

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА ПАО КАМАЗ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

*С.В. Снарский, директор, Г.Г. Гаффаров, вед. инженер, А.Г. Гаффаров, вед. инженер
Завод двигателей ПАО КамАЗ*

*С.Ю. Коваленко, к.т.н., ст. преподаватель кафедры автомобильного транспорта
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»*

Представлены результаты исследований, направленных на повышение эксплуатационной надежности автомобильных двигателей производства ПАО КамАЗ за счет модернизации осевых подшипников коленчатого вала. На основе анализа условий работы осевых подшипников было установлено, что причиной выхода их из строя является отсутствие организованного процесса смазки и охлаждения. Предложены мероприятия по совершенствованию конструкции осевых подшипников, обеспечивающие надежную подачу масла к поверхностям трения осевых подшипников. Стендовые испытания двигателя подтвердили работоспособность и эффективность предложенной конструкции.

В настоящее время повышение мощности и технико-эксплуатационных показателей двигателей обеспечивается за счет форсирования. Вместе с тем форсирование связано с повышением нагруженности и теплонапряженности деталей и систем двигателя. Так, например, опыт эксплуатации высокофорсированных двигателей ПАО КамАЗ позволил выявить характерные отказы осевых подшипников коленчатых валов как в гарантийный, так и в постгарантийный сроки эксплуатации, вызванные интенсивным износом, разрушением полуколец осевых подшипников с падением обломков в поддон картера. В результате разрушения осевого подшипника происходит смещение коленчатого вала по продольной оси с последующим заклиниванием и поломкой деталей кривошипно-шатунного механизма и цилиндропоршневой группы. Статистика отказов упорных подшипников отрицательно сказывается на показателях надежности двигателей и ведет к материальным потерям ПАО КамАЗ и потребителей.

В качестве примера на рис. 1 представлен внешний вид серийных верхнего и нижнего полуколец осевого подшипника после проведения стендовых испытаний двигателя КамАЗ 740.662-280 с характерными признаками сухого трения.

При внешнем осмотре деталей было установлено, что поверхности трения верхнего и нижнего полуколец осевого подшипника претерпели высокие температурные перегрузки из-за отсутствия смазки и охлаждения поверхностей полуколец, что вызвало их механический износ. В результате товарный вид полуколец утерян и дальнейшая их эксплуатация неприемлема.

Конструктивные особенности полуколец осевых подшипников коленчатых валов двигателей ПАО КамАЗ и схема их установки показаны на рис. 2.

Для исключения осевого перемещения коленчатого вала на его пятой коренной опоре установлены два осевых подшипника: задний предназначен для удержания коленчатого вала от осевого перемещения при движении автомобиля в гору, передний — при движении автомобиля по дорогам с уклоном. Осевые подшипники состоят из верхних и нижних стальных полуколец, являющихся неподвижными деталями, на одну из боковых сторон которых нанесено антифрикционное покрытие из свинцово-оловянистой бронзы. Подвижными частями осевых подшип-

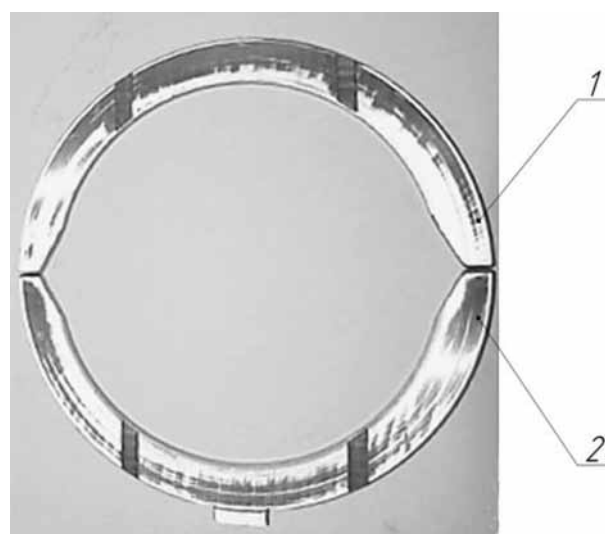


Рис. 1. Внешний вид верхнего (1) и нижнего (2) полуколец переднего осевого подшипника коленчатого вала после стендовых испытаний двигателя

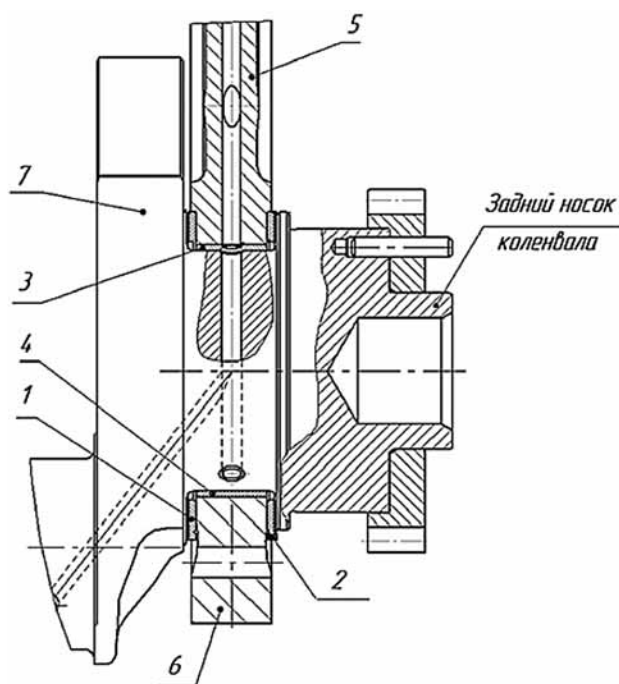


Рис. 2. Установка осевых подшипников коленчатых валов двигателей ПАО КамАЗ:

1 — осевой подшипник передний; 2 — осевой подшипник задний; 3 — вкладыш подшипника коленчатого вала верхний; 4 — вкладыш подшипника коленчатого вала нижний; 5 — блок цилиндров; 6 — крышка подшипника пятой коренной опоры коленчатого вала; 7 — коленчатый вал

ников являются шлифованные поверхности боковых щек пятой коренной шейки коленчатого вала, которые могут располагаться в различных положениях относительно рабочих поверхностей полуколец и вращаются с коленчатым валом. У коленчатых валов всех моделей двигателей ПАО КамАЗ эти поверхности являются плоскими и непрерывными в виде круглого венца с твердостью 52–62 HRC. Поверхности трения полуколец осевых подшипников также плоские.

Конструкция серийных нижнего и верхнего полуколец осевых подшипников, показана на рис. 3, из которого видно, что на их рабочих поверхностях отсутствуют какие-либо конструктивные решения для организации смазочного процесса.

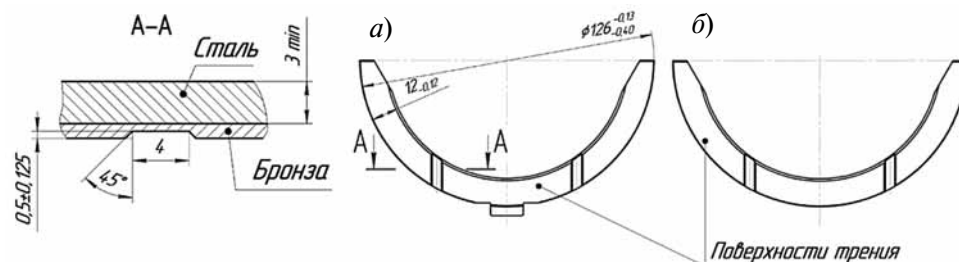


Рис. 3. Конструкция серийных нижнего и верхнего полуколец осевых подшипников коленчатого вала:

а — нижнее полукольцо; б — верхнее полукольцо

Полукольца подшипников конструктивно выполнены биметаллическими. Величины коэффициентов теплового линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$) у стальной основы и у бронзового антифрикционного слоя значительно отличаются (1,10 и 1,71 соответственно). Принимая во внимание, что при работе двигателя масло в осевые подшипники поступает после отработки в пятой коренной опоре с повышенной температурой и незначительным давлением, в осевых подшипниках возникает режим масляного голодания и, как следствие, отсутствие охлаждения на поверхностях трения. Это ведет к выгибанию полуколец в сторону антифрикционного слоя, и они принимают форму зонтика [1, 3] (рис. 4).

Лабораторными исследованиями, проведенными на заводе двигателей ПАО КамАЗ, было подтверждено, что такая деформация приводит к уменьшению эффективной рабочей поверхности серийных упорных полуколец и снижает несущую способность осевых подшипников. Это приводит к возникновению сухого трения в локальных зонах и интенсивным износам, причем поверхности трения имеют черный вороненый цвет, а в зоне внутреннего диаметра имеют место повышенные износы.

Таким образом, на основе проведенного анализа можно сделать вывод, что причиной разрушения серийных полуколец осевых подшипников коленчатых валов двигателей ПАО КамАЗ является режим сухого трения в осевых подшипниках вследствие отсутствия процесса смазки и охлаждения трущихся поверхностей полуколец.

Рассматривая теоретические основы работы подшипников скольжения, было установлено, что осевые подшипники скольжения с плоскопараллельными поверхностями не могут работать в режиме жидкостной смазки. В упорных подшипниках с плоскопараллельными поверхностями скольжения отсутствует естественный сужающийся зазор, необходимый для создания масляного клина, как, например, в подшипниках скольжения. Для опор такого типа наиболее характерен режим граничной смазки и реже полужидкостной, причем смазка обычно подводится к

поверхностям трения подшипника с помощью радиальных каналов, выполненных на поверхностях трения. Таким образом, для обеспечения условий жидкостной смазки необходимо обеспечить подвод масла к поверхностям трения для создания масляного клина [1, 6].

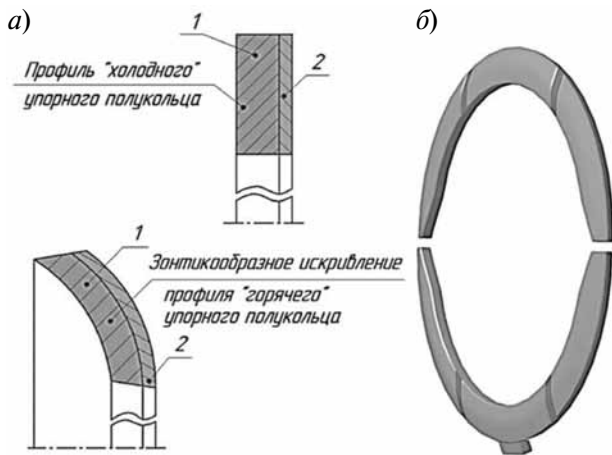


Рис. 4. Изменение формы полуколыца осевого подшипника при повышении его температуры:

а — схема процесса выгибания; *б* — объемное изображение деформированного состояния полуколыца осевого подшипника; 1 — стальная основа; 2 — залитый бронзовый сплав

Для обеспечения жидкостного режима смазки в осевых подшипниках коленчатого вала была предложена конструкция модернизированного полуколыца осевого подшипника коленчатого вала, разделенного радиальными маслоподводящими канавками на несколько равных участков (участок АВСД), секторная подушка поверхности которого показана на рис. 5 [6].

Все подушки модернизированных осевых подшипников имеют поверхности контакта, обработанные плоско, причем толщина смазочной пленки в произвольной точке подушки зависит от радиуса расположения этой точки (кроме поверхности, образованной углом θ) и может иметь сложный характер изменения, определяемый приложенной к осевому подшипнику нагрузкой, угловой скоростью вращения ω коленчатого вала и геометрией деталей.

Несложный инженерный расчет, выполненный согласно рекомендациям, приведенным в справочной конструкторской литературе [2–6], показал, что допускаемая несущая способность каждого модернизированного осевого подшипника составляет не менее 856 кгс.

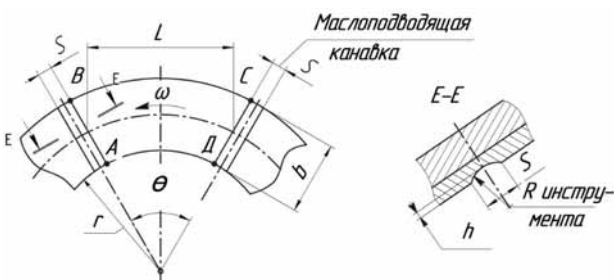


Рис. 5. Секторная подушка предлагаемого плоского полуколыца осевого подшипника со смазочными канавками

При движении автомобиля с двигателем КамАЗ 740.632-400 общее вертикальное усилие $T_{к1}$, приложенное к оси коленчатого вала, в зависимости от того, движется автомобиль по дороге с положительным или отрицательным уклоном, состоит из следующих величин:

- масса коленчатого вала в сборе — 72 кг;
 - масса маховика — 45 кг;
 - масса гасителя крутильных колебаний — 10 кг;
 - масса сцепления — 35 кг;
- общая масса: $G = 163$ кг; $T_{к1} = 160$ кгс;

Дополнительная составляющая осевого усилия на передний или задний осевые подшипники коленчатого вала $T_{м.в}$ возникает на муфте выключения сцепления при переключениях передач, выполнении остановки и трогании с места автомобиля. На муфте сцепления модели MFZ-430 это усилие составляет 600 Н или $T_{м.в} = 61$ кгс. Усилие от муфты выключения сцепления модели MFZ-430 направлено в сторону муфты сцепления.

При движении автомобиля по дороге с положительным уклоном осевое усилие $T_{м.в}$ по отношению к осевому усилию $T_{к1}$ будет со знаком (+), при движении по дороге с отрицательным уклоном — со знаком (–). При движении по дороге с «нулевым» уклоном, т. е. горизонтально, усилие $T_{к1}$ отсутствует, поэтому для определения несущей способности или нагрузки W предлагаемых осевых подшипников коленчатых валов достаточно выполнить расчет для режима движения автомобиля по дороге с положительным уклоном.

Двигатели КамАЗ 740.632-400 устанавливаются на коммерческие автомобили общего назначения, для которых конструкторской документацией предусмотрены граничные условия движения по дорогам с положительным и отрицательным максимальным уклоном 20° [4]. В то же время оси коленчатых валов двигателей производства ПАО КамАЗ относительно продольной оси автомобилей располагаются с углом атаки в 3° . С учетом этого при движении автомобиля по дороге с положительным уклоном угол между осью коленчатого вала и горизонтом составляет 23° . Тогда несущая способность или нагрузка на передний осевой подшипник коленчатого вала составляет:

$$W = T_{к1} \cdot \cos(90^\circ - 23^\circ) + T_{м.в} = 160,39 + 61 = 124 \text{ кгс} [5].$$

Таким образом выполненный расчет осевых усилий, возникающих в упорных подшипниках, показал:

- осевая нагрузка W на передний осевой подшипник коленчатого вала автомобиля КамАЗ с двигателем КамАЗ 740.632-400 при движении по дороге с положительным уклоном составляет

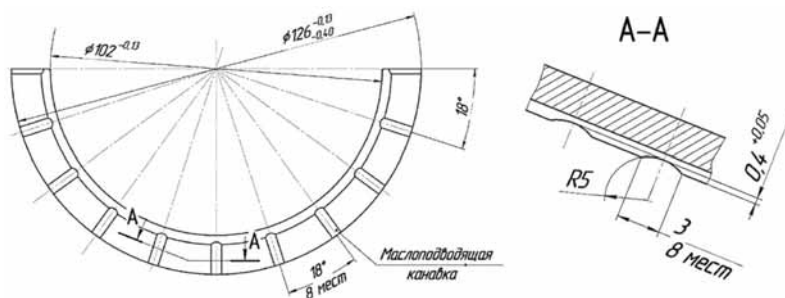


Рис. 6. Упорное полукольцо с маслоподводящими канавками с криволинейными профилями

124 кгс, что примерно в 7 раз меньше допускаемой осевой нагрузки, т. е. $[W]/W = 856/124 \approx 6,9$;

➤ результирующие силы на коренных опорах коленчатых валов от сил давления газов в цилиндрах двигателя p_r , от сил инерции поступательно движущихся частей кривошипно-шатунного механизма и поршней всех цилиндров двигателя p_{jn} [2] какие-либо воздействия и нагрузки на осевые подшипники коленчатого вала не оказывают.

Таким образом, причиной выхода из строя осевых подшипников коленчатых валов двигателей производства ПАО КамАЗ может быть только отсутствие организации их смазки и охлаждения.

Для проверки этого предположения были проведены стендовые испытания двигателя с установленными осевыми подшипниками предлагаемой конструкции.

В связи с тем что выполнение маслоподводящих канавок упорных полуколец осевых подшипников коленчатых валов представляет собой довольно трудоемкий технологический процесс, на заводе двигателей ПАО КамАЗ были изготовлены опытные полукольца осевых подшипников с маслоподводящими канавками с профилями, выполненными сверлением в специальном кондукторе. Опытные полукольца были изготовлены из заготовок серийных полуколец. Конструкция изготовленных по этой технологии маслоподводящих канавок приведена на рис. 6.

На опытных полукольцах каждого осевого подшипника коленчатых валов были выполнены маслоподводящие канавки и глубиной $0,4^{+0,05}$ мм, шириной канавок 3,0 мм; общее количество маслоподводящих канавок — 20 шт. с помощью специально изготовленного кондуктора, эскиз и фотография которого представлены на рис. 7.

Упорные полукольца предлагаемой конструкции были установлены на двигатель КамАЗ 740.632-400 мощностью $N_e = 400$ л. с. при $n_{ном} = 1900$ об/мин, на котором были проведены стендовые испытания на режимах, соответствующих приемо-сдаточным. После проведения моторных стендовых испытаний упорные по-

лукольца предлагаемой конструкции с маслоподводящими канавками были демонтированы с двигателя. Внешний осмотр показал отсутствие каких-либо видимых следов износа и перегрева (рис. 8), присущих серийным полукольцам после проведения аналогичных стендовых моторных испытаний (см. рис. 1).

Основываясь на результатах анализа причин отказов осевых подшипников коленчатого вала двигателей КамАЗ и с учетом результатов испытаний

модернизированных подшипников доработанной конструкции, можно сделать следующие выводы.

1. Причиной разрушения серийных полуколец осевых подшипников коленчатых валов двигателей производства ПАО КамАЗ является именно

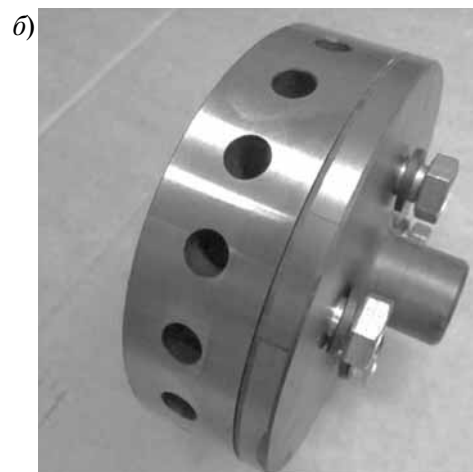
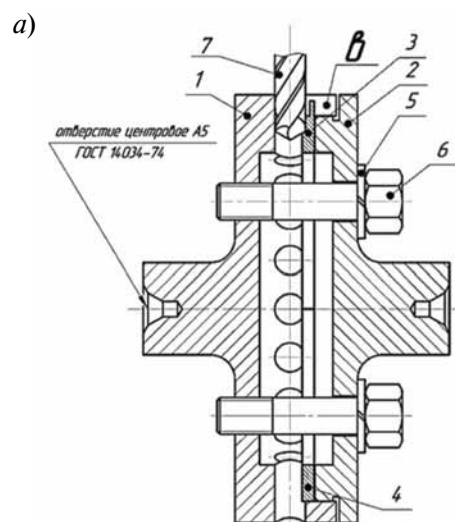


Рис. 7. Эскиз (а) и фотография (б) изготовленного кондуктора:

1 — корпус кондуктора; 2 — крышка кондуктора; 3 — нижнее полукольцо; 4 — верхнее полукольцо; 5 — шайба; 6 — болт М12х1,5–40; 7 — инструмент режущий — сверло Ø10 мм; в — паз в корпусе кондуктора под запирающий выступ нижнего полукольца

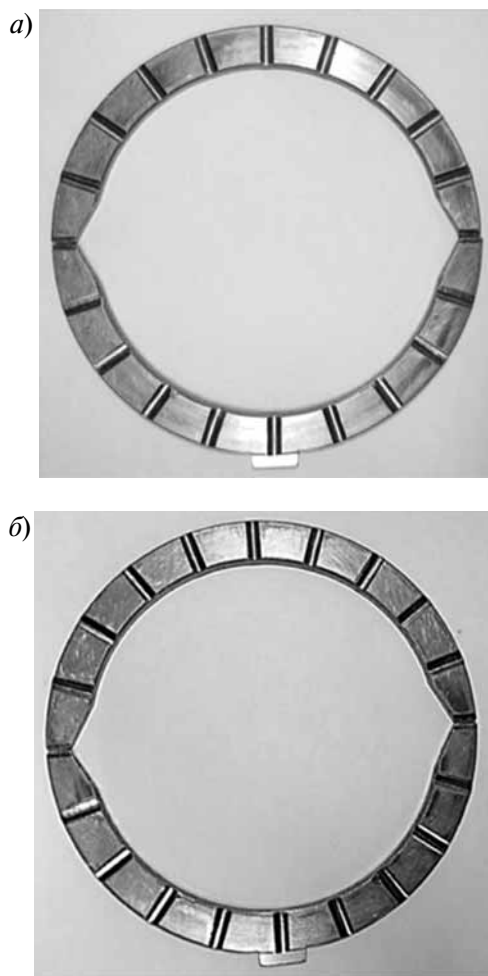


Рис. 8. Фотоснимки опытных верхних и нижних полуколец переднего (а) и заднего (б) осевых подшипников коленчатого вала после приемо-сдаточных моторных испытаний

сухое трение в осевых подшипниках вследствие отсутствия организации процессов смазки и охлаждения трущихся поверхностей полуколец, а не повышенные нагрузки на коленчатый вал при движении автомобиля под уклон.

2. Организация условий смазки осевых подшипников коленчатых валов, и, соответственно, их охлаждение, были обеспечены за счет модернизации конструкции полуколец, состоящей в изготовлении радиальных маслоподводящих канавок.

3. Выполненные опытные образцы упорных полуколец осевых подшипников предлагаемой конструкции в результате стендовых испытаний даже на более мощном двигателе показали удовлетворительные результаты, в отличие от упорных подшипников серийной конструкции.

Вместе с тем, для повышения достоверности результатов стендовых испытаний и обеспечения надежности осевых подшипников коленчатых валов всех моделей двигателей производства ПАО КамАЗ необходимо продолжение исследовательских работ по изложенной тематике с проведением ресурсных испытаний.

Литература

1. *Воскресенский В.А.* Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка): Справочник / В.А. Воскресенский, В.И. Дьяков. — М. : Машиностроение, 1980. — 224 с.
2. *Углов Б.А.* Авиационный двигатель АШ-62 ИР: учебное пособие / Б.А. Углов. — Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева. — 111 с.
3. *Денисов А.С.* Основы работоспособности технических систем: учебник / А.С. Денисов. — Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2014. — 312 с.
4. Двигатели газовые КамАЗ 820.60-260, 820.61-260, 820.62-300, 820-63-320. ТУ 37.104.311. — 2012.
5. *Савельев И.В.* Курс общей физики: Учебное пособие. Механика. Молекулярная физика. — 3-е изд., испр. — М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. Т. 1. — 432 с.
6. *Тупей Н.* Подшипники скольжения. Расчет, проектирование, смазка / Н. Тупей, Н. Константиnescу, О. Бице. — Изд-во академии Румынской Народной Республики, Бухарест, 1964. — 457 с.

ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ФОРСИРОВАННОГО ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ С КРИВОШИПНО-ШАТУННЫМ МЕХАНИЗМОМ С ПРИЦЕПНЫМ ШАТУНОМ

*И.О. Лысов, д.т.н., асп., В.Г. Камалтдинов, д.т.н., проф.
Южно-Уральский государственный университет*

Проведены расчетные исследования рабочего цикла форсированного дизеля 12ЧН15/16 с прицепным шатуном при форсировании до 883 кВт при 2100 об/мин. Определены расчетные значения максимального давления газов и индикаторных показателей рабочего цикла в главных и боковых цилиндрах. Показано, что при данном уровне форсирования максимальное давление газов в боковом цилиндре больше на 3,6 % по сравнению с главным, а индикаторные показатели цикла улучшаются. Установлено, что основными причинами различий максимального давления газов и индикаторных показателей рабочего цикла в главных цилиндрах и цилиндрах с прицепным шатуном являются различие в рабочем объеме, запаздывании на 1 град ПКВ прихода поршня в ВМТ и опережении прихода поршня в НМТ на 4 град ПКВ в цилиндре с прицепным шатуном. Для равномерного нагружения всех цилиндров необходимо выполнить корректировки механизма газораспределения и опережения подачи топлива в цилиндрах с прицепным шатуном по сравнению с главными цилиндрами.

