

*В. В. Назарова, Г. Е. Масленников, А. А. Фоменко, А. Ф. Рыжков*  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург  
[vika\\_n@inbox.ru](mailto:vika_n@inbox.ru)

## ОСОБЕННОСТИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО CO<sub>2</sub> КАК ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦИКЛАХ

*В работе рассмотрены свойства CO<sub>2</sub>, применяемого в сверхкритических углекислотных циклах, которые влияют на работу как теплообменных аппаратов, так и всей энергоустановки. Резкое изменение свойств флюида при прохождении температуры через псевдокритическую точку определяет режим и эффективность теплообмена, эти особенности необходимо учитывать при разработке схем энергоустановок.*

Ключевые слова: *теплообменник; сверхкритический CO<sub>2</sub>; рекуператор.*

*V. V. Nazarova, G. E. Maslennikov, A. A. Fomenko, A. F. Ryzhkov*  
Ural Federal University, Ekaterinburg

## FEATURES OF SUPERCRITICAL CO<sub>2</sub> AS A WORKING FLUID IN POWER CYCLES

*The work considers the properties of CO<sub>2</sub> used in supercritical carbon dioxide cycles, which affect the operation of both heat exchangers and the entire power plant. A sharp change in the properties of the fluid when the temperature passes through the pseudo-critical point determines the mode and efficiency of heat transfer, these features must be taken into account when developing power plant schemes.*

Keywords: *Heat exchanger; supercritical CO<sub>2</sub>; recuperator.*

Сверхкритические энергетические углекислотные циклы (sCO<sub>2</sub> циклы) представляют собой полужамкнутые циклы ГТУ, в которых в качестве рабочей среды используется сверхкритический CO<sub>2</sub>. Критические параметры CO<sub>2</sub> – это 31,1 °С и 7,39 МПа [1]. Одним из

основных преимуществ  $s\text{CO}_2$  цикла является достижение большей тепловой эффективности по сравнению с паровым циклом (рис. 1) [2].

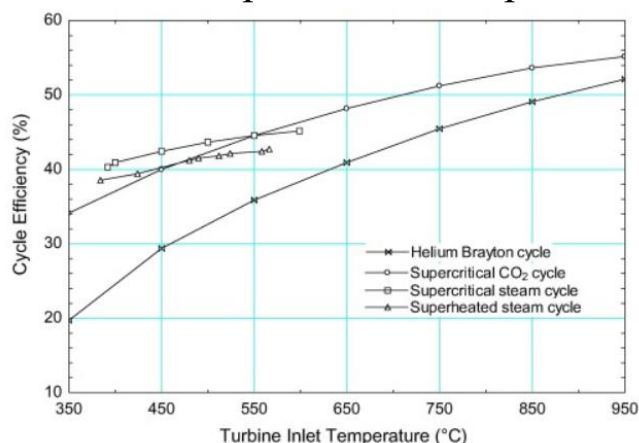


Рис. 1. КПД цикла в зависимости от температуры на входе турбины для различных рабочих сред [2]

Цикл *Allam* – это новый энергетический цикл на основе  $\text{CO}_2$ , где начальное давление составляет порядка 300 бар, температура – 1150 °C, а заявленный КПД нетто – 55,1 %. Такие рабочие параметры позволяют закачивать лишней топливный  $\text{CO}_2$  под землю с меньшими затратами, что является существенным конкурентным преимуществом [3]. В обычных циклах отделение и удаление низкоконцентрированных примесей, образующихся при сжигании, таких как  $\text{CO}_2$ , приводит к большим дополнительным капитальным затратам и увеличению потерь на собственные нужды.

В настоящее время лучшим вариантом для рекуператоров  $s\text{CO}_2$  являются пластинчатые теплообменники с вытравленными каналами (*Printed Circuit Heat Exchanger – PCHE*). Теплообменник *PCHE* способен не только обеспечивать требуемую эффективность теплообмена, но и выдерживать тепловые напряжений и давления до 1000 бар [4].

Все термодинамические и транспортные свойства  $s\text{CO}_2$  (плотность, удельная теплоемкость, вязкость, теплопроводность и число Прандтля) стремительно меняют свои значения при псевдокритической температуре, что является одной из отличительных характеристик  $s\text{CO}_2$  по сравнению со средами с постоянными свойствами. Псевдокритическая температура

характеризуется тем, что изобарная теплоемкость флюида достигает пикового значения при данном давлении и тем самым имитирует критическую температуру. Сверхкритический  $\text{CO}_2$  выгоден в качестве теплоносителя, по сравнению со сверхкритической водой, из-за его низких критических параметров, и более низкого значения удельного объема [5]. На рис. 2 показано быстрое и нелинейное изменение свойств  $\text{sCO}_2$  при различных рабочих давлениях и температурах [1].

