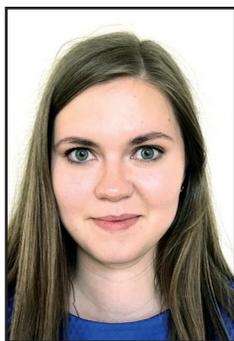


Особенности расчёта характеристик энергетических комплексов, использующих низкопотенциальную энергию



Артур ДМИТРЕНКО



Мария КОЛОСОВА

*Дмитренко Артур Владимирович – Российский университет транспорта, Москва, Россия.
Колосова Мария Александровна – Российский университет транспорта, Москва, Россия*.*

Развитие стационарной энергетики представляется важным аспектом внедрения энергосберегающих технологий на транспорте. В России оно обусловлено основными положениями Энергетической стратегии Российской Федерации до 2030 года. В связи с этим актуальной является задача эффективного использования низкопотенциальной теплоты на основе органического цикла Ренкина (ОЦР) в стационарных энергетических комплексах транспорта. В частности, эта задача характерна для котельных, переводимых с мазутного топлива на газ. В этом случае эффективность применения ОЦР в первую очередь будет определяться эффективностью используемых теплообменных аппаратов (ТА) с фазовым переходом, вследствие чего как технически, так и теоретически будет представлять большой интерес задача проектирования и расчёта оптимальных характеристик этих ТА.

В статье представлена расчётно-теоретическая модель переноса тепла при фазовых

переходах в турбулентных потоках на основе соотношений, полученных стохастической теорией гидродинамики и теплообмена. Рассматривается моделирование влияния турбулентности при фазовом переходе при неразвитом кипении пузырькового режима. Результаты сравнения показывают удовлетворительное соответствие значений по формуле, полученной на основе стохастических уравнений, со значениями, рассчитанными по эмпирической формуле для течения в трубе, применяемой в инженерной методике проектирования теплообменных аппаратов. Полученные результаты открывают перспективу исследования процессов переноса тепла при фазовых переходах в турбулентных потоках ТА с целью уменьшения их габаритно-массовых характеристик, а также роста энергетической эффективности как самих аппаратов, так эффективности всего энергетического комплекса.

Ключевые слова: транспорт, энергетический комплекс, теплопередача, неразвитое кипение, цикл Ренкина, стохастические уравнения, пузырьковый режим.

*Информация об авторах:

Дмитренко Артур Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики железнодорожного транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, ammsv@yandex.ru.

Колосова Мария Александровна – аспирант кафедры теплоэнергетики железнодорожного транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, m.a.kolosova@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 19.10.2020, принята к публикации 27.12.2020.

For the English text of the article please see p. 113.

ВВЕДЕНИЕ

Важность внедрения энергосберегающих технологий на транспорте определяет вектор развития стационарной энергетики транспорта. В частности, актуальной проблемой является эффективное использование низкопотенциальной теплоты в стационарных транспортных энергетических комплексах на основе органического цикла Ренкина (ОЦР). Эта задача характерна для котельных стационарной энергетики транспорта, эффективность которых во многом определяется теплообменными аппаратами, обеспечивающими функционирование энергокомплекса.

Создание новых компактных теплообменных аппаратов, как известно, сосредоточено на поиске не только различных инженерных решений [1; 2] по увеличению их эффективности, но и новых путей развития теории турбулентности, использование различных идей для описания которой представлено в [3–20]. В связи с этим модернизация объектов стационарной энергетики в России в основном, но не полностью, соответствует основным ориентирам энергетической системы, которая должна удовлетворять требованиям энергетической стратегии Российской Федерации до 2030 года: энергетическая безопасность; энергетическая эффективность экономики; бюджетная эффективность энергетики; экологическая безопасность энергетики [21; 22]. А именно, направление экологической безопасности и энергетической эффективности не полностью использует потенциал инноваций ввиду имеющихся на сегодняшний момент возможностей утилизации энергии выхлопных газов котельной с последующим образованием замкнутого энергетического цикла.