Введение

В конструкции многих транспортных V-образных поршневых двигателях внутреннего сгорания, различного назначения (судовые и локомотивные дизели, авиационные двигатели и др.) применяется кривошипно-шатунный механизм (КШМ) с прицепным шатуном. Данный тип механизма имеет некоторые преимущества по сравнению с прочими типами КШМ (уменьшение длины коленчатого вала и всего двигателя, возможность создания звездообразных компоновочных схем и т. д.). Известно, что ход поршня с прицепным шатуном в боковом цилиндре несколько больше, чем в главном, что приводит к некоторому увеличению рабочего объема по сравнению с главным цилиндром. Одновременно изменяется закон перемещения поршня в боковом цилиндре. При форсировании таких дизелей дополнительно приходится решать задачу обес-

печения равномерного нагружения главных и боковых цилиндров, в частности, силами давления газов. В связи с этим возникают практические вопросы: насколько отличаются максимальные давления газов и индикаторные показатели цикла в боковом цилиндре относительно главного при форсировании дизеля? И за счет чего можно уменьшить неравномерность нагружения?

Расчетные исследования и обработка результатов

Цель данного исследования — разработать рекомендации по изменению регулировок механизма газораспределения и цикловой подачи топлива в боковых цилиндрах при форсировании транспортного дизеля 12ЧН15/16 для снижения динамической нагрузки на детали КШМ с прицепным шатуном.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Разработать алгоритм расчета закона перемещения поршня с прицепным шатуном для моделирования параметров рабочего цикла форсированного дизеля в инженерной программе для ЭВМ.
2. Определить расчетные значения максимального давления газов и индикаторных показателей рабочего цикла в главных цилиндрах и цилиндрах с прицепным шатуном при форсировании дизеля до 883 кВт при 2100 об/мин.
3. Определить причины различий максимального давления газов и индикаторных показателей рабочего цикла в главных цилиндрах и цилиндрах с прицепным шатуном и способы их нивелирования.

Известно, что закон движения поршня с прицепным шатуном в боковом цилиндре существенно отличается от такового для поршня и шатуна главного цилиндра. Кинематика перемещения поршня в боковом цилиндре на практике вычисляется с помощью аналитических зависимостей, разработанных советскими авторами (И.Ш. Нейман, И.А. Биргер, И.И. Холмаков, А.И. Володин и др.) [1–7] или средств CAD/CAE-технологий специализированных программных продуктов для исследования динамики механических систем [8–14]. Сравнительная оцен-

ка различных способов расчета для анализа кинематики КШМ с прицепными шатунами приведена в работе [15]. На основе анализа этих данных для проведения расчетного исследования была выбрана методика расчета перемещения поршня в боковом цилиндре [3]. В этой методике перемещение поршня относительно верхней мертвой точки (ВМТ) определяется с точностью до гармоник второго порядка из выражения

$$S_{np} = S_{0l} - R[E \cos(\varphi_l + \Phi) + 0,25F \cos(2\varphi_l - \theta)] \quad (1)$$

где φ_l — угол поворота кривошипа от оси бокового цилиндра; R — радиус кривошипа; S_{0l} , E , Φ , F , θ — коэффициенты, зависящие от геометрических размеров механизма.

Вспомогательные углы Φ и θ и коэффициенты E и F определяются по следующим приближенным выражениям:

$$\Phi = \arctg \frac{(r/l) \sin \psi - (1 + r/l)(r/L) \sin \psi \cos \gamma}{1 + (1 + r/l)(r/L) \sin \psi \sin \gamma}, \quad (2)$$

$$\theta = \arctg \frac{[\lambda r/(2l)] \sin \gamma - (1 + r/l)[\lambda r/(4L)] \sin 2\gamma}{R/4l - [\lambda r/(2l)] \cos \gamma + (1 + r/l)[\lambda r/(4L)] \cos 2\gamma}, \quad (3)$$

$$E = \frac{1 + (1 + r/l)(r/L) \sin \psi \sin \gamma}{\cos \Phi}, \quad (4)$$

$$F = \frac{4[R/4l - (\lambda r)/(2l) \cos \gamma + (1 + r/l)[\lambda r/(4L)] \cos 2\gamma]}{\cos \theta}, \quad (5)$$

где r — расстояние от оси пальца прицепного шатуна до центра головки главного шатуна; l — длина прицепного шатуна; L — длина главного шатуна; λ — отношение радиуса кривошипа к длине шатуна; γ — угол между осями цилиндров; ψ — разность между углами φ_l и φ ; φ_l — угол между осью главного шатуна и радиусом r .

Значение S_{0l} определяется из условия, что при некотором значении угла φ_{l0} поршень находится в ВМТ, т. е. значение перемещения равно нулю.

Тогда

$$S_{0l} = R[E \cos(\varphi_{l0} + \Phi) + 0,25F \cos(2\varphi_{l0} - \theta)] \quad (6)$$

где угол φ_{l0} определяется из приближенного уравнения

$$\operatorname{tg} 2\varphi_{l0} = \frac{F \sin \theta - E \sin 2\Phi}{F \cos \theta + E \cos 2\Phi}. \quad (7)$$

Алгоритм расчета закона перемещения поршня с прицепным шатуном был внедрен в основной алгоритм инженерной программы для ЭВМ «Программа расчета рабочего цикла дизеля «Double-Wiebe function», разработанную на кафедре двигателя внутреннего сгорания и электронные системы автомобилей ЮУрГУ (НИУ), и на которую получено свидетельство о государственной регистрации [16]. Программа позволяет рассчитывать рабочий цикл форсированного транспортного ди-

зеля с двумя законами сгорания топлива по Вибе И.И. [17] и давление и температуру рабочего тела в цилиндре по известной методике [18]. С ее использованием выполнены расчетные исследования рабочего цикла для главного и бокового цилиндров транспортного дизеля 12ЧН15/16, форсированного до 883 кВт при 2100 об/мин. При этом на первом этапе все исходные данные, кроме геометрической степени сжатия и параметров КШМ с прицепным шатуном, принимались одинаковыми для обоих типов цилиндров. Величина геометрической степени сжатия в боковом цилиндре определена из условия равенства объемов камеры сгорания в главном и боковом цилиндрах.

В результате получены законы перемещения поршня, изменения давления и температуры рабочего тела и индикаторной работы газов в обоих цилиндрах в диапазоне от 180 до 540 градусов поворота коленчатого вала (град ПКВ).

Сравнение графиков перемещения поршней в цилиндрах и с главным прицепным шатуном (рис. 1, 2) показывает, что поршень в боковом цилиндре достигает ВМТ в 361 град ПКВ, то есть запаздывает на 1 град ПКВ по сравнению с поршнем в главном цилиндре. В нижнюю мертвую точку (НМТ) этот поршень приходит в 535 град ПКВ, то есть опережает на 4 град ПКВ поршень в главном цилиндре.

Таким образом, поршень в цилиндре с прицепным шатуном сначала в такте сжатия отстает от поршня в главном цилиндре, а затем в такте расширения его опережает. На рис. 3 показано, что максимальная скорость поршня с прицепным шатуном в такте сжатия составляет 17,5 м/с, а в такте расширения — 19,4 м/с. При этом максимальная скорость поршня в главном цилиндре во всех тактах одинакова и равна 17,7 м/с.

Ход поршня с прицепным шатуном на 6,7 мм больше хода поршня в главном цилиндре, и, со-

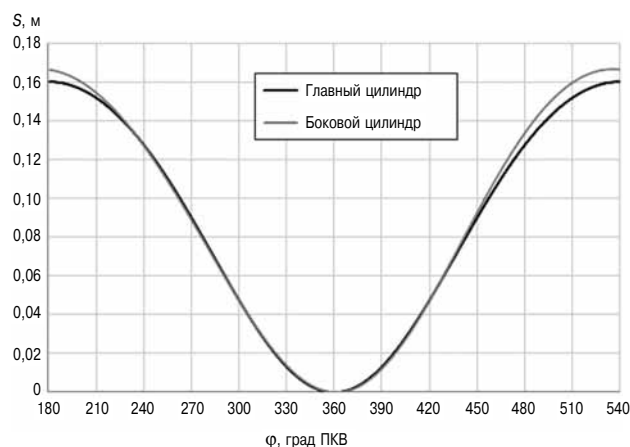


Рис. 1. Перемещение поршней в главном и боковом цилиндрах дизеля 12ЧН15/16

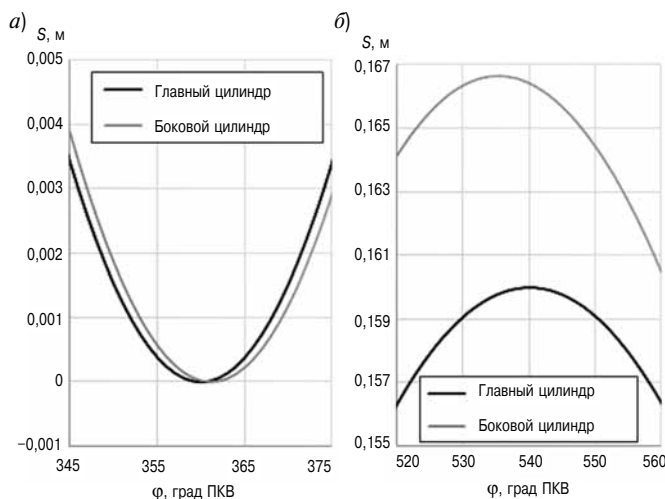


Рис. 2. Перемещение поршней в главном и боковом цилиндрах в области верхней (а) и нижней (б) мертвых точек

ответственно, рабочий объем в боковом цилиндре также больше (на 0,124 л).

Сравнение графиков изменения давления и температуры газов в главном и боковом цилиндрах (рис. 4 и 5) показывает, что в такте сжатия давление и температура газов практически совпадают. Однако максимальное давление в боковом цилиндре достигает величины в 15,49 МПа, а в главном — $p_{\max} = 14,95$ МПа. Превышение составляет 0,54 МПа или 3,6 %.

При этом максимальные температуры отличаются незначительно (всего на 6 К). А температура газов в конце расширения в боковом цилиндре ниже на 20 К по сравнению с главным цилиндром.

Повышенное давление газов в цилиндрах с прицепным шатуном увеличивает механическую нагрузку на детали цилиндропоршневой группы и КШМ по сравнению с главным цилиндром, что может сказаться на их надежности.

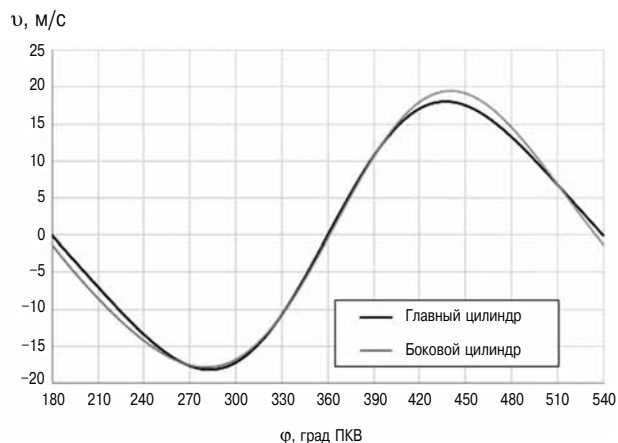


Рис. 3. Скорость поршня в главном и боковом цилиндрах

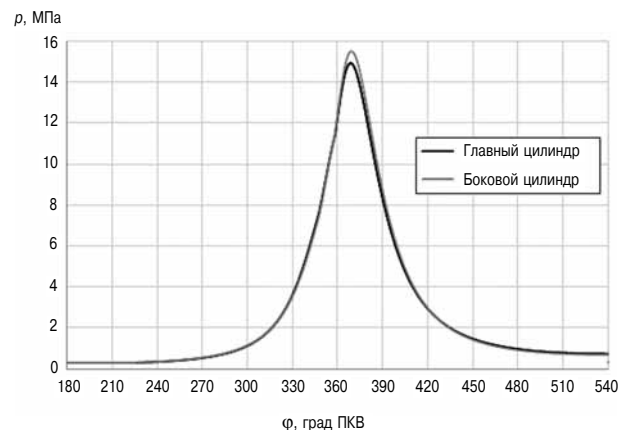


Рис. 4. Диаграмма изменения давления газов в главном и боковом цилиндрах

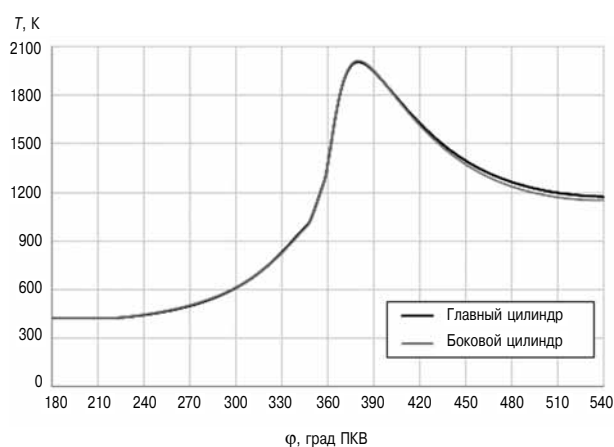


Рис. 5. Диаграмма изменения температуры газов в главном и боковом цилиндрах

Большее наполнение свежим зарядом и увеличенный рабочий объем цилиндров с прицепным шатуном совместно с повышенным давлением газов приводит к увеличению индикаторной работы газов (рис. 6) L_i до 4976 Дж по сравнению с 4909 Дж для главных цилиндров. Превышение составляет 67 Дж или 1,36 %. Среднее индикаторное давление p_i и индикаторная мощность N_i этих цилиндров составляют 1,76 МПа и 87,09 кВт соответственно, что также превышает на 1,36 % аналогичные показатели главных цилиндров. Удельный индикаторный расход топлива g_i соответственно уменьшился до 165,7 г/кВт·ч по сравнению с 167,9 г/кВт·ч для главных цилиндров.

На втором этапе расчетных исследований определялись способы нивелирования различий максимального давления газов и индикаторных показателей рабочего цикла в цилиндрах с прицепным шатуном и главных цилиндров.

Принимая во внимание запаздывание прихода в ВМТ поршня с прицепным шатуном, произведена корректировка угла начала сгорания топлива в этом цилиндре на 1 град ПКВ позже по

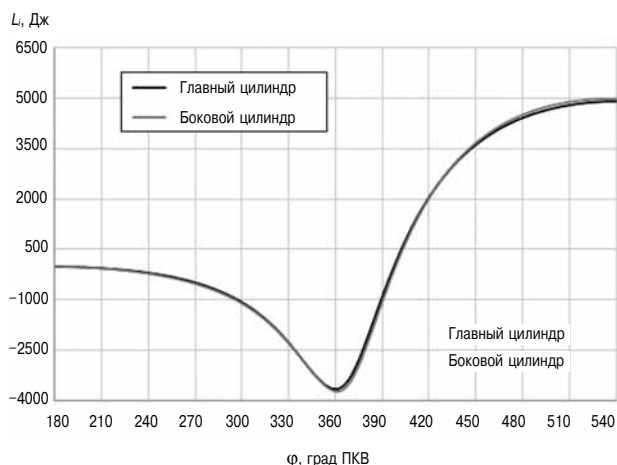


Рис. 6. Диаграмма изменения индикаторной работы газов в главном и боковом цилиндрах в тактах сжатия и расширения

сравнению с главным цилиндром при сохранении закона выгорания. Одновременно запаздывание угла закрытия впускных клапанов также было увеличено на 1 град ПКВ

В результате получили максимальное давление газов $p_{\max}$ в боковом цилиндре 15,07 МПа, то есть всего на 0,12 МПа (на 0,8 %) больше давления в главном цилиндре, составляющем 14,95 МПа (рис. 7). Среднее индикаторное давление и индикаторная мощность также уменьшились до 1,756 МПа и 86,87 кВт соответственно. Однако их превышение по сравнению с показателями главного цилиндра составило около 1,1 %.

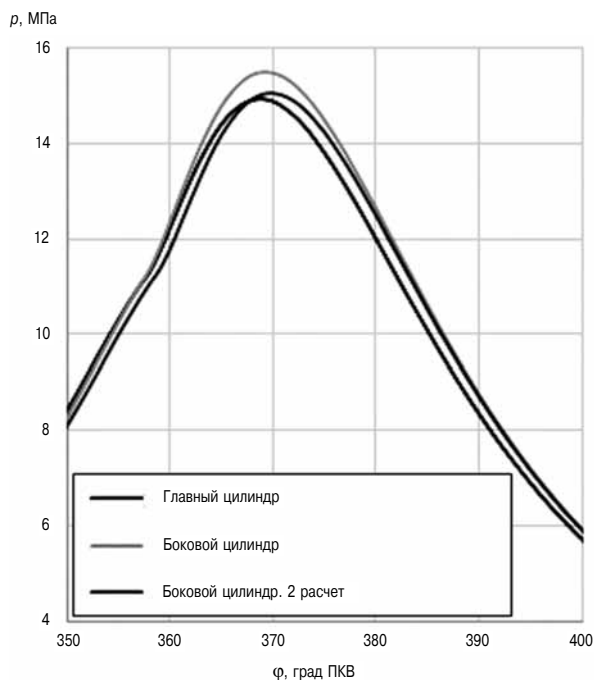


Рис. 7. Фрагмент диаграммы изменения давления газов вблизи ВМТ в главном и боковом цилиндрах в первом и во втором расчетах

Дальнейшее снижение среднего индикаторного давления и индикаторной мощности до уровня показателей главного цилиндра (1,736 МПа и 5,92 кВт соответственно) можно получить уменьшением цикловой подачи на 1,2 %. Максимальное давление газов при этом составит 15,0 МПа, что всего на 0,05 МПа (на 0,3 %) больше давления в главном цилиндре.

Заключение

На основании полученных результатов расчета можно сделать следующие выводы.

1. Разработанный алгоритм расчета закона перемещения поршня с прицепным шатуном в инженерной программе для ЭВМ позволил выполнить расчетные исследования рабочего цикла форсированного дизеля с учетом изменения объема сжатия-расширения и определить отличия в регулировках механизма газораспределения и подачи топлива для равномерного нагружения всех цилиндров.

2. Определены расчетные значения максимального давления газов и индикаторных показателей рабочего цикла в главных цилиндрах и цилиндрах с прицепным шатуном при форсировании до 883 кВт при 2100 об/мин. В главных цилиндрах $p_{\max} = 14,95$ МПа, $L_i = 4909$ Дж, $p_i = 1,736$ МПа и $N_i = 85,92$ кВт, $g_i = 167,95$ г/кВт·ч. В цилиндрах с прицепным шатуном при тех же регулировках $p_{\max} = 15,5$ МПа, $L_i = 4976$ Дж, $p_i = 1,76$ МПа и $N_i = 87,09$ кВт, $g_i = 165,7$ г/кВт·ч. То есть максимальное давление газов в боковом цилиндре больше на 3,6 %, а индикаторные показатели цикла улучшаются на 1,36 %.

3. Различия максимального давления газов и индикаторных показателей рабочего цикла в главных цилиндрах и цилиндрах с прицепным шатуном вызваны разницей в рабочих объемах цилиндров (на 0,124 л) и в наполнении свежим зарядом вследствие большего перемещения поршня (на 6,7 мм), запаздывания на 1 град ПКВ прихода поршня в ВМТ, большей степени расширения газов из-за повышенной скорости перемещения поршня на такте расширения и опережения прихода поршня в НМТ на 4 град ПКВ

4. Для снижения динамической нагрузки деталей КШМ с прицепным шатуном при форсировании транспортного дизеля 12ЧН15/16 до 883 кВт при 2100 об/мин необходимы следующие корректировки механизма газораспределения и подачи топлива в цилиндрах с прицепным шатуном по сравнению с главными цилиндрами:

- увеличить на 1 град ПКВ запаздывание закрытия впускных клапанов;
- уменьшить на 1 град ПКВ угол начала подачи топлива;
- уменьшить цикловую подачу топлива на 1,2 %.

Литература

1. *Нейман И.Ш.* Динамика и расчет на прочность авиационных моторов: Справочник / И.Ш. Нейман. — М.; Л. : ОНТИ НКТП СССР — Государственное авиационное и автотракторное издательство, 1933. — 208 с.
2. *Биргер И.А.* Авиационные поршневые двигатели / И.А. Биргер, Н.И. Дружинин и др. — М. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1950. — 870 с.
3. *Володин А.И.* Локомотивные двигатели внутреннего сгорания / А.И. Володин. — М. : Транспорт, 1990. — 256 с.
4. *Холмаков И.И.* Динамика авиационных двигателей / И.И. Холмаков. — М.; Л. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1938. — 147 с.
5. *Львов Е.Д.* Динамика поршневых двигателей / Е.Д. Львов. — М.; Л. : ОНТИ: Главная редакция автотракторной литературы, 1936. — 274 с.
6. *Истомин П.А.* Динамика судовых двигателей внутреннего сгорания / П.А. Истомин — Л. : Судостроение, 1964. — 288 с.
7. *Бортников М.Т.* Авиационные двигатели: сб. справ. материалов / М.Т. Бортников и др.; под ред. М.А. Левина, Г.В. Сеничкина — М. : Машгиз, 1951. — 244 с.
8. The Multibody Dynamics software ADAMS — <http://www.mscsoftware.com/product/adams> (дата обращения 14 июня 2017).
9. AVL EXCITE Power Unit software — <https://www.avl.com/web/guest/-/avl-excite-power-unit> (дата обращения 15 июня 2017).
10. Система NX компании Siemens PLM Software — <http://www.plm.automation.siemens.com/ru/products/nx/about-nx-software.shtml> (дата обращения 17 июня 2017).
11. Программный комплекс Universal Mechanism (UM) для моделирования динамики механических систем — <http://www.umlub.ru> (дата обращения 17 июня 2017).
12. Программный комплекс ФРУНД для моделирования динамики систем твердых и упругих тел — <http://frund.vstu.ru/> (дата обращения 18 июня 2017).
13. Autodesk Inventor — <https://www.autodesk.ru/products/inventor/overview> (дата обращения 18 июня 2017).
14. Alaska / Simulation Engine for the modelling of mechanical systems and the simulation of the dynamic behaviour of the modelled systems — https://www.tu-chemnitz.de/ifm/produkte-html_e/alaskaSimulationEngine.html (дата обращения 18 июня 2017).
15. *Жуков В.А.* Анализ алгоритмов расчета кинематики кривошипно-шатунных механизмов с прицепными шатунами / В.А. Жуков, А.И. Яманин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 107–117.
16. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ "Программа расчета рабочего цикла дизеля "Double-Wiebe function" / В.Г. Камалтдинов, И.О. Лысов; заявитель и правообладатель Юж.-Урал. гос. ун-т. — № 2017610304; заявл. 02.11.2016; опубл. 10.01.2017.
17. Diesel Engine Operating Cycle Optimization with Simulation of Combustion Process by Double-Wiebe Function / V.G. Kamaltdinov, I.O. Lysov, S.S. Nikiforov // Procedia Engineering. — 2015. — Vol. 129. — P. 873–878.
18. *Камалтдинов В.Г.* Уточненная методика расчета параметров рабочего тела на пусковых режимах дизеля / В.Г. Камалтдинов // Двигателестроение. — 2008 — № 2. — С. 31–34.

РАЗВИТИЕ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК, РАБОТАЮЩИХ ПО СПЕЦИАЛЬНЫМ ЦИКЛАМ

В.Г. Кривов, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ
В.С. Корчинский, к.т.н., доцент
ВИ(ИТ) ВА МТО имени А.В. Хрулева

Выполнен обзор результатов комплекса НИР по созданию дизельных энергетических установок (ДЭУ), работающих по специальным циклам (СЦ) без связи с атмосферой. Приведены результаты исследований, выполненных на действующих макетах ДЭУ СЦ мощностью до 100 кВт. Обзор материалов выполненных НИР публикуется в качестве научного наследия д.т.н. проф. В.Г. Кривова, руководившего развитием этих работ на кафедре ДЭУ Военного инженерно-технического университета (ВИТУ).

