

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

УДК 621.18; 621.18.08  
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-150-155

## ТЕПЛОВЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В. П. Ходунков

*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,  
190005, Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: walkerearth@mail.ru*

Рассмотрены аспекты, связанные с проектированием и эксплуатацией современных судовых энергетических установок, — эксплуатационная надежность и их экономическая эффективность. Для обеспечения надежности предложено использовать технологию тепловизионных измерений, для обеспечения эффективности — технологию псевдооживленного слоя. Приведены примеры, дано обоснование и показаны пути решения. Показано, что внедрение техники тепловизионных измерений в систему судового контроля позволит наилучшим образом выполнить современные требования, предъявляемые к судовым энергетическим установкам в отношении экономики и безопасности их эксплуатации.

**Ключевые слова:** судовые энергетические установки, газоходы, тепловизор, псевдооживленный слой

В настоящей статье рассматриваются две задачи, связанные с проектированием и эксплуатацией современных судовых энергетических установок (СЭУ):

1) повышение эксплуатационной надежности судовых двигателей за счет их мониторинга и тепловой диагностики;

2) повышение экономической эффективности СЭУ, обеспечиваемое на стадии проектирования одного из составных элементов СЭУ — парогенератора, выполняющего роль утилизатора теплоты отработавших газов дизельного судового двигателя.

В рамках решения первой задачи необходимо достоверно оценивать качество процесса сгорания топлива в цилиндрах судового двигателя, определяемого техническим состоянием узлов топливной аппаратуры и цилиндро-поршневой группы. В настоящее время такую оценку получают с применением стационарных средств диагностики путем анализа индикаторной диаграммы рабочего процесса, данные носят дискретный характер. Использование такого способа оценки для непрерывного контроля технического состояния двигателя невозможно. Это, главным образом, вызвано отсутствием технической возможности непрерывного измерения давления в камере сгорания, являющегося одним из определяющих параметров диаграммы состояния процесса. Поэтому актуальна разработка методов непрерывного контроля качества рабочего процесса в цилиндрах дизельного двигателя. Задача усложняется тем, что контроль должен выполняться в условиях ограниченного набора параметров, измеряемых современными средствами автоматического управления СЭУ.

Представляется целесообразным использование тепловизионных средств измерений температуры для диагностики теплового режима газоходов, являющегося одним из показателей работы СЭУ. Уместно заметить, что тепловизионные средства измерений (тепловизоры) внесены в Государственный реестр средств измерений РФ с момента вступления в силу ГОСТ Р 8.619-2006 „Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки“. Ввиду относительной новизны этих средств измерений их применение в судостроении пока довольно ограничено, а методики выполнения измерений — недостаточно разработаны.

В то же время тепловизоры заключают в себе потенциал использования, в частности в мониторинге и тепловой диагностике СЭУ. Указанные средства позволяют выполнять дистанционный энергоинформационный мониторинг СЭУ с целью непрерывного получения информации о тепловом состоянии СЭУ. Применение средств тепловизионных измерений для диагностики СЭУ позволит получить набор точных данных о наружном тепловом поле СЭУ и отдельных ее элементов. На первом этапе с помощью этой техники целесообразно контролировать температуру отработавших газов на срезе газоходов газовыпускного тракта (ГВТ) СЭУ.

Температура отработавших газов на выходе ГВТ на режимах полной нагрузки является важным интегральным показателем качества регулировки двигателя в целом. К примеру, ее повышение является следствием обеднения топливо-воздушной смеси, которое может быть вызвано неконтролируемым подсосом воздуха в топливной системе, нарушением регулировки топливного насоса высокого давления (ТНВД) или снижением его производительности вследствие засорения элементов топливной аппаратуры, неправильной установкой крейсерского режима (при переходе от высоких оборотов к более низким).

В других случаях сильное обеднение или обогащение смеси вызывает значительное падение температуры отработавших газов, что может быть вызвано либо загрязнением системы воздушных фильтров, либо нарушением регулировки ТНВД.

В настоящее время для контроля температуры отработавших газов на малооборотных судовых двигателях применяют индикаторные приводы, индикаторные краны и термомпары. С помощью этих регистрирующих устройств получают индикаторные диаграммы процесса, по которым формируют представления о его качестве (скорости и полноте сгорания топлива), об отклонениях от нормы, а также определяют мощность двигателя.

Среднеоборотные двигатели не имеют индикаторных приводов, так как их невозможно установить. Такие двигатели снабжают только индикаторными кранами и термомпарами, при этом регулирование двигателей производят по давлению и температуре отработавших газов.