Внимание этой проблеме уделяется и в других странах [23; 24], где рассматриваются принципиальные схемы энергетических комплексов на основе органического цикла Ренкина.

В связи с этим методы теоретико-расчётного исследования процесса теплообмена при фазовых переходах остаются в центре внимания при проектировании компактных теплообменных аппаратов, утилизирующих низкопотенциальную энергию, ввиду проблемы учёта многопараметрических процессов и их взаимного влияния. Несмотря на численные методологии на

основе статистических методов RANS, LES и DNS [25; 26], остаются важными и инженерные методологии, базирующиеся на эмпирических и полуэмпирических соотношениях. Это особенно актуально ввиду результатов, полученных на базе стохастической теории турбулентности. Теория стохастической турбулентности [27–47], основанная на стохастических уравнениях и теории эквивалентных мер, позволяет получить аналитические зависимости для первого и второго критических чисел Рейнольдса [27–31], профилей усреднённых полей скорости и температуры [32–34], коэффициентов трения и теплоотдачи [35–38], корреляций второго порядка, [39–41], корреляционной размерности аттракторов [42; 43], спектральных функций [46; 47]. Такие результаты позволяют изучить задачу по учёту параметров влияния турбулентности на процесс переноса тепла в потоке при наличии фазовых превращений [44; 45]. Подчеркнём, что моделирование гидравлических потерь при пузырьковом режиме течения с учётом характеристик турбулентности потока исследовалось в работах [46; 47].

Цель статьи – представить расчётно-теоретическую модель переноса тепла при фазовых переходах в турбулентных потоках на основе соотношений, полученных стохастической теорией гидродинамики и теплообмена. Рассматривается моделирование влияния турбулентности при фазовом переходе при неразвитом кипении пузырькового режима.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. ПЕРЕНОС ТЕПЛА ПРИ НЕРАЗВИТОМ РЕЖИМЕ КИПЕНИЯ

В инженерной практике моделирование переноса тепла при фазовых переходах на пузырьковом режиме описывается коэффициентом теплоотдачи [25; 26]. Как известно, в экономайзерной области выделяют: область конвективного теплообмена; область неразвитого поверхностного кипения; участок развитого поверхностного кипения. В испарительной области выделяют: область развитого кипения; область ухудшенного теплообмена. В пароперегревательной области имеется один расчётный участок – конвективного теплообмена. В данной работе рассмотрим движение в вертикальной



Результаты расчётов чисел Нуссельта для характерных параметров турбулентного теплообмена от стенки круглой трубы к воде (расчёты авторов)

Re	Re ^{0,8}	Re ^{7/8}	Nu _d , уравнение (5)	Nu _d , уравнение (6)
10 ⁴	1585	3163	57	76,95
5 · 10 ⁴	5743	12930	228	279
10 ⁵	10000	23717	420	485
5 · 10 ⁵	36239	96961	1716	1757
10 ⁶	63095	177827	3152	3063

Таблица 2

Результаты расчётов чисел Нуссельта для характерных параметров турбулентного теплообмена от воды к стенке трубы (расчёты авторов)

Re	Re ^{0,8}	Re ^{7/8}	Nu _d , уравнение (6)	Nu _d , уравнение (5)
10 ⁴	1585	3163	32	43
5 · 10 ⁴	5743	12930	130	156
3 · 10 ⁵	24082	62012	620	655
10 ⁶	63095	177827	1778	1715
5 · 10 ⁶	228652	727107	7271	6219

трубе на экономайзерном участке в области неразвитого поверхностного кипения. За начало области неразвитого поверхностного кипения следует принять сечение, в котором $t_{ст} = t_s$. Коэффициент теплоотдачи в зоне неразвитого кипения может быть рассчитан по формуле:

$$\alpha_{н.к.} = \alpha_k + \left[\frac{q}{\alpha_{р.к.} \frac{x_{р.к.} r}{\alpha_0}} - \alpha_k \right] \left[\frac{x - x_{н.к.}}{x_{р.к.} - x_{н.к.}} \right], \quad (1)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи при течении однофазного потока в трубе;

α_0 – коэффициент теплоотдачи при кипении в большом объёме;

$\alpha_{р.к.}$ – коэффициент теплоотдачи в зоне развитого кипения;

q – плотность теплового потока;

r – удельная теплота парообразования;

x – текущее значение относительной энтальпии рабочего тела;

$x_{н.к.}$ – относительная энтальпия рабочего тела, при которой начинается неразвитое кипение;

$x_{р.к.}$ – относительная энтальпия рабочего тела, соответствующая началу развитого поверхностного кипения.