В настоящее время в системах автономного энергоснабжения (САЭ) специальных объектов преимущественно используются дизельные энергетические установки (ДЭУ), так как имеют достаточно высокий коэффициент полезного действия, относительно небольшой расход воды на охлаждение, способны быстро запускаться и принимать нагрузку, безопасны в эксплуатации, хорошо адаптированы к кратковременной перегрузке при воздействии некоторых показателей аномального состояния приземного слоя атмосферы. Вместе с тем функционирование ДЭУ специальных объектов требует непрерывной связи с атмосферой через газозадушные тракты (ГВТ).

Поиск способов и средств, обеспечивающих работу ДЭУ без связи с атмосферой по так называемым специальным циклам (СЦ), до сих пор является актуальной проблемой в случае возможности их эксплуатации на подводных аппаратах, предназначенных для исследования и освоения прибрежного шельфа, а также в условиях аномального состояния атмосферы, например в районах крупных пожаров и техногенных аварий. Кроме прочего, ДЭУ СЦ могут найти применение в условиях метрополитена, глубоких карьеров, тоннелях горных и подземных выработок и т. д.

Следует отметить также и то, что уменьшенный выброс отработавших газов (ОГ) в атмосферу ДЭУ СЦ в сравнении с работой дизеля по обычному (открытому) циклу в какой-то мере позволил бы решить и экологические проблемы, которые

особенно актуальны для районов сосредоточения автономной дизельной энергетики.

Специальными циклами в контексте области применения ДЭУ называются циклы, обеспечивающие работу дизеля на искусственных газовых смесях при полной или частичной изоляции ГВТ от атмосферы. Различают замкнутый, квази-замкнутый и полужамкнутый специальные циклы.

Перевод ДЭУ в режим функционирования по СЦ характеризуется тем, что для сжигания топлива и в качестве рабочего тела в цилиндр дизеля подается искусственная газовая смесь (ИГС), которая по своему составу, физическим и термодинамическим свойствам принципиально отличается от атмосферного воздуха и оказывает существенное влияние на протекание процессов воспламенения и горения топлива, а следовательно, на мощностные и экономические показатели дизеля. Состав ИГС по существу определяет выбор схемных решений ДЭУ СЦ и является важнейшим критерием безопасной эксплуатации энергоустановки (ЭУ). Анализ работы ДЭУ СЦ показал, что уровень их рабочих параметров в основном определяется совершенствованием оборудования системы подготовки ИГС, алгоритмов управления и регулирования на основе микропроцессоров. Создание экспериментальных ДЭУ СЦ, исследование их технических характеристик проведением прямых и косвенных измерений всегда было приоритетным направлением научно-технической политики кафедры ДЭУ ВИТУ, сегодня это кафедра двигателей и тепловых установок ВИ(ИТ) ВА МТО.

Исторически необходимость функционирования ЭУ без связи с атмосферой возникла при появлении первых подводных лодок (ПЛ). При этом на всем протяжении развития подводного кораблестроения остро стояла задача создания так называемого «единого» двигателя, способного обеспечить движение лодки как в надводном, так и в подводном положении. Первоначально в подводных аппаратах применялись пневматические двигатели и паросиловые турбины. Однако очевидные преимущества двигателей внутреннего сгорания (ДВС) перед паросиловыми установками (более простая конструкция, меньшая масса и

более высокий КПД) на долгие годы определили их использование в энергетических установках ПЛ. При этом необходимо было решить проблему функционирования ДВС в подводном положении, а именно: обеспечить ДВС воздухом (кислородом) для сгорания топлива; удалить продукты сгорания — отработавшие газы (ОГ).

Многочисленные исследования в этом направлении проводились как зарубежными специалистами, так и отечественными учеными, инженерами и конструкторами. Так в 1946–1956 гг. в лаборатории двигателей АН СССР разрабатывалась реальная дизельная энергоустановка для подводных лодок, использующая в качестве окислителя высококонцентрированную перекись водорода (продукт ВПВ). Практически удалось создать стендовую установку с двигателем, работавшим по следующей схеме: ВПВ из эластичной емкости подавалась в реактор, где осуществлялось ее каталитическое разложение при давлении 2–3 МПа. Из реактора парокислородная смесь при температуре 500 °С поступала во впускной коллектор дизеля, в цилиндрах которого происходило расширение смеси и совершение полезной работы. Затем следовал такт сжатия, подача топлива, его самовоспламенение, расширение и выпуск. Отработавшие газы поступали в газоохладитель, конденсат откачивался, а газовая фаза удалялась компрессором за борт.

После длительных научных поисков в ЭУ для обеспечения работы дизеля по замкнутому циклу в качестве окислителя топлива и поглотителя углекислого газа было предложено применять продукт Б-2 на основе технической надперекиси натрия, разработанный в лаборатории перекисных соединений АН СССР под руководством И.А. Казарновского. Особенностью продукта Б-2 является то, что результатом реакции надперекиси натрия с водой является кислород и щелочь, причем количество последней было достаточно для поглощения всего углекислого газа, образующегося при сгорании расчетного количества органического топлива. В июле 1959 г. была спущена на воду подводная лодка М-261 с ЭУ на основе продукта Б-2, однако в 1960 году заводские испытания были остановлены.

Использование ДЭУ СЦ для систем автономного энергоснабжения специальных объектов в условиях аномального состояния атмосферы было предложено ЗДНиТ д.т.н. профессором В. Г. Кривовым и по его инициативе на кафедре ДЭУ ВИТУ началось развитие этого научного направления [1].

На первом этапе исследований (1965–1979) было выполнено обоснование использования ДЭУ для систем автономного энергоснабжения,

разработаны принципиальные схемные решения, в которых в качестве источника кислорода использовался технический надпероксид натрия, созданы оригинальные экспериментальные ДЭУ полузамкнутого цикла различной мощности.

Второй этап исследований ДЭУ СЦ для систем автономного энергоснабжения (1980–1993) был направлен на реализацию комплексных НИР, выполненных по заданию Правительства СССР в целях разработки технологии гидролизного способа генерации кислорода из Б-2. В последующем такой способ работы ДЭУ СЦ получил название «мокрый» цикл.

Наиболее важные результаты этого периода исследований:

- создание в 1983 г. на экспериментальной базе ВИТУ двух действующих макетных образцов ДЭУ СЦ мощностью 50 кВт с ручным и с автоматическим управлением [1];

- широкомасштабные экспериментально-теоретические исследования по оценке работоспособности ДЭУ СЦ мощностью 50 кВт на базе дизеля 6Ч12/14;

- создание и проверка работоспособности действующего макетного образца ДЭУ СЦ мощностью 500 кВт на базе дизеля 12ЧН18/20;

- проведение экспериментально-теоретических исследований ДЭУ СЦ по заказам ЦКБМТ «Рубин», ЦКБ ТМ, ТамбовНИХИ, АРТЭС и др.

По результатам выполненных исследований получено более 100 патентов на изобретения, подготовлены и защищены 10 кандидатских и одна докторская диссертации, разработаны и утверждены ТТЗ на ОКР по созданию ДЭУ СЦ различной мощности предприятиями промышленности.

Полученные в ВИТУ результаты положили начало последующему развитию исследований по поиску новых источников кислорода для ДЭУ ЗЦ, а также схемных решений на его базе. Так в 1988 г. РНЦ «Прикладная химия» (Санкт-Петербург) был разработан приемлемый альтернативный источник кислорода для реализации специальных циклов дизелей — хлорат натрия (NaClO_3), который, в отличие от Б-2 (при прочих равных условиях), не реагирует с водой, устойчив при температурах до 300 °С, не образует опасных продуктов при разложении, в несколько раз менее экзотермичен при выделении кислорода, более дешев и технологичен. Выделение кислорода из такого источника происходит под действием локальной высокой температуры. Данный способ генерации кислорода получил название термолитного.

В период 1990–1992 гг. ассоциацией АРТЭС под руководством д.т.н., профессора А.В. Орлова был выполнен с привлечением ВИТУ, ВВИМУ, ОАО «Звезда», РНЦ «Прикладная химия»,

ТамбовНИИХИ и других организаций обширный цикл комплексных НИР, обосновывающий оптимальные решения по ДЭУ СЦ с термолитным способом генерации кислорода, получившим в последующем название «сухой» специальный цикл.

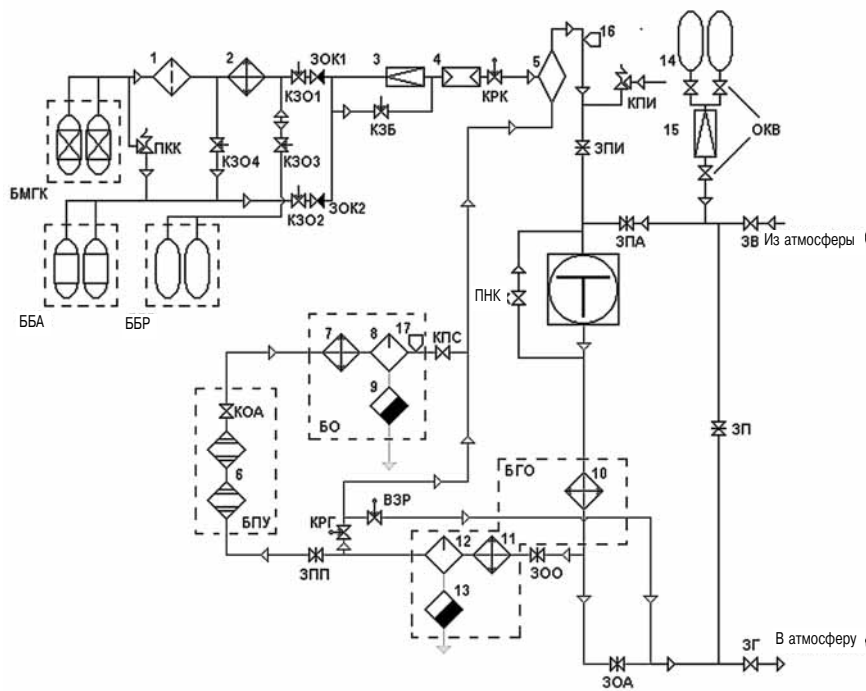
В 1995 г. на экспериментальном стенде кафедры ДЭУ ВИТУ был смонтирован макетный образец анаэробной дизельной энергоустановки мощностью 10 кВт с гидролизной системой генерации кислорода (рис. 1). Испытания макетного образца показали его работоспособность и перспективность дальнейших исследований [1, 2].

автономного энергоснабжения позволил выделить две перспективные принципиальные схемы организации работы ДЭУ по специальным циклам:

1. Схема с применением твердого кислородсодержащего вещества на основе хлоратов натрия, термолитическим способом генерации кислорода и последующим поглощением двуокси углерода, неконтактным охлаждением отработавших газов (так называемый «сухой» цикл).

2. Схема с применением твердого кислородсодержащего вещества на основе технического надпероксида натрия, гидролизным способом генерации кислорода и последующим поглощением двуокиси углерода в растворе щелочи и контактным охлаждением ОГ (так называемый «мокрый» цикл).

При организации работы ДЭУ по «сухому» циклу используются твердые кислородоносители на основе хлората натрия (NaClO_3), а в системе



БМГК — блок модулей генераторов кислорода; БАА — блок баллонов аварийного сброса кислорода; ББР — блок баллонов ресиверной системы; БГО — блок охлаждения и осушки ОГ; БПУ — блок поглощения углекислоты; БО — блок осушки газов; ВЗР — вентиль запорно-регулирующий; ВЗК — вентиль запорный кислородный; ЗВ — задвижка воздухозабора из атмосферы; ЗГ — задвижка газовыпускного тракта в атмосферу; ЗП — задвижка перепускная ГВТ; ЗПА — задвижка подачи воздуха в ДГ СЦ из атмосферы; ЗПИ — задвижка подачи ИГС в ДГ СЦ из СПИГС; ЗОА — задвижка отвода ОГ в атмосферу; ЗОО — задвижка отвода ОГ в охладитель-конденсатор; ЗПП — задвижка подачи ОГ в СПУ; ЗОК — затвор обратный кислородный; КЗБ — клапан запорный байпасирования редуктора; КОА — клапан подачи из адсорберов; КРК — клапан рециркуляции ОГ в режиме РПЗ и РКЗ, а также байпасирования в режиме РЗ; КПА — клапан подачи ОГ в адсорбер; КПС — клапан подачи очищенных охлажденных газов в смеситель; КЗО — клапан запорный отсечной; КПИ — клапан предохранительный разрежения ИГС на впуске в дизель; КРК — клапан регулирующий кислородный; ОКВ — клапан отсечной баллонов ВВД; ПНК — перепускной невозвратный клапан; ПКК — предохранительный клапан кислородный

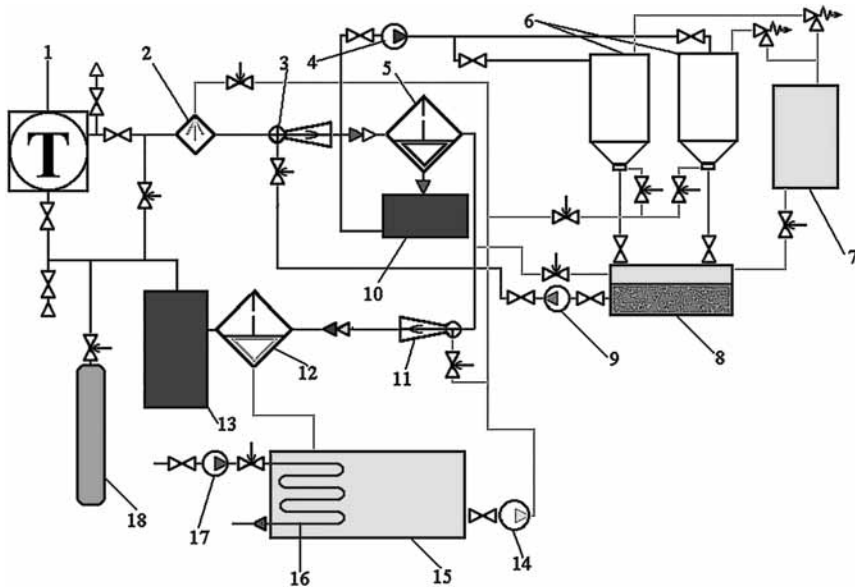


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема анаэробной энергоустановки мощностью 100 кВт:

1 — дизель 4ЧН15/15; 2 — форсуночная камера; 3 — прямоточный распыливающий абсорбер; 4 — насос перекачки отработанного раствора; 5, 12 — фазовые разделители; 6 — бункер-реакторы; 7 — ресивер кислорода; 8 — ресивер кислорода и щелочного раствора; 9 — насос подачи щелочного раствора; 10 — емкость для сбора отработанного раствора; 11 — охладитель-промыватель ИГС; 13 — ресивер ИГС; 14 — насос подачи технологической воды; 15 — емкость запаса воды; 16 — охладитель технологической воды; 17 — насос заборной воды; 18 — баллон запаса инертного наполнителя

поглощения двуоксида углерода — химические поглотители на основе $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

На рис. 2 представлена принципиальная технологическая схема ДЭУ СЦ, работающая по «сухому» циклу

Схема организации работы ДЭУ СЦ с гидролизным способом генерации кислорода и щелочным поглощением диоксида углерода для САЭ была впервые апробирована на ДЭУ мощностью 50 и 500 кВт сначала в ВИТУ, а затем в ТамбовНИИХИ.

С этой целью в ВИТУ были проведены исследования, позволившие улучшить технико-экономические показатели работы энергоустановки. Разработан иной подход к системе генерации газообразного кислорода и жидкого поглотителя (раствора щелочи), позволивший создать и исследовать различные варианты бункеров-реакторов получения кислорода и щелочи [1, 2].

В 1992 г. в ВИТУ было впервые предложено проводить генерацию кислорода с верхней дозированной подачей воды, разработано несколько аппаратов, работающих по этому принципу. В ходе выполнения комплексной НИР (1995–1997) спроектирован и прошел всесторонние исследования с получением динамических характеристик бункер-реактор с верхним подводом воды конструкции к.т.н., доцентов А.Ф. Мусатова и В.С. Корчинского, сформулированы тактико-техни-

ческие требования на его изготовление для ДЭУ СЦ мощностью 30, 60 и 100 кВт [1, 2].

Разработанные в ВИТУ бункеры-реакторы позволили усовершенствовать технологические системы поглощения углекислоты и подготовки ИГС, новизна которых состояла в том, что в поток ускоренных горячих ОГ вводится раствор абсорбента и газообразного кислорода.

При этом осуществляется поглощение диоксида углерода и других продуктов сгорания углеводородного топлива, обогащение смеси кислородом, а также выпаривание воды из раствора в количестве, достаточном для разложения продукта Б-2. Образовавшийся поток подвергается разделению на газовый, в виде ИГС (с последующей промывкой, охлаждением и подачей в дизель) и жидкостной в виде концентрированного раствора соды

Na_2CO_3 с продуктами неполного сгорания топлива, которые в дальнейшем удаляются в бункер-накопитель. При этом объем, занимаемый раствором соды, практически не превышает объема израсходованного продукта Б-2, что позволяет использовать бункер-накопитель в качестве промежуточного. По мере освобождения бункера-реактора раствор соды перекачивается в него насосом. В качестве основного оборудования в таких системах подготовки ИГС используются центробежные нейтрализаторы (ЦН) и скрубберы Вентури в сочетании с фазовыми разделителями циклонного типа [1, 2].

Канд. техн. наук доцент Балашов С.В. и канд. техн. наук Терехин А.Н. разработали и исследовали на экспериментальной ДЭУ СЦ мощностью 10 кВт скоростные нейтрализатор и охладитель на основе скруббера Вентури. Результаты показали, что использование аппаратов данной конструкции позволяет существенно улучшить технико-экономические и массогабаритные показатели ДЭУ СЦ [1, 2].

Выполненные исследования показали, что дальнейшее повышение эффективности ДЭУ за счет применения единого кислородосодержащего продукта NaO_2 невозможен при отдельной обработке отработавших газов (ОГ). Эта проблема была решена д-ром техн. наук, профессором И.О. Прутчиковым, разработавшим принци-

ально новый аппарат, обеспечивающий надежное и эффективное проведение процесса единой обработки ОГ при их непосредственном взаимодействии с блоком кассет NaO_2 .

Технологическая схема одного из перспективных вариантов ДЭУ СЦ с гидролизным способом подготовки ИГС показана на рис. 3 [1, 2].

Анализ результатов исследований показал, что в процессе работы ЭУ по замкнутому циклу выделяется большое количество теплоты в результате физико-химических процессов, протекающих в системе подготовки ИГС при получении газобразного кислорода и поглощении двуокиси углерода.

Дальнейшее совершенствование технологических схем ДЭУ СЦ было направлено на повышение их эффективности и экономичности за счет реализации комбинированных циклов, в которых избыточное тепло утилизировалось в парогазовой турбине.

При этом для эффективного преобразования низкопотенциальной энергии в турбинах могут использоваться дополнительные рабочие тела в виде низкокипящих жидкостей, например, фреона. Механическая энергия турбин может передаваться на коленчатый вал двигателя или на автономный генератор [2].

Наиболее полное решение проблемы повышения энергетической эффективности ДЭУ было найдено в комбинированных схемах с термохимической очисткой ОГ, предложенных д-ром техн. наук, профессором Дыбком В.В. [1, 2].

Для этой цели используются щелочноземельные металлы, например магний, для химического превращения диоксида углерода и паров воды из состава ОГ в синтез-газ (смесь оксида углерода и водорода).

В результате создается ИГС с горючим наполнителем, часть которого является топливом, а

часть — рабочим телом. В данном комбинированном цикле используется также регенерационный контур с турбогенератором на основе низкокипящего рабочего тела, что обеспечивает существенное повышение КПД энергоустановки.

Отдельные фрагменты системы комбинированного цикла с термохимической системой подготовки ИГС были реализованы к.т.н., доцентом Савельевым В.В. на ДЭУ мощностью 16 кВт, однако создание комбинированных ДЭУ СЦ по этой технологии требует тщательного экспериментального подтверждения [2].

Состояние проблематики ДЭУ СЦ было предметом научно-технической конференции, проведенной в 1996 г., на которой были обсуждены различные направления разработок в этой области.

Например, достигнутый прогресс в создании опытных образцов энергетических установок (ЭУ) с электрохимическими генераторами (ЭХГ) для космической техники и подводных аппаратов ВМФ в сочетании с рядом очевидных преимуществ ЭХГ (по массогабаритным показателям, расхода и запасам рабочих сред, КПД) перед другими автономными энергоисточниками, делают их привлекательными для создания систем автономного энергосбережения в сочетании с ДЭУ СЦ в виде единой комбинированной энергоустановки (КЭУ). Развитие этого направления выполнялось под руководством д-ра техн. наук, профессора Сайданова В.О.

Анализ разработок по ДЭУ СЦ показывает, что повышение их тактико-технических характеристик, надежности и безопасности в основном определяется оптимизацией схемных решений, разработкой и совершенствованием оборудования системы подготовки ИГС, алгоритмов САР и САУ на базе микропроцессоров, а также совершенствованием работы двигателя — основного функционального элемента установки.

Совершенствование работы двигателей ДЭУ СЦ, повышение живучести и безопасности их

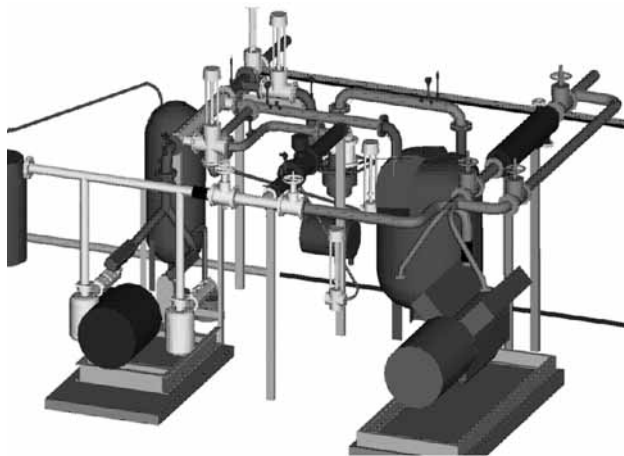


Рис. 4. 3D-модель экспериментальной ДЭУ СЦ мощностью 100 кВт

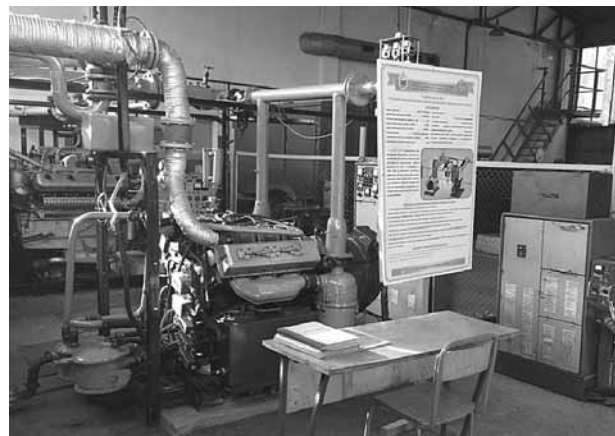


Рис. 5. Экспериментальная ДЭУ СЦ мощностью 100 кВт

функционирования затрагивает все этапы их жизненного цикла: от проектирования до эксплуатации, среди которых следует отметить:

- выбор и оптимизация конструктивных и схемных решений ДЭУ на стадии проектирования;
- прогнозирование эксплуатационных показателей ДЭУ на ИГС различного состава;
- проведение НИОКР по созданию и исследованию ДЭУ СЦ;
- повышение качества монтажных и пусконаладочных работ;
- подготовка и повышение квалификации обслуживающего персонала для безопасной эксплуатации ДЭУ СЦ.

Сегодня на кафедре функционирует созданная совместно с СПМБМ «Малахит» автоматизи-

рованная стендовая модель ДЭУ, работающая по специальному циклу мощностью 100 кВт на базе двигателя 6Ч15/15, и современный измерительно-вычислительный комплекс на основе ЭВМ для ее исследований.