Многие высокооборотные двигатели не снабжены ни индикаторными кранами, ни термомпарами, поэтому качество их работы обычно определяется только регулировкой ТНВД.

Из изложенного следует, что контроль температуры отработавших газов в судовой технике носит эпизодический характер и выполняется, как правило, только при периодической регулировке двигателей (через 100—150 моточасов). При этом измерения, выполняемые в процессе эксплуатации, по сути, носят формальный характер и не могут оперативно влиять на качество работы двигателя.

Для подтверждения эффективности тепловизионной диагностики в судовой технике выполнены натурные измерения теплового режима ГВТ некоторых судов. Например, проведено тепловизионное обследование на срезе ГВТ судна, снабженного двумя дизельными агрегатами 3-2Д42 мощностью 1400 кВт каждый (производство ОАО „Коломенский завод“). При обследовании на ходе судна дистанционно измерялась температура внутренних стенок на срезе газоходов, которая принималась близкой к температуре газового факела (спектральный диапазон измерений 8—14 мкм). Измерения выполнялись при скорости хода судна 12,5 узлов, обороты каждого двигателя поддерживались на уровне 460 об/мин, дистанция тепловизионного визирования составляла 1,5—4 м.

По результатам измерений сделан вывод о том, что система ГВТ СЭУ функционирует в нормальном температурном режиме, но при этом в газоходе № 1 (рис. 1, а) температура факела систематически на 25—30 К была выше, чем в газоходе № 2 (рис. 1, б), в то время как оба двигателя имели одинаковые обороты (460 об/мин). Данное температурное различие свидетельствует об обеднении топливо-воздушной смеси дизеля № 1 (газоход № 1), что обусловлено недостаточно качественной регулировкой его топливной аппаратуры и подсосом воздуха в топливной системе. Следует отметить, что этот факт был полностью подтвержден старшим механиком судна.

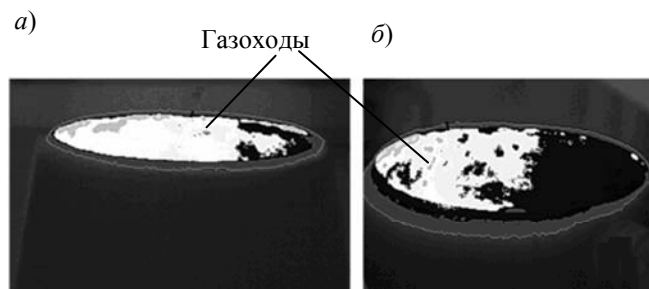


Рис. 1

Кроме того, при испытаниях другого судна, снабженного двумя дизельными агрегатами мощностью 3265 л.с., в результате тепловизионной диагностики установлено, что на полном ходе температура отработавших газов значительно ниже, чем при экономичном ходе судна. Это свидетельствует о неправильной установке крейсерского режима и недостаточно качественной регулировке ТНВД.

Из представленных примеров следует, что с помощью тепловизионной диагностики можно оперативно получить информацию о состоянии газоходов ГВТ (рис. 2), что в ряде случаев позволит своевременно предупредить возникновение пожароопасной ситуации с одновременным указанием местоположения опасного участка.



Рис. 2

В этой связи представляется вполне обоснованным введение в состав штатной судовой контрольно-измерительной аппаратуры средств тепловизионных измерений. Их стоимость относительно невелика, а эффект от применения очевиден, методики выполнения тепловизионных измерений подробно рассмотрены в работах [1, 2].

Гораздо более сложной задачей является очистка отработавших газов и утилизация их теплоты. Известно, что отработавшие газы, выбрасываемые в атмосферу, включают в себя большую неиспользуемую теплоту и имеют довольно высокую концентрацию сажистых включений (входящий в состав отработавших газов  $\alpha$ -бензопирен крайне опасен, его концентрация  $1 \text{ мг/м}^3$  является смертельной для человека).

В этой связи одним из перспективных вариантов решения задачи представляется использование техники и технологии псевдооживленного слоя. Следует отметить, что в 1980-х гг. данное направление активно разрабатывалось российскими учеными, однако было вынужденно