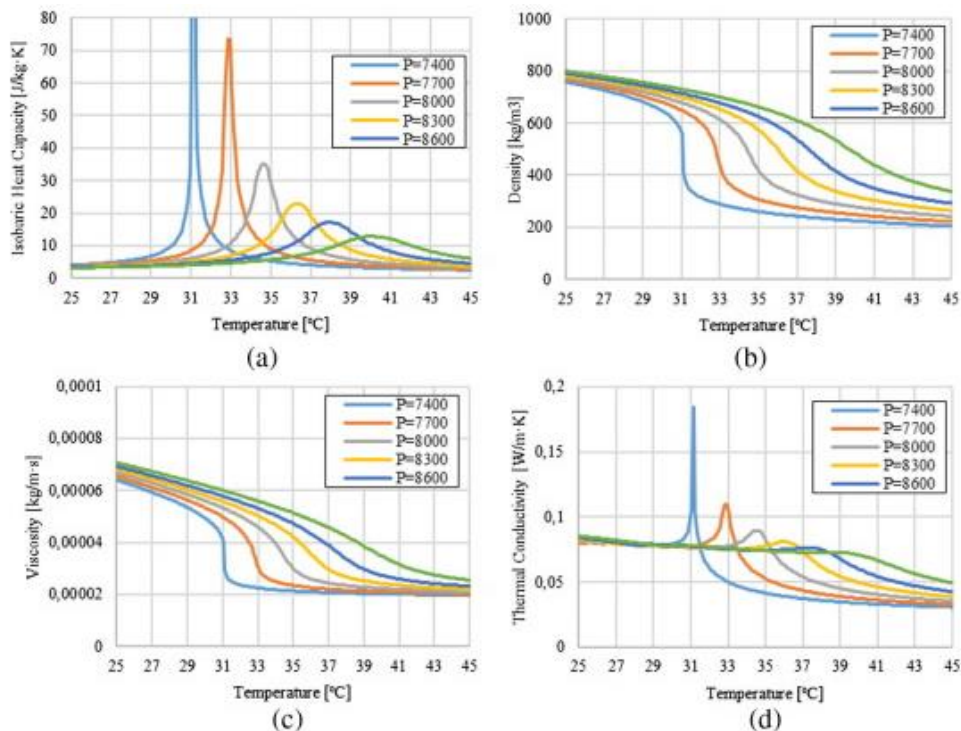


Рис. 2. Свойства  $\text{CO}_2$  в зависимости от температуры при различных сверхкритических давлениях: (а) – теплоемкость, (б) – плотность, (с) – теплопроводность и (д) – динамическая вязкость [1]

Механизмы теплопередачи  $\text{sCO}_2$  в *РСНЕ* являются более сложными, чем у других рабочих жидкостей, таких как вода и гелий, что обусловлено резкими изменениями теплофизических свойств в области псевдокритических температур и влиянием геометрических факторов микро-каналов [6].

В [5] отмечают, что стандартные зависимости для расчета теплообмена вблизи критической точки дают ошибку из-за экстремальных изменений свойств флюида, в связи с чем

исследователями предлагаются свои корреляции для специфических условий. Также в [5] указывается, при нагревании  $s\text{CO}_2$  могут возникать три режима теплопередачи (нормальный, улучшенный и ухудшенный).

С ростом давления скачки в характеристиках при псевдокритических температурах сглаживаются, однако увеличивается значение изобарной теплоемкости. В рекуператоре это приводит к тому, что для нагрева  $\text{CO}_2$  с более высоким давлением до требуемой температуры необходимо большее количество теплоты, чем может отдать уходящий поток  $\text{CO}_2$  с меньшим давлением, поэтому требуется подвод дополнительного тепла [3]. Эту и остальные особенности необходимо учитывать при разработке схем энергоустановок.

#### Список использованных источников

1. Cabeza Luisa F., de Gracia Alvaro, Fernández A. Inés, Faridd Mohammed M. Supercritical  $\text{CO}_2$  as heat transfer fluid : A review // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 125. P. 799–810. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.049.
2. A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors / V. Dostal, M. J. Driscoll, P. Hejzlar. Tech. Rep. MIT-ANP-TR-100, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA, 2004. 326 p.
3. Rodney Allam, Scott Martin, Brock Forrest, Jeremy Fetvedt, Xiji Lu, David Freed, G. William Brown Jr., Takashi Sasaki, Masao Itoh, James Manning. Demonstration of the Allam Cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 114. P. 5948–5966. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1731.
4. Hinze Jacob F., Nellis Gregory F., Anderson Mark H. Cost comparison of printed circuit heat exchanger to low cost periodic flow regenerator for use as recuperator in a  $s\text{-CO}_2$  Brayton cycle // *Applied Energy*. 2017. Vol. 208. P. 1150–1161. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.037.
5. Ehsan M. Monjurul, Guan Zhiqiang, Klimenko A. Y. A comprehensive review on heat transfer and pressure drop characteristics and correlations with supercritical  $\text{CO}_2$  under heating and cooling applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 92. P. 658–675. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.106.
6. Zhang Yuandong, Peng Minjun, Xia Genglei, Cong Tenglong. Numerical investigation on local heat transfer characteristics of  $S\text{-CO}_2$  in horizontal semicircular microtube // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 154. P. 380–392. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.082.