер – 0.05 м , время – 300 с . Теплофизические свойства водорода брались из [32], причем реперные значения выбирались соответствующими температуре при давлении 1 бар по кривой насыщения.

$$T_0 = 20.28 \text{ К}; P_0 = 1 \text{ бар}; \rho_0 = 1.2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \lambda_0 = 0.0158 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}};$$

$$\mu_0 = 1.16 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

Данные параметры для водорода соответствуют следующим значениям безразмерных определяющих величин:

$$A = 12.5; t = 0.15$$

Рассматривалось фиксированное значение числа Рэлея, равное 10^8 , что соответствует случаю развитой ламинарной конвекции. Число Прандтля – 1.0 . Безразмерные температурные зависимости теплоемкости, теплопроводности, динамической вязкости задавались следующими аппроксимациями табличных данных из [27]:

$$\lambda = 1 - 0.000427(T - 1)^3 + 0.00091(T - 1)^2 + 0.85236(T - 1)$$

$$\mu = 1 - 0.001801(T - 1)^3 + 0.05376(T - 1)^2 + 0.91534(T - 1)$$

$$c_p = 1; T \leq 2$$

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_0 - 1} c_p = -0.00277T^3 + 0.0510T^2 - 0.1803T + 1.6781; 2 < T \leq 10$$

$$c_p = c_p(10); T > 10$$

В качестве материала стенки рассматривалась сталь со следующими зависимостями коэффициентов теплопроводности и теплоемкости от температуры:

$$\lambda_w = 1 + 0.01940(T - 1)^3 - 0.11004(T - 1)^2 + 0.56324(T - 1)$$

$$c_w = 1 - 0.14149(T - 1)^3 + 0.38151(T - 1)^2 + 3.30122(T - 1)$$

Значения безразмерных критериев, определяющих свойства материала стенки заданы следующими:

$$K_{wv}^\lambda = 234; K_{wv}^E = 7.1$$

Начальные условия брались однородными по объему емкости:

$$u(r, z) = 0; w(r, z) = 0; T(r, z) = 1.0; \rho(r, z) = 1.0; P = 1.0$$

В рассматриваемом эксперименте безразмерная толщина стенки $\delta=0.02$.

Была проведена серия расчетов при различных значениях толщины стенки в диапазоне $\delta=0-0.02$ при фиксированном $B=1$. На рис. 2-3 представлены данные расчетов по росту давления и изменению максимума модуля скорости по времени для различных значений безразмерной толщины стенки:

