



ТЕПЛОТДАЧА И ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ КИПЕНИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА CO₂ В ТРУБАХ

Н. М. Твердохлебов, студент,

e-mail: nilskansk@gmail.com

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

В статье показан анализ опытных данных теплоотдачи и падения давления, полученных при кипении природного хладагента R744 в гладких трубах. Также выполнены расчеты с использованием программы, разработанной научным руководителем С. В. Кошелевым, с целью сравнения полученных результатов с экспериментальными данными. Выявлены достоинства и недостатки диоксида углерода.

Ключевые слова: теплоотдача, падение давления, R744, хладагенты.

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент действует международное соглашение, согласно которому необходимо сократить потребление гидрофторуглеродов, что задало тенденцию к использованию так называемых природных хладагентов, одним из которых является углекислота (R744, CO₂). R744 является хладагентом, соответствующим всем экологическим требованиям (ODP = 0, GWP = 1). Дешевое, нетоксичное и негорючее вещество. Отличная совместимость с минеральными маслами, электроизоляционными и конструкционными материалами. Низкая критическая температура $t_{\text{крит}} = 31,06$ °C ограничивает использование в СХУ в качестве автономного хладагента, поэтому прибегают к транскритическим циклам и использованию каскадных холодильных установок с R744 в нижнем каскаде и R717 в верхнем. Также высокие давления при относительно низких температурах кипения и конденсации стоит учитывать при проектировании оборудования.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – собранные из доступных источников опытные данные о теплоотдаче и падении давления при кипении CO₂.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования – оценка перспектив применения хладагента R744 на судах.

1. Выполнить анализ опытных данных из опубликованных источников.
2. Сделать краткий обзор методик расчета теплоотдачи и падения давления, провести сравнительные расчеты по дополненной компьютерной программе.
3. Выявить достоинства и недостатки диоксида углерода.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе работы использованы такие методы, как описание, сравнение и анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа теплоотдачи и падения давления CO_2 при кипении в гладких трубах были рассмотрены зарубежные источники. В них использовались экспериментальные контуры, которые построены по одинаковому принципу.

Обобщенный испытательный контур состоит из насоса, массового расходомера, подогревателя и испытательной секции. Насос обеспечивает циркуляцию переохлажденной жидкости из резервуара в подогреватель. Переохладитель и отдельный нагреватель установлены для регулировки паросодержания хладагента на входе до желаемого значения. Массовый расходомер, использующий эффект Кориолиса (расчетная погрешность 0,23 %), устанавливается перед предварительным нагревателем для измерения расхода хладагента в жидкой фазе. После выхода из массового расходомера хладагент поступает в испытательную секцию, а затем испаряется, протекая по трубке. Переохлажденная жидкость нагревается электронагревателем, питаемым от источника низкого напряжения и высокой силы тока. После выхода из испытательной секции CO_2 охлаждается в другом противоточном теплообменнике, а пар, образующийся в испытательной секции, конденсируется в этом охладителе. Пример испытательного контура представлен на рисунке 1.

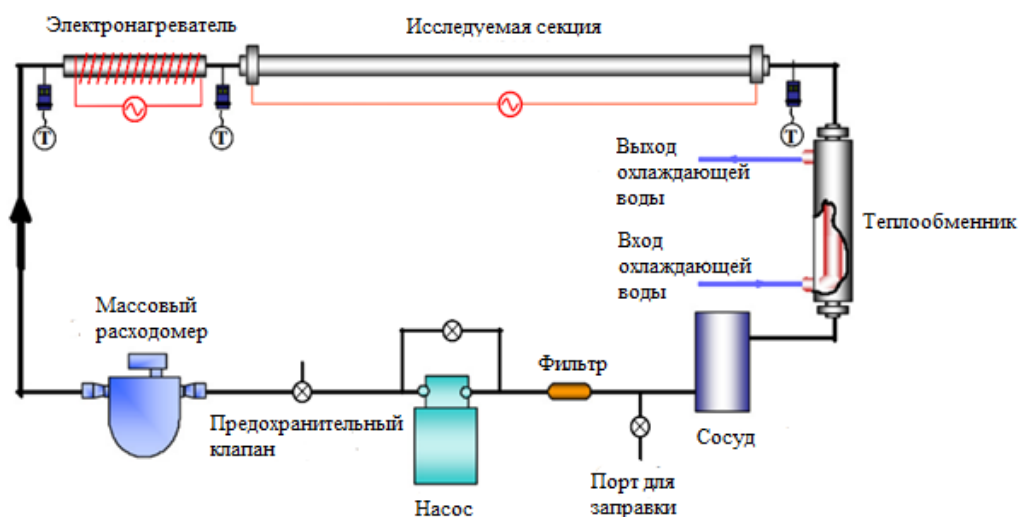


Рисунок 1 – Пример испытательного контура

К исследуемой секции прикреплены термопары типа Т для измерения температуры внешней стенки трубки в 10 местах. В каждом месте температуры измеряются в четырех положениях по окружности – сверху, снизу и с обеих сторон, также по длине всего участка расположены дифференциальные манометры для определения потерь давления. Испытательный участок плотно покрыт изоляционным материалом из стекловолкна. Пример исследуемой секции показан на рисунке 2.