свернуто [3, 4]. Суть предлагаемого в настоящей статье технического решения — совместить судовой утилизационный парогенератор с системой ГВТ, при этом парогенератор должен содержать псевдооживленный (кипящий) слой, обладающий высокой интенсивностью межфазного (внутреннего) теплообмена. На практике предлагается дооборудовать газоходы судовых энергетических установок специальными насадками, представляющими собой съемные аппараты с размещенными в них теплообменными элементами, например, в виде трубных пучков (рис. 3). Такая насадка является обычным теплообменным элементом, обладающим высокой тепловой эффективностью — интегральным теплосъемом. В качестве теплоносителя (хладагента) может успешно использоваться забортная вода, а в качестве материала, образующего слой — обыкновенный речной (морской песок) тонкой фракции (0,5—1 мм), при этом псевдооживление слоя осуществляется отработавшими газами энергетической установки. Благодаря малому гидравлическому сопротивлению таких аппаратов падение мощности СЭУ составит, согласно экспертным оценкам, не более 3 %, в то время как получаемая выгода от последующего использования теплоты отработавших газов ощутимо компенсирует потерю, а по экономическим показателям — покрывает дополнительные затраты на топливо из-за указанного снижения мощности.

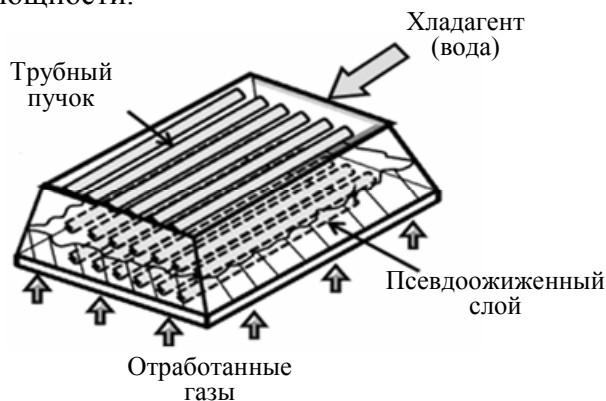


Рис. 3

Предлагаемая технология обладает рядом преимуществ:

- высокая интенсивность перемешивания твердой фазы, обеспечивающая высокие значения коэффициентов внешнего теплообмена и высокий интегральный теплосъем;
- высокая подвижность (текучесть) псевдооживленного слоя, что обеспечивает возможность создания аппаратов с непрерывным вводом свежей и отводом отработавшей твердой фазы;
- малое гидравлическое сопротивление и независимость его величины от скорости отработавшего газа в пределах существования псевдооживленного слоя;
- широкий диапазон свойств применяемых твердых частиц слоя;
- сравнительно простое устройство аппарата, возможность его механизации и автоматизации.

Для проектирования аппаратов с псевдооживленным слоем отработаны математический аппарат и эксплуатационные технологии [5—9].

Согласно предварительным оценкам, использование предложенного решения на судах с мощными СЭУ позволит получать дополнительную теплоту (достигаемая плотность теплосъема  $\sim 100$  кВт/м<sup>2</sup>, интегрального теплосъема — 200—300 кВт), которая, в свою очередь, может быть использована для технологических и бытовых целей.

Наибольший эффект от предлагаемых псевдооживленных систем утилизации теплоты отработавших газов СЭУ может быть получен при их использовании в технологической схеме опреснения морской воды в больших объемах. Кроме того, при использовании техники псевдооживленного слоя можно снизить вредные выбросы СЭУ в окружающую среду [10, 11].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Изд. дом „Спектр“, 2013. 544 с.
2. Ходунков В. П. Термометрия и инфракрасная радиометрия многофазных и многообъектных систем. СПб: Политехника, 2013. 259 с.
3. А.с. № 1537853 СССР. Дизельный двигатель с замкнутым газовым трактом / В. В. Дыбок и др. Опубл. 1989.
4. А.с. № 1576700 СССР, Способ работы двигателя внутреннего сгорания / В. В. Дыбок, П. В. Дружинин, А. Г. Тишкевич. Опубл. 1990.
5. Тодес О. М., Цитович О. Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1981. 296 с.
6. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б. Основы техники псевдооживления. М.: Химия, 1967.
7. Тодес О. М., Цитович О. Б., Ходунков В. П., Пилипенко Н. В., Ключев В. М. Теплообмен в заторможенном псевдооживленном слое // Инж.-физ. журн. 1986. Т. 50, № 3. С. 445—451.
8. Дульнев Г. Н., Пилипенко Н. В., Ходунков В. П. Теплофизические аспекты процесса псевдооживления в энергетических установках // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 3. С. 83—89.
9. Дементьев К. С., Романов В. А., Турлаков А. С., Волков Д. И. Проектирование судовых парогенераторов. Л.: Судостроение, 1986. 336 с.
10. Дыбок В. В., Сайданов В. О. Комбинированные системы снижения вредных выбросов ДВС транспортных средств, применяемых внутри специальных фортификационных сооружений, с использованием реакторов — нейтрализаторов газовых смесей // Сб. военно-научных статей ВАМТО. СПб: ВАМТО, 2013. Вып. 58(70), ч. 2. С. 57—62.
11. Дыбок М. В. Комбинированная система снижения вредных выбросов ДВС специальной техники, применяемой для работы в условиях ограниченных объемов. Дис. ... канд. техн. наук. СПб: ГАУ, 2006. 151 с.