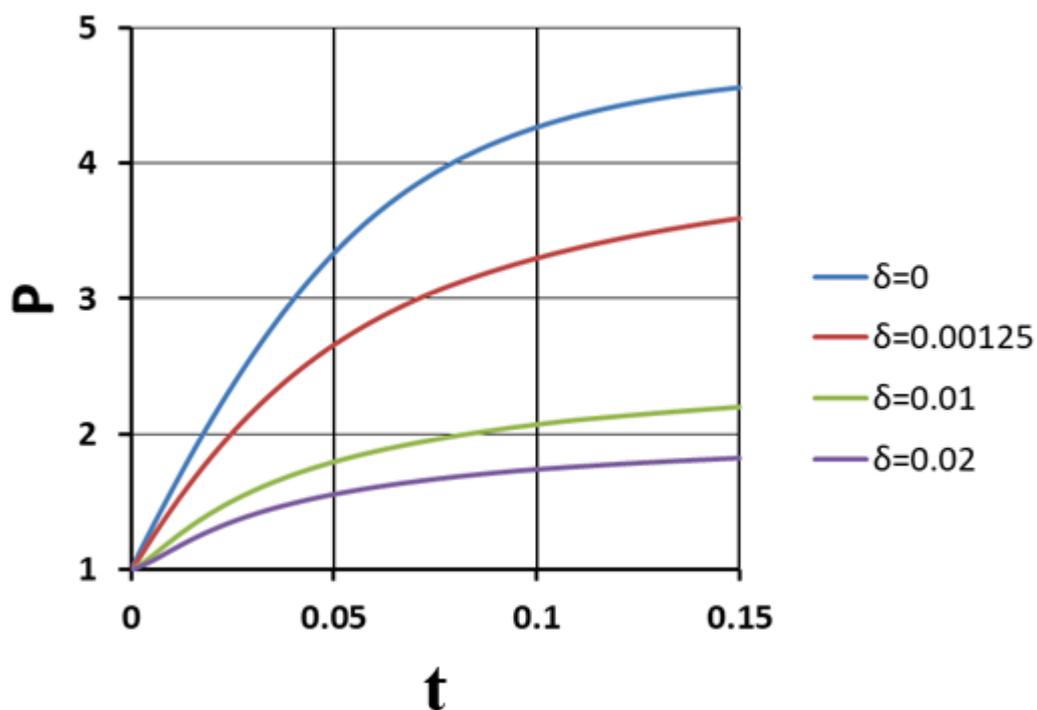


Рис. 2. Изменение термодинамического давления по времени для различных значений толщин стенки

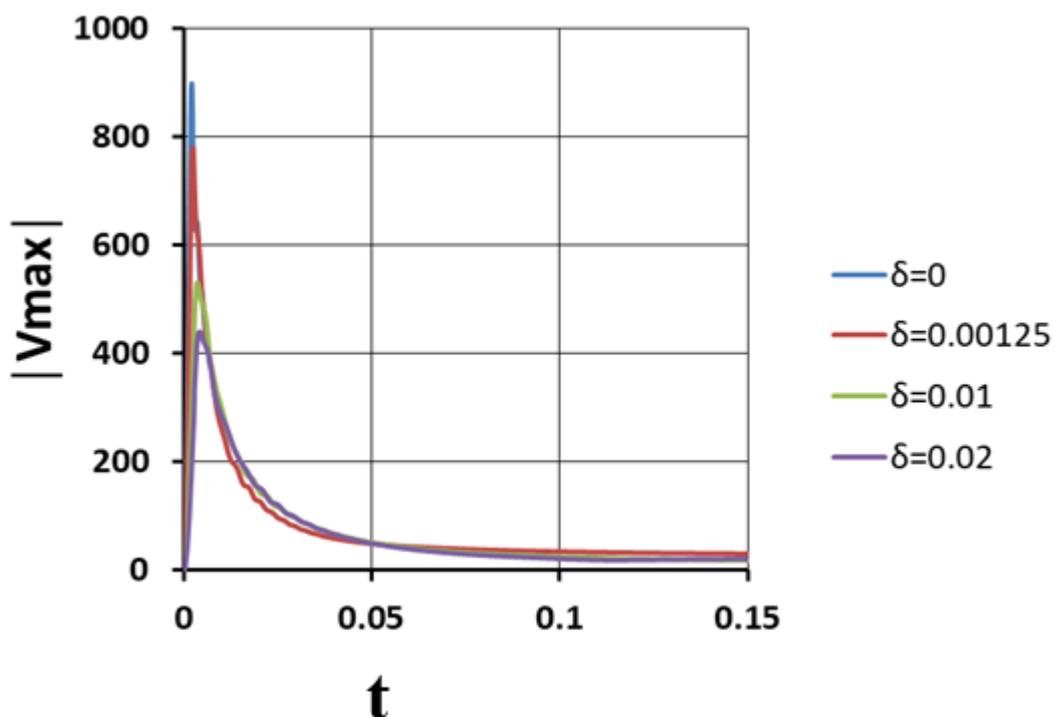


Рис. 3. Изменение модуля максимума скорости по времени для различных толщин стенки

Влияние теплоемкости стенки на температурное расслоение пара демонстрируется на рис. 4-6.

