

УДК 681.5.08

**ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕРОВ АКТИВНОЙ ЧАСТИ УСТРОЙСТВА
ТЕРМИЧЕСКОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ВОД****Чичурин Александр Геннадьевич¹**, к.т.н., доцентe-mail: alex1.chich@yandex.ru**Шураев Олег Петрович¹**, к.т.н., доцентe-mail: solwrk@inbox.ru**Чернов Владимир Александрович¹**, аспирантe-mail: yov7777@bk.ru¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Известно устройство, обеспечивающее утилизацию нефтесодержащих вод (НСВ) путем впрыска НСВ в отработавшие газы (ОГ) судового двигателя, которое принято называть устройством термического обезвреживания НСВ. Одной из задач, которую необходимо решить для практической реализации этого устройства, это определение размеров области газохода, в которой происходят процессы между отработавшими газами дизеля и впрыскиваемой в них НСВ. Эту область будем в дальнейшем называть активной зоной устройства термического обезвреживания НСВ. Составлены термодинамические соотношения для определения температуры, которая будет после окончания переходных процессов в газоходе после впрыска НСВ, то есть после окончания тепловых процессов, обусловленных утилизацией НСВ. Построен график зависимости этой температуры от количества, впрыскиваемой НСВ. На основе полученных в эксперименте зависимостей температуры в контрольных точках газохода для случаев, когда нет впрыска НСВ, и когда она присутствует, можно ориентировочно определить размеры активной зоны. Для более точного определения этой области выполнено сравнение графика зависимости температуры от длины газохода, полученного в эксперименте, с аналогичным графиком при условии, что процесс теплообмена в газоходе осуществляется только за счет теплообмена с окружающей средой. С учетом этого показано, что длина активного участка устройства термического обезвреживания НСВ составляет порядка 900 мм.

Ключевые слова: нефтесодержащие воды, устройство термического обезвреживания нефтесодержащих вод, газоход судового двигателя, температура в газоходе.

**JUSTIFICATION OF THE SIZE OF THE ACTIVE PART OF THE DEVICE FOR
THERMAL NEUTRALIZATION OF OILY WATERS****Alexander G. Chichurin¹**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professore-mail: alex1.chich@yandex.ru**Oleg P. Shurayev¹**, Candidate of Technical Science, Associate Professore-mail: solwrk@inbox.ru**Vladimir A. Chernov¹**, Doctoral Studente-mail: yov7777@bk.ru

Abstract. A device is known to ensure the disposal of oily waters by injecting them into the exhaust gases of a marine engine. This device is commonly referred to as a thermal neutralization device for oily waters. One of the tasks that must be solved for the practical implementation of the device for thermal neutralization of oily waters is to determine the size of the flue gas duct in which the processes between the exhaust gases of the diesel engine and the injected oily waters occur. In the future, we will refer to this area as the active zone of the thermal neutralization device. Thermodynamic relations have been compiled to determine the temperature that will be after the end of the transients in the flue after the injection of oily waters, that is, after the end of the thermal processes caused by their neutralization. A graph of the temperature dependence on the amount of injected oily water is constructed. Based on the temperature dependences obtained in the experiment at the flue control points for cases when there is no injection of oily water, and when it is present, it is possible to approximately determine the size of the core. To more accurately determine this area, the graph of the temperature dependence on the length of the flue obtained in the experiment was compared with a similar graph, provided that the heat exchange process in the flue is carried out only due to heat exchange with the environment. With this in mind, it is shown that the length of the active section of the device for thermal neutralization of oily waters is about 900 mm.

Keywords: oily waters, device for thermal neutralization of oily waters, marine engine flue, flue temperature.

Введение

Известно устройство, предназначенное для утилизации нефтесодержащих вод (НСВ) малой концентрации, путем их впрыска в отработавшие газы (ОГ) дизеля [1]. Также установлено, что максимальное количество НСВ, которое может быть впрыснуто в ОГ определяется расходом топлива дизелем [2].

Для проверки возможности практического применения данного устройства была разработана установка, имитирующая газовыпускной газопровод дизеля [3]. Проведенные испытания показали, что при впрыскивании НСВ с малой концентрацией нефтепродукта состав ОГ не ухудшается по экологическим показателям. При концентрациях от 3.5% и выше наблюдается заметное ухудшение состава ОГ [4]. Таким образом, данное устройство может быть применено для утилизации НСВ малой концентрации (порядка сотен частей на миллион - ppm, что соответствует сотым долям процента).

