

## Учет сильно переменных теплофизических свойств для моделирования теплообмена в потоке диоксида углерода сверхкритического давления

А.Ю. Чирков<sup>1</sup>, Т. Ло<sup>1</sup>, К.С. Егоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2-ая Бауманская 5, Москва, Россия, 105005

**Аннотация.** Обсуждается математическая модель изобарного течения в трубе диоксида углерода сверхкритического давления при условии постоянного теплового потока на поверхности охлаждаемой трубы. Проанализированы критериальные зависимости для теплоотдачи. Показан эффект сильно переменной теплоемкости. Разработана методика учета этого фактора в численных расчетах. Обнаружены области с так называемым ухудшенным теплообменом.

### 1. Введение

Интерес к использованию двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) как низкокипящего теплоносителя возник достаточно давно. Привлекательные с практической точки зрения особенности  $\text{CO}_2$  связаны с сравнительно низкими значениями критических давления и температуры (74 бар, 304 К). Так как реализовать конденсацию  $\text{CO}_2$  при характерных температурах окружающей среды около 300 К практически затруднительно, то большой интерес представляют циклы в области сверхкритических параметров. Сильно переменные свойства при околкритических параметрах порождают большое разнообразие режимов теплоотдачи для условий использования двуокиси углерода в качестве рабочего тела замкнутых термодинамических циклов перспективных энергоустановок [1, 2].

Значительное количество исследований было посвящено перспективам использования двуокиси углерода в ядерных энергоустановках достаточно большой мощности. В недавнее время появились разработки энергоустановок малой мощности. На сегодня накоплен достаточно большой объем экспериментальных данных по теплообмену сверхкритической двуокиси углерода при течении в каналах [2]. Одна из проблем, важных с точки зрения организации отвода теплоты, состоит в так называемых ухудшенных режимах теплоотдачи при охлаждении [3], которые связаны с переменностью теплофизических свойств.

В настоящей работе рассматривается течение двуокиси углерода в трубке малого диаметра при сверхкритических давлениях в условиях, когда течение можно считать практически изобарным. Рассматриваются изменения термодинамических параметров и теплофизических свойств по длине трубки. Цель работы состоит в том, чтобы оценить насколько сильные вариации коэффициента теплоотдачи возникают в связи с переменностью свойств, а также установить факторы, влияющие наиболее существенным образом.

## 2. Моделирование теплоотдачи

Мы рассматривали условия течения, аналогичные условиям течения в численных исследованиях [4] и экспериментах [5], выполненных применительно к охлаждению сверхкритического метана.

Для оценки изменения термодинамических параметров рассматривалось течение двуокиси углерода в трубке диаметром 2 мм. Скорость на входе в участок теплообмена была принята 40 м/с. Режим течения при рассматриваемых условиях турбулентный.

Давление на входе принималось равным  $p_{вх} = 80, 95$  и  $110$  бар. Оценка изменения термодинамических параметров потока по длине трубки была выполнена на основе термодинамических уравнений для одномерного потока в канале постоянного сечения при постоянном отводе теплоты [6], которые решались численно.

Термодинамические свойства рассчитывались с помощью уравнения состояния Пенга–Робинсона, а транспортные – взяты из базы данных NIST. Перепад давления по длине трубки считается малым, поэтому течение можно считать изобарным. В нашем случае перепад на длине трубки 0.6 м составил около 0.8 бар, что намного меньше давления флюида. Плотность теплового потока была задана на уровне  $1 \text{ МВт/м}^2$ .

Для расчета температуры стенки задавался коэффициент теплоотдачи, который оценивался по двум эмпирическим зависимостям из работы [7]. Эти зависимости сегодня используются в большинстве работ, публикуемых по данной тематике.

В первом случае коэффициент теплоотдачи соответствовал зависимости для числа Нуссельта [8]

$$\text{Nu}_c = \text{Nu}_{0c} (\rho_c / \rho_\phi)^n (\bar{c}_p / c_{pc})^m, \quad (1)$$

где  $\text{Nu}_{0c} = (\xi / 8) \text{Re Pr} / [12.7 \sqrt{\xi / 8} (\text{Pr}^{2/3} - 1) + 1.07]$  – число Нуссельта без учета переменности свойств;  $\xi = (1.82 \lg \text{Re} - 1.64)^{-2}$ ; индексы «с» и «ф» указывают определяющие температуры стенки и флюида (жидкости);  $\rho_c$  и  $\rho_\phi$  – плотности при температуре стенки и флюида;  $\bar{c}_p$  – среднеинтегральная изобарная теплоемкость;  $c_{pc}$  – изобарная теплоемкость при температуре стенки;  $n$  – функция давления;  $m$  – функция отношения  $\bar{c}_p / c_{pc}$ .