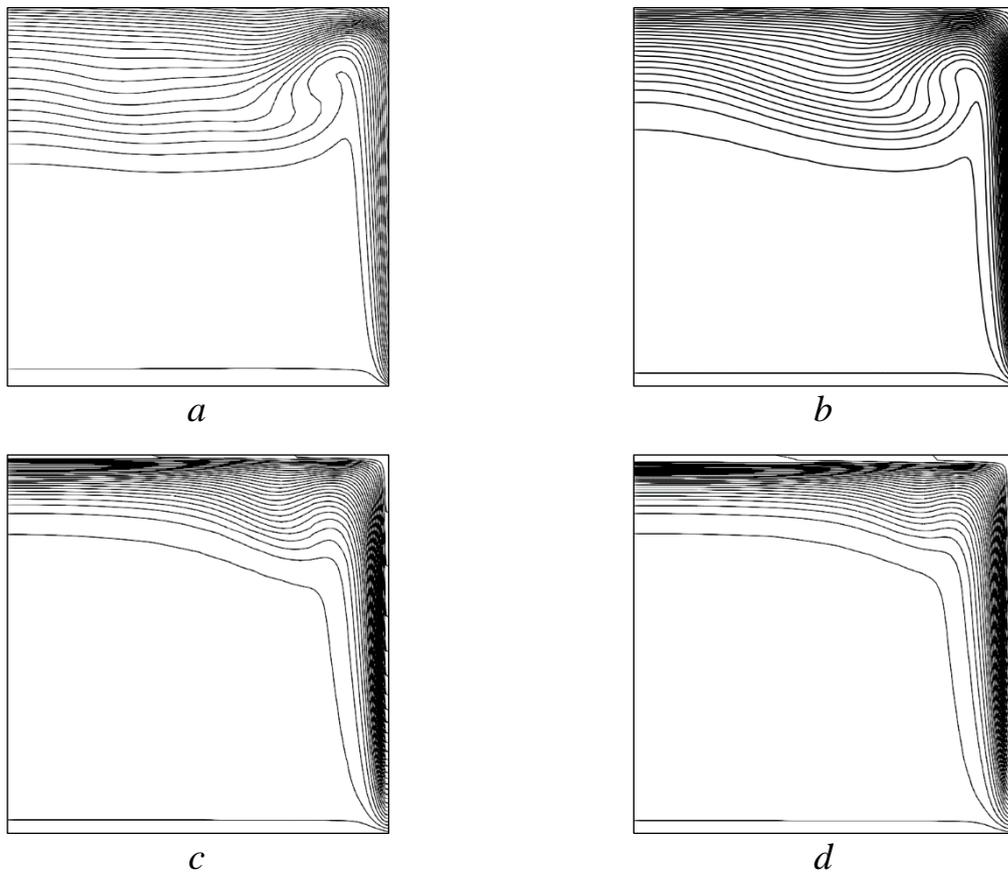
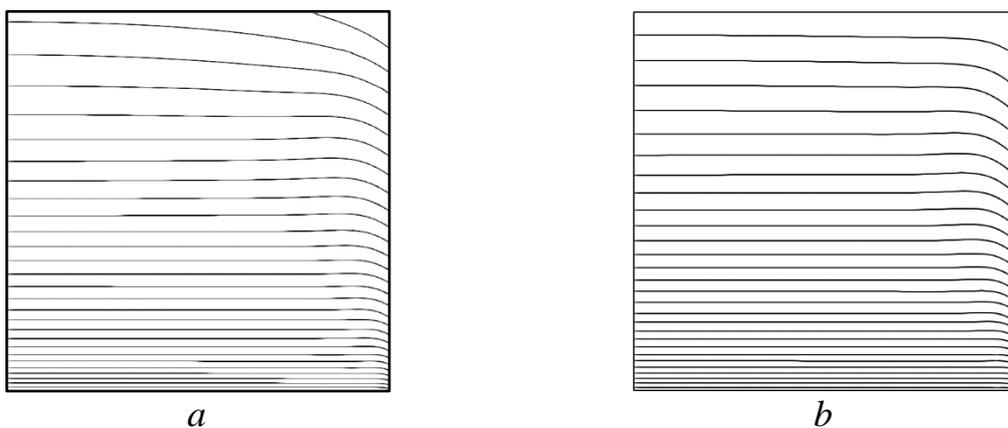


Рис. 4. Изолинии температуры для различных толщин стенки, $t=0.003$, $T_{min}=1$: *a* – $\delta=0$, $T_{MAX}=6.64$; *b* – $\delta=0.00125$, $T_{MAX}=4.74$; *c* – $\delta=0.01$, $T_{MAX}=2.86$; *d* – $\delta=0.02$, $T_{MAX}=3.13$