Одной из задач, которую необходимо решить для практической реализации устройства термического обезвреживания НСВ, это определение размеров области газопровода, в которой происходят физико-химические процессы между отработавшими газами дизеля и впрыснутой в них НСВ. Эту область будем в дальнейшем называть активной частью устройства термического обезвреживания НСВ.

Для определения размеров этой области необходимо знать существо процессов, происходящих в ОГ дизеля при впрыскивании в них НСВ. Данные процессы, происходящие в высокотемпературных газах, при подаче в них капель разного рода жидкостей достаточно широко освещены в литературе [5-8]. Однако, в указанных публикациях, как правило, рассматривается поведение одиночной капли, и практически не рассматриваются процессы, происходящие в высокотемпературных газах, при подаче облака частиц различных диаметров, и вообще не затрагиваются вопросы, связанные с НСВ.

Взаимодействие капель нефтесодержащей воды и отработавших газов

Процессы, происходящие в высокотемпературной газовой среде даже при поступлении в нее одиночной капли весьма сложны и многообразны. А в нашем случае необходимо рассмотреть эти процессы при попадании в ОГ целого ансамбля частиц НСВ.

Здесь сложности заключаются в следующем.

1. Поступающие в газоход частицы имеют различную скорость, как по величине, так и по направлению, а также различные размеры.

2. На поверхности капель могут распространяться колебания, которые появляются при их формировании в форсунке, а также так называемые поверхностные волны, обусловленные потоком обдуваемого их газа.

3. Форма капель НСВ под действием потока ОГ может изменяться, особенно крупных капель, а в некоторых случаях они могут распадаться на более мелкие.

4. Вследствие разных диаметров время прогрева капель до температуры кипения различное - мелкие быстрее, крупные медленнее. При этом также необходимо учитывать изменение объема капли при ее прогреве (до 4%).

5. При достижении каплей температуры кипения начинается процесс ее интенсивного испарения, при этом возле капли формируется облако насыщенного пара, которое весьма существенно затрудняет теплообмен капли с ОГ.

6. Вследствие разных диаметров капель через некоторое время (этому времени соответствует определенная координата X по ходу газохода) может быть ситуация, когда одни капли еще прогреваются, другие уже начали интенсивно испаряться, а третьи уже полностью испарились, а у четвертых начался процесс окисления нефтепродуктов из состава НСВ. Таким образом, в ОГ могут одновременно существовать дискретные фазы - непосредственно капли НСВ, насыщенный и перегретый пар, испарившиеся нефтепродукты, а также продукты их окисления.

Таким образом, рассмотренные процессы в газоходу дизеля при впрыске НСВ весьма и весьма сложны, многообразны и в недостаточной степени изучены. Поэтому для получения необходимых расчетных соотношений требуются очень серьезные исследования указанных процессов. В связи с этим, при обосновании размеров активной части устройства термического обезвреживания будем исходить из полученных на стенде [3] результатов испытаний [4, 10].

Тепловые процессы в газоходу

В газоходу при впрыске НСВ происходят одновременно три тепловых процесса, которые сказываются на температуре ОГ. Это процесс теплообмена ОГ с окружающей средой; процесс, связанный с нагревом, испарением и перегревом воды в составе НСВ; а также процесс, обусловленный явлениями разложения и окисления нефтепродуктов, входящих в состав НСВ.

Процесс теплообмена ОГ с окружающей средой достаточно хорошо исследован, в частности для рассматриваемого в стенде участка газохода получены аналитические выражения для его описания [10]. Показано, что зависимость температуры ОГ по ходу их движения за счет теплообмена с окружающей средой носит убывающий характер, близкий к экспоненциальному закону.

Очевидно, что длина активной части устройства термического обезвреживания НСВ определяется продолжительностью переходных процессов, происходящих в газоходу при впрыскивании НСВ, то есть процессами, связанными с нагревом, испарением и перегревом воды в составе НСВ, а также процессом разложения и окисления нефтепродуктов, входящих в состав НСВ. Рассмотрим эти процессы более подробно.