Для сравнения использовалась также другая зависимость [3], также представленная в работе [7],

$$\text{Nu}_\phi = 0.028 \text{Re}_\phi^{0.8} (\text{Pr}_\phi \text{Pr}_c)^{0.4+k}, \quad (2)$$

где величина  $k$  вычисляется согласно [7].

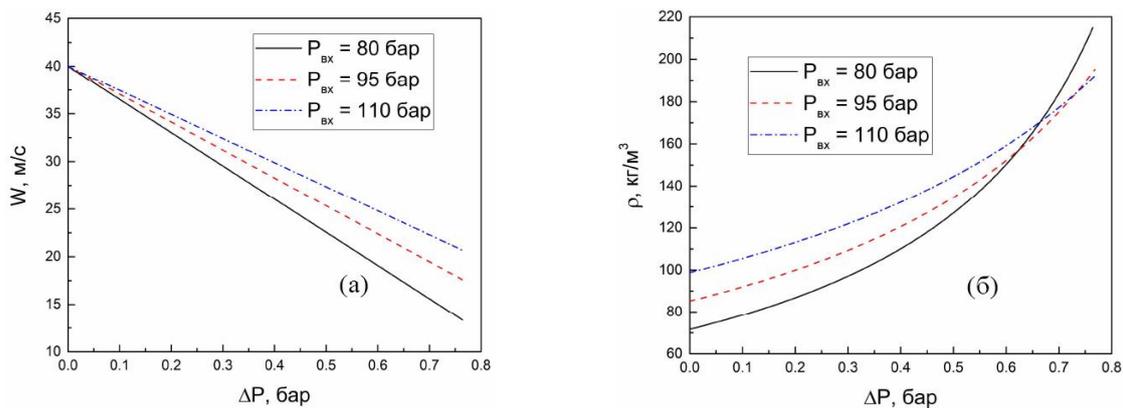
Как было показано сравнение, выполненное в работе [7], обе зависимости (формулы (1) и (2)) хорошо согласуются с экспериментальными данными.

На рис. 1 представлены результаты одномерного расчета изменений скорости и плотности по длине трубки. Так как в использованные для расчета соотношения продольная координата не входит в явном виде, то по оси абсцисс на рис. 1 и последующих отложено падение давления  $\Delta p$  в соответствующем сечении.

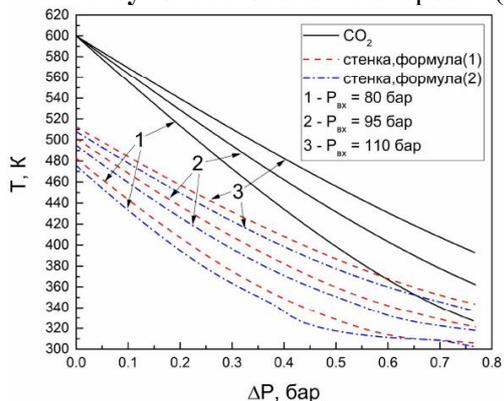
Изменение температуры флюида, а также температуры стенки при расчете с использованием формул (1) и (2) приведены на рис. 2. Соответствующие значения местного коэффициента теплоотдачи приведены на рис. 3. Как можно видеть по рис. 2 и 3, оценки по формулам (1) и (2) приводят к качественно подобным результатам, количественные различия относительно невелики.

Коэффициент теплоотдачи резко возрастает при понижении температур до уровня приближающегося к критической температуре. Далее рассмотрим, как при этом меняются теплофизические свойства и как их переменность сказывается на вариациях числа Нуссельта.

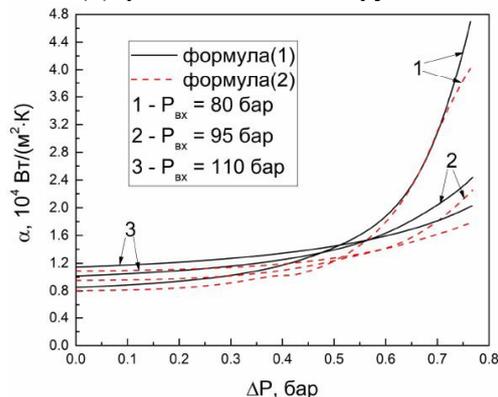
На рис. 4 приведено изменение теплоемкости флюида при различных давлениях, а также теплоемкости по температуре стенки и среднеинтегральной теплоемкости при давлении, близком к критическому (80 бар). Изменение местного числа Нуссельта показано на рис. 5.