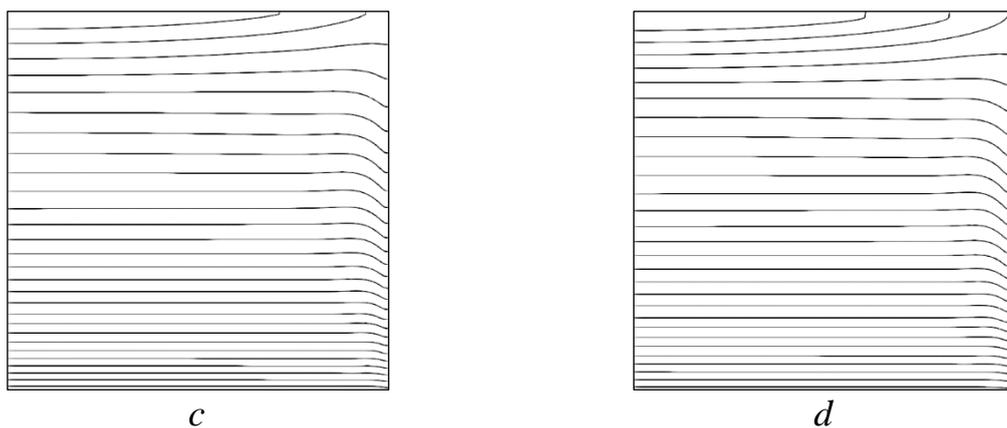


Рис. 5. Изолинии температуры для различных толщин стенки, $t=0.075$, $T_{min}=1$: $a - \delta=0$, $T_{MAX}=2.25$; $b - \delta=0.00125$, $T_{MAX}=1.75$; $c - \delta=0.01$, $T_{MAX}=1.39$; $d - \delta=0.02$, $T_{MAX}=1.12$