На рис. 4 и 5 представлены 3D-модель и фото экспериментальной ДЭУ СЦ мощностью 100 кВт.

Литература

1. *Кривов В.Г.* Военная и малая энергетика на рубеже веков и пути ее развития/ВИТУ. — СПб., 2010. — 377 с.
2. *Агафонов А.Н.* Работа дизелей в условиях функционирования по специальным циклам. — СПб.: СПбГПУ, 2005. — 316 с.

ПАМЯТИ В.Г. КРИВОВА

19 ноября 2017 года ушел из жизни один из ведущих ученых России, крупнейший специалист в области создания дизельных и комбинированных энергетических установок и станций автономного энергоснабжения для объектов Министерства обороны и общепромышленного применения, д-р техн. наук, профессор

Валентин Гаврилович Кривов

Валентин Гаврилович прожил яркую и насыщенную событиями жизнь, в которой отразилась история страны без малого за 100 лет (ему было 93 года).

В.Г. Кривов — доктор технических наук, профессор кафедры ДЭУ ВИ(ИТ) Военной академии МТО им. А.В. Хрулева (ранее ВИТУ), участник ВОВ, полковник в отставке, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат премии Совета Министров СССР, заслуженный работник высшей школы РФ, почетный академик Российской Академии архитектуры и строительных наук РФ, почетный энергетик РФ, почетный работник топливно-энергетического комплекса РФ, награжден пятью орденами (орден Отечественной войны II степени, орден Красной Звезды, орден Почета, орден Трудового Красного Знамени, орден И.В. Сталина), 26 медалями СССР и РФ, включая медаль «За боевые заслуги», и многими юбилейными наградами.

В мае 1942 г. В.Г. Кривов был направлен горвоенкоматом на обучение в ВИТУ ВМФ в г. Ярославль. По окончании училища с апреля 1947 до 1953 г. проходил службу в частях береговой обороны Северного флота. В 1953 г. поступил в адъюнктуру на кафедру ДВС ВИТУ ВМФ.

В 1956 г. после защиты кандидатской диссертации назначен преподавателем кафедры. В 1965 г. защитил докторскую диссертацию. В 1967 г. ему присвоено ученое звание профессора. В 1968 г. В.Г. Кривов был назначен начальником кафедры ДВС, которую



возглавлял более двадцати лет (до 1989 г.).

За 60 лет активной инженерной, научно-педагогической, научно-исследовательской и общественной деятельности им создана и получила всеобщее признание научная школа по проблемам развития автономного энергоснабжения на базе поршневых ДВС, включающая направления комбинированного производства энергии и утилизации теплоты, использования нетрадиционных источников энергии, комплексной защиты и обеспечения работы ДЭУ по специальным циклам, повышения надежности и живучести технических систем объектов МО, силовых структур и государственных пунктов управления.

Под научным руководством В.Г. Кривова было подготовлено и защищено 14 докторских и более 70 кандидатских диссертаций.

Коллектив ВИ(ИТ) ВА МТО им. А.В. Хрулева, редакция журнала «Двигателестроение», его коллеги на долгие годы сохраняют светлую память о Валентине Гавриловиче Кривове

ОПТИМАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ФОРСИРОВКИ ПОРШНЕВЫХ ДВС НАДДУВОМ

Г.Е. Циплёнкин, к.т.н., В.И. Иовлев, к.т.н.,
ООО «Турбоком»

Энергия отработавших газов в поршневом ДВС используется для передачи полезной мощности на коленчатый вал двигателя и привод турбокомпрессора. С увеличением форсировки двигателя по среднему эффективному давлению наддувом растут мощности двигателя и турбокомпрессора. Достижение равенства этих мощностей означает предел оптимального уровня форсировки двигателя наддувом.

Достижение предела форсировки поршневых ДВС по среднему эффективному давлению p_{me} наиболее наглядно иллюстрирует рассмотрение работы двигателя с механическим наддувом. В этом случае компрессор приводится во вращение непосредственно от коленчатого вала через мультипликатор. При увеличении давления наддува мощность двигателя и p_{me} растут, но одновременно растет и мощность, потребляемая компрессором. При этом мощность двигателя растет по линейному закону в зависимости от p_{me} , а мощность компрессора по параболе. При низких p_{me} прирост мощности двигателя больше прироста мощности компрессора, но с ростом p_{me} увеличение мощности двигателя требует существенно большего увеличения мощности компрессора, и наступает момент, когда эти мощности уравниваются, после чего мощность двигателя будет уменьшаться.

Для оценки соотношений между мощностями двигателя и компрессора выполнен расчет для двигателя 12ЧН18/20 (рис. 1). Принято, что без наддува двигатель имеет $p_{me} = 8$ бар, а при использовании приводного компрессора со степенью повышения давления $\pi_k = 2,9$ — $p_{me} = 17$ бар, что позволяет получить зависимость p_{me} от π_k в виде уравнения $p_{me} = 4,3 + 4,7 \pi_k$ для расчета мощностей двигателя и компрессора. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2$, удельный расход топлива — 220 г/кВт·ч. Расчет выполнен для двух значений КПД компрессора 0,6 и 0,7 с учетом характеристик мультипликатора. Из данных, приведенных на рис. 1, видны ограниченные возможности наддува дизеля с приводным компрессором.

На рис. 1, наряду с абсолютными значениями мощностей двигателя и компрессора, представлены их относительные значения, т. е. мощности двигателя и турбокомпрессора, отнесенные к их суммарной мощности. Относительная мощность двигателя уменьшается с увеличением его форсировки, а относительная мощность компрессора возрастает.

При использовании газотурбинного наддува возможности форсировки по p_{me} существенно расширяются. Но и здесь имеется аналогичное ограничение. Энергия отработавших газов рас-

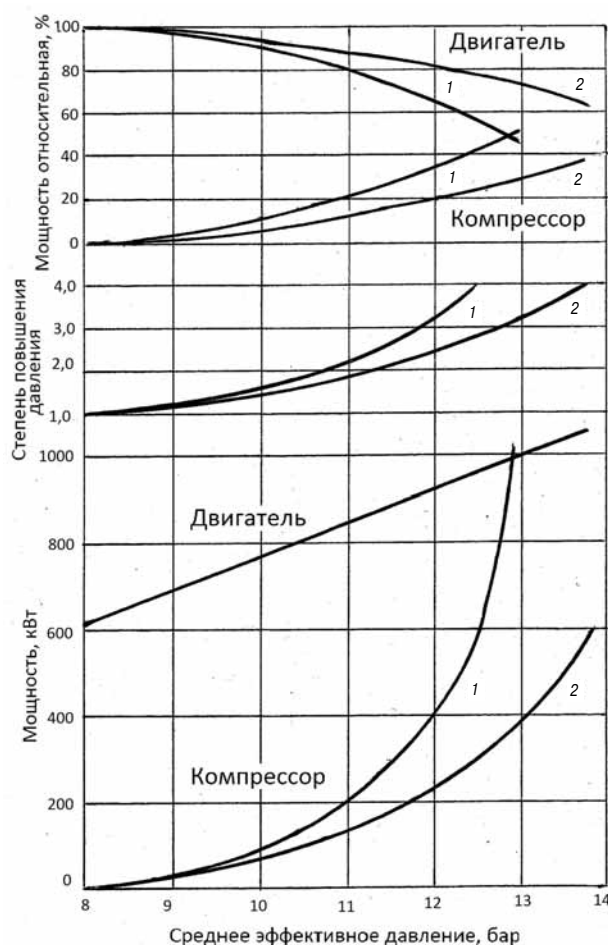


Рис. 1. Изменение мощностей двигателя и компрессора при механическом наддуве двигателя:
1 — КПД компрессора с мультипликатором 60%;
2 — КПД компрессора с мультипликатором 70%

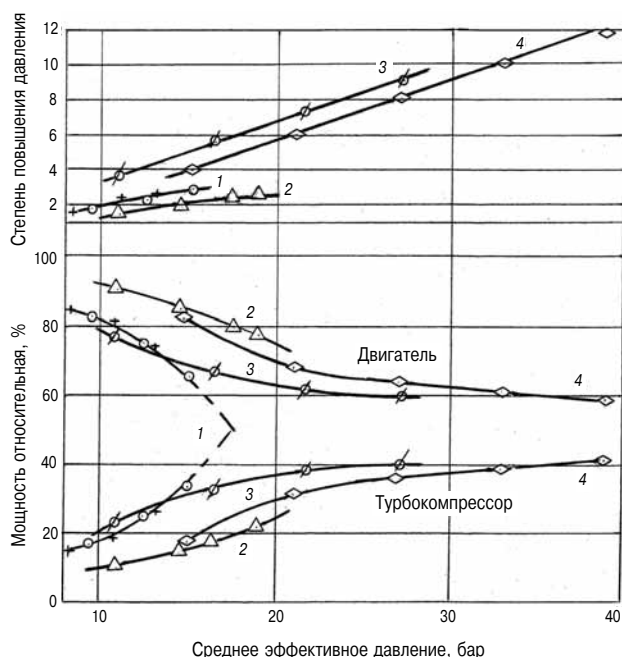


Рис. 2. Изменение мощностей двигателя и турбокомпрессора при газотурбинном наддуве двигателя:

двигатели с одноступенчатым наддувом:

1 — 12ЧН18/20; 2 — 6ЧРН40/46;

двигатели с двухступенчатым наддувом:

3 — Wartsila; 4 — по данным фирмы АВВ

ходуется на передачу мощности на коленчатый вал и на привод турбокомпрессора. С ростом p_{me} абсолютные мощности двигателя и турбокомпрессора растут. Относительная же мощность двигателя с ростом p_{me} падает, а доля мощности турбокомпрессора возрастает (рис. 2). Пределом оптимального уровня форсировки принято условие равенства мощности турбокомпрессора и двигателя.

При использовании одноступенчатой системы наддува (ОСН) (рис. 2, кривые 1 и 2) линии мощностей могут быть продолжены, что дает возможность оценить предел оптимальной степени форсировки двигателей при достигнутом качестве рабочего процесса. При дальнейшем совершенствовании рабочего процесса и повышении КПД турбокомпрессора эти кривые смещаются в сторону больших p_{me} . Для уменьшения мощности турбокомпрессора и получения более высоких значений p_{me} необходимо повышение КПД турбокомпрессора и отработка параметров рабочего процесса с меньшими значениями коэффициента избытка воздуха (α).

Оценка соотношения мощностей турбокомпрессора и двигателя при использовании двухступенчатой системы наддува (ДСН) была выполнена по параметрам двигателя Wartsila 20 со

средним эффективным давлением 27,3 бар [1]. На этом двигателе с ДСН, циклом Миллера и укороченной продувкой был снижен удельный расход топлива на 2–3 % с уменьшением выброса NO_x на 50 %. При этих условиях соотношения между мощностями турбокомпрессора и двигателя представлены кривыми 3 (рис. 2). Видно, что мощность турбокомпрессора с ростом p_{me} возрастает, при этом КПД системы наддува остается в пределах 70–73 %, вследствие чего относительная мощность турбокомпрессора нарастает очень плавно, с таким же плавным снижением относительной мощности двигателя. Такой характер изменения мощностей затрудняет аппроксимацию и нахождение точки их пересечения, но уже и при $p_{me} = 30$ бар мощность турбокомпрессора составляет 70 % мощности двигателя.

Еще одна оценка оптимального уровня форсировки выполнена по данным фирмы АВВ [2, 3]. По результатам моделирования фирма АВВ установила, что для $p_{me} = 30$ бар оптимальное значение $\pi_k = 9$ при использовании ДСН, а при $p_{me} = 24$ бар оптимальное значение $\pi_k = 7$ [2]. Это позволяет получить зависимость p_{me} от π_k в виде уравнения $p_{me} = 3 + 3\pi_k$ для ДСН. Задаваясь значениями КПД системы наддува в зависимости от π_k по данным этой же фирмы [3], можно рассчитать относительные мощности турбокомпрессоров и двигателей (рис. 2, кривая 4). Характер изменения мощностей аналогичен кривым 3 для двигателя Wartsila, при этом они сдвинуты еще больше из-за большего значения КПД в пределах 70–80 %.

Достигнутые в настоящее время предельные значения $p_{me} = 26–28$ бар реализованы при использовании ОСН. Дальнейшая форсировка двигателей возможна только при использовании ДСН. В настоящее время дальнейший рост уровня форсировки двигателей применяется для снижения выбросов NO_x при сохранении достигнутого уровня экономичности.

Литература

1. Wik C., Hallback B. Utilisation of 2-stage turbo charging as an emission reduction mean on a Wartsila 4-stroke medium-speed diesel engine. Paper № 101, CIMAC 2007, Vienna.
2. Behr T., Kahi M., Reichl A., Hubacher M. Second generation of two-stage turbocharging Power2 systems for medium speed gas and diesel Engines. Paper № 134, CIMAC 2013, Shanghai.
3. Codan E., Mathey C., Rettig A. 2-Stage Turbocharging — Flexibility for Engine Optimisation. Paper № 293, CIMAC 2010, Bergen.

УЛУЧШЕНИЕ СМЕСЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С РАПСОВЫМ МАСЛОМ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЯХ

С.А. Плотников, д.т.н., проф., А.Н. Карташевич, д.т.н., проф., П.Н. Черемисинов, аспирант
Вятский государственный университет

Проведены лабораторные исследования физико-химических свойств дизельных топлив с добавками рапсового масла. Разработан состав топливной композиции с улучшенными эксплуатационными свойствами, обладающий патентной новизной. Проведены стендовые испытания тракторного дизеля при работе на дизельном топливе и топливах с добавками рапсового масла. Определены регулировочные, экономические и эффективные показатели дизеля.

Творческим коллективом ученых Вятского государственного университета (ВятГУ) и Белорусской государственной сельскохозяйственной академии (БГСХА) длительное время проводятся исследования работы автотракторных дизелей на дизельном топливе (ДТ) с добавками топлив биологического происхождения — растительных масел (РМ), этанола (Э), генераторного газа (ГГ), биогаза (БГ) [1–4].

Использование в двигателях тракторов и автомобилей рапсового масла в чистом виде накладывает некоторые ограничения [1–6]. Обязательным является высокая идентичность физико-химических свойств смесевых и дизельного топлив. Рабочие характеристики агрегатов топливной системы в целом должны оставаться неизменными или быть в пределах допустимых регулировок топливной аппаратуры. Надежность и ресурс работы системы питания также должны быть соизмеримы с аналогичными для серийной системы условиями.

Первоначально методом капиллярной газовой хроматомасс-спектрометрии была выполнена оценка жирнокислотного состава различных образцов РМ холодного отжима, произведенных в России и странах СНГ. Хроматомасс-спектрометрия проводилась на газовом хроматомасс-спектрометре GCMS-QP2010 Plus («Shimadzu», Япония).

Полученные масс-спектры были интерпретированы с помощью программного обеспечения, которое дает возможность подбора и сравнения максимально сходимых масс-спектров из элек-

тронных библиотек с экспериментально полученными масс-спектрами. Данные были нормализованы и сведены в табл. 1. На основе полученных результатов был установлен образец РМ, позволяющий (предположительно) обеспечивать наибольшую скорость и полноту сгорания впрыснутого в цилиндр дизеля смесевых топлива (табл. 1) — образец № 3. Отмеченный образец РМ был использован в дальнейших исследованиях.

Основной проблемой применения РМ является высокая, по сравнению с ДТ, вязкость. С целью ее снижения было оценено несколько присадок различных классов на основе сложных виниловых эфиров, ненасыщенных кетонов, эфиров и амидов ненасыщенных кислот. В ходе исследований было установлено, что снижение кинематической вязкости смесей РМ и ДТ до 22 % возможно путем введения депрессорных присадок (табл. 2) [7]. В дальнейших исследованиях использовались различные составы смесевых топлив с уже выбранными ингредиентами [8].

Для оценки влияния смесевых видов топлива на основе рапсового масла на показатели работы дизеля 4ЧН11,0/12,5 (Д-245.5S5) были проведены экспериментальные исследования на электродвигателе SAK N670 (Германия) с балансирной маятниковой машиной. На рис. 1 представлен общий вид стенда с установленным дизелем. Крутящий момент на коленчатом валу дизеля измерялся с помощью динамометрического устройства, входящего в состав нагрузочного стенда. Массовый расход топлива определялся элек-

Таблица 1

Жирнокислотный состав образцов рапсового масла

Название кислоты	Число атомов углерода	Число двойных связей	Содержание в образце масла, %масс.	
			Образец № 12	Образец № 3
Пальмитиновая	16	Нет	1,01	4,72
Маргариновая	17	Нет	—	0,19
Стеариновая	18	Нет	0,68	1,65
Олеиновая	18	1	91,34	64,74
Линолевая	18	2	—	18,71
Арахидовая	20	Нет	—	0,32

Таблица 2

Кинематическая вязкость смесей на основе дизельного топлива и рапсового масла [6]

Содержание рапсового масла в смеси, %	Без присадки			С присадкой в количестве 5%		
	15	25	50	15	25	50
Кинематическая вязкость, мм ² /с	6,90445	8,81833	19,39065	6,27598	8,28081	18,42116

тронным расходомером АИР-50. Значение установочного угла опережения впрыска топлива определялось по мениску.

На рис. 2 представлены регулировочные характеристики дизеля 4ЧН11,0/12,5 при работе на ДТ и смесях ДТ с РМ при различных значениях угла опережения впрыска топлива и номинальной частоте вращения коленчатого вала $n = 1800$ об/мин.

Из данных рис. 2 видно, что при работе на чистом ДТ оптимальный установочный угол опережения впрыска $\theta_{впр} = 26^\circ$, что соответствует руководству по эксплуатации дизеля. При этом эффективная мощность дизеля составляет 70,2 кВт, а значение удельного эффективного расхода топлива 235 г/кВт·ч. Значение эффективного КПД, учитывающего теплотворную способность топлива, также максимально и составляет $\eta_e = 36\%$.

При работе дизеля на смесях ДТ и РМ характер кривых несколько изменяется. Так, значения часового расхода топлива увеличиваются от 16,5 кг/ч при работе дизеля на чистом ДТ, до 17,3 кг/ч и 17,5 кг/ч при работе дизеля с содержанием РМ в смеси 25 и 45 % соответственно. Увеличение расхода топлива вызвано снижением нижней теплотой сгорания смесевое топлива. Значения удельного эффективного расхода топлива также возрастают и составляют 247,2 и 255,6 г/кВт·ч соответственно, для случаев содержания 20 и 45 % РМ в смесевом топливе. При этом минимум g_e сдвигается в сторону более

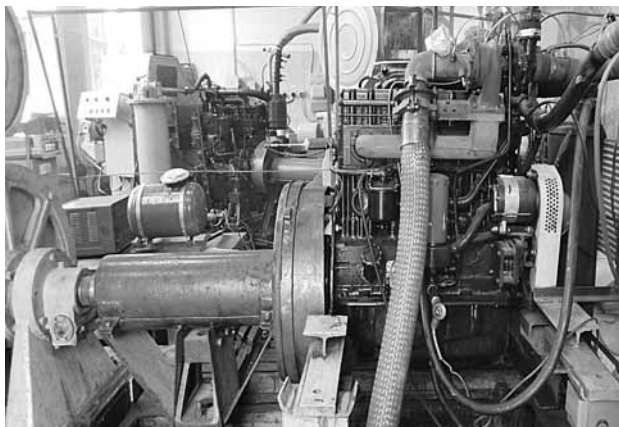


Рис. 1. Общий вид моторного стенда дизелем 4ЧН11,0/12,5 (Д-245.5S5)

поздних углов опережения впрыска топлива и составляет $\theta_{впр} = 25$ и 24 град ПКВ до ВМТ соответственно для случаев содержания 20 и 45 % РМ в смесевом топливе. Максимальные значения эффективной мощности и эффективного КПД изменяются незначительно в сравнении с работой дизеля на чистом ДТ, и также сдвигаются в сторону поздних углов опережения впрыска топлива. Учитывая конструктивную сложность установки данных значений угла для топливного насоса 4УТНМ, в дальнейших испытаниях было принято значение $\theta_{впр} = 26^\circ$ для всех исследуемых составов смесевых топлив.

На рис. 3 и 4 представлены нагрузочные, а на рис. 5 — скоростные характеристики дизеля 4ЧН11,0/12,5 при работе на ДТ и с добавками РМ.

Как видно из графика (рис. 3), во всем диапазоне изменения нагрузки растет суммарный часовой расход топлива при работе на смесях ДТ и РМ. Так, при нагрузке $p_e = 0,3$ МПа и работе на ДТ, $G_{дт} = 7,22$ кг/ч, а при работе на смесях с содержанием РМ 20 и 45 % он равен соответственно, $G_{дт20} = 6,18$ кг/ч и $G_{дт45} = 7,93$ кг/ч. При этом расход ДТ в смеси снижается на 27,15 и 37,26 %. Удельный эффективный расход топлива также увеличивается: для чисто ДТ $g_{e\min ДТ} = 214,6$ г/кВт·ч, а при работе на смесях с содержанием РМ 20 и 45 % $g_{e\min РМ20} = 226,7$ и $g_{e\min РМ45} =$

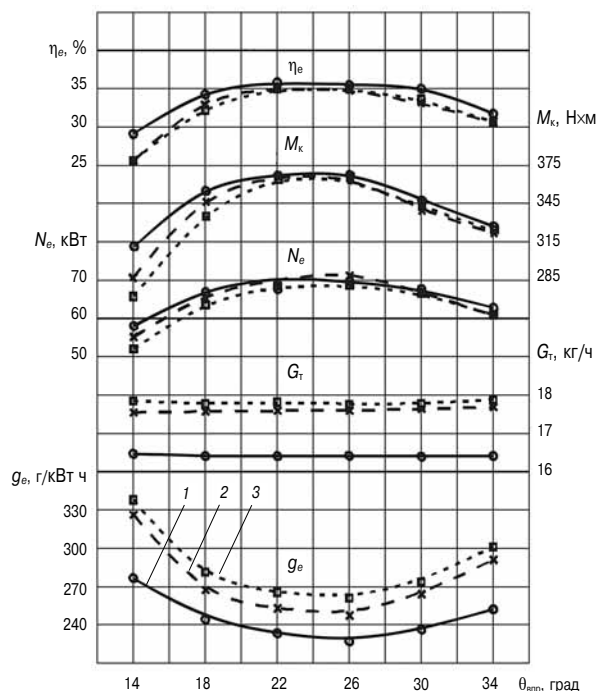


Рис. 2. Регулировочные характеристики дизеля 4ЧН11,0/12,5 при $n = 1800$ об/мин:

1 — дизельное топливо; 2 — 25 % рапсового масла в топливе; 3 — 45 % рапсового масла в топливе

$= 234,2$ г/кВт·ч. Увеличение удельного эффективного и часового расходов топлива объясняется снижением теплоты сгорания смесового топлива. Значение эффективного КПД топлива при работе дизеля на смесовом топливе снижается незначительно относительно уровня, характерного для работы дизеля на чистом ДТ. Минимум удельного эффективного расхода топлива при работе дизеля на смесях ДТ и РМ сдвигается в сторону меньших нагрузок. Если при работе на ДТ $g_{e \min}$ ДТ достигается при $p_e = 0,7$ МПа, то при работе на топливе с добавкой 20 и 45 % РМ он соответствует $p_e = 0,66$ и $p_e = 0,69$ МПа. Очевидно, что добавка РМ изменяет характер протекания процесса смесеобразования и, как следствие, — процесса сгорания топлива.

На рис. 4 представлена нагрузочная характеристика дизеля при частоте вращения $n = 1400$ об/мин, соответствующей режиму максимального крутящего момента. Характер изменения эффективных показателей дизеля не изменяется, но представлен более отчетливо.

Суммарный часовой расход топлива при работе на смесях ДТ и РМ также возрастает во всем диапазоне изменения нагрузки. При $p_e = 0,9$ МПа и работе на ДТ часовой расход топлива равен $G_{\text{ДТ}} = 10,27$ кг/ч, а при работе на смесях с содержанием РМ 20 и 45% он равен, соответственно, $G_{\text{РМ20}} = 10,45$ и $G_{\text{РМ45}} = 10,65$ кг/ч. При этом снижение расхода ДТ в смеси составляет 18,21 и 42,55%.