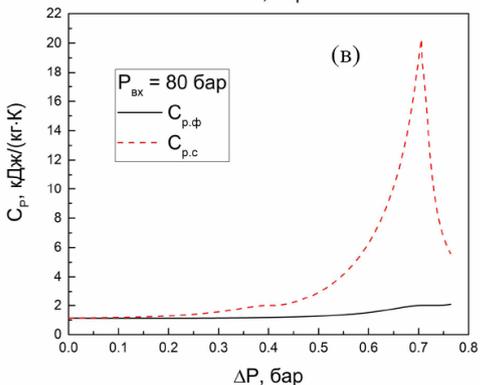
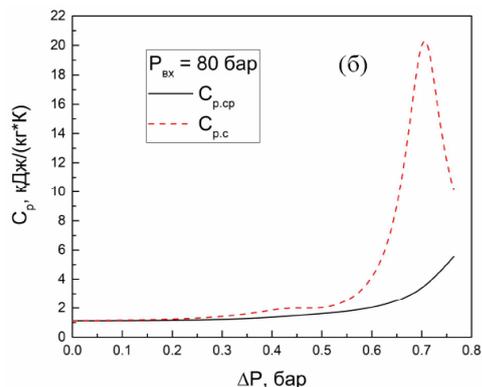
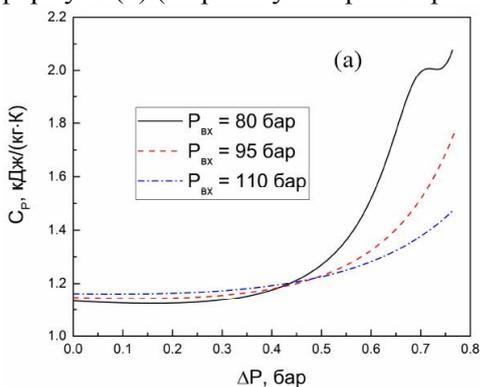
**Рисунок 1.** Изменение скорости (а) и плотности (б) флюида по длине трубки.



**Рисунок 2.** Изменение температуры флюида (сплошные кривые) и температуры стенки при расчете по формуле (1) (пунктирные кривые) и формуле (2) (штрих-пунктирные кривые).



**Рисунок 3.** Изменение местного коэффициента теплоотдачи по формуле (1) (сплошные кривые) и формуле (2) (пунктирные кривые).



**Рисунок 4.** Изменение теплоемкости флюида (а), средней теплоемкости и теплоемкости по температуре стенки при расчете по формуле (1) (б) и по формуле (2) (в).

Формула (1) позволяет выяснить влияние поправок, связанных с переменностью плотности и теплоемкости. Влияние этих величин на число Нуссельта показано на рис. 6. Как можно видеть, возрастающая плотность приводит к росту Числа Нуссельта примерно на 30 % по сравнению со случаем без учета переменности свойств. Рост теплоемкости, напротив, дает существенное уменьшение.

Изменение температур стенки и флюида также влияет на изменение чисел Рейнольдса и Прандтля. Так как в формуле (1) температура стенки является определяющей для числа Рейнольдса, то оно существенно изменяется. В формуле (2) для числа Рейнольдса определяющей является температура флюида. Поэтому оно имеет постоянные по длине канала значения  $Re_{\phi} = 2.34 \cdot 10^5$ ,  $2.68 \cdot 10^5$  и  $3.05 \cdot 10^5$  для давлений 80, 95 и 110 бар, соответственно.