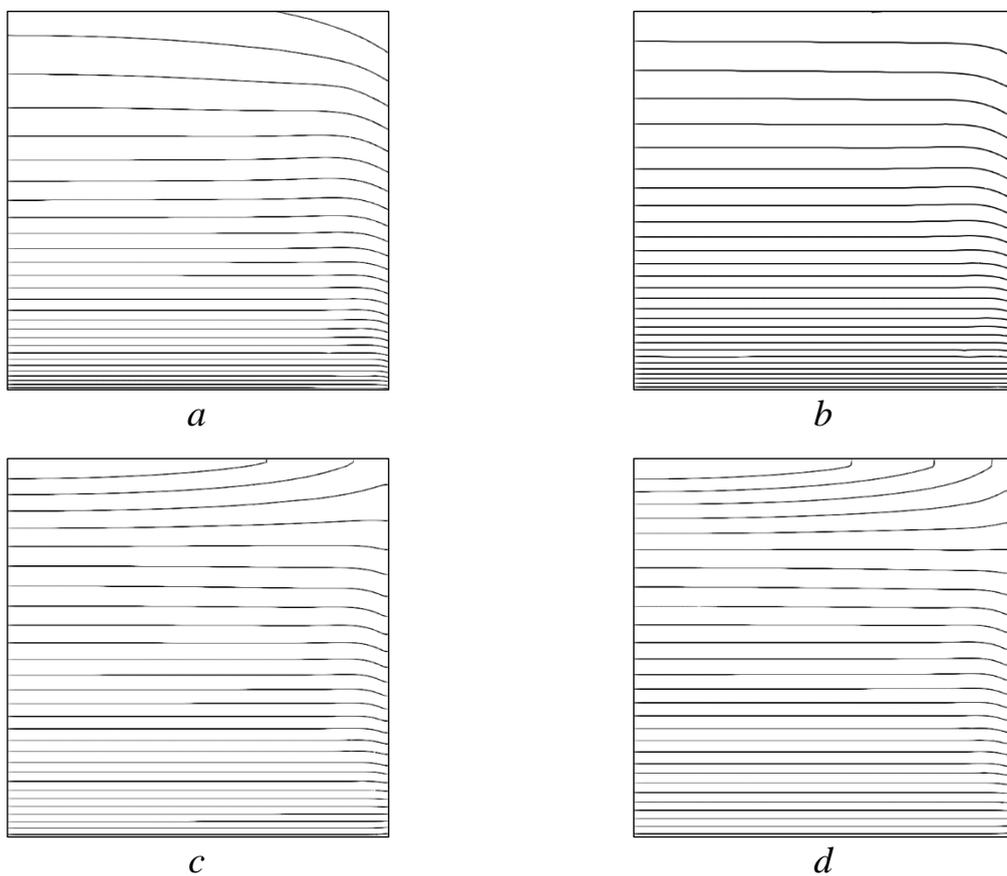


Рис. 6. Изолинии температуры для различных толщин стенки, $t=0.15$, $T_{min}=1$: $a - \delta=0$, $T_{MAX}=7.53$; $b - \delta=0.00125$, $T_{MAX}=5.67$; $c - \delta=0.01$, $T_{MAX}=3.37$; $d - \delta=0.02$, $T_{MAX}=2.68$

Обсуждение результатов

Как видно из представленных на рис. 2-6 данных расчета, изменение толщины стенки от случая $\delta \rightarrow 0$ до величины $\delta=0.02$, совпадающей с толщиной стенки в эксперименте [2] приводит к замедлению скорости роста давления почти в 4.5 раза и понижению максимального перепада температуры в емкости почти в 4 раза. Также, в 2 раза снижается максимальная интенсивность конвекции. При этом, теплоемкость и теплопроводность стенки оказывает заметное влияние на тепломассоперенос даже при крайне малых значениях параметра δ , снижая максимальный перепад температур на 30% для случая $\delta=0.00125$.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости учета теплообмена со стенкой при математическом моделировании паровой подушки криогенных топливных баков. Кроме того, полученные результаты указывают на возможность существенного занижения скорости роста давления и величины температурной неоднородности в паровой подушке при экспериментальном моделировании процесса бездренажного хранения на малых баках с большей, чем в натурном резервуаре, относительной толщиной стенки.

Библиографический список

1. Ward W.D. et al. Evaluation of AS-203 Low-Gravity Orbital Experiment, NASA CR 94045 (Chrysler Corp. Space Div. Technical Report BB-3.4.3-5-101), 13 January 1967.

2. Belyayev A.Yn., Ivanov A.V., Egorov S.D., Voyteshonok V.S., Mironov V.M. Pathways to solve the problem of cryogenic rocket propellant long storage in space // Proc. Int. Aerospace Congress, Moscow, Russia, August 15-19, 1994, vol. 1. pp. 558 - 562.
3. Van Dresar N.T., Lin C.S., Hasan M.M. Self_pressurization of a flightweight liquid hydrogen tank: Effect of fill level at low wall heat flux // AIAA Paper, 1992. DOI: [10.2514/6.1992-818](https://doi.org/10.2514/6.1992-818)
4. Hastings L.J., Flachbart R.H., Martin J.J., Hedayat A., Fazah M., Lak T., Nguyen H., Bailey J.W. Spray Bar Zero-Gravity Vent System for On-Orbit Liquid Hydrogen Storage, NASA TM-2006-212926, 2006. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20040000092>
5. Seo M., Jeong S. Analysis of self-pressurization phenomenon of cryogenic fluid storage tank with thermal diffusion model // Cryogenics, 2010, vol. 50, no. 9, pp. 549 - 555. DOI: [10.1016/j.cryogenics.2010.02.021](https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.02.021)
6. Хуснетдинов И.Р. Анализ тенденций развития отечественных и зарубежных ракет-носителей сверхтяжелого класса // Труды МАИ. 2014. № 73. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=48480>
7. Партола И.С. Развитие средств математического моделирования двигательных установок ракет космического назначения // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26017>
8. Полежаев В.И., Бунэ А.В., Вerezуб Н.А. и др. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса. - М.: Наука, 1987. – 270 с.