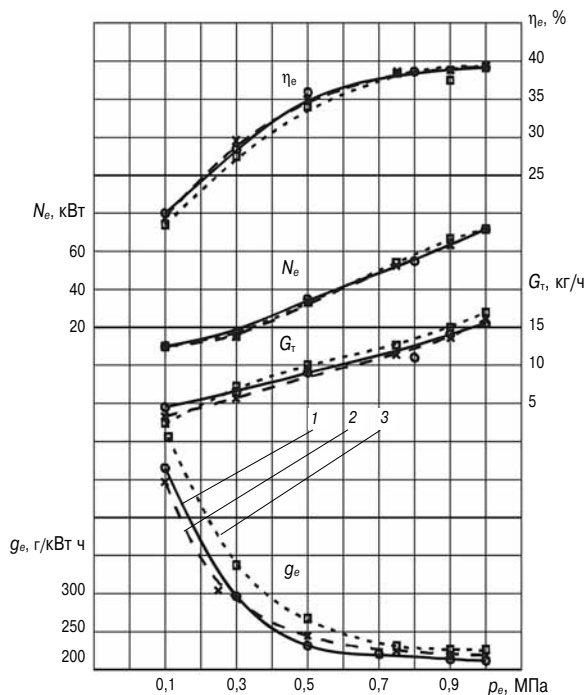


Рис. 3. Нагрузочные характеристики дизеля 4ЧН11,0/12,5 при $n = 1800$ об/мин:

1 — дизельное топливо; 2 — 25 % рапсового масла в топливе; 3 — 45 % рапсового масла в топливе

Удельный эффективный расход топлива также увеличивается: для чисто дизельного топлива $g_{e \min \text{ ДТ}} = 207,2$ г/кВт·ч, а при работе на смесях с содержанием РМ 20 и 45% $g_{e \min \text{ РМ20}} = 214,3$ г/кВт·ч и $g_{e \min \text{ РМ45}} = 221,5$ г/кВт·ч.

На частоте вращения коленчатого вала дизеля вращения $n = 1400$ об/мин заметно снижение эффективного КПД. Так, при работе на чистом ДТ максимум эффективного КПД равен $\eta_{e \max \text{ ДТ}} = 38,7$ %, а при работе с добавкой 20 и 45 % РМ эти значения равны $\eta_{e \max \text{ РМ20}} = 36,8$ % и $\eta_{e \max \text{ РМ45}} = 37,9$ %.

Минимум удельного эффективного расхода топлива и максимум эффективного КПД при работе дизеля на смесях ДТ и РМ также сдвигается в сторону меньших нагрузок. Так, если при работе на ДТ $g_{e \min}$ и $\eta_{e \max}$ достигается при $p_e = 0,9$ МПа, то при работе на топливе с добавкой 20 и 45% рапсового масла эти значения нагрузки, соответственно, равны $p_e = 0,8$ МПа.

Влияние рапсового масла в смесовом топливе на изменение эффективных показателей дизеля было рассмотрено также при работе дизеля по скоростным характеристикам на номинальной нагрузке (рис. 5).

Из графиков видно, что работа дизеля на смесях ДТ и РМ вызывает некоторое изменение его эффективных показателей. Так, значения эффективной мощности, крутящего момента и эффективного КПД снижаются в сравнении с аналогичными характеристиками для ДТ. Сни-

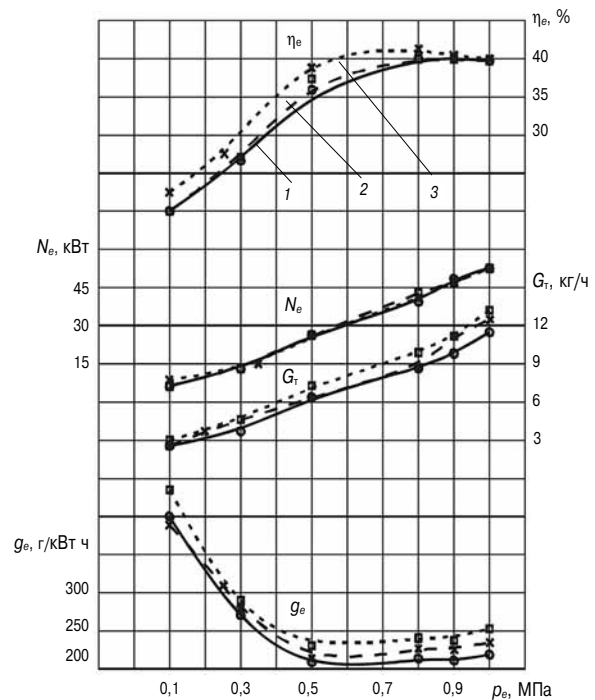


Рис. 4. Нагрузочные характеристики дизеля 4ЧН11,0/12,5 при $n = 1400$ об/мин:

1 — дизельное топливо; 2 — 25 % рапсового масла в топливе; 3 — 45 % рапсового масла в топливе

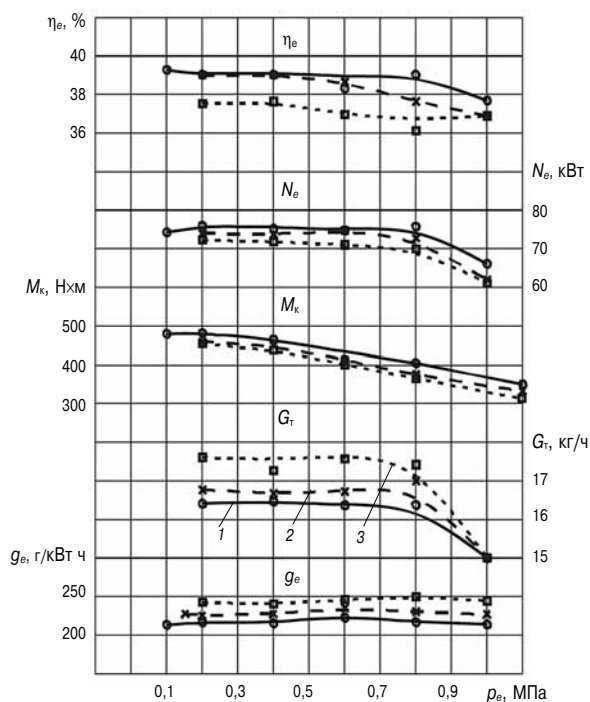


Рис. 5. Скоростные характеристики дизеля 4ЧН11,0/12,5:
1 — дизельное топливо; 2 — 25 % рапсового масла в топливе;
3 — 45 % рапсового масла в топливе

жение КПД составляет 3,86 % при содержании 20 % РМ и 7,20 % при содержании 45 % РМ в смесевом топливе.

Снижение эффективной мощности и крутящего момента дизеля составляет 1–3,56 % во всем диапазоне частот вращения при работе с добавкой 20 % РМ. В то же самое время при добавке РМ до 45 % эти значения составляют 3,44–7,38 %. Все это однозначно объясняется снижением нижней теплоты сгорания смесевого топлива.

Часовой расход самого ДТ при работе на топливах с добавками РМ уменьшается во всем диапазоне изменения частот вращения.

Минимум удельного эффективного расхода топлива несколько смещается в сторону больших частот вращения, так как присутствие рапсового масла в топливе утяжеляет фракционный состав смеси, увеличивает значение потребной вихреобразующей способности впускного тракта.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

1. В ходе эксперимента была получена информация о качественном и количественном составе сложных смесей летучих органических соединений.

2. Снижение кинематической вязкости топлив на основе рапсового масла до 22 % возможно путем введения депрессорных присадок.

3. При работе дизеля на топливах с добавками рапсового масла оптимальным установочным углом опережения впрыскивания следует считать угол $\theta_{впр} = 26^\circ$.

4. Работа дизеля с добавками 20 и 45% рапсового масла позволяет сократить расход ДТ до 18,21 и 42,55 % соответственно. При этом в зависимости от режима работы дизеля, значения эффективной мощности и эффективного КПД остаются на уровне, характерном для работы дизеля на чистом ДТ или снижаются на более чем на 8 %.

5. Представляет значительный интерес исследование работы трактора на смесях ДТ и РМ в эксплуатационных условиях.

Литература

1. Карташевич А.Н., Плотников С.А., Гурков Г.Н. Применение этанолсодержащих топлив в дизеле: монография. Ч. I. — Киров : Типография «Авангард», 2011. — 116 с.
2. Карташевич А.Н., Плотников С.А., Товстыка В.С. Применение топлив на основе рапсового масла в тракторных дизелях: монография. — Киров : Типография «Авангард», 2014. — 144 с.
3. Плотников С.А., Зубакин А.С., Коротков А.Н. Система питания генераторным газом ДВС и установка для его осуществления. Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе современных информационно-коммуникационных технологий. // Сб. науч. тр. по мат. заоч. науч.-практ. конф. — Воронеж, 2015. — С. 66–69.
4. Карташевич А.Н., Малышкин П.Ю., Плотников С.А., Зубакин А.С. Исследование работы двигателя 146,8/5,4 на альтернативных топливах // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2016. — № 4. — С. 115–117.
5. Плотников С.А. Создание новых альтернативных топлив. — Концепт. — 2014. — Спецвыпуск № 10. — <http://e-koncept.ru/2014/14621.htm>.
6. Плотников С.А., Черемисинов П.Н. Недостатки применения топлив на основе рапсового масла в дизельных двигателях. Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и практика // Сб. науч. тр. по мат. заоч. науч.-практ. конф. — Воронеж : ООО ИПЦ «Научная книга», 2015. — № 4. — Ч. 1 (15–1). — С. 97–101.
7. Плотников С.А., Черемисинов П.Н. Влияние присадок на кинематическую вязкость топлив на основе рапсового масла. Общество, наука, инновации. (НПК-2016) [Электронный ресурс] // Всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. статей, 18–29 апреля 2016 г. / Вят. гос. ун-т. — Киров, 2016. — С. 1378–1382.
8. Топливная композиция. // Заявка на выдачу патента РФ № 2016133419/17(051858) от 12.08.2016. / С.А.Плотников, А.Н.Карташевич, П.Н.Черемисинов.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*В.О. Сайданов, д.т.н., профессор
ВИ(ИТ) ВА МТО им. генерала армии А.В. Хрулева
И.К. Ландграф, зам. директора–гл. конструктор
М.А. Касаткин, нач. отдела*

Филиал ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Рассмотрены основные типы топливных элементов и энергоустановки на их основе, преимущества таких энергоустановок перед другими источниками энергии, а также области их применения в энергетике и на транспорте. Выполнен анализ результатов НИОКР, проведенных филиалом ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в 1990–2016 гг. по созданию топливных элементов с твердополимерным и твердооксидным электролитом и энергоустановок на их базе, в том числе в комбинации с ДВС, оборудованным системой утилизации теплоты.

Одним из перспективных направлений развития энергетики, обеспечивающим экономию топливно-энергетических и сырьевых ресурсов, радикальное снижение загрязнения окружающей среды является разработка и использование прямых методов преобразования химической энергии топлива в электрическую.

Процессы прямого преобразования химической энергии в электрическую и наоборот осуществляются в электрохимических элементах. Простейший электрохимический элемент (ячейка) состоит из двух электродов — проводников первого рода, разделенных проводником второго рода (ионным проводником или электролитом). На границе между этими проводниками возникает скачок потенциала, называемый электродным потенциалом. На электродах протекают реакции окисления восстановителя (на анодах) и восстановления окислителя (на катодах).

Топливный элемент (ТЭ) — одна из разновидностей электрохимических элементов, существенным преимуществом которого является то, что, в отличие от гальванических (первичных) элементов и аккумуляторов, электроды в ТЭ в процессе выработки электрической энергии не изменяются, так как химические реагенты (топливо и окислитель) в их состав не входят, а подаются в ТЭ извне в момент его работы.

Таким образом, схема обеспечения реагентами ТЭ подобна схемам топливоснабжения тепловых

машин, однако в них достигается более высокий КПД за счет прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую.

История топливных элементов отсылает нас к 30-м годам XIX века, когда первый водородный топливный элемент был сконструирован англичанином Уильямом Р. Гроувом в 1839 г. (намного раньше первого двигателя внутреннего сгорания бельгийца Жана Этьена Лемуара — в 1860 г.). Сам термин «топливный элемент» (Fuel Cell) появился позднее — он был предложен в 1889 г. Людвигом Мондом и Чарльзом Лангером.

Разработанные ТЭ классифицируются по типу ионного проводника (электролита). В табл. 1 представлены основные типы и характеристики ТЭ, получившие практическое применение.

ТЭ вырабатывает постоянный электрический ток только при подключении внешней нагрузки. Напряжение ТЭ обычно не превышает 1 В, при этом плотность тока может достигать значений 1 А/см² и более, сила тока зависит от площади ТЭ. Поэтому для увеличения напряжения отдельные элементы соединяют в батареи ТЭ, которые, объединяют в электрохимический генератор (ЭХГ). Для постоянного получения электроэнергии при постоянно подключенной внешней нагрузке необходимо непрерывно подводить в батарею ТЭ окислитель и топливо, выводить из батареи продукты реакции, поддерживать постоянную температуру и т. п. Поэтому реальная выработка электрической энергии и теплоты осуществляется в ЭХГ (рис. 1) и энергоустановках (ЭЭУ).

Электрохимический генератор (ЭХГ) — это энергоустановка, состоящая из батареи ТЭ, систем хранения и подачи топлива и окислителя, отвода продуктов реакции и теплоты. ЭХГ входит в состав электрохимической энергетической установки (рис. 2) [8].

Электрохимическая энергоустановка (ЭЭУ) предназначена для выработки электрической энергии и теплоты. Она включает в себя ЭХГ, устройства для преобразования напряжения и тока (например, инвертор) и систему утилизации теплоты, генерируемой в ТЭ, например, для теплофикации (низкопотенциальная теплота)

Основные типы топливных элементов и их характеристики

Характеристики	Типы топливных элементов				
Наименование	Щелочные (ЩТЭ)	Твердополимерные (ТПТЭ)	Фосфорнокислые (ТЭФК)	С расплавленными карбонатами (ТЭРК)	Твердоокисдные (ТОТЭ)
Электролит	Водный раствор КОН	Полимерная мембрана	H_3PO_4 высокой концентрации	Расплавы Li_2CO_3 , K_2CO_3	Твердый (ZrO_2), стабилизированный (Y_2O_3)
Рабочая температура, °C	60–90	50–80	180–220	500–700	800–1000
Топливо	Особо чистый водород	Чистый водород	Очищенный водород	Водородо-содержащий газ	Водородо-содержащий газ
Окислитель	Чистый кислород	Чистый кислород или атмосферный воздух	Атмосферный воздух	Атмосферный воздух	Атмосферный воздух
Коэффициент полезного действия (электрическая энергия), %	50–65	50–60	30–55	50–60	60–70
Коэффициент использования топлива (электричество + теплота), %	80	80	85	80	95

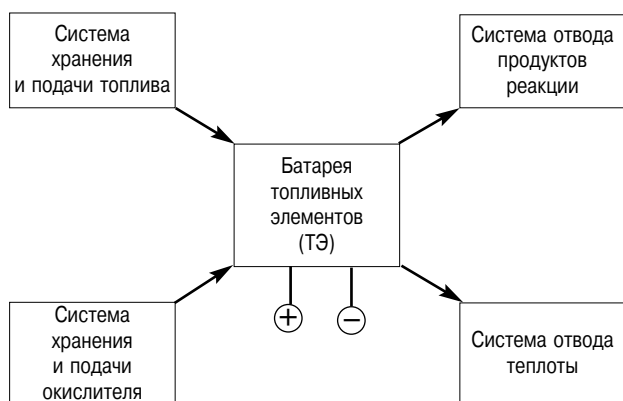


Рис. 1. Структурная схема электрохимического генератора

или получения электрической энергии (высокопотенциальная теплота) в паровой или газовой турбине (в комбинированном цикле).

ЭЭУ на основе ТЭ по сравнению с энергетическими установками других типов обладают преимуществами, основные из которых:

- высокая эффективность (экономичность), в том числе за счет полной совместимости нагрузки и генерации на всех эксплуатационных режимах;
- высокая маневренность на переходных режимах;
- экологическая чистота (полное отсутствие вредных выбросов при работе ЭХГ);
- способность работы без связи с атмосферой (для специальных применений);
- бесшумность работы.

Основными недостатками ЭЭУ с ТЭ являются:

- относительно высокая стоимость (из-за высокой стоимости материалов и комплектующих, эксклюзивно производимых ограниченным количеством зарубежных компаний и использования драгоценных и редкоземельных металлов);

➤ ухудшение вольтамперных характеристик в процессе длительной эксплуатации.

Отмеченные достоинства ЭЭУ с ТЭ делают их использование на объектах стационарной энергетики и транспорта весьма перспективным. На сегодняшний день существует, как минимум, пять направлений использования ЭЭУ:

- постоянно действующие, резервные и аварийные электростанции;
- главные и вспомогательные энергетические установки неатомных подводных лодок (НАПЛ);
- энергетические установки автомобильного и железнодорожного транспорта;
- энергетические установки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА);
- вспомогательные энергетические установки воздушных и космических аппаратов.

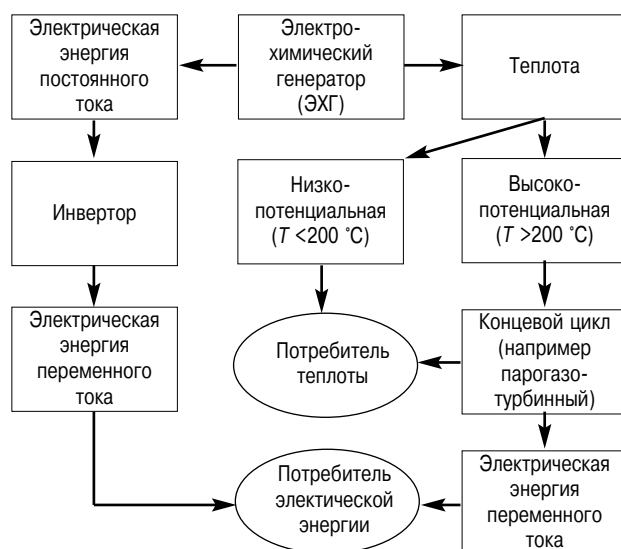


Рис. 2. Структурная схема электрохимической энергетической установки

При подготовке настоящей статьи рассмотрено состояние разработок ЭЭУ с ТЭ несколькими десятками компаний, включая «Ballard Power System» (www.ballard.com), «Dais-Analytic» (www.dais-analytic.com), «Fuji Electric» (www.fujielectric.co.jp), «H Power Hydrogenics» (www.hydrogenics.com), «Ida Tech» (www.idatech.com), «Matsuchita Electric Industrial Co» (www.panasonic.co.jp), «Nu Elements Inc» (www.nuelement.com), «Nuvera» (www.nuvera.com), «Phocos» (www.phocos.com), «Plug Power Inc.» (www.plugpower.com), «Proton Energy Systems» (www.protonenergy.com), «Sanyo Electric Co» (www.global-sanyo.com), «Schatz Energy Research Center», «Toshiba International Fuel Corp.» (www.toshiba.co.jp), «Toyota» (www.toyota.com), «UTC Fuel Cell» (www.utcfuelcells.com) и т. д.

Как показывает анализ, основные разработки в данной области энергетики сосредоточены в трех регионах планеты — Северная Америка (США, Канада), Западная Европа (Германия, Италия, Великобритания, Финляндия и др.), Юго-Восточная Азия (Япония, Южная Корея, Китай). При этом, если Япония практически целиком сосредоточила усилия на разработке электротеплогенераторов (ЭТГ) для бытового применения, так называемые Home Fuel Cells, то в Европе и особенно в США практически одинаковое внимание уделяется разработкам стационарных и транспортных ЭЭУ с ТЭ. Сегодня в мире эксплуатируются тысячи опытных ЭЭУ с ТЭ различной мощности и назначения.

В России разработкой ЭЭУ на ТЭ занимаются следующие научно-исследовательские институты и промышленные предприятия: ИФТТ РАН (г. Черноголовка), ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» (Москва), филиал ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (Санкт-Петербург), ИВТЭ УрО РАН (Екатеринбург), ООО «ИнЭнерджи» (Москва), ООО «Эй Ти Энерджи» (Москва).

Наибольших практических результатов по созданию действующих образцов ЭЭУ с ТЭ в России добились специалисты направления водородной энергетики филиала ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Филиал ЦНИИ СЭТ — многопрофильный специализированный научно-производственный центр, выполняющий наукоемкие научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы в области создания судового электротехнического оборудования, в том числе с полным циклом создания новой техники «под ключ»: от научной идеи до монтажа на объекте.

ЦНИИ СЭТ был образован в 1965 г. на базе ЦКБ-55 для выполнения базовых функций по всем видам судового электрооборудования и разработке технических заданий на создание электротехни-

ческого оборудования для отечественного судостроения. Вошел в состав Крыловского государственного научного центра в 2012 г.

Направление водородной энергетики филиала ЦНИИ СЭТ имеет многолетний опыт создания энергоустановок на основе топливных элементов (ЭУ с ТЭ), в том числе специального назначения, располагает модернизированной опытно-производственной и испытательной базами и значительным научно-техническим заделом в области водородной энергетики.

Несмотря на то, что к настоящему времени разработано большое число различных типов ТЭ, практический интерес для стационарной энергетики и транспорта представляют в основном:

- низкотемпературные топливные элементы с твердополимерной (протонообменной) мембраной (ТПТЭ);

- высокотемпературные топливные элементы с твердооксидным керамическим электролитом (ТОТЭ).

В 2004–2005 гг. филиалом ЦНИИ СЭТ были разработаны ЭЭУ с ТПТЭ для резервного электроснабжения потребителей мощностью 5 кВт и ЭЭУ для совместной выработки электрической энергии и теплоты электрической мощностью 5 кВт и тепловой мощностью 7 кВт (рис. 3). Последняя установка использует в качестве топлива природный газ, а в качестве окислителя атмосферный воздух. При этом природный газ для получения водорода подвергают паровой конверсии при температуре 600–650 °С в топливном процессоре согласно термохимической реакции:



В 2006 г. по заказу Федерального агентства по науке и инновациям, в рамках Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002–2006 годы» (направление «Энергетика и энергосбережение»), ФГУП ЦНИИ СЭТ совместно с ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» был разработан, создан и испытан опытный образец блочно-модульной ЭЭУ на с ТПТЭ и системы получения водорода методом конверсии углеводородного топлива мощностью 10 кВт.

В рамках ФЦП «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 годы в 2011 г. завершен проект «Разработка технологии создания гибридной судовой энергетической установки мощностью от 250 до 2500 кВт на основе высокоманевренного низкотемпературного ЭХГ с ТПТЭ».

Гибридные ЭУ с ТПТЭ предназначены, прежде всего, для оснащения перспективных типов судов, работающих в условиях Крайнего Севера и обеспечивающих разведку, добычу и транспортировку нефти и газа.

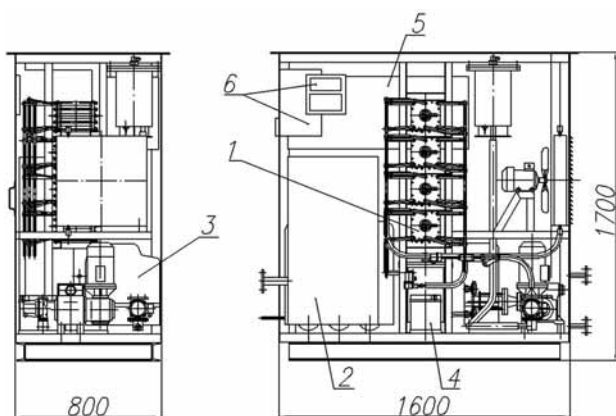


Рис. 3. Электрохимическая энергетическая установка для совместной выработки электрической энергии и теплоты:
1 — батарея топливных элементов; 2 — топливный процессор; 3 — нагнетатель воздуха; 4 — аккумуляторная батарея; 5 — преобразователь напряжения; 6 — система управления

На рис. 4 представлена структурная схема, а на рис. 5 — демонстрационный образец модуля гибридной судовой энергоустановки мощностью 60 кВт на основе высокоманевренного низкотемпературного ЭХГ с ТПТЭ (МГЭУ-60).

Демонстрационный образец модуля гибридной судовой энергоустановки мощностью 60 кВт разработан для реализации в качестве базового конструктивно-технологического решения при создании типоряда гибридных (комбинированных) судовых энергетических установок, работающих на углеводородном топливе.