Ниже приведены формулы для определения температуры ОГ после нагрева впрыснутой воды до кипения T'_g , температуры ОГ после испарения впрыснутой воды T''_g , температуры ОГ при перегреве впрыснутой воды T'''_g , выведенные на основе простых термодинамических соотношений [11-13].

При этом, для T'_g - температуры ОГ после нагрева впрыснутой воды до кипения

$$c_{ог} \cdot m_{\tau g} \cdot T_g + c_{нсв} \cdot m_{\tau нсв} \cdot T_{нсв} = c_{ог} \cdot m_{\tau g} \cdot T'_g + c_{нсв} \cdot m_{\tau нсв} \cdot T_s, \quad (1.1)$$

$$T'_g = \frac{c_{ог} \cdot m_{\tau g} \cdot T_g - c_{нсв} \cdot m_{\tau нсв} \cdot (T_s + T_{нсв})}{c_{ог} \cdot m_{\tau g}}. \quad (1.2)$$

Для T''_g - температуры ОГ после испарения впрыснутой воды

$$c_{ог} \cdot m_{\tau g} \cdot T'_g + c_{нсв} \cdot m_{\tau нсв} \cdot T_s = c_{ог} \cdot m_{\tau g} \cdot T''_g + r_w \cdot m_{\tau нсв}, \quad (2.1)$$

$$T''_g = \frac{c_{ог} \cdot m_{\tau g} \cdot T'_g + c_{нсв} \cdot m_{\tau нсв} \cdot T_s - r_w \cdot m_{\tau нсв}}{c_{ог} \cdot m_{\tau g}}. \quad (2.2)$$

Для T'''_g - температуры ОГ после утилизации впрыснутой воды

$$c_{ог} \cdot m_{\tau g} \cdot T''_g + r_w \cdot m_{\tau нсв} = (c_{ог} \cdot m_{\tau g} + c_s \cdot m_{\tau нсв}) \cdot T'''_g, \quad (3.1)$$

$$T'''_g = \frac{c_{ог} \cdot m_{\tau g} \cdot T''_g + r_w \cdot m_{\tau нсв}}{(c_{ог} \cdot m_{\tau g} + c_s \cdot m_{\tau нсв})}. \quad (3.2)$$

Так как нас интересует в первую очередь температура ОГ после всех рассмотренных выше процессов, то T'''_g сразу можно найти из формулы

$$T'''_g = \frac{c_{ог} \cdot m_{\tau g} \cdot T_g - c_{нсв} \cdot m_{\tau нсв} \cdot (T_{нсв})}{(c_{ог} \cdot m_{\tau g} + c_s \cdot m_{\tau нсв})}. \quad (4)$$

Массовый расход отработавших газов может быть определен через расход топлива B

$$m_{\tau g} = B \cdot (L_0 \cdot \alpha + 1), \quad (5)$$

где L_0 - теоретически необходимое количество воздуха; α - коэффициент избытка воздуха.

Введём коэффициент отношения массовых расходов $k_{омр}$, который представляет собой отношение массового расхода НСВ к массе расходуемого топлива в единицу времени:

$$k_{омр} = \frac{m_{\tau нсв}}{B}. \quad (6)$$

На рисунке 1 приведена зависимость снижения температуры отработавших газов в области впрыска воды в зависимости от ее количества (после окончания переходных процессов, вызванных нагревом и испарением воды)