9. Полежаев В.И., Черкасов С.Г. Нестационарная тепловая конвекция в цилиндрическом сосуде при боковом подводе тепла // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1983. № 4. С. 148 - 157.
10. Полежаев В.И. Конвективное взаимодействие в цилиндрическом сосуде, частично заполненном жидкостью, при подводе тепла к боковой и свободной поверхностям и дну // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1972. № 4. С. 77 - 88.
11. Моисеева Л.А., Черкасов С.Г. Математическое моделирование естественной конвекции в вертикальном цилиндрическом баке при знакопеременном распределении теплового потока на стенке // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1996. № 2. С. 66 - 72.
12. Lin W., Armfield S.W. Direct simulation of natural convection cooling in a vertical circular cylinder // International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, vol. 42, no. 22, pp. 4117 – 4130.
13. Пивоваров Д.Е. Численное исследование конвективного теплообмена в наклонном продольном слое воздуха // Труды МАИ. 2013. № 68. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41694>
14. Федюшкин А.И., Пунтус А.А. Нелинейные особенности ламинарных течений жидкости на земле и в невесомости // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=98829>

15. Ай М.В., Темнов А.Р. Вращение твердого тела с эллипсоидальной полостью, целиком наполненной стратифицированной жидкостью // Труды МАИ. 2015. № 79.

URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=55633>

16. Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A. Turbulent natural convection combined with thermal surface radiation inside an inclined cavity having local heater // International Journal of Thermal Sciences, 2018, vol. 124, pp. 122 - 130.

17. Martyushev S.G., Sheremet M.A. Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in a three-dimensional enclosure with a heat source // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, vol. 73, pp. 340 - 353. DOI:

[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.009](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.009)

18. Gray D.D., Giorgini A. The validity of the boussinesq approximation for liquids and gases // International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, vol. 19, no.5, pp. 545 – 551.

DOI: [10.1016/0017-9310\(76\)90168-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(76)90168-X)

19. Нехамкина О.А., Никулин Д.А., Стрелец М.Х. Об иерархии моделей тепловой естественной конвекции совершенного газа // Теплофизика высоких температур. 1989. Т. 27. № 6. С. 1115 - 1125.

20. Paolucci S. On the filtering of sound from the Navier-Stokes equations, Sandia National Laboratories, Livermore, Rep. SAND824257, December 1982. URL:

<https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=614439>

21. Лапин Ю.В., Стрелец М.Х. Внутренние течения газовых смесей. - М.: Наука, 1989. - 368 с.

22. Соболева Е.Б. Численное моделирование динамики околоскритической жидкости в твердой пористой матрице. - М.: Институт проблем механики РАН, 2006. – 58 с.
23. Beysens D., Chatain D., Nikolayev V.S., Ouazzani J., Garrabos Y. Possibility of long-distance heat transport in weightlessness using supercritical fluids // Physical Review E, 2010, vol. 82, iss. 6. DOI: [10.1103/PhysRevE.82.061126](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.061126)
24. Chenoweth D.R., Paolucci S. Natural convection in an enclosed vertical air layer with large horizontal temperature difference // Journal of Fluid Mechanics, 1986, vol. 169, pp. 173 – 210. URL: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112086000587>
25. Chenoweth D.R., Paolucci S. Gas flow in vertical slots with large horizontal temperature difference // Physics Fluids, 1985, vol. 28, no. 8, pp. 2365 - 2374.
26. Черкасов С.Г., Лаптев И.В. Упрощенный расчет ламинарного свободно-конвективного слоя в газе // Тепловые процессы в технике. 2017. № 4. С. 146 - 153.
27. Cherkasov S.G., Anan'ev A.V., Moiseeva L.A. Limitations of the Boussinesq Model on the Example of Laminary Natural Convection of Gas between Vertical Isothermal Walls // High Temperature, 2018, vol. 56, no. 6, pp. 878 – 883. DOI: [10.1134/S0018151X18060081](https://doi.org/10.1134/S0018151X18060081)
28. Черкасов С.Г., Лаптев И.В., Ананьев А.В., Городнов А.О. Рост давления при нестационарной естественной конвекции паров водорода в вертикальном цилиндрическом сосуде с постоянной температурой нижней границы // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 5. С. 203 – 215.

29. Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics, Springer, 2002.
DOI: [10.1007/978-3-642-56026-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2)
30. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980, 197 p.
31. Quazzani J., Garrabos Y. A new numerical algorithm for low Mach number supercritical fluid, Preprint Elsevier, 23 Apr. 2007. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00142988>
32. Варгафтик. Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей.
- М.: Наука, 1972. - 721 с.