Данное конструктивно-технологическое решение ЭХГ основано на реализации:

- технологии изготовления ТПТЭ;
- технологии получения водорода из различных углеводородных топлив.

Для пояснения первой технологии следует рассмотреть схему устройства ТПТЭ (рис. 6).

ТПТЭ представляет собой систему, состоящую из тонкой полимерной мембраны, способной

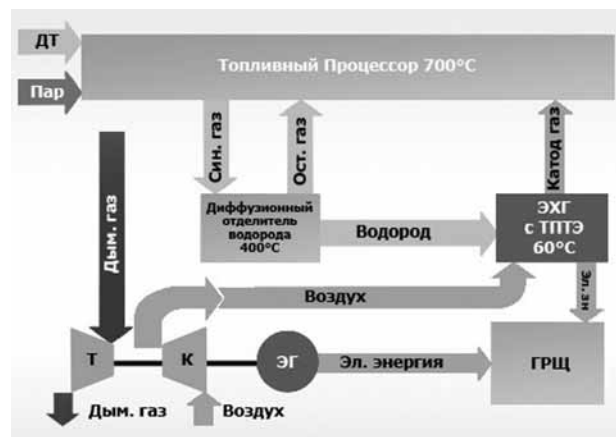


Рис. 4. Структурная схема гибридной ЭУ с ТПТЭ

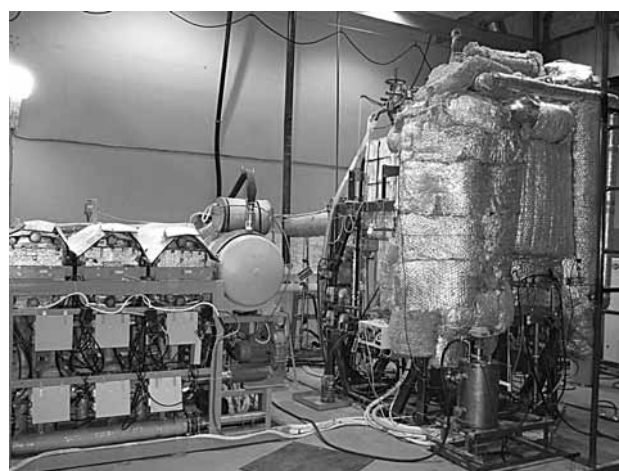


Рис. 5. Демонстрационный образец модуля гибридной судовой энергоустановки МГЭУ-60

проводить протоны, и не пропускающей топливо и окислитель. На мембрану с обеих сторон нанесен слой катализатора (платины), который находится в контакте с пористым волокнистым материалом, обладающим высокой электронной проводимостью — газодиффузионным слоем (ГДС), осуществляющим подвод газообразных реагентов к протонопроводящей мембране, и отвод продуктов электрохимической реакции, т. е. воды, а также для осуществления токосъема. Такая конструкция — мембрана, катализатор, ГДС — носит название мембранно-электродного блока (МЭБ) (рис. 7).

Для подвода реагентов ко всей поверхности газодиффузионных слоев, а также эффективного отвода образующейся воды, которая в противном случае может блокировать («затопить») поры газодиффузионного слоя используется биполярная холодильная камера.

Батарея топливных элементов состоит из пакета последовательно собранных мембранно-электродных блоков (МЭБ) и биполярных холодильных камер (БХК), сжатых через уплот-

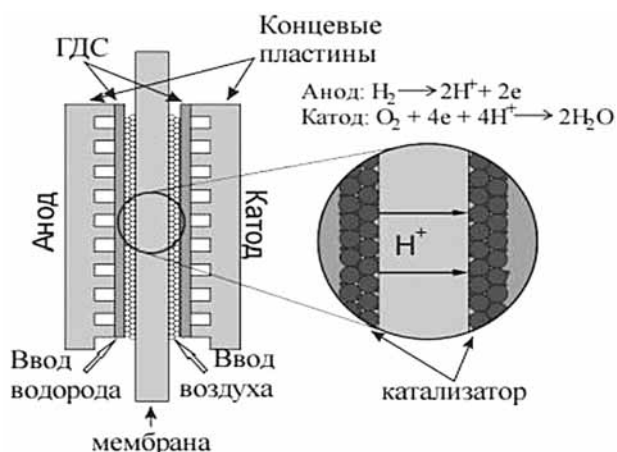


Рис. 6 Схема устройства ТПТЭ

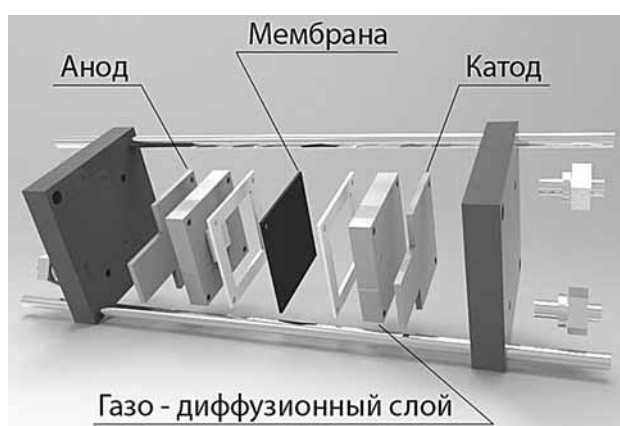


Рис. 7. Схема мембранно-электродного блока

нительные элементы силовыми пластинами, снабженными токосъемными элементами и устройством для отвода теплоты электрохимической реакции.

Филиал ЦНИИ СЭТ имеет уникальное оборудование для изготовления на базе отечественных полимерных мембран МФ-4СК мембранно-электродных блоков ТПТЭ собственной разработки (совместно с ФГУ РНЦ «Курчатовский институт»). При этом используется технология напыления каталитического слоя Pt/C на мембрану «принтерным» методом с последующим «припеканием» газодиффузионных слоев методом термопрессования [3]. В настоящее время предприятием освоено производство двух типоразмеров ТПТЭ: первый на базе МЭБ с активной поверхностью 330 см² (рис. 8, а), второй — на базе МЭБ с активной поверхностью 1225 см² (рис. 8, б). Первый типоразмер ТПТЭ положен в основу батареи ТЭ номинальной мощности 5 кВт (рис. 9, а), второй — соот-

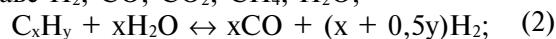
ветственно номинальной мощности 50 кВт (рис. 9, б). В табл. 2 представлены основные характеристики батарей ТЭ [3].

В 2015 г. на специальном стенде состоялись испытания опытного образца батареи БТЭ-50К в условиях, имитирующих условия эксплуатации (рис. 10). На БТЭ-50К оформлен паспорт экспортного облика и рекламный паспорт. В июне 2017 г. работа БТЭ-50К была продемонстрирована индийской делегации.

Разработанная технология и технические решения изготовления ТПТЭ защищены патентами РФ на изобретения и полезные модели [13, 14, 16], часть из них являются «ноу-хау» предприятия и охраняются режимом коммерческой тайны.

Функционирование ЭХГ с ТПТЭ обеспечивается тем, что для получения водорода используется технология паровой конверсии различных углеводородных топлив (природный газ и дизельное топливо) [8]. В основе технологии лежит известный промышленный процесс риформинга углеводородного топлива, который включает в себя две или три стадии:

➤ паровая конверсия углеводородного топлива в синтез-газ — газовую смесь, содержащую в своем составе H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O;



➤ паровая конверсия оксида углерода, образовавшегося на предыдущей стадии паровой конверсии углеводородного топлива (стадия исключается при мембранном способе разделения синтез-газа);

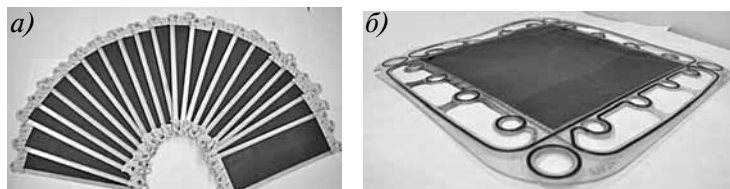
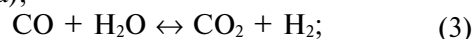


Рис. 8. Мембранно-электродные блоки ТПТЭ:

а — с активной поверхностью 330 см²;
б — с активной поверхностью 1225 см²

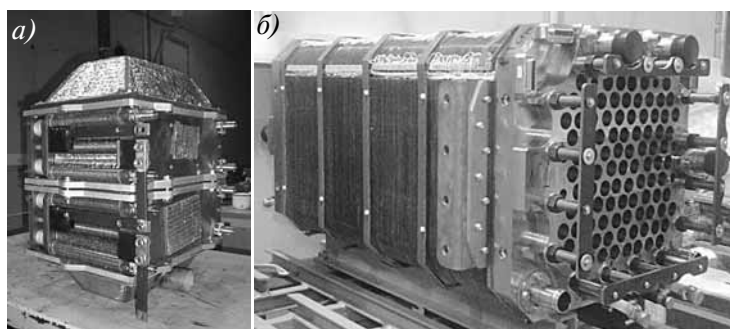


Рис. 9. Водородо-воздушные батареи ТПТЭ:

а — номинальной мощностью 5 кВт (БТЭ-П);
б — номинальной мощностью 50 кВт (БТЭ-50В)

Таблица 2

Характеристики батарей ТПТЭ

Наименование параметра, единица измерения	Марки батарей	
	БТЭ-П	БТЭ-50В
Максимальная мощность, кВт	11	80
Номинальная мощность, кВт	5	50
Площадь активной поверхности МЭБ, см ²	330	1225
КПД, %	60	60
Напряжение на номинальной мощности, В	54	115
Количество ТЭ *2×42), шт.	84	180
Габаритные размеры, мм	380×420×750	1180×536×536
Масса, кг	100	710
Рабочая температура, °С	(+1)–(+50)	(+1)–(+50)
Рабочее давление (избыточное) водорода (синтез-газа), МПа	0,04	0,1

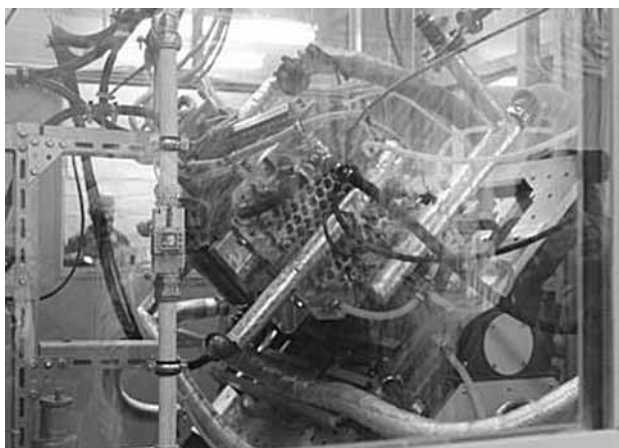


Рис. 10. Государственные приемочные испытания опытного образца водородо-кислородной батареи БТЭ-50В в условиях, имитирующих эксплуатационные

➤ тонкая очистка и разделение синтез-газа с выделением чистого водорода.

Существуют различные методы разделения и очистки газов: изменение агрегатного состояния, абсорбционные и адсорбционные; химические; мембранные (с использованием полимерной или металлической мембраны) [6].

Широкое применение для разделения газов находят селективные мембраны, в частности полимерные. Наиболее чистый водород можно получить при использовании мембран диффузионных отделителей водорода (ДОВ), изготавливаемых из сплавов палладия.

Несмотря на высокую стоимость палладиевых мембран, внедрение этой передовой технологии в практику создания энергоустановок с ЭХГ представляет значительный интерес, так как ее реализация одновременно обеспечивает и увеличение ресурса низкотемпературных ТЭ за счет получения высокой степени чистоты водорода

(не менее 99,999 %), и повышение эффективности риформинга используемого углеводородного топлива по показателям конверсии, выходу чистого водорода, массогабаритным характеристикам оборудования и термическому КПД.

Филиалом ЦНИИ СЭТ еще в 2004 г. была предложена одностадийная схема осуществления процесса конверсии углеводородного топлива с отбором водорода непосредственно из зоны реакции, что конструктивно обеспечивается за счет интеграции мембран ДОВ в каталитическую зону конвертора [2]. Организация вывода водорода непосредственно из зоны реакции позволяет повысить КПД конверсии до 0,8 (против 0,6 при других способах) либо снизить температуру процесса до 600–650 °С (против 750–850 °С при других способах), что позволяет использовать недорогие конструкционные материалы, снижает стоимость и повышает надежность конструкции.

Для реализации данной технологии в 2015 г. был создан и испытан топливный процессор, обеспечивающий эффективное преобразование органического топлива в водородосодержащий синтез-газ, включая диффузионный отделитель водорода, обеспечивающий выделение химически чистого водорода из синтез-газа. На рис. 11 представлена принципиальная схема, на рис. 12 — конструкция, а в табл. 3 — основные характеристики моноблочного конвертора [5].

Основным технологическим отличием моноблочного конвертора является использование новой конструкции ДОВ и нового высокопористого проницаемого ячеистого материала (ВПЯМ), примененного в качестве носителя катализатора [5].

Конструкция конверсионного элемента, реализующего одностадийный способ получения водорода с выделением непосредственно из зоны реакции, представляет собой корпус в виде плоского диска диаметром около 180 мм, внутри которого расположены диффузионный отделитель водорода и по обе стороны от него два каталитических диска из ВПЯМ [5].

Таблица 3

Характеристики моноблочного конвертора филиала ЦНИИ СЭТ

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
Мощность ЭХГ, обеспечиваемая данным конвертором, кВт	10
Габаритные размеры (диаметр×высота), мм	600×2000
Расход углеводородного топлива, кг/ч	7,58
Температура паротопливной смеси на входе в конвертор, °С	510
Расход остаточного газа, кг/ч	6,98
Выход водорода, кг/ч	0,6

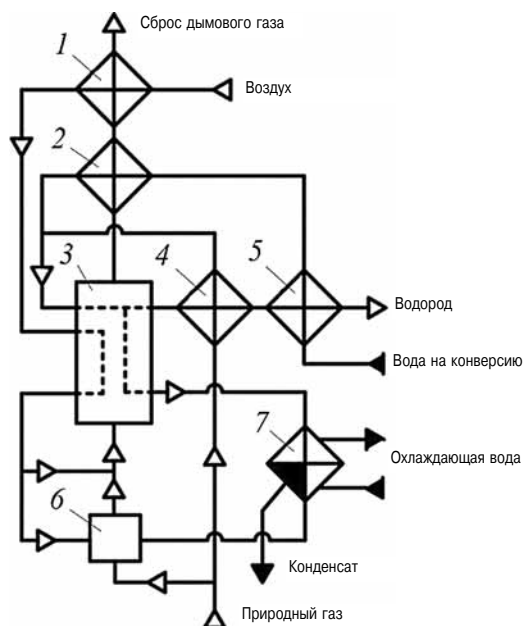


Рис. 11. Принципиальная схема моноблочного конвертора филиала ЦНИИ СЭТ:

1 — подогреватель воздуха; 2 — парогенератор; 3 — термохимический реактор; 4 — подогреватель топлива; 5 — подогреватель воды; 6 — горелочное устройство; 7 — осушитель остаточного синтез-газа

На рис. 13 представлена схема компоновки реакционной зоны конвертора из однотипных конверсионных элементов. В разрабатываемой конструкции конвертора требуемое соответствие водородопроницаемости мембран ДОВ (1) и активности катализатора реакционной зоны достигается путем согласования внешней формы и размеров ДОВ с формой, размерами и размещением каталитических элементов на носителе из ВПЯМ (2) относительно мембран во внутреннем объеме конверсионного элемента (3). Данное техническое решение было разработано филиалом ЦНИИ СЭТ при участии ИК СО РАН им. Г.К. Борескова.

Разработанная технология и технические решения конверсии углеводородного топлива с отбором водорода непосредственно из зоны реакции защищены патентами РФ на изобретения и полезные модели [15], часть из них являются «ноу-хау» фирмы и охраняются режимом коммерческой тайны.

В настоящее время в промышленно развитых странах мира проходят опытную эксплуатацию экономичные (коэффициент использования топлива — более 80 %) ЭЭУ с ЭХГ на основе топливных элементов с твердооксидным электролитом (ТОТЭ) [7, 18].

Большой интерес к разработке ЭЭУ данного типа не случаен и объясняется их основными достоинствами: использование неплатиновых ката-

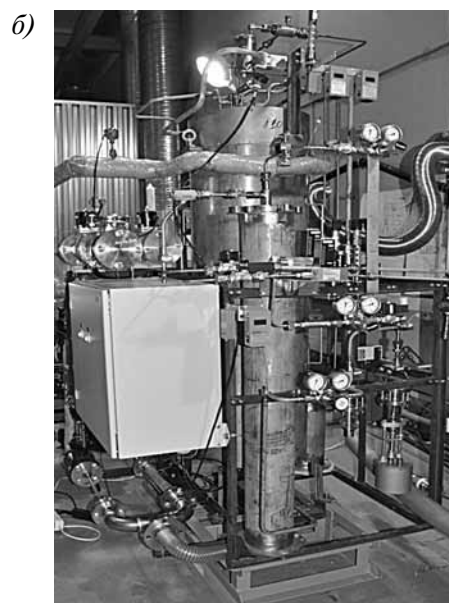
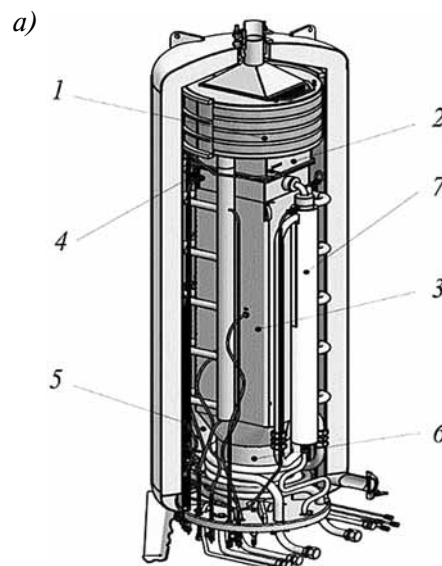


Рис. 12. Моноблочный конвертор филиала ЦНИИ СЭТ:

а — конструкция; б — конвертор в составе энергоустановки на экспериментальном стенде (все обозначения соответствуют рис. 11)

лизаторов, а также водородосодержащих газов в качестве топлива, в том числе полученных в результате газификации углей, отсутствие фазовых превращений твердого электролита и т. п.

В ТОТЭ наряду с электроэнергией, генерируется высокопотенциальная теплота, которую можно использовать в газовой турбине.

ТОТЭ отличаются простотой конструкции и функционируют при очень высоких температурах 800–1000 °С. Такие высокие температуры позволяют использовать относительно «грязное», неочищенное топливо. В качестве топлива могут применяться природный и синтетические водородосодержащие газы.

В отличие от ТПТЭ, электроды ТОТЭ не содержат драгоценных металлов. Анод, катод и электролит ТОТЭ изготовлены из специальных сортов керамики. Наиболее часто в качестве электролита используется смесь диоксида циркония и оксида иттрия, но могут использоваться и другие оксиды. Электролит образует кристаллическую решетку, покрытую с обеих сторон пористым электродным материалом. Конструктивно такие элементы выполняются в виде трубок или плоских плат, что позволяет при их изготовлении использовать технологии, широко применяемые в электронной промышленности.

В России работы по созданию ЭХГ на основе ТОТЭ начались еще в 1991 г., когда была создана научно-производственная кооперация предприятий под руководством ОАО «Специальное конструкторское бюро котлостроения (СКБК)» (впоследствии вошло в состав ФГУП ЦНИИ СЭТ) в составе предприятий Уральского региона, в том числе Института высокотемпературной электрохимии (ИВТЭ УрО РАН) — основоположника разработок ТОТЭ в России.

В ходе работ, совместно с ИВТЭ УрО РАН, была создана новая отечественная тонкопленочная технология изготовления ТОТЭ трубчатой конструкции, с помощью которой выполнен макетный образец батареи ТОТЭ мощностью 1 кВт,

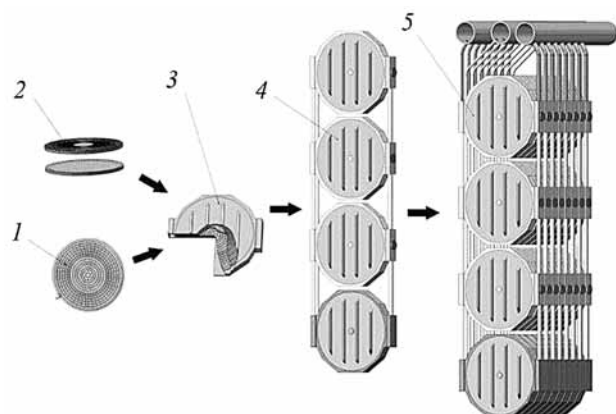


Рис. 13. Схема компоновки реакционной зоны конвертора: 1 — диффузионный отделитель водорода (ДОВ); 2 — каталитический элемент на носителе из высокопористого проницаемого ячеистого материала (ВПЯМ); 3 — конверсионный элемент; 4 — конверсионная секция; 5 — конверсионная система

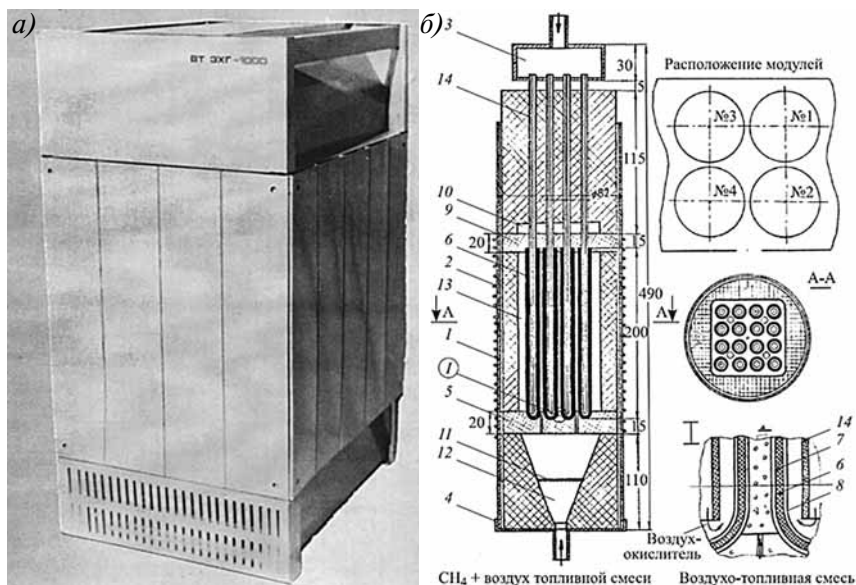


Рис. 14. Макетный образец батареи ТОТЭ мощностью 1 кВт:

а — внешний вид; б — эскиз основных элементов модуля; 1 — корпус; 2 — стартовый нагреватель; 3 — коллектор воздуха-окислителя; 4 — пробка; 5 — решетка; 6 — несущий электролит; 7 — топливный электрод (анод); 8 — воздушный электрод (катод); 9 — газоразделительная решетка; 10 — камера дожигания; 11 — решетка для катализатора конверсии; 12 — зона ввода топливной смеси; 13 — рабочая зона; 14 — трубки подвода воздуха-окислителя

Таблица 4

Характеристики макетного образца батареи ТОТЭ, мощностью 1 кВт

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
Расход метановоздушной смеси (на 1 модуль), нл/ч	340
Давление метановоздушной смеси, мм вод.ст.	10–20
Расход воздуха-окислителя (на 1 модуль), нл/ч	2000
Давление воздуха-окислителя, мм вод.ст.	10–40
Температура уходящих газов, °С	150–200
Объем катализатора ГИАП-18 (на 1 модуль), см ³	170
Масса сборки из 4-х модулей, кг	60
Электрический КПД, %	43
Время пуска, ч	8

прошедший всесторонние испытания на стенде ОАО СКБК. На рис. 14 представлен внешний вид и эскиз основных элементов модернизированного макетного образца батареи ТОТЭ, состоящей из 4-х модулей, суммарной мощностью 1 кВт, а в табл. 4 — его основные характеристики [4].