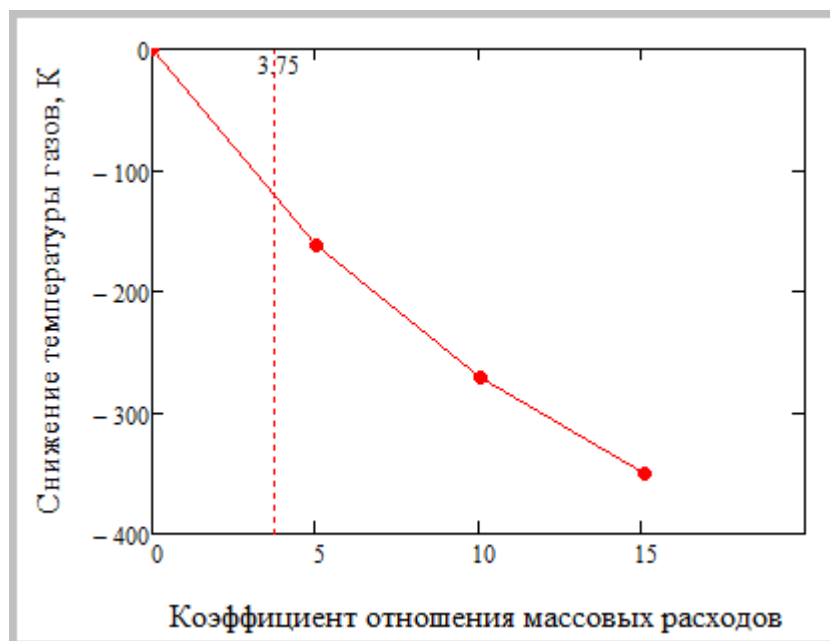


Рисунок 1 – Снижение температуры отработавших газов в области впрыска воды в зависимости от коэффициента отношения массовых расходов (после окончания переходных процессов, вызванных нагревом и испарением воды)

Из рисунка 1 следует, что температура отработавших газов в области впрыска воды существенно зависит от соотношения количества впрыскиваемой воды к массовому расходу топлива.

На рисунке 2 приведены графики изменения температуры по длине газохода, полученные экспериментально [4, 9]. Линия 1 соответствует режиму, когда в газоходе присутствуют только ОГ, а линия 2 - когда в газоходе в ОГ подана чистая вода при $k_{\text{омр}} = 3,75$. Сравнивая графики, приведенные на рисунках 1 и 2 отметим, что падение температуры при впрыске воды по термопаре Т03 примерно одинаково (при $K=3.75$), то есть имеется достаточно хорошее совпадение теоретических расчетов с результатом экспериментов.

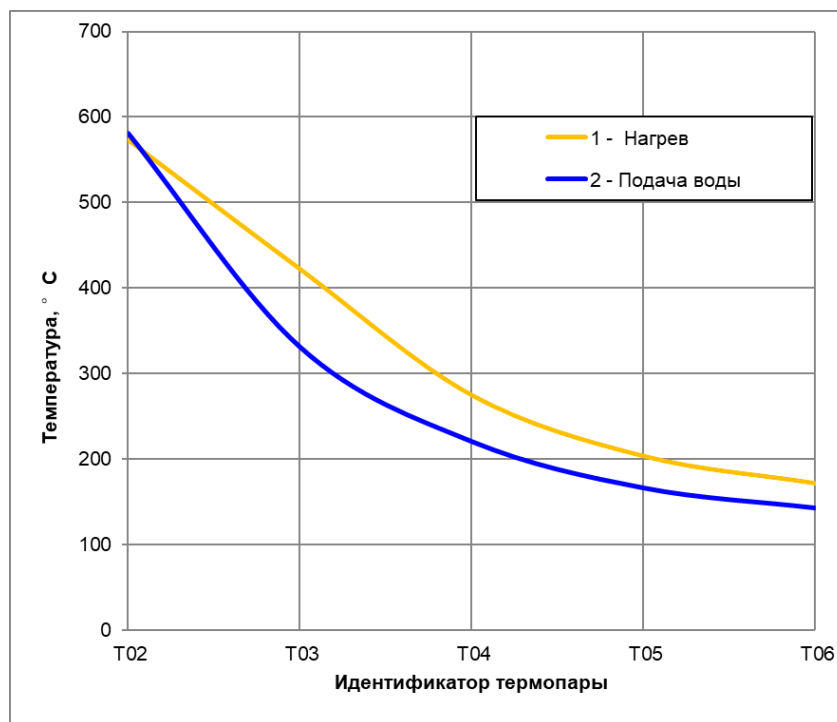


Рисунок 2 – Изменение температуры в газоходе по данным термопар в эксперименте [4].
 Расстояние между термопарами 300 мм. Подача воды производится между термопарами T02 и T03

Из рисунка 2 следует, что переходные процессы в газоходе, вызванные впрыском чистой воды, идут в основном между точками T02 и T03, далее по газоходу при приближении к точке T04 интенсивность процессов постепенно уменьшается и практически прекращаются между точками T04 и T05. Далее поведение кривой 4 приближается к поведению кривой 1, то есть в газоходе будет происходить теплообмен в основном с окружающей средой. Для более точного определения конца участка газохода, где заканчиваются переходные процессы, обусловленные впрыском воды, необходимо найти точку (область) на газоходе, начиная с которой все тепловые процессы будут определяться только теплообменом с окружающей средой, то есть подчиняться экспоненциальному закону. Эта точка и есть окончание переходных процессов.