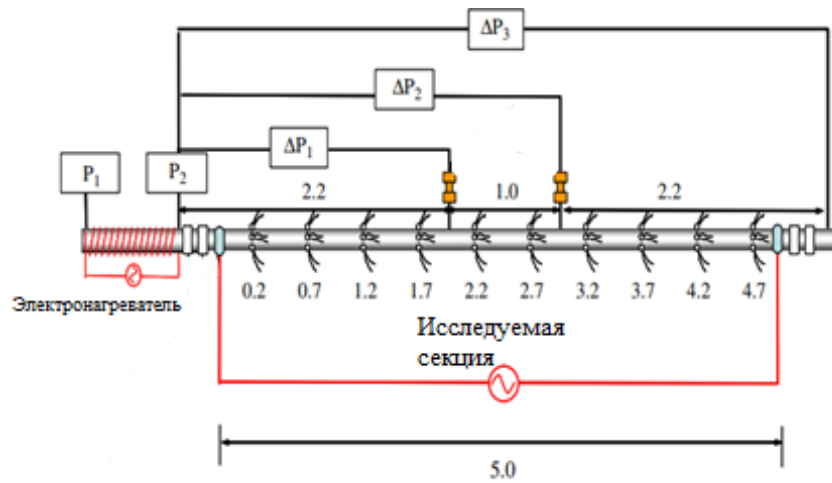


Рисунок 2 – Пример исследуемой секции.

В испытательной установке из статьи [1] использовались гладкие трубы круглого сечения из нержавеющей стали с внутренним диаметром $d_3 = 3$ мм и длиной 1200 мм. Массовая скорость CO_2 (G) варьировала в диапазоне от 200 до $349 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \times \text{с}}$; температура насыщения ($t_{\text{нас}}$) – в диапазоне от $-7,8$ до $5,8$ °С и тепловой поток (q) в диапазоне от $10,0$ до $20,6 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$; массовое паросодержание (X) – в диапазоне от 0,02 до 0,68. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты эксперимента [1]

Исходные данные							Данные, полученные в ходе эксперимента
$t_{\text{нас}}, \text{C}$	$q, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$G, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \times \text{с}}$	$l, \text{м}$	$D_3, \text{м}$	$X1$	$X2$	$\alpha, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \times \text{К}}$
5	10000	348	1,2	0,003	0,02	0,93	5939,31 - 5222,6
5,8	10300	300	1,2	0,003	0,09	0,85	5928,93 - 5292,4
5,7	10200	252	1,2	0,003	0,07	0,93	6191,09 - 4912,89
4,2	10100	202	1,2	0,003	0,13	0,95	5923,46 - 3982,22
-7,8	10100	349	1,2	0,003	0,1	0,76	5569,94 - 5231,74
3,2	10100	349	1,2	0,003	0,05	0,78	5290,85 - 6114,68
5	10000	348	1,2	0,003	0,02	0,93	6607,26 - 5813

В других источниках предложен аналогичный подход для получения теплоотдачи, отличия содержатся лишь в некоторых исходных данных. Рассмотрим их.

В статье [2] использовались трубы с внутренним диаметром $d_3 = 7,73$ мм и длиной 5 м. Массовый расход CO_2 составлял $318 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \times \text{с}}$. Температура насыщения равнялась 5 °С, и тепловой поток варьировал в диапазоне от $12,5$ до $18,6 \frac{\text{кВт}}{\text{м}}$; коэффициент паросодержания находился в диапазоне от 0,08 до 0,53.

В работе [3] использовались трубы с внутренним диаметром $d_3 = 7$ мм. Массовый расход составлял $400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \times \text{с}}$, с температурой насыщения $t_{\text{sat}} = -10$ °С и тепловым потоком, равным $6 \frac{\text{кВт}}{\text{м}}$. Массовое паросодержание варьировало в диапазоне от 0,07 до 0,92.