В 1997 г. ОАО СКБК под руководством главного конструктора энергоустановок на топливных элементах В.Б. Авакова разработало принципиально новый тип ЭХГ на основе ТОТЭ с неразделенным газовым пространством, работающих на метановоздушной смеси [2].

Начиная с 2007 г. ситуация с господдержкой разработок ЭЭУ с ТОТЭ коренным образом изменилась. Работы по созданию энергоустановок

на основе ТОТЭ для станций катодной защиты газопроводов, включены в состав Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы». Головной исполнитель комплексного проекта — ФГУП ЦНИИ СЭТ основной исполнитель работ по ЭЭУ с ТОТЭ — РФЯЦ ВНИИТФ (г. Снежинск).

Окончание в следующем номере

Литература

1. Аваков В.Б., Зинин В.И., Ландграф И.К. Автономные энергоустановки на основе высокотемпературных электрохимических генераторов для промышленных и коммунальных объектов // Теплоэнергоэффективные технологии. — 1997. — № 4. — С. 25–29.
2. Аваков В.Б., Ландграф И.К., Кулаков Г.В. и др. Состояние и потенциал развития водородной энергетики // Академия энергетики. — 2008. — № 4. — С. 28–32.
3. Аваков В.Б., Богдановская В.А., Ландграф И.К. и др. Характеристики мембранно-электродных блоков водородо-воздушных топливных элементов с ртсост/с-катализатором // Электрохимия. — М., 2014. Т. 50, № 7. — С. 733.
4. Аваков В.Б., Ландграф И.К., Ковалевский В.П. Экспериментальная стендовая доводка конструкции и эксплуатационных режимов твердооксидного электрохимического генератора мощностью около 1000 Вт // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2014. — Вып. 81 (365). — С. 5–24.
5. Аваков В.Б., Хайров Д.А., Ландграф И.К. и др. Разработка моноблочного конвертора углеводородного топлива с отбором водорода из зоны реакции // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2017. — Вып. 2 (380). — С. 111–120.
6. Дядик А.Н., Замуков В.В., Дядик В.А. Корабельные воздушонезависимые энергетические установки. — СПб. : Судостроение, 2006. — 424 с.
7. Ковалевский В.П., Аваков В.Б., Ландграф И.К. Конструкции трубчатых твердооксидных топливных элементов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2014. — Вып. 81 (365). — С. 25–50.
8. Аверьянов В.К., Карасевич А.М., Сайданов В.О. и др. Системы малой энергетики. Современное состояние и перспективы развития. / под ред. Аверьянова В.К. — М. : ИД «Страховое ревю», 2008. Т. 1. — 466 с.
9. Сайданов В.О., Дыбок В.В., Скляренко Е.В. Экспериментальное исследование работы дизеля 6Ч15/18 с системой термохимической обработки топлива по нагрузочной характеристике // Двигателестроение. — 1991. — № 12. — С. 5–6.
10. Сайданов В.О., Агафонов А.Н., Гудзь В.Н. Комбинированные энергоустановки объектов малой энергетики. — СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2005. — 262 с.
11. Сайданов В.О., Михайлов А.К., Ландграф И.К. Энергетические установки на базе топливных элементов // Новости электротехники. — 2007. — № 5 (47). — С. 2–5; № 6 (48). — С. 27–29.
12. Патент РФ 2206777 С1 МПК 7 F 02 G 5/00. Способ работы комбинированной энергоустановки для совместной выработки электрической и тепловой энергии / Сайданов В.О., Агафонов А.Н., Аваков В.Б., Ландграф И.К. — Оpubл. 20. 06. 2003. Бюл. № 17.
13. Патент РФ 2328060 С1 МПК H01M 8/00. Топливный элемент и батарея топливных элементов / Аваков В.Б., Кулаков Г.В., Ландграф И.К. и др. — Оpubл. 27. 06. 2008., бюл. № 18.
14. Патент РФ 114808 С1 МПК H01M 8/00. Полномасштабный топливный элемент с твердополимерным электролитом для батарей топливных элементов мощностью около 60 кВт / Аваков В.Б., Кулаков Г.В., Ландграф И.К. и др. — Оpubл. 25. 10. 2011.
15. Патент РФ 152752 С1 МПК G01B 3/34. Конвертор паровой органического топлива на базе нежаростойких конструкционных материалов со сниженными потерями энергии с уходящими газами / Аваков В.Б., Ландграф И.К., Хайров Д.А. и др. — Оpubл. 20. 06. 2015.
16. Патент РФ 154716 С1 МПК H01 M 8/00. Батарея водородовоздушная многосекционная для энергоустановок мегаваттного класса / Аваков В.Б., Ландграф И.К., Хайров Д.А. и др. — Оpubл. 20. 06. 2015.
17. Бредихин С.И., Голодницкий А.Э., Истомин С.Я., Ковалевский В.П., Филиппов С.П. / Стационарные энергетические установки с топливными элементами: Материалы, Технологии, Рынки. — М. : НТФ «Энергопрогресс» Корпорации ЕЭЭК, 2017 г.
18. Yoshinori Koboyashi, Yoshima Sa Ando, Tatsuo Kabata, Masanori Nishiura, Kazuo Tomida, Norisha Mataka. Extremely high-efficiency thermal power system-solid oxide fuel cell (SOFC) triple combined-cycle system // Mitsubishi Heavy Industries technical review. — 2011. Vol. 48. — № 3. — P. 9–15.

ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ УГОЛЬНЫХ КОТЛОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

*А.В. Бондарев, к.т.н., ВА МТО, Санкт-Петербург
Б.И. Морозов, к.т.н., зам. директора, ОАО «Авангард», Санкт-Петербург
С.Н. Смолинский, нач., ВИ(ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург*

Выполнен анализ технического состояния систем теплоснабжения (СТС) в муниципальных и ведомственных образованиях РФ. Разработаны мероприятия по совершенствованию СТС в процессе реконструкции и модернизации котельных установок с применением котлоагрегата высокотемпературного кипящего слоя КВП-1,74 ВТКС для сжигания твердого топлива в автоматическом режиме. Представлена методика экспресс-оценки выбора экономически целесообразного варианта реконструкции СТС на основе теории производственных функций.

Теплоснабжение существенной части муниципальных образований и ведомственных объектов осуществляется от отопительных котельных установок и тепловых сетей. Из общего числа котельных в системах теплоснабжения значительная часть приходится на низкоэффективные угольные котельные с неудовлетворительными экономическими и экологическими показателями: КПД 40–50 %, выбросы вредных веществ, включая золы и сажи, значительно превышающие предельно-допустимые концентрации. Такие котельные укомплектованы котлами со слоевыми ручными топками с отсутствием какой-либо механизации и автоматизации технологических процессов, топливоподготовки, топливоподдачи, горения, шлакозолоудаления, газоочистки.

Только на объектах министерства обороны число низкоэффективных угольных и жидкотопливных котельных превышает 2500, при этом более 500 котельных по данным ПАО «Газпром» не подлежат газификации из-за значительной удаленности от магистральных и сетевых газопроводов.

Тепловые сети, находящиеся в неудовлетворительном состоянии, создавались во второй половине XX века, требуют замены и технической модернизации. Функционирование старых сетей характеризуются повышенными потерями теплоты через изношенную тепловую изоляцию, низкой надежностью с частыми аварийными разрывами

трубопроводов, что сопряжено со значительным экономическим ущербом.

Данное состояние систем теплоснабжения требует комплексной модернизации, включающей строительство или реконструкцию угольных котельных и тепловых сетей с применением новых энергоэффективных технологий и оборудования.

Одним из наиболее перспективных направлений модернизации и технического перевооружения существующих угольных котельных является применение технологии сжигания угля в высокотемпературном «кипящем» слое (ВТКС). Котлоагрегаты КВП-1,74-ВТКС с высокотемпературным кипящим слоем с узкой наклонной подвижной колосниковой решеткой единичной мощностью 1,5 Гкал/ч (1,74 МВт) сертифицированы и могут серийно применяться при строительстве и реконструкции угольных котельных. За счет увеличения КПД в два раза (до 80 %) при использовании котлов ВТКС можно ожидать снижение расходов на топливо на 50 %, что сократит сроки окупаемости капитальных вложений до 4 лет.

В настоящее время на кафедре двигателей и тепловых установок ВИ(ИТ) ВА МТО накоплен значительный опыт разработки и промышленного изготовления высокоэффективных, автоматизированных котлоагрегатов КВП-1,74-ВТКС, а также опыт проектирования, строительства и реконструкции угольных котельных с применением этих котлоагрегатов. Результаты исследований по данному направлению нашли отражение в работах ученых кафедры, возглавляемой д.т.н., профессором А.В. Смирновым [3, 4].

Наряду с научно-техническими разработками высокоэффективных, автоматизированных котлоагрегатов с топками кипящего слоя на кафедре разработаны типовые проектные решения по компоновке оборудования, а также по расположению на генеральном плане зданий и сооружений котельных. В состав котельной установки входит здание котельной, механизированный укрытый угольный склад с мостовым краном, грейферным ковшом и дробильным отделением, механизированные системы топливоподдачи и

шлакозолоудаления скребкового типа, система газоочистки.

До настоящего времени в МО РФ только на двух пилотных объектах построены котельные с котлами высокотемпературного кипящего слоя КВП-1,74-ВТКС — в экспериментальной механизированной угольной котельной п. Горская, Ленинградской области и в теплоэнергетическом учебно-исследовательском комплексе, расположенном на полигоне ВИ(ИТ) в п. Приветнинское Ленинградской области [2].

На рис. 1 приведены общий вид котельной установки с продольным, параллельным и поперечным расположением котельной и угольного склада. Компоновка оборудования, транспортеры подачи угля и шлакозолоудаления приведены на рис. 2.

С использованием этих проектных решений силами ООО «Тепломех» (Санкт-Петербург) разработана проектная и рабочая документации для строительства и реконструкции угольных котельных по технологии ВТКС для ряда объектов Ленинградской и Псковской областей, г. Барнаул (Алтайский край) и других регионов РФ.

Реконструкция угольных котельных по технологии ВТКС в зависимости от состояния и характеристик реконструируемой котельной может осуществляться по одному из вариантов, представленных в табл. 1.

Модернизация тепловых сетей включает замену трубопроводов на новые в современной ППУ изоляции, применение четырехтрубной схемы тепловой сети с современными средствами автоматического регулирования, в том числе с использованием частотных преобразователей, и др.

Модернизация систем теплоснабжения сопряжена со значительными капитальными затратами, составляющими для котельных до 13–20 млн руб. на 1 МВт установленной мощности, что сопоставимо с затратами на модернизацию тепловых сетей.

В табл. 2 приведены данные по капитальным затратам на реконструкцию действующих котельных с применением технологии ВТКС.

В сложившихся экономических условиях получение бюджетного (и внебюджетного) финансирования для строительства и реконструкции систем теплоснабжения маловероятно, если речь идет о

значительных единовременных капитальных затратах. В этих условиях становится актуальной задача определения первоочередных приоритетных объектов для строительства и реконструкции, а также задача выбора приоритетного варианта проектного решения.

При рассмотрении нескольких вариантов реконструкции сравнительная оценка эффектив-

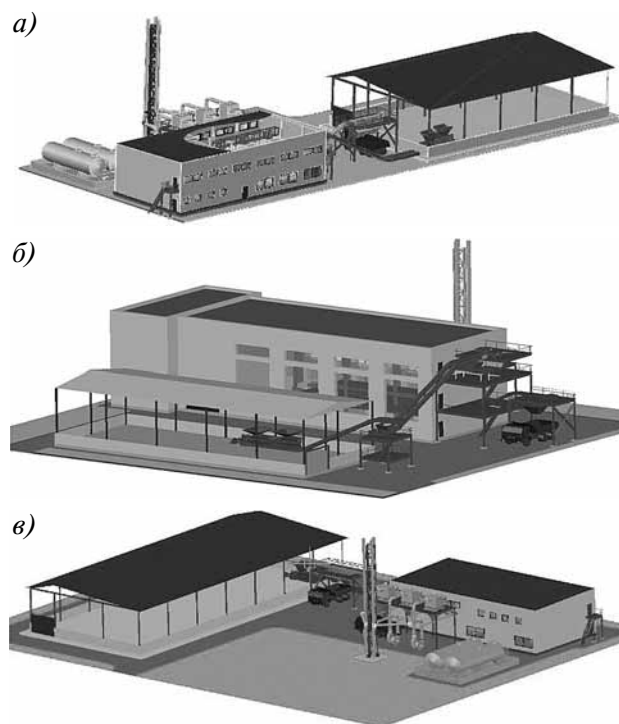


Рис. 1. Общий вид котельной:

а — с продольным расположением котельной и угольного склада; б — параллельным расположением котельной и угольного склада; в — поперечным расположением котельной и угольного склада

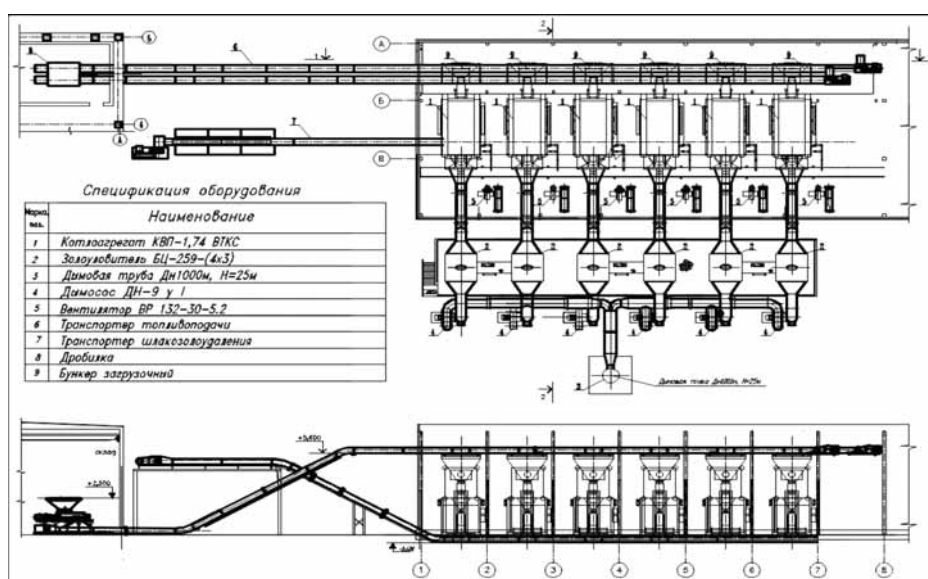


Рис. 2. Компоновка оборудования, транспортеры углеподачи и шлакозолоудаления

ности затрат известными методами на стадии «Технико-экономическое обоснование» или «Обоснование инвестиций», становится трудоемкой.

Для принятия оптимального решения о варианте реконструкции желательно иметь некий более упрощенный инструментарий, с помощью которого можно было бы выполнять сравнительный анализ без подробных расчетов всех необходимых технико-экономических показателей. Другими словами, представляется актуальной задача разработки экспресс-метода сравнительной технико-экономической оценки эффективности капитальных вложений при строительстве и реконструкции угольных котельных объектов МО РФ.

Первым положительным результатом в решении сформулированной задачи стали разработки Б.И. Морозова, выполненные на кафедре теплосиловых установок ВИТУ с использованием метода экономико-математического моделирования с нахождением математических зависимостей между основными показателями котельных, выраженных в виде производственных функций [5].

Применение этого метода позволяет решать задачи, связанные со взаимозамещаемостью и оптимальным распределением материальных ресурсов при проектировании и строительстве котельных установок, и другие более сложные, комплексные задачи, относящиеся к любым другим техническим системам.

Однако данные результаты были получены для отопительно-производственных котельных малой и средней мощности при работе на газе и мазуте. В них не отражены особенности технологических процессов, наличие нового оборудования и проектных решений, характерных для угольных котельных малой мощности при сжигании угля по технологии ВТКС.

На кафедре теплосиловых установок ВИТУ под руководством профессора А.В. Смирнова инженером И.С. Рода был собран и проанализирован обширный статистический материал по технико-экономическим показателям известных проектных решений реконструкции котельных с применением технологии ВТКС. С использованием результатов анализа были разработаны и рассчитаны однофакторные и двухфакторные производственные функции в виде семейства графических зависимостей (изоквант) удельных капитальных затрат и себестоимости выработанной теплоты.

С применением изоквант можно выполнять экспресс-оценку технико-экономических показателей только для строительства и реконструкции угольных котельных малой мощности с энергоэффективными котлами высокотемпературного кипящего слоя. При этом подразумевается, что управление работой таких котельных осуществ-

Таблица 1

Варианты реконструкции действующих котельных

Вариант	Существующие здания и оборудование	Строящиеся здания и оборудование
1		➤ здание котельной; ➤ укрытый топливный склад; ➤ дымовая труба; ➤ система топливоподачи; ➤ система ШЗУ; ➤ система воздухоподдачи и газоочистки; ➤ замена всего основного и вспомогательного оборудования; ➤ замена инженерных систем котельной
2	➤ здание котельной	➤ укрытый топливный склад; ➤ дымовая труба; ➤ система топливоподачи; ➤ система ШЗУ; ➤ система воздухоподдачи и газоочистки; ➤ замена всего основного и вспомогательного оборудования; ➤ замена инженерных систем котельной
3	➤ здание котельной; ➤ укрытый топливный склад	➤ дымовая труба; ➤ система топливоподачи; ➤ система ШЗУ; ➤ система воздухоподдачи и газоочистки; ➤ замена всего основного и вспомогательного оборудования; ➤ замена инженерных систем котельной
4	➤ здание котельной; ➤ укрытый топливный склад; ➤ дымовая труба; ➤ система топливоподачи; ➤ система ШЗУ; ➤ система воздухоподдачи и газоочистки;	➤ замена всего основного и вспомогательного оборудования; ➤ замена инженерных систем котельной; ➤ замена котлов на котлы КВП-1,74-ВТКС
5	➤ здание котельной; ➤ укрытый топливный склад; ➤ дымовая труба; ➤ система топливоподачи; ➤ система ШЗУ; ➤ система воздухоподдачи и газоочистки; ➤ вспомогательное оборудование; ➤ замена инженерных систем котельной	➤ замена существующих котлоагрегатов на котлы КВП-1,74-ВТКС; ➤ замена электрооборудования котлов; ➤ замена системы автоматизации котлов

ляется оператором дистанционно со щита автоматики в соответствии с режимной картой. В этих щитах имеются органы управления подачей топлива, первичного и вторичного воздуха, разрежения, удаления шлака из топки котла. Однако ручное управление работой котла на переходных режимах может сопровождаться

Таблица 2

**Капитальные затраты на реконструкцию
действующих котельных**

Вариант рекон- струкции	Сметная стоимость в тыс. руб. (в базовых ценах 2000 года)			
	Строй- тельные работы	Монтажные работы	Оборудо- вание	Всего
3,5 МВт 3,0 Гкал/ч				
1	2965,8	1306,95	4987,5	9260,25
2	1002,75	1306,95	4987,5	7297,2
3	599,7	1306,95	4987,5	6894,15
4	157,2	882,6	3650,4	4690,2
5	41,85	673,8	3277,2	3992,85
5,2 МВт 4,5 Гкал/ч				
1	3858,756	1844,922	7326,006	13029,68
2	1330,32	1844,922	7326,006	10501,25
3	811,302	1844,922	7326,006	9982,23
4	213,9	1231,788	5586,792	7032,48
5	63,756	717,6	5081,712	5863,068
7,0 МВт 6,0 Гкал/ч				
1	4089,33	2076,732	8458,758	14624,82
2	1450,89	2076,732	8458,758	11986,38
3	909,216	2076,732	8458,758	11444,71
4	224,154	1372,896	6617,772	8214,822
5	69,426	721,728	5232,402	6023,556
8,7 МВт 7,5 Гкал/ч				
1	4126,87	2308,46	9388,61	15823,94
2	1535,6	2308,46	9388,61	13232,67
3	944,57	2308,46	9388,61	12641,64
4	242,77	1531,31	7552,49	9326,57
5	71,72	678,15	5085,3	5835,17
10,5 МВт 9,0 Гкал/ч				
1	4094,6	2421,1	9941,2	16456,9
2	1477,2	2421,1	9941,2	13839,5
3	939,8	2421,1	9941,2	13302,1
4	250,9	1600,3	8074,2	9925,4
5	73,1	720,3	5590	6383,4

перерасходом топлива. Для повышения экономичности работы котлов на переходных режимах необходимо оснащение их современными программируемыми логическими контроллерами с использованием средств микропроцессорной техники и соответствующего программного обеспечения. Автоматизированная таким образом котельная может экономично работать в автоматическом режиме с минимальным числом эксплуатационного персонала. При несомненном повышении экономичности, и, как следствие, снижении годовых эксплуатационных расходов оснащение котельной средствами автоматизации повлечет за собой увеличение капитальных затрат, поэтому данное обстоятельство потребует уточнения разработанной методики экспресс-оценки.

Для решения сформулированной задачи по заданию ДЭС и ОКУ МО РФ в период с сентября 2016 г. и по декабрь 2017 г. выполнялась НИР (шифр «Энергоэффективность»).

В рамках данной НИР была разработана, разослана на 93 объекта МО РФ, собрана и обработана специальная опросная документация, на основании которой получена информация по технико-экономическим показателям существующих котельных и тепловых сетей по военным округам [2].

Статистическая обработка собранного материала позволила определить параметры двухфакторных производственных функций Кобба-Дугласа для систем теплоснабжения вида $C = A(pK)^\alpha C_M^\beta$.

Для удобства применения с помощью несложных преобразований была получена функциональная зависимость в виде

$$\frac{K}{K_0} = \left(\frac{C_{M0}}{C_M} \right)^{\frac{\beta}{\alpha}},$$

где C_M , C_{M0} — годовые приведенные расходы рассматриваемого и базового вариантов системы теплоснабжения; K , K_0 — капитальные затраты на строительство или реконструкцию рассматриваемого и базового вариантов системы теплоснабжения; α , β — параметры функции Кобба-Дугласа (коэффициенты эластичности по ресурсам).

Основной характеристикой, определяющей расположение изокванты на графиках, является величина отношения коэффициентов эластичности по ресурсам β/α . Значения этих отношений для различных групп котельных установок для годовых эксплуатационных расходов и приведенных затрат представлены в табл. 3.

На основе двухфакторных функций были определены отношения β/α для систем теплоснабжения. Значения их представлены в табл. 4.

Данные таблиц 3–4 в графической форме представлены на универсальной диаграмме кривых замещения материальных ресурсов (рис. 3).

Как видно из графиков, чем меньше величина отношения β/α , тем более полого располагается изокванта, а следовательно, меньшие дополнительные капитальные затраты должны компенсироваться большей экономией годовых материальных расходов. Для приведенных затрат величины β/α значительно меньше, чем для годовых эксплуатационных расходов (изокванты располагаются более полого), это определяет более рациональное использование дополнительных капиталовложений, связанное с нормативным сроком их окупаемости.

Таблица 3

Показатели степени β/α в уравнениях изоквант
для различных групп котельных установок

Группа котельных установок	Вид топлива	Значение отношения β/α	
		для годовых эксплуатационных расходов	для приведенных затрат
Котельные установки с котлами ВТКС	Уголь	6,4	1,7
Котельные установки с механизированными котлами	Уголь	10,5	2,8
Котельные установки с котлами ручного обслуживания	Уголь	30,4	8,2
Котельные установки низкого давления малой мощности	Мазут	16,6	5,2

Таблица 4

Показатели степени β/α в уравнениях изоквант
для годовых эксплуатационных расходов
и приведенных затрат СТС

Группы систем теплоснабжения (СТС)	Вид топлива	Тип прокладки тепловой сети					
		бесканальная в сухих грунтах	бесканальная в мокрых грунтах	в непроходных каналах в сухих грунтах	в непроходных каналах в мокрых грунтах	надземная в сухих грунтах	надземная в мокрых грунтах
СТС с котельными установками с котлами ВТКС	Уголь	$\frac{2,98}{0,87}$	$\frac{2,50}{0,75}$	$\frac{2,01}{0,63}$	$\frac{1,27}{0,4}$	$\frac{2,82}{0,84}$	$\frac{2,44}{0,74}$
СТС с котельными установками с механизированными котлами	Уголь	$\frac{4,87}{1,69}$	$\frac{4,09}{1,46}$	$\frac{3,28}{1,22}$	$\frac{2,07}{0,78}$	$\frac{4,61}{1,63}$	$\frac{3,99}{1,43}$
СТС с котельными установками с котлами ручного обслуживания	Уголь	$\frac{7,09}{2,44}$	$\frac{5,91}{2,11}$	$\frac{4,75}{1,78}$	$\frac{3,16}{1,26}$	$\frac{6,28}{2,19}$	$\frac{5,41}{1,94}$
СТС с котельными установками низкого давления малой мощности	Мазут	$\frac{3,98}{1,55}$	$\frac{2,7}{1,1}$	$\frac{1,76}{0,69}$	$\frac{0,63}{0,16}$	$\frac{2,95}{1,21}$	$\frac{2,17}{0,88}$

Примечание. В таблице определены отношения β/α для систем теплоснабжения:

— в числителе — для годовых эксплуатационных расходов;
— в знаменателе — для приведенных затрат.