Величина относительной энтальпии потока в этом сечении определяется для продольного внутреннего и внешнего обтекания теплообменных труб:

$$x_{н.к.} = -\frac{qc_p}{\alpha_k r}. \quad (2)$$

Для течения внутри трубы и внутри кольцевых каналов в диапазоне режимных параметров $p = 2,9 \div 19,6$ МПа; $\rho w = 1000 \div 5500$ кг/(м² · с); $q = 0,7 \div 1,7$ МВт/м².

$$x_{р.к.} = -140 \left(\frac{q}{r(\rho w)_{см}} \right)^{1,1} \left(\frac{(\rho w)_{см} d}{\mu_1} \right)^{0,2} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{-0,2}. \quad (3)$$

Индексы 1 и 2 – соответственно относятся к жидкости, пару;

ρ – плотность;

$w_{см}$ – скорость двухфазного потока.

2. ПЕРЕНОС ТЕПЛА ПРИ ТЕЧЕНИИ ОДНОФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ

Запишем вначале выражение для α_0 – коэффициента теплоотдачи при кипении в большом объёме (при этом p – давление). Для воды – это $\alpha_0 = 4,34 q^{0,7} \cdot (p^{0,14} + 1,37 \cdot 10^{-2} p^2)$ [29]. При неразвитом кипении и вынужденном турбулентном течении вблизи стенки трубы он, так же, как и коэффициент теплоотдачи при развитом кипении $\alpha_{р.к.}$, как известно [28; 29], играет незначительную роль, по сравнению с величиной коэффициента теплоотдачи при вынужденном течении однофазного потока в трубе α_k . Известно [5; 6], что α_k для однофазной жидкости на турбулентном режиме в диапазонах $0,6 < Pr < 200$, $10^4 < Re_d < 5 \cdot 10^6$ определяется зависимо:

$$\left\langle \alpha_k = \frac{\lambda Nu}{d} \right\rangle, \quad (4)$$

$$Nu = 0,021 Pr_L^{0,43} Re_d^{0,8} (Pr_L / Pr_w)^{0,25}, \quad (5)$$

где Nu , Pr , Re – числа Нуссельта, Прандтля и Рейнольдса, индексы L , W – относятся к ядру потока и на стенке;

d – диаметр трубы;

λ – теплопроводность.

Как следует из сопоставления [12–15], отклонение результатов расчёта по зависимости (5) и иных зависимостей для числа Нуссельта с экспериментальными распределениями может составлять $\pm 25\%$. Как отмечено в [3–16], такой разброс может быть объяснён в первую очередь влиянием степени турбулентности и её масштабом, по зависимости:

$$\left\langle Nu_d = 0.2 \left[\left(\frac{\sqrt{E_{st}}}{U_0} \right) Re_d \right]^{(7/8)} \left[(Pr)^{7/12} \right] \right\rangle. \quad (6)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Сравнение результатов расчётов чисел Нуссельта для характерных параметров турбулентного теплообмена от стенки круглой трубы к воде дано в табл. 1.

Сравнение результатов расчётов чисел Нуссельта для характерных параметров турбулентного теплообмена от воды к стенке трубы представлено в табл. 2.