В статье [4] использовались трубы с внутренним диаметром $d_3 = 6,1$ мм. Массовый расход изменялся от 200 до $400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \times \text{с}}$, с температурой насыщения $t_{\text{нас}} = -15$ °С и тепловым потоком, равным $10 \frac{\text{кВт}}{\text{м}}$. Массовое паросодержание варьировало в диапазоне от 0,10 до 0,81.

В компьютерной программе для расчета процессов кипения хладагентов в трубах и змеевиках использовались пять обобщенных методик расчета коэффициента теплоотдачи (КТО). Они учитывают, что в трубах теплоотдача происходит за счет пузырькового (свободного) кипения, зависящего в основном от теплового потока и вынужденного (конвективного) движения двухфазной смеси, в котором большую роль играет число Рейнольдса. **Рассмотрим** эти методики.

- Методика Shah M.M. базируется на КТО вынужденного движения α_v и четырех безразмерных параметрах: числе Фруда Fr ; параметре конвекции Co ; параметре кипения Bo ; параметре интенсификации F_0 .

- По методике Gungor K.E., Winterton R.H.S. локальный КТО находится как сумма двух составляющих со своими множителями: составляющей вынужденного движения жидкой фазы $\alpha_{вж}$ и пара α_p .

- Другая методика Gungor K.E., Winterton R.H.S. также содержит два множителя, хотя в ней используется лишь составляющая α_v и безразмерный коэффициент En .

- Методика Kandlikar S.G. опирается на КТО вынужденного движения жидкой фазы $\alpha_{вж}$, а также параметры Co, Bo, Fr ;

- В методике Liu Z., Winterton R.H.S. учитываются составляющие вынужденного движения α_v и пузырькового кипения α_p с поправочными множителями по степенной зависимости.

Для определения ПД в программе используются две модели:

- Гомогенная модель, не учитывает скольжение фаз и предполагает, что жидкость и пар движутся с одинаковой скоростью, как однородная среда.

- Модели раздельного движения фаз, предусматривают раздельный подход к рассмотрению потерь на трение при движении жидкой и паровой фаз:

1) по методике Grönnerud падение давления кипящего хладагента на трение находится как произведение падения давления насыщенной жидкости $\Delta P_{ж}$ и поправочного множителя $\Phi_{гд}$;

2) методика Müller-Steinhagen и Heck обуславливает трением градиент парожидкостной смеси;

3) методика Moreno Quiben и Thome для определения потерь давления на трение при кипении хладагентов в горизонтальных трубах учитывает локальные режимы течения двухфазного потока и межфазные волновые эффекты;

4) в методике Moreno Quiben и Thome для определения потерь давления на трение при кипении хладагентов в горизонтальных трубах учитываются локальные режимы течения двухфазного потока и межфазные волновые эффекты.

Программа для расчета процессов кипения хладагентов в трубах и змеевиках позволяет определить локальный КТО и ПД по рассмотренным выше методикам, а также среднее арифметическое значение между ними. Помимо этого, программа способна рассчитать длину исследуемого участка (l_u), объемный расход (V), падение температуры насыщения (Δt).

Для проведения расчета требуются следующие исходные данные.

Температура насыщения – $t_{нас}$; начальное и конечное паросодержание – X_1 и X_2 ; эквивалентный диаметр – d_3 ; число труб – n_T ; массовый расход вещества – W_p ; тепловой поток – q ; количество калачей в змеевике – Z .

В базе программы заложены термодинамические параметры десяти хладагентов (R717, R22, R404A, R507, R410A, R134A, R407C, R290, R125, R417). Для данного исследования мною были добавлены параметры R744 из программного продукта REFPROP.

На графике 1 представлено сопоставление коэффициента теплоотдачи из источника [4] с коэффициентом теплоотдачи, полученным с применением разработанной программы.

Источник: [4]; $t_{\text{нас}} = -15 \text{ C}$, $X = 0,1 \dots 0,71$, $q = 10000 \text{ Вт/м}^2$, $G = 400 \text{ кг/(м}^2 \times \text{с)}$