Полученные результаты позволяют разработать методику экспресс-оценки эффективности капитальных вложений при реконструкции систем теплоснабжения. Методика позволит учитывать эффект от внедрения энергосберегающих и природоохранных технологий, материалов и оборудования, а также учитывать снижение среднего ожидаемых ущербов за счет повышения энергетической безопасности (табл. 5).

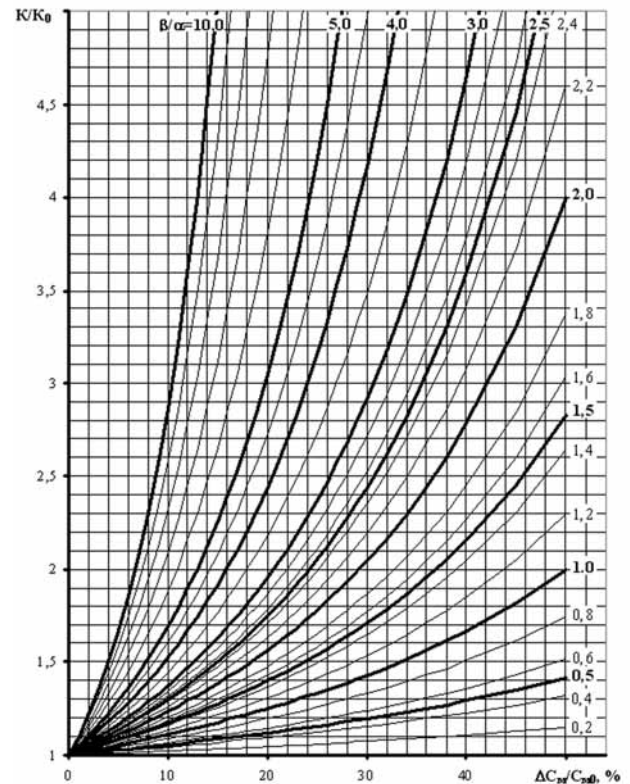


Рис. 3. Диаграмма кривых замещения (изоквант)
для двухфакторной функции Кобба-Дугласа
вида $C = A(pK)^\alpha C_M^\beta$

Практическое применение методики сводится к работе с универсальной диаграммой, приведенной на рис. 3. На диаграмме представлено семейство кривых в форме зависимостей снижения материальной части эксплуатационных расходов C_M от капитальных затрат при реконструкции. По оси абсцисс отложены значения эксплуатационных расходов в результате реконструкции (в %), а по оси ординат относительное увеличение капитальных затрат.

Следует отметить, что в материальную часть эксплуатационных расходов включены затраты на топливо, электроэнергию, воду, заработная плата, платежи за загрязнение окружающей среды, а также ущерб от возможных аварий (ущерб от перебоев в снабжении теплом потребителей). В материальную часть эксплуатационных расходов не включаются затраты на текущий ремонт и амортизационные отчисления. Такое разделение обусловлено тем, что в результате капитальных вложений на реконструкцию котельной материальная составляющая эксплуатационных расходов снижается вследствие внедрения энергосберегающих и природоохранных технологий и технических решений по повышению энергетической безопасности, а затраты на текущий ремонт и амортизацию растут с увеличением капитальных вложений.

**Результаты оценки среднеожидаемых годовых ущербов от перебоев теплоснабжения
на 1 МВт установленной мощности**

Категория ущерба	Характеристика категории ущерба	Вероятность появления ущерба	Величина среднеожидаемого ущерба, млн руб.
1	Частичное падение мощности системы теплоснабжения и сопутствующим снижением температуры воздуха в отапливаемых помещениях до 12 °С. Ущерб от нарушений в теплоснабжении такого типа определяется дискомфортом в отапливаемых помещениях и связанной с ним повышенной заболеваемостью людей, перерасходом электроэнергии на обогрев помещений	0,43–0,52	0,05–0,133
2	Падение тепловой мощности, при котором начинается замерзание теплоносителя в некоторых участках тепловых сетей, в стояках систем отопления зданий. При этом, ущерб будет состоять из затрат на восстановление разрушенных трубопроводов и отопительных приборов и затрат по первой группе ущербов	0,17–0,21	0,034–0,088
3	Полное прекращение теплоснабжения и пребывании в таком состоянии, когда полностью замерзают целые кварталы и даже целые поселки с массовой эвакуацией людей	0,03–0,05	До 0,038

Каждая кривая на диаграмме рис. 3 соответствует определенному соотношению коэффициентов эластичности β/α в пределах от 0,2 до 10,0 и более. Соотношение β/α существенно зависит от типа котлов (паровые, водогрейные), мощности котельной (малая, до нескольких МВт или средняя, несколько десятков МВт), вида топлива (уголь, газ, мазут), и типа прокладки тепловых сетей (бесканальная, в непроходных каналах, надземная).

Численные значения β/α приведены в табл. 4 для годовых эксплуатационных расходов и приведенных затрат соответственно.

Из диаграммы следует, что любая точка пространства принадлежит какой-либо кривой со своим значением β/α . Любая кривая соответствует сроку окупаемости капитальных вложений, равному нормативному. Любой точке на диаграмме соответствует снижение материальной части эксплуатационных расходов.

В дополнение к диаграмме рис. 3 и табл. 4 при оценке эффективности капитальных вложений необходимо использовать табл. 6, где приведены численные значения (%) содержания отдельных составляющих годовых материальных эксплуатационных расходов (на топливо, электроэнергию, воду и др.) от всех материальных эксплуатационных расходов.

В соответствии с приведенными пояснениями и комментариями методика оценки эффективности капитальных вложений сводится к нескольким несложным действиям:

1. Из табл. 4 выбирается для рассматриваемой системы теплоснабжения значение отношения β/α для приведенных затрат.

2. Для полученного значения β/α выбирается одна из семейства кривых на диаграмме рис. 3, которая будет являться рабочей кривой.

3. Для реальных значений экономии материальных эксплуатационных расходов ΔC_m , ожи-

даемой от внедрения автоматизации, энергосберегающих и природоохранных мероприятий, технических решений по повышению энергетической безопасности и необходимых для этого дополнительных капитальных вложений K/K_0 , находим рабочую точку на диаграмме.

Это осуществляется в следующей последовательности:

3.1. Определяем необходимые для сравнения технико-экономические показатели исходного варианта.

По табл. 6 находим для рассматриваемого варианта СТС доли составляющих в суммарных материальных затратах C_i/C_m , по которым ожидается экономия в результате реконструкции.

По тепловой мощности с использованием графиков или по формуле для СТС в зависимости от группы котельной и типа прокладки тепловых сетей определяем удельные капитальные затраты на строительство $k_{уд}$. По удельным капитальным затратам и тепловой мощности определяется стоимость исходного варианта СТС до реконструкции $K_0 = k_{уд} \cdot Q_{уст}$ в базовых ценах 2000 г. без НДС.

3.2. Определяем соотношение $\Delta C_m/C_{m0}$ и K/K_0 для предлагаемого и исходного вариантов.

Общая экономия материальных расходов C_m/C_{m0} определяется суммированием произведений экономии составляющей материальных расходов C_i в процентах и доли этой составляющей C_i/C_m .

Отношение K/K_0 определяется по выражению $K/K_0 = (K_0 + \Delta K)/K_0$, где ΔK — дополнительные капитальные затраты на реконструкцию.

3.3. По значениям $\Delta C_m/C_{m0}$ и K/K_0 на диаграмме (рис. 3) определяем рабочую точку.

4. Если рабочая точка попадает на рабочую кривую, соответствующую выбранному соотношению β/α , то это означает, что срок окупаемости капитальных вложений равен нормативному (8,4 года).

Составляющие текущих материальных расходов для различных групп систем теплоснабжения

Группы систем теплоснабжения (СТС)	Вид топлива	Доли составляющих текущих материальных расходов				
		на топливо $C_{\text{т}}/C_{\text{м}}, \%$	на электроэнергию $C_{\text{эл}}/C_{\text{м}}, \%$	на воду $C_{\text{в}}/C_{\text{м}}, \%$	зарплата $C_{\text{з.п}}/C_{\text{м}}, \%$	общекотельных и др. $C_{\text{общ}}/C_{\text{м}}, \%$
СТС с котельными установками с котлами ВТКС	Уголь	$\frac{40-60}{60-80}$	$\frac{10-12}{8-9}$	$\frac{9-12}{7-10}$	$\frac{10-15}{6-9}$	$\frac{7-10}{4-6}$
СТС с котельными установками с механизированными котлами	Уголь	$\frac{35-50}{50-70}$	$\frac{7-12}{6-8}$	$\frac{10-14}{8-10}$	$\frac{12-20}{9-12}$	$\frac{8-12}{6-8}$
СТС с котельными установками с котлами ручного обслуживания	Уголь	$\frac{35-45}{45-60}$	$\frac{7-11}{4-8}$	$\frac{8-12}{8-12}$	$\frac{25-35}{20-30}$	$\frac{9-12}{10-13}$
СТС с котельными низкого давления малой мощности	Мазут	$\frac{45-50}{50-55}$	$\frac{4-5}{3-4}$	$\frac{9-12}{7-9}$	$\frac{30-35}{25-30}$	$\frac{10-12}{8-10}$

Примечание.

1. В таблице указаны значения долей составляющих текущих материальных расходов для различной тепловой мощности системы теплоснабжения:

- в числителе — при установленной тепловой мощности $Q_{\text{уст}}$ до 5 МВт;
 - в знаменателе — при установленной тепловой мощности $Q_{\text{уст}}$ от 5 до 15 МВт.
2. Значения долей в пределах указанных интервалов следует принимать:
- для расходов на топливо и воду при большей мощности — большее значение;
 - для других расходов при большей мощности — меньшие значения.

5. Если рабочая точка попадает в область диаграммы выше рабочей кривой, то срок окупаемости будет больше нормативного.

6. Если рабочая точка попадает в область диаграммы ниже рабочей кривой, то срок окупаемости будет меньше нормативного.

Следует заметить, что рабочая точка при попадании ее в область диаграммы ниже рабочей кривой всегда будет принадлежать одной из других кривых с другим значением соотношения β/α . Чем меньше будет значение β/α для кривой, на которую попадает рабочая точка, тем больше будет разница между реальным и нормативным сроком окупаемости. Поэтому при сравнении двух или нескольких вариантов реконструкции по положению рабочих точек можно легко оценить у какого варианта будет меньший срок окупаемости капитальных вложений.

Заметим, что выше изложена методика оценки эффективности капитальных вложений при реконструкции систем теплоснабжения по приведенным затратам. Такую оценку можно выполнить также по отношению β/α для годовых эксплуатационных расходов (табл. 6). При этом если рабочая точка попадает на рабочую кривую, то это означает, что капитальные затраты за счет снижения годовых эксплуатационных расходов будут окупаться бесконечно долго.

Если рабочая точка находится выше рабочей кривой, то капитальные вложения не окупятся никогда. Это может произойти, когда увеличение расходов на текущий ремонт и амортизацию будет превалировать над уменьшением материальных эксплуатационных расходов из-за экономии топлива, электроэнергии и т. п.

Если рабочая точка лежит ниже рабочей кривой, то тогда дополнительные капитальные

вложения будут окупаться. При этом сравнительная оценка сроков окупаемости рассматриваемых вариантов реконструкции должна проводиться аналогично тому, как это изложено выше для оценки по приведенным затратам.

Разработанная методика экспресс-оценки эффективности капитальных вложений при реконструкции систем теплоснабжения, позволяет на стадии принятия решений о выборе приоритетного варианта выполнять сравнительную оценку сроков окупаемости с учетом эффекта энергосбережения и повышения энергетической безопасности.

Литература

1. Бондарев А.В., Маллаев К.М., Смирнов А.В. Разработка и испытание модернизированного угольного котлоагрегата высокотемпературного кипящего слоя с устройством автоматического пуска // Двигателестроение. — 2017. — № 3 (269). — С. 35–43.
2. Смолинский С.Н. Оценка технико-экономической эффективности модернизации систем теплоснабжения с автоматизированными угольными котельными с котлами высокотемпературного кипящего слоя // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. — 2017. — № 656. — С. 183–189.
3. Бондарев А.В. Смирнов А.В., Кныш С.А., Карнов М.А., Проскуряков Д.А. Результаты режимной наладки и теплоснабжения котлоагрегата малой мощности КВП-1,74-ВТКС для сжигания низкосортных углей в высокотемпературном кипящем слое // Инженерные системы. — 2008. — № (37).
4. Смирнов А.В., Морозов Б.И., Рода И.С. и др. Разработка сборника нормативных показателей по эксплуатации угольных котельных с котлами высокотемпературного кипящего слоя для теплоснабжения объектов МО РФ: Отчет о НИР «Норматив» // СПб: ВИТУ, 2007.
5. Морозов Б.И. Использование экономико-математических методов для оценки характеристик отопительно-производственных котельных // Военная наука и образование — городу: Тез. докл. 1-й Городск. научн.-практич. конф. 20–22 мая 1997 г. — СПб., 1997. Ч. 1. — С. 186.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*А.С. Олейник, к.т.н, ст. преподаватель
Академия управления МВД России*

Приведены математические методы и модели совершенствования управления безопасностью критически важных объектов на примере дизельных электростанций. Представлено описание отечественного программного комплекса «Контрфорс» и даны примеры оценки безопасности объектов, поиска оптимальных вариантов их защиты для случаев террористических атак. Даны рекомендации по совершению методов моделирования безопасности объектов в целях информационно-аналитической поддержки принятия решений при выборе оптимальной стратегии защиты.

Критически важные объекты (КВО) — объекты, нарушение или прекращение функционирования которых может привести к потере управления субъектом Российской Федерации или подразделениями силовых структур либо к существенному снижению безопасности жизнедеятельности населения на длительный период.

К критически важным объектам можно отнести дизельные электростанции пунктов государственного управления, воинских частей, промышленных предприятий, атомных электростанций и социальных учреждений.

Рост степени организации и квалификации диверсионных групп, доступ к современным средствам вооружения, взрывным устройствам, оснащение средствами радиосвязи и спецтехникой требует расширения функциональных возможностей системы безопасности критически важных объектов (КВО) и, как следствие, ведет к усложнению ее структуры. Оперативный сбор, обработка и отображение информации от большого количества охранных и пожарных датчиков, контроль и управление доступом на охраняемую территорию людей с различными правами доступа невозможны без построения систем физической защиты (СФЗ) на основе использования комплексов современных инженерно-технических средств и квалифицированного персонала, обеспечивающих решение задач обнаружения и пресечения

несанкционированных действий. В условиях возрастающих возможностей современных технологий задача обеспечения безопасности объектов энергетики становится актуальной уже на стадии проектирования. Это связано с высокой стоимостью СФЗ и требованиями, предъявляемыми к их надежности.

В этой ситуации практически единственным методом, позволяющим проводить проверку принимаемых проектных решений, является метод математического моделирования, применение которого в обязательном порядке должно учитывать тот факт, что СФЗ представляет собой конфликтную систему с антагонистическими интересами, содержащую существенный элемент неопределенности.

Главное преимущество математических моделей состоит в том, что они являются удобным инструментом для изучения особенностей функционирования СФЗ важных государственных объектов (объектов энергетики). Модели позволяют оценить варианты поведения персонала СФЗ в тех или иных условиях, проанализировать возможные сценарии действий, предложить и сразу опробовать различные способы их совершенствования.

На основе проведенного анализа основных методов моделирования, используемых для решения задачи анализа уязвимости КВО установлено, что в проведенных ранее исследованиях недостаточно внимания уделялось рассмотрению безопасности КВО как одного из «участников» конфликтной ситуации с учетом в явном виде возможных действий как стороны нападения, так и стороны защиты для выбора наиболее рационального варианта защиты КВО.

Наиболее перспективными методами, позволяющими проводить объективный анализ конфликтных ситуаций, учитывая все возможные действия, как со стороны нападения, так и со стороны защиты КВО, являются методы математического и имитационного моделирования.

Характеристики известных методик и программных средств для исследования и анализа уязвимости КВО, особенностей их построения и использования приведены в таблице.

Характеристики программных средств анализа уязвимости КВО

Характеристики	Программы					
	EASI	ASSESS	СПРУТ	СПРУТ-ИМ	«Вера-2»	«Контрфорс»
Представление пространственной структуры объекта	Последовательность действий на маршруте	Схема последовательности действий	3-мерный электронный план	Последовательность действий на маршруте	Иерархическое дерево участков территории	3-мерный электронный план
Автоматический поиск наиболее опасных маршрутов	—	+	+	—	+	—
Ввод характеристик рубежей с помощью шаблонов	—	+	+	—	+	—
Наличие базы данных по средствам охраны	—	+	+	—	+	+
Количество исследуемых маршрутов	1	до 10	Не ограничено	1	Зависит от числа заданных секций и переходов	Не ограничено
Учет случайного характера времени действий нарушителей и сил охраны	+	—	+	+	+	+
Учет вида тактики действий сил охраны	—	—	+	—	+	+
Моделирование действий нескольких тактических групп нарушителей и сил охраны	—	+	+	—	—	+
Моделирование боевого столкновения	—	+	+	—	—	+
Разработчик	Министерство энергетики США	Лаборатория «Сандия», США	Центр анализа уязвимости НПП «Иста»	Центр анализа уязвимости НПП «Иста»	ФГУП СНПО «Элерон»	ГЦ АСУ ВВ МВД России

Рассмотрим более подробно отечественный программный комплекс «Контрфорс». За последние десять лет накоплен позитивный опыт применения этого комплекса, программные средства которого позволяет эксперту сделать вывод о соответствии безопасности предъявляемым требованиям, а также подготовить рекомендации представителям подразделений, выполняющим задачи по охране объекта по дальнейшему совершенствованию безопасности.

Для моделирования функционирования КВО и проведения исследования безопасности КВО формируется перечень исходных данных и необходимых документов (информационное обеспечение модели). Собранные данные используются при создании и проведении вычислительного эксперимента на имитационной модели.

К исходным данным и документам относятся:

- результаты обследования объектов;
- оценка уязвимости объекта (используются результаты анализа уязвимости объекта: описание объекта, угрозы, возможные маршруты движения нарушителей, уязвимые места, а также план охраны и обороны);

- растровые битовые массивы для создания реалистичных текстур структурных элементов объекта (текстуры объекта);

- результаты панорамной цифровой цветной фотосъемки объекта, содержащие данные для точной координатной привязки изображений к местности;

- характеристики элементарных участков СФЗ (системы физической защиты);

- формализованное описание состава и алгоритмов действий личного состава, вооружения и военной техники;

- сведения об оснащенности нарушителей — их штатное вооружение и инженерно-технические средства;

- сведения о группировке, численности, ролевом составе, характеристиках и других возможностях нарушителей (противодиверсионный паспорт объекта);

- исходные данные для разработки модели местности (рельефа) и трехмерных моделей зданий и сооружений (планы объекта, система внешних ограждений, схемы охраняемого объекта).

Алгоритм программного комплекса для каждого набора исходных данных в плане вычислительного

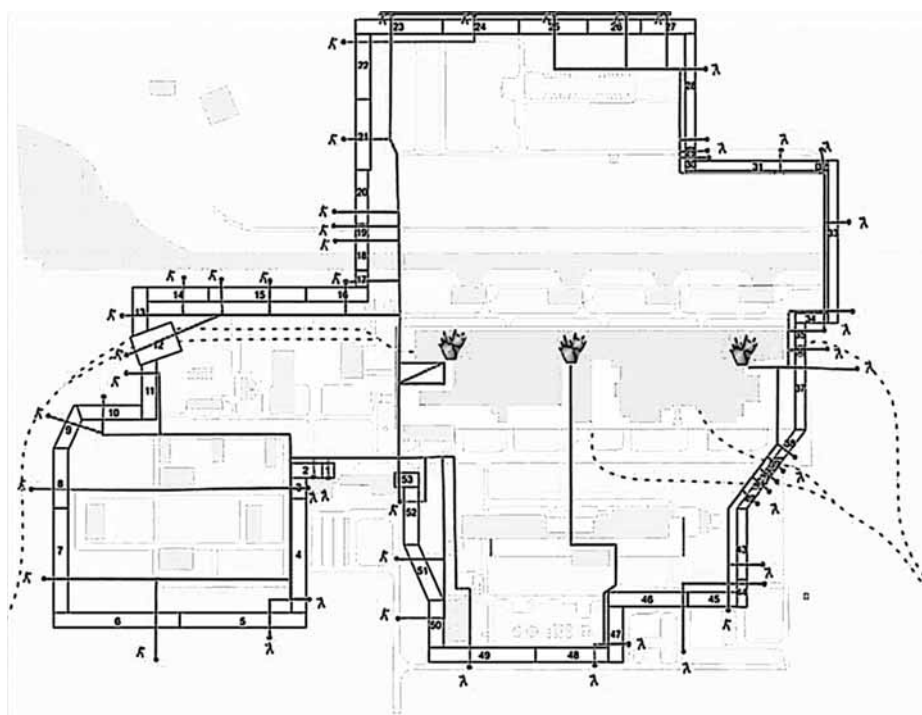


Рис. 1. Схема вариантов проникновения сил нападения на гипотетический объект

эксперимента формирует ситуационный план, который разрабатывается на основе плана охраны и обороны объекта. На ситуационный план наносятся маршруты движения нарушителей к це-

ли, характеристики нарушителей и другие данные.

Построение модели безопасности КВО осуществляется на основе структуры объекта защиты, в модель включаются все системы и связи, оказывающие влияние на охрану объекта защиты.

Вычислительный эксперимент проводился с применением имитационной модели, которая использует возможности программного комплекса «Конترفорт».

На его основе разработана гипотетическая модель безопасности КВО, которая составила 53 участка. На каждом участке расположены свои инженерно-технические средства охраны.

Рассматривался штатный состав караула, согласно требованиям и наставлениям по охране важных государственных объектов.

Исследовались варианты проникновения сил нападения численностью от 1 до 6 человек через каждый участок. Схема вариантов проникновения



Рис. 2. Информация о соотношении побед защитников и нападающих

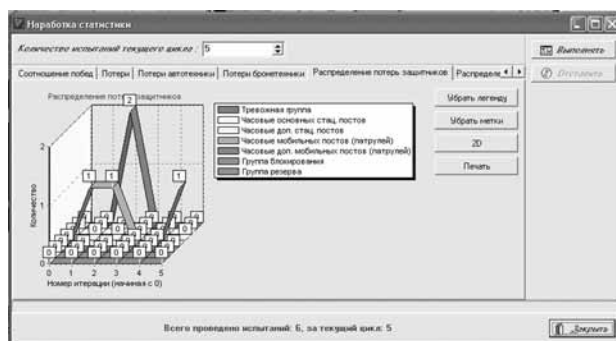


Рис. 4. Информация о распределении потерь защитников

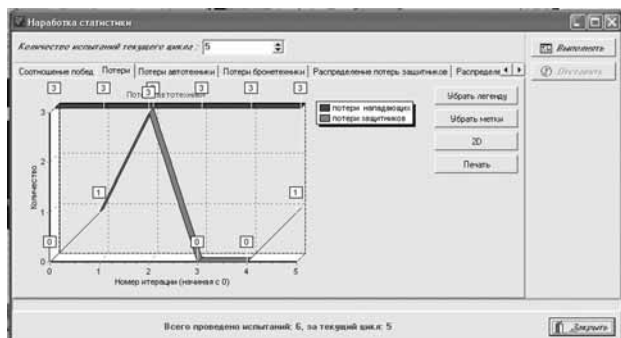


Рис. 3. Информация о потерях личного состава сторон