Таким образом, практически все переходные процессы в газоходе, вызванные впрыском в ОГ чистой воды, заканчиваются до точки T04. Для обеспечения гарантированного окончания тепловых процессов, происходящих при подаче НСВ, примем инженерный запас длины 300 мм, то есть активный участок газохода будет порядка 900 мм. Аналогичные результаты дают и данные по распределению температуры по длине газохода при тепловизионной съемке (рисунок 3) [4, 9].



Рисунок 3 - Распределение температуры по длине газохода данным тепловизионной съемки

Далее рассмотрим процесс теплообмена, обусловленный разложением и окислением нефтепродуктов, количественно совпадающих с величиной вносимых нефтепродуктов при подаче в газоход в составе НСВ. Для случая полной утилизации нефтепродуктов без учета воды из НСВ можно записать

$$c_{\text{ОГ}} \cdot m_{\text{тг}} \cdot T_g + m_{\text{тнп(НСВ)}} \cdot Q_{\text{Ннп}} = c_{\text{ОГ}} \cdot (m_{\text{тг}} + m_{\text{тнп(НСВ)}}) \cdot T'_{g'} \quad (7)$$

На основе этого можно записать выражение для температуры ОГ после окончания переходных процессов, вызванных разложением и окислением нефтепродуктов из состава НСВ.

$$T'_{g'} = \frac{c_{\text{ОГ}} \cdot m_{\text{тг}} \cdot T_g + m_{\text{тнп(НСВ)}} \cdot Q_{\text{Ннп}}}{c_{\text{ОГ}} \cdot (m_{\text{тг}} + m_{\text{тнп(НСВ)}})} \quad (8)$$

На основе данной формулы построена зависимость прироста температуры ОГ (рисунок 4) от количества нефтепродуктов в НСВ.

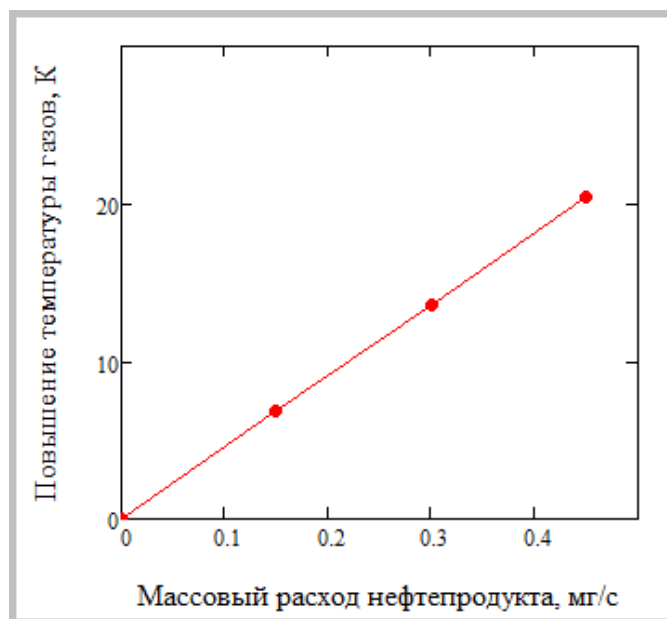


Рисунок 4 - Зависимость прироста температуры ОГ от количества нефтепродуктов в НСВ

Как видно из рисунка, при малой концентрации нефтепродуктов в НСВ (до 0.2%) их влияние на температуру ОГ практически не сказывается. На основе этого можно сделать вывод о том, что процесс теплообмена, обусловленный явлениями разложения и окисления нефтепродуктов, входящих в состав НСВ, при их малых концентрациях имеет слабовыраженный характер по сравнению с процессом нагрева и испарения воды, и соответственно оказывает незначительный вклад в переходные процессы, возникающие при впрыске НСВ в ОГ.