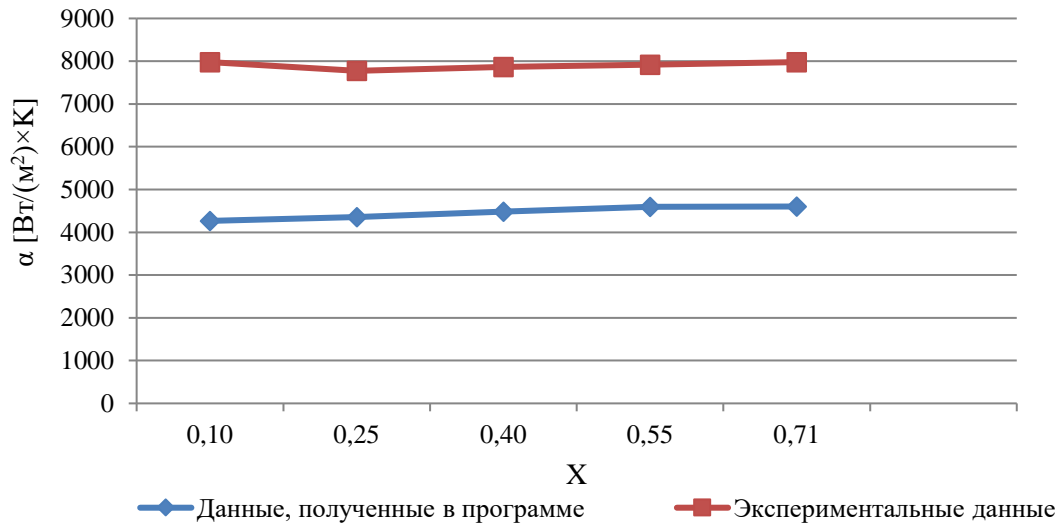


График 1 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от массового паросодержания

Графики показывают, что зависимость вполне сохраняется, однако экспериментальные значения оказались выше, и отклонение в среднем составляет 16 %.

На графике 2 представлено сопоставление коэффициента теплоотдачи из источника [1] с коэффициентом теплоотдачи, полученным программой.

Источник: [1]; $t_{\text{нас}} = 5 \text{ C}$, $X = 0,02 \dots 0,68$, $q = 10000 \text{ Вт/м}^2$, $G = 348 \text{ кг/(м}^2 \times \text{с)}$

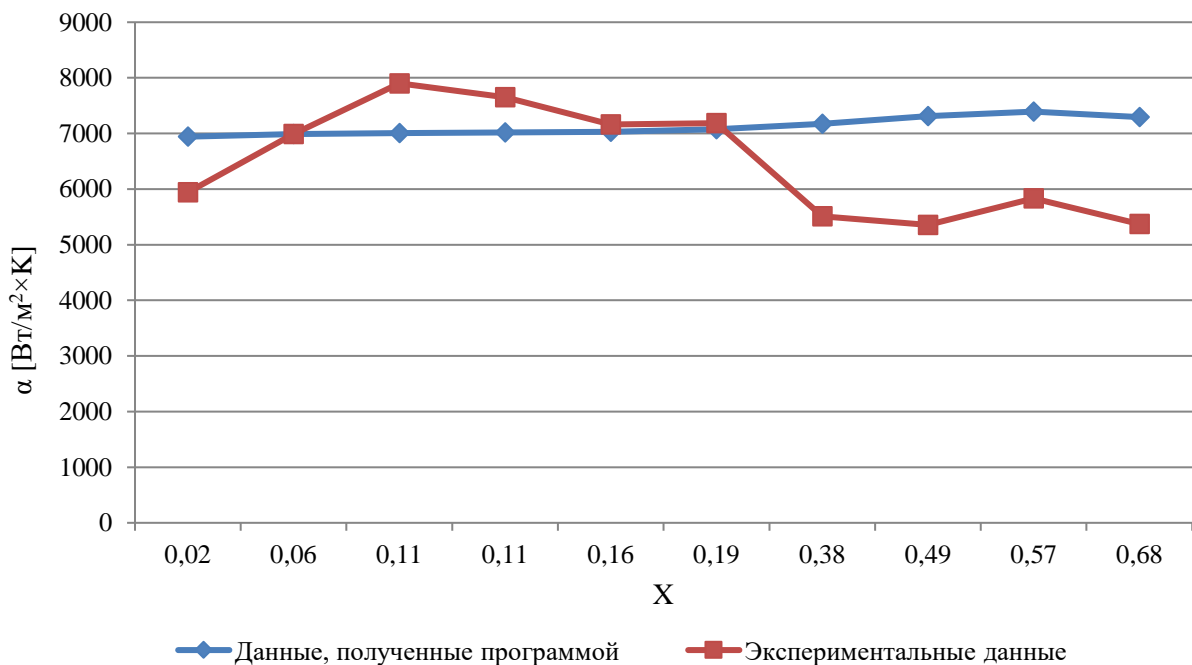


График 2 – зависимость коэффициента теплоотдачи от массового паросодержания

Из графика 2 следует, что опытные данные имеют тенденцию к увеличению, а потом к падению коэффициента теплоотдачи, в то время как рассчитанные в программе значения существенно не изменяются.

На графике 3 представлено сопоставление падения давления из источника [3] с падением давления, полученным в программе.