Таким образом, учёт параметров турбулентности по формуле (6) даёт возможность с большой достоверностью определять перенос тепла при фазовом переходе на пузырьковом режиме по формулам (1), (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена модернизированная модель неразвитого кипения в трубах теплообменных аппаратов, предназначенных для использования низкопотенциальной теплоты на основе органического цикла Ренкина для уже модернизированных котельных, переводимых с мазутного топлива на газ. Результаты сравнения показывают удовлетворительное соответствие значений по формуле (6), полученной на основе стохастических уравнений, со значениями, рассчитанными по эмпирической формуле (5) для течения в трубе, применяемой в инженерной методике проектирования теплообменных аппаратов. Полученные результаты открывают перспективу исследования процессов переноса тепла при фазовых переходах в турбулентных потоках по формулам (1), (2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kalinin, E. K., Dreitser, G. A., Kopp, I. Z., Myakochin, A. S. Efficient Surfaces for Heat Exchangers. Fundamentals and Design. New-York, 2002, 392 p.
2. Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Ненарокомов А. В. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена. – М.: Янус-К, 2009. – 300 с.
3. Ландау Л. Д. К проблеме турбулентности // ДАН СССР. – 1944. – Т. 44. – № 8. – С. 339–342.
4. Колмогоров А. Н. Новый метрический инвариант транзитивных динамических систем и автоморфизмов пространств Лебега // ДАН СССР. – 1958. – Т. 119. – № 5. – С. 861–864.
5. Колмогоров А. Н. Об энтропии на единицу времени как метрическом инварианте автоморфизмов // ДАН СССР. – 1959. – Т. 124. – № 4. – С. 754–755.
6. Колмогоров А. Н. Математические модели турбулентного движения несжимаемой вязкой жидкости // УМН. – 2004. – Т. 59. – Вып. 1 (355). – С. 5–10.
7. Lorenz, E. N. Deterministic nonperiodic flow. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, Vol. 20, pp. 130–141. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2). Доступ 19.10.2020.
8. Ruelle, D., Takens, F. On the nature of turbulence. Communications in Mathematical Physics, 1971, Vol. 20, pp. 167–192. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01646553>. (Erratum Vol. 23, pp. 343–344. <https://doi.org/10.1007/BF01893621>). Доступ 19.10.2020.
9. Feigenbaum, M. The transition to aperiodic behavior in turbulent systems. Communications in Mathematical Physics, 1980, Vol. 77, pp. 65–86. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01205039>. Доступ 19.10.2020.
10. Рабинович М. И. Стохастические автоколебания и турбулентность // УФН. – 1978. – Т. 125. – № 1. – С. 123–168.
11. Монин А. С. О природе турбулентности // УФН. – 1978. – Т. 125. – № 1. – С. 97–122.
12. Рабинович М. И., Сушик М. М. Когерентные структуры в турбулентных течениях. Нелинейные волны. Самоорганизация / Под ред. А. В. Гапонова и М. И. Рабиновича. – М.: Наука, 1983. – С. 58–84.
13. Заславский Г. М. Стохастичность динамических систем. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
14. Струминский В. В. Возникновение турбулентности // ДАН СССР. – 1989. – Т. 307. – № 3. – С. 564–567.
15. Самарский А. А., Мажукин В. И., Матус П. П., Михайлик И. А. Z/2-консервативные схемы для уравнения Кортевега–де Фриса // ДАН. – 1997. – Т. 357. – № 4. – С. 458–461.
16. Климонтович Ю. Л. Проблемы статистической теории открытых систем: критерии относительной степени упорядоченности состояний в процессах самоорганизации // УФН. – 1989. – Т. 158. – Вып. 1. – С. 59–91. DOI: [10.3367/UFNr.0158.198905b.0059](https://doi.org/10.3367/UFNr.0158.198905b.0059). Доступ 19.10.2020.
17. Sreenivasan, K. R. Fractals and multifractals in fluid turbulence. Ann. Rev. Fluid Mech. 1991, Vol. 23, pp. 539–600.
18. Orzag, S. A., Kells, L. C. Transition to turbulence in plane Poiseuille and plane Couette flow. Journal of Fluid Mechanics, 1980, Vol. 96 (1), pp. 159–205. DOI: [10.1017/S0022112080002066](https://doi.org/10.1017/S0022112080002066). Доступ 19.10.2020.
19. Priymak, V. G. Splitting dynamics of coherent structures in a transitional round-pipe flow. Dokl. Phys., 2013, Vol. 58, Iss. 10, pp. 457–465.
20. Фурсиков А. В. Моментная теория для уравнений Навье – Стокса со случайной правой частью // Изв. РАН. Сер. матем. – 1992. – Т. 56. – № 6. – С. 1273–1315.
21. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.02.2009 № 27-р/п.



Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. – М., 2009. – 144 с.

22. Энергетическая стратегия России до 2035 года. Корректировка. – М., 2014. – 25 с.

23. Energy Use, Loss and Opportunities Analysis: US Manufacturing and Mining. US Department of Energy Industrial Technologies Program, 2004, 165 p. [Электронный ресурс]: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/energy_use_loss_opportunities_analysis.pdf. Доступ 19.10.2020.

24. Chudnovsky, Y., Gotovsky, M., Greenman, M. [et al]. Integrated Steam/Organic Rankine Cycle (ISORC) for Waste Heat Recovery in Distributed Generation and Combined Heat and Power Production, Paper No: ИТС-14-22704, pp. 77–81. Proc. of ИТС-14, Washington, 2010. DOI: 10.1115/ИТС14-22704. Доступ 19.10.2020.

25. Hinze, J. O. Turbulence, 2nd ed., New York, McGraw-Hill, 1975, 790 p.

26. Schlichting, H. Boundary-Layer Theory. 6th ed., New York, McGraw-Hill, 1979, 838 p.

27. Dmitrenko, A. V. Equivalence of measures and stochastic equations for turbulent flows. Doklady Physics, 2013, Vol. 58, Iss. 6, pp. 228–235. DOI: 10.1134/S1028335813060098. Доступ 19.10.2020.

28. Dmitrenko, A. V. Calculation of pressure pulsations for a turbulent heterogeneous medium. Doklady Physics, 2007, Vol. 52, Iss. 7, pp. 384–387. DOI: 10.1134/S1028335807120166. Доступ 19.10.2020.

29. Dmitrenko, A. V. Some analytical results of the theory of equivalence measures and stochastic theory of turbulence for non-isothermal flows. Advanced Studies in Theoretical Physics, 2014, Vol. 8, Iss. 25, pp. 1101–1111. DOI: 10.12988/astp.2014.49131. Доступ 19.10.2020.

30. Dmitrenko, A. V. Analytical estimation of velocity and temperature fields in a circular pipe on the basis of stochastic equations and equivalence of measures. J. Eng. Phys. Thermophys, 2015, Vol. 88, Iss. 6, pp. 1569–1576. DOI: 10.1007/s10891-015-1344-x. Доступ 19.10.2020.

31. Dmitrenko, A. V. Determination of critical Reynolds numbers for non-isothermal flows with using stochastic theories of turbulence and equivalent measures. Heat Transfer Research, 2015, Vol. 47, Iss. 1, pp. 338–399. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2015014191. Доступ 19.10.2020.

32. Dmitrenko, A. V. An estimation of turbulent vector fields, spectral and correlation functions depending on initial turbulence based on stochastic equations. The Landau fractal equation. Int J Fluid Mech Res., 2016, Vol. 43, Iss. 3, pp. 82–91. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v43.i3.60. Доступ 19.10.2020.

33. Dmitrenko, A. V. The theory of equivalence measures and stochastic theory of turbulence for non-isothermal flow on the flat plate. Int J Fluid Mech Res., 2016, Vol. 43, Iss. 2, pp. 182–187. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v43.i2.60. Доступ 19.10.2020.

34. Dmitrenko, A. V. Stochastic equations for continuum and determination of hydraulic drag coefficients for smooth flat plate and smooth round tube with taking into account intensity and scale of turbulent flow. Continuum Mechanics and Thermodynamics, Vol. 29, Iss. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1007/s00161-016-0514-1. Доступ 19.10.2020.