The effect of the wall heat capacity on the temperature stratification and pressure rise during natural convection of hydrogen vapor in a vertical cylindrical vessel

Gorodnov A.O.^{1,2*}, Laptev I.V.^{1,2}**

¹*SSC Keldysh Research Center, 8, Onezhskaya str., Moscow, 125438, Russia*

²*Moscow institute of physics and technology, 9, Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia*

**e-mail: an.ol.gorodnov@gmail.com*

***e-mail: laptev.iv.kerc@gmail.com*

Abstract

As of today, Russian space industry announced several projects of new launch vessels, such as super heavy class rocket and the rocket with reusable stages, operated on liquefied natural gas as a fuel. Moreover, other countries, such as USA, China and the ESA members, announced plans of future missions to Mars and Moon. A considerable part of the future space missions depends on the possibility of effective long-term storage of cryogenic fuel components under lowered gravity conditions. The important role of cryogenics in space flights is being determined by their widespread application as a fuel and in life support systems.

Due to cryogenics' very low temperatures, the tanks for their storage are extremely sensitive to the thermal flows from the environment caused by solar radiation, aerodynamic heating and conductive transference from the other parts of a spacecraft. External heating and the presence of microgravity lead to pressure raise and free-convective motions in the storage tank. The pressure rise rate is being accelerated by temperature stratification effect. This effect has been demonstrated in many ground and space experiments.

One of the most important problem in experimental cryogenic storage studies is scale factor. Most of experimental data was obtained with small-size fuel tanks. This leads to the problem of geometric similarity violation of the fuel tank wall thickness compared to the real rocket storage tanks. To estimate the impact of this dissimilarity, the article considers the problem of the wall's thermal capacity and thermal conductivity impact on temperature stratification and pressure rise at the vapor non-stationary thermal convection in the closed cylindrical vessel.

Low Mach numbers approximation is being used to describe evolution of the vapor temperature, velocity, density and other parameters. Boundary conditions, defining parameters range, physical properties of vapor and a wall material simulate conditions of the experiment on drainage-free hydrogen storage.

A series of computations at various wall thickness values was performed using numerical method proposed by Quazzani and Garrabos. The computation data demonstrates considerable reduction in the pressure rise rate, temperature stratification value and convection intensity with the wall thickness increase. The obtained results demonstrate the possibility of considerable underrating of the pressure rise rate and other heat exchange parameters on the steam blanket of the tank, when the wall's real thermal capacity and thermal conductivity are not being accounted for.

Keywords: natural convection, low Mach number approach, homo-baricity approximating, drainage-free storage, steam blanket.

References

1. Ward W.D. et al. *Evaluation of AS-203 Low-Gravity Orbital Experiment, NASA CR 94045* (Chrysler Corp. Space Div. Technical Report BB-3.4.3-5-101), 13 January 1967.
2. Belyayev A.Yn., Ivanov A.V., Egorov S.D., Voyteshonok V.S., Mironov V.M. Pathways to solve the problem of cryogenic rocket propellant long storage in space, *Proc. Int. Aerospace Congress*, Moscow, Russia, August 15-19, 1994, vol. 1. pp. 558 - 562.
3. Van Dresar N.T., Lin C.S., Hasan M.M. Self_pressurization of a flightweight liquid hydrogen tank: Effect of fill level at low wall heat flux, *AIAA Paper*, 1992. DOI: [10.2514/6.1992-818](https://doi.org/10.2514/6.1992-818)
4. Hastings L.J., Flachbart R.H., Martin J.J., Hedayat A., Fazah M., Lak T., Nguyen H., Bailey J.W. *Spray Bar Zero-Gravity Vent System for On-Orbit Liquid Hydrogen Storage*, NASA TM-2006-212926, 2006. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20040000092>
5. Seo M., Jeong S. Analysis of self-pressurization phenomenon of cryogenic fluid storage tank with thermal diffusion model, *Cryogenics*, 2010, vol. 50, no. 9, pp. 549 - 555. DOI: [10.1016/j.cryogenics.2010.02.021](https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.02.021)
6. Khusnetdinov I.R. *Trudy MAI*, 2014, no. 73. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=48480>
7. Partola I.S. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26017>
8. Polezhaev V.I., Bune A.V., Verezub N.A. et al. *Matematicheskoe modelirovanie konvektivnogo teplomassoobmena na osnove uravnenii Nav'e-Stoksa* (Mathematical

modelling of convective heat and mass exchange basyв от Navier-Stokes equations), Moscow, Nauka, 1987, 270 p.