Учитывая, вышесказанное, а также то, что рассматриваемое устройство предназначено для утилизации НСВ после их грубой очистки с содержанием нефтепродукта порядка сотен ppm (сотые доли процента) можно считать, что длина активной части газохода будет определяться переходными процессами нагрева, испарения воды из состава НСВ и перегрева образовавшегося пара, и не превышает 900 мм.

Выводы

1. Длина активной части устройства термического обезвреживания НСВ определяется продолжительностью переходных процессов, происходящих в газоходе при впрыскивании НСВ, то есть процессами, связанными с нагревом, испарением и перегревом воды в составе НСВ, а также процессом разложения и окисления нефтепродуктов, входящих в состав НСВ.

2. Теоретический расчет длины активной части устройства термического обезвреживания НСВ весьма сложен. Поэтому при обосновании ее размеров будем исходить из полученных на стенде результатов испытаний. Установлено, что процесс теплообмена, обусловленный явлениями разложения и окисления нефтепродуктов из состава НСВ, при их малых концентрациях имеет слабовыраженный характер, и, соответственно, оказывает незначительный вклад в переходные процессы, возникающие при впрыске НСВ в ОГ.

3. Показано, что основные переходные процессы в газоходе при впрыске в ОГ НСВ возникают за счет нагрева и испарения воды из состава НСВ. Причем, наиболее интенсивно они проявляются в области впрыска НСВ. Поэтому длина активной части устройства термического обезвреживания НСВ малой концентрации определяется процессом нагрева и испарения воды из состава НСВ. Эта длина составляет порядка 900 мм.

Список литературы:

1. Пат. на полезную модель №151927 Россия, МПК F01N 3/029. Дизельная установка / А.Г. Чичурин, О.П. Шураев, М.Х. Садеков, В.Н. Власов – № 2014 121199/06. Заявл. 26.05.2014; Опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11.
2. Чичурин А.Г., Шураев О.П. Утилизация нефтесодержащих вод теплотой отработавших газов судовых дизелей. // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2016, №47. С. 201-206.
3. Чернов В.А., Шураев О.П., Чичурин А.Г. Стенд для исследования термического обезвреживания нефтесодержащих вод. // Научные проблемы водного транспорта. 2022, №73. С. 79-87. DOI 10.37890/jwt.vi73.314. – EDN SPAOSZ.
4. Чернов В.А., Шураев О.П., Чичурин А.Г. Эксперименты по термическому обезвреживанию судовых нефтесодержащих вод. // Научные проблемы водного транспорта. 2024, №79. С. 79-87.
5. Высокоморная, О.В. Прогностическое определение интегральных характеристик испарения капель воды в газовых средах с различной температурой / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Инженерно-физический журнал. – 2017. – Т. 90, № 3. – С. 648–657.
6. Стрижак, П.А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде / П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 8. – С. 26–31.
7. Жданова, А.О. Влияние распределения капель воды в «водяном снаряде» на температуру в его следе / А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 2. – С. 9–17.
8. Козырев А. В., Ситников А. Г. Испарение сферической капли в газе среднего давления // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 7. С. 765–774. - DOI: 10.3367/UFNr.0171.200107c.0765.
9. Чернов В.А., Шураев О.П., Чичурин А.Г., Гуро-Фролова Ю. Р. Доводочные испытания стенда термического обезвреживания судовых нефтесодержащих вод. Научные проблемы водного транспорта. 2024, №80. С. 77-88. - DOI 10.37890/jwt.vi80.513. – EDN LMDEDR.
10. Шураев О.П., Чернов В.А., Чичурин А.Г. Модель теплообмена в стенде термического обезвреживания нефтесодержащих вод. // Научные проблемы водного транспорта, 2025, №83. С. 95-105.
11. Селиверстов В.М., Бажан П.И. Термодинамика, теплопередача и теплообменные аппараты. М.: Транспорт, 1988. 287 с.
12. Баскаков А.П., Берг Б.В., Витт О.К. Теплотехника. М.: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.
13. Теплотехника. / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. М.: Высшая школа, 2000. 671 с.