35. Dmitrenko, A. V. Analytical determination of the heat transfer coefficient for gas, liquid and liquid metal flows in the tube based on stochastic equations and equivalence of measures for continuum. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2017, Vol. 29, Iss. 6, pp. 1197–1206. DOI: 10.1007/s00161-017-0566-x. Доступ 19.10.2020.

36. Dmitrenko, A. V. Estimation of the critical Rayleigh number as a function of an initial turbulence in the boundary layer of the vertical heated plate. Heat Transfer Research, 2017, Vol. 48, Iss. 13, pp. 1195–1202. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2017018750. Доступ 19.10.2020.

37. Dmitrenko, A. V. Determination of the Coefficients of Heat Transfer and Friction in Supercritical-Pressure Nuclear Reactors with Account of the Intensity and Scale of Flow Turbulence on the Basis of the Theory of Stochastic Equations and Equivalence of Measures. J. Eng. Phys. Thermophys, 2017, Vol. 90, Iss. 4, pp. 1288–1294. DOI: 10.1007/s10891-017-1685-8. Доступ 19.10.2020.

38. Dmitrenko, A. V. Regular Coupling between Deterministic (Laminar) and Random (Turbulent) Motions-Equivalence of Measures. Scientific Discovery 2013, Diploma No. 458, registration No. 583 of December 2.

39. Дмитренко А. В. Теория эквивалентных мер и множеств с повторяющимися, счётными фрактальными элементами. Стохастическая термодинамика и турбулентность. Коррелятор «Детерминированность–случайность»: Монография. – М.: Галлея-Принт, 2013. – 226 с.

40. Dmitrenko, A. V. Fundamentals of heat and mass transfer and hydrodynamics of single-phase and two-phase media. Criterial integral statistical methods and direct numerical simulation. Moscow, Galleya print, 2008, 398 p.

41. Dmitrenko, A. V. Uncertainty relation in turbulent shear flow based on stochastic equations of the continuum and the equivalence of measures. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2019. DOI: 10.1007/s00161-019-00784-0. Доступ 19.10.2020.

42. Dmitrenko, A. V. Formation of a turbulence spectrum in the inertial interval on the basis of the theory of stochastic equations and equivalence of measures. J. Eng. Phys. Thermophys, 2020, Vol. 93, Iss. 5, pp. 122–127. DOI: 10.1007/s10891-020-02098-4. Доступ 19.10.2020.

43. Dmitrenko, A.V. The correlation dimension of an attractor determined on the base of the theory of equivalence of measures and stochastic equations for continuum. Continuum Mechanics and Thermodynamics, Vol. 32, Iss. 2, pp. 63–74. DOI: 10.1007/s00161-019-00784-0. Доступ 19.10.2020.

44. Дмитренко А. В. Современные аспекты стохастической теории гидродинамики // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Уфа, 20–24 августа 2019. – Сб. трудов. – Т. 2. – С. 339–341.

45. Дмитренко А. В., Колосова М. А. Определение гидравлических характеристик промышленных агрегатов на основе стохастической теории гидродинамики // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Уфа, 20–24 августа 2019. – Сб. трудов. – Т. 2. – С. 342–343.

46. Dmitrenko, A. V., Kolosova, M. A. The possibility of using low-potential heat based on the organic Rankine cycle and determination of hydraulic characteristics of industrial units based on the theory of stochastic equations and equivalence of measures. JP Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, Vol. 21, Iss. 1, pp. 11–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.17654/HM021010200>. Доступ 19.10.2020.

47. Dmitrenko, A. V. Theoretical solutions for spectral function of the turbulent medium based on the stochastic equations and equivalence of measures. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00161-020-00890-4>. Доступ 19.10.2020.

48. Данилова Г. Н., Богданов С. Н., Иванов О. П., Медникова Н. М., Крамской Э. И. Теплообменные аппараты холодильных установок // Под ред. д.т.н. Г. Н. Даниловой. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. – 303 с.

49. Кириллов П. Л., Юрьев Ю. С., Бобков В. П. Справочник по теплогидравлическим расчётам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с. ●