9. Polezhaev V.I., Cherkasov S.G. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1983, no. 4, pp. 148 - 157.

10. Polezhaev V.I. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1972, no. 4, pp. 77 - 88.

11. Moiseeva L.A., Cherkasov S.G. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1996, no. 2, pp. 66 - 72.

12. Lin W., Armfield S.W. Direct simulation of natural convection cooling in a vertical circular cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, vol. 42, no. 22, pp. 4117 – 4130.

13. Pivovarov D.E. *Trudy MAI*, 2013, no. 68. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41694>

14. Fedyushkin A.I., Puntus A.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 102. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98829>

15. Ai M.V., Temnov A.R. *Trudy MAI*, 2015, no. 79. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=55633>

16. Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A. Turbulent natural convection combined with thermal surface radiation inside an inclined cavity having local heater, *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, vol. 124, pp. 122 - 130.

17. Martyushev S.G., Sheremet M.A. Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in a three-dimensional enclosure with a heat source, *International Journal*

- of *Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 73, pp. 340 - 353. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.009](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.009)
18. Gray D.D., Giorgini A. The validity of the boussinesq approximation for liquids and gases, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1976, vol. 19, no.5, pp. 545 – 551. DOI: [10.1016/0017-9310\(76\)90168-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(76)90168-X)
19. Nekhamkina O.A., Nikulin D.A., Strelets M.Kh. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1989, vol. 27, no. 6, pp. 1115 - 1125.
20. Paolucci S. *On the filtering of sound from the Navier-Stokes equations*, Sandia National Laboratories, Livermore, Rep. SAND824257, December 1982. URL: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=614439>
21. Lapin Yu.V., Strelets M.Kh. *Vnutrennie techeniya gazovykh smesei* (Internal flows of gas mixtures), Moscow, Nauka, 1989, 368 p.
22. Soboleva E.B. *Chislennoe modelirovanie dinamiki okolokriticheskoi zhidkosti v tverdoi poristoï matritse* (Numerical modelling of near-critical fluid dynamics in solid porous medium), Moscow, Institut problem mekhaniki RAN, 2006, 58 p.
23. Beysens D., Chatain D., Nikolayev V.S., Ouazzani J., Garrabos Y. Possibility of long-distance heat transport in weightlessness using supercritical fluids, *Physical Review E*, 2010, vol. 82, no. 6. DOI: [10.1103/PhysRevE.82.061126](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.061126)
24. Chenoweth D.R., Paolucci S. Natural convection in an enclosed vertical air layer with large horizontal temperature difference, *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, vol. 169, pp. 173 – 210. URL: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112086000587>

25. Chenoweth D.R., Paolucci S. Gas flow in vertical slots with large horizontal temperature difference, *Physics Fluids*, 1985, vol. 28, no. 8, pp. 2365 - 2374.
26. Cherkasov S.G., Laptev I.V. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2017, no. 4, pp. 146 - 153.
27. Cherkasov S.G., Anan'ev A.V., Moiseeva L.A. Limitations of the Boussinesq Model on the Example of Laminary Natural Convection of Gas between Vertical Isothermal Walls, *High Temperature*, 2018, vol. 56, no. 6, pp. 878 – 883. DOI: [10.1134/S0018151X18060081](https://doi.org/10.1134/S0018151X18060081)
28. Cherkasov S.G., Laptev I.V., Anan'ev A.V., Gorodnov A.O. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2019, vol. 11, no. 5, pp. 203 – 215.
29. Ferziger J.H., Peric M. *Computational methods for fluid dynamics*, Springer, 2002. DOI: [10.1007/978-3-642-56026-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2)
30. Patankar S. *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980, 197 p.
31. Quazzani J., Garrabos Y. *A new numerical algorithm for low Mach number supercritical fluid*, Preprint Elsevier, 23 Apr. 2007. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00142988>
32. Vargaftik. N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti* (Handbook of physical properties of liquids and gases), Moscow, Nauka, 1972, 721 p.