**Сведения об авторе**

**Вячеслав Петрович Ходунков** — канд. техн. наук; Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, отдел эталонов и научных исследований в области термодинамики; старший научный сотрудник;  
E-mail: walkerearth@mail.ru

Поступила в редакцию  
26.06.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Ходунков В. П. Тепловые и технологические задачи проектирования и эксплуатации судовых энергетических установок // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 2. С. 150—155.

**THERMAL AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS  
IN MARINE POWER PLANTS DESIGN AND OPERATION**

**V. P. Khodunkov**

*D. I. Mendeleev Institute for Metrology, 190005, St. Petersburg, Russia  
e-mail: walkerearth@mail.ru*

Several aspects of design and operation of modern marine power plants – namely, operational reliability and economic efficiency of the plants - are considered. Application of thermal imaging measurements technology is proposed as a mean to solve the first problem, and the technology of fluidized bed is suggested to solve the second one. Examples are given, a justification is provided, and ways to solve the problems are described. It is shown that introduction of thermal measurements in on-board control system will best meet the modern requirements for the economy and safety of marine power plant operation.

**Keywords:** marine power plant, gas flue, thermal imager, fluidized bed

**REFERENCES**

1. Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol'* (Infrared Thermography and Thermal Control), Moscow, 2013, 544 p. (in Russ.)
2. Khodunkov V.P. *Termometriya i infrakrasnaya radiometriya mnogofaznykh i mnogoob"yektnykh sistem* (Thermometry and Infrared Radiometry of Multiphase and Multi-object Systems), St. Petersburg, 2013, 259 p. (in Russ.)

3. Copyright certificate of the USSR, no. 1537853, *Dizel'nyy dvigatel' s zamknutym gazovym traktom* (Diesel Engine with a Closed Gas Circuit), V.V. Dybok et al., Published 1989. (in Russ.)
4. Copyright certificate of the USSR, no. 1576700, *Sposob raboty dvigatelya vnutrennego sgoraniya* (Mode of Work of the Internal Combustion Engine), V.V. Dybok, P.V. Druzhinin, A.G. Tishkevich, Published 1990. (in Russ.)
5. Todes O.M., Tsitovich O.B. *Apparaty s kipyashchim zernistym sloyem* (Devices with the Boiling Granular Layer), Leningrad, 1981, 296 p. (in Russ.)
6. Gel'perin N.I., Aynshteyn V.G., Kvasha V.B. *Osnovy tekhniki psevdoozhizheniya* (Basic Techniques of Fluidization), Moscow, 1967. (in Russ.)
7. Todes O.M., Tsitovich O.B., Khodunkov V.P., Pilipenko N.V., Klyuchev V.M. *Journal of Engineering Physics*, 1986, no. 3(50), pp. 445–451. (in Russ.)
8. Dul'nev G.N., Pilipenko N.V., Khodunkov V.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2010, no. 3(53), pp. 83–89. (in Russ.)
9. Dement'yev K.S., Romanov V.A., Turlakov A.S., Volkov D.I. *Proyektirovaniye sudovykh parogeneratorov* (Design of Ship Steam Generators), Leningrad, 1986, 336 p. (in Russ.)
10. Dybok V.V., Saydanov V.O. *Sbornik voyenno-nauchnykh statey Voennoy akademii material'no-tekhnicheskogo obespecheniya*, St. Petersburg, 2013, no. 58(70), pt. 2, pp. 57–62. (in Russ.)
11. Dybok M.V. *Kombinirovannaya sistema snizheniya vrednykh vybrosov dvigateley vnutrennego sgoraniya spetsial'noy tekhniki, primenyayemoy dlya raboty v usloviyakh ogranichennykh ob'yemov* (Combined system of reduction of harmful emissions of internal combustion engines of special equipment used for work in conditions of limited volumes), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2006, 151 p. (in Russ.)

**Data on author**

**Viacheslav P. Khodunkov** — PhD; D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Department of Standards and Research in the Field of Thermodynamics; Senior Researcher; E-mail: walkerearth@mail.ru

**For citation:** Khodunkov V. P. Thermal and technological problems in marine power plants design and operation. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 2. P. 150—155 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-150-155