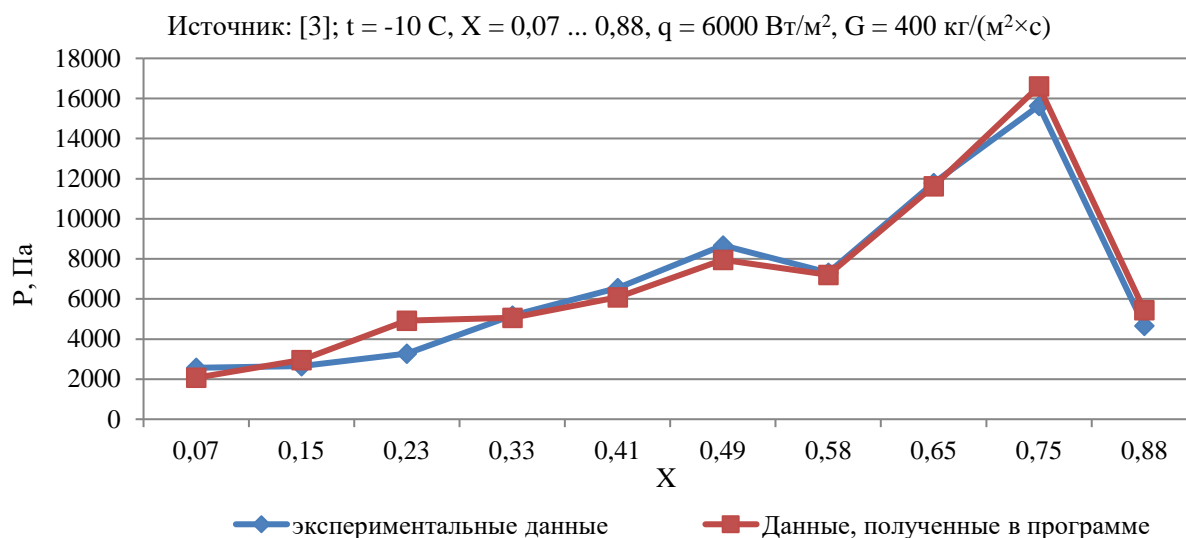


График 3 – Зависимость падения давления от коэффициента паросодержания

На основе данных графика 3 можно заключить, что экспериментальные значения зависят от рассматриваемых параметров почти таким же образом (с небольшими отличиями), как и значения, полученные программой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хладагент R744 уже применяется на ряде отечественных судов по зарубежным проектам. Методы проектирования каскадных установок в нашей стране пока не разработаны, поэтому анализ данных о теплоотдаче и гидравлическом сопротивлении при его кипении в трубах представляет практический интерес. Перспективы применения CO_2 обусловлены рядом его преимуществ. Малое количество опытных данных о процессах теплообмена затрудняет проектирование, анализ работы и оценку эффективности установок на R744. Некоторые недостатки CO_2 обусловлены высоким давлением, отсутствием запаха, высокой плотностью газа и трудностями подбора оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Comparison of R744 and R134a heat transfer coefficients during flow boiling in a horizontal circular smooth tube / R. Mastrullo, A. W. Mauro, A. Rosato, G. P. Vanoli; European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (Valencia, Spain, 15th to 17th April, 2009). – P. 5.
2. Characteristics of evaporative heat transfer and pressure drop of carbon dioxide and correlation development / Seok Ho Yoon, Eun Seok Cho, Yun Wook Hwang, Min Soo Kimb, Kyoungdoug Min [et al.] // International Journal of Refrigeration. – 2004. – PP. 111–119.
3. A flow pattern based phenomenological twophase frictional pressure drop model for CO_2 evaporation in macro- and micro-channels / L. Cheng, G. Ribatski, J. Moreno Quibén, J. R. Thome // 5th European Thermal-Sciences Conference (The Netherlands, 2008).
4. Chang Yong Park. Flow Boiling Heat Transfer of CO_2 at Low Temperatures in a Horizontal Smooth Tube. Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign. – PP. 3–5.

HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP DURING BOILING OF CARBON DIOXIDE CO₂ IN PIPES

N. M. Tverdokhlebov, student,
e-mail: nilskansk@gmail.com
Kaliningrad State Technical University

In the article, the author shows the analysis of experimental data on heat transfer and pressure drop obtained at boiling natural refrigerant R744 in smooth tubes. Calculations have also been performed using a program developed by scientific supervisor S. V. Koshelev, in order to compare the results obtained with experimental data. The advantages and disadvantages of carbon dioxide are revealed.

Keywords: *heat transfer, pressure drop, R744, refrigerant.*