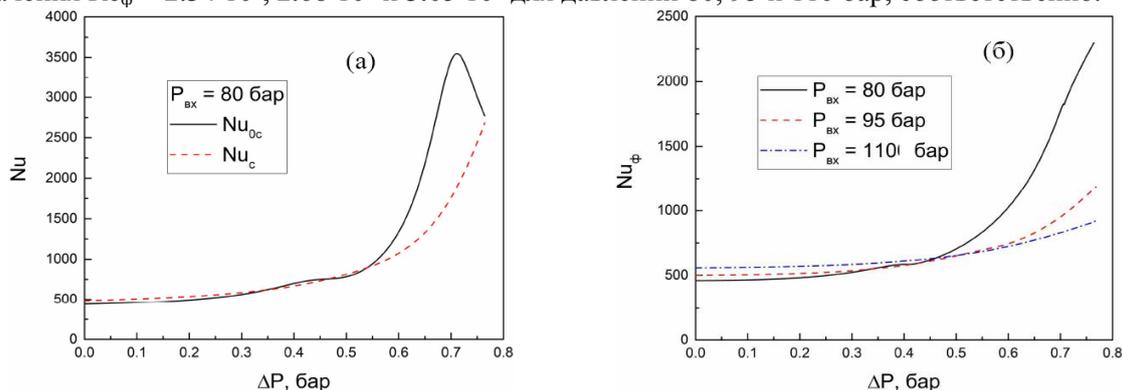


Рисунок 5. Изменение числа Нуссельта по длине трубки: а – по формуле (1), б – по формуле (2).

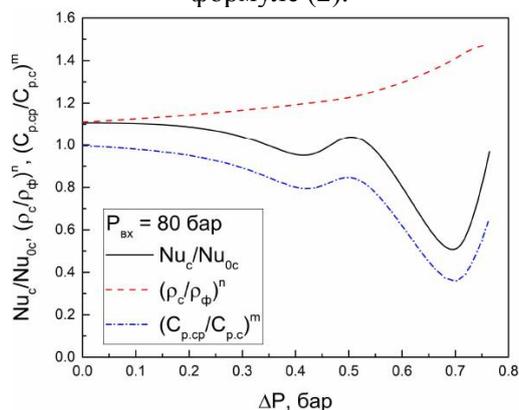


Рисунок 6. Влияние поправок на число Нуссельта при расчете по формуле (1).

### 3. Заключение

Полученные оценки показывают, что в перспективных энергоустановках со сверхкритическими рабочими телами даже относительно небольшие вариации параметров в каналах охлаждения могут приводить к заметным вариациям эффективности теплоотдачи, что особенно сильно проявляется при давлениях, близких к критическим. Это особенно важно в случае двуокиси углерода, так как практически достижимые значения нижней температуры в цикле со сверхкритическим  $CO_2$  близки к критической температуре.

### 4. Литература

- [1] Гохштейн, Д.П. Проблема применения углекислоты в качестве рабочего тела мощных энергетических блоков / Д.П. Гохштейн, Г.П. Верхивкер, В.Л. Дехтярев // Теплофизика высоких температур. – 1968. – Т. 6, № 4. – С. 621-633.
- [2] Курганов, В.А. Теплообмен в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя: некоторые итоги научного исследования // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-4). – 2006. – Т. 1. – С. 74-83.

- [3] Шицман, М.Е. Ухудшенные режимы теплоотдачи при закритических давлениях // Теплофизика высоких температур. – 1963. – Т. 1, № 2. – С. 267-275.
- [4] Wang, Y.-Z. Numerical studies of supercritical turbulent convective heat transfer of cryogenic-propellant methane / Y.-Z. Wang, Y.-X. Hua, H. Meng // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2010. – Vol. 24(3). – P. 490-500.
- [5] Gu, H. Experimental investigation on convective heat transfer from a horizontal miniature tube to methane at supercritical pressures / H. Gu, H. Li, H. Wang, Y. Luo // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 58. – P. 490-498.
- [6] Техническая термодинамика / под ред. В.И. Крутова. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
- [7] Краснощеков, Е.А. Экспериментальное исследование местной теплоотдачи двуокиси углерода сверхкритического давления в условиях охлаждения / Е.А. Краснощеков, И.В. Кураев, В.С. Протопопов // Теплофизика высоких температур. – 1969. – Т. 7, № 5. – С. 922-930.
- [8] Петухов, Б.С. Теплообмен в однофазной среде при околокритических параметрах состояния // Теплофизика высоких температур. – 1968. – Т. 6, № 4. – С. 732-745.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-08-01233).

## Modeling heat transfer in a supercritical carbon dioxide flow with strongly variable thermophysical properties

A.Yu. Chirkov<sup>1</sup>, T. Luo<sup>1</sup>, K.S. Egorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya 5, Moscow, Russia, 105005

**Abstract.** A mathematical model of isobaric flow of a carbon dioxide under supercritical pressure is discussed under the condition of a constant heat flux on the surface of a cooled pipe. Criterion dependences for heat transfer are analyzed. The effect of strongly variable heat capacity is shown. A method has been developed for taking this factor into account in numerical calculations. Areas are found with the so-called degraded heat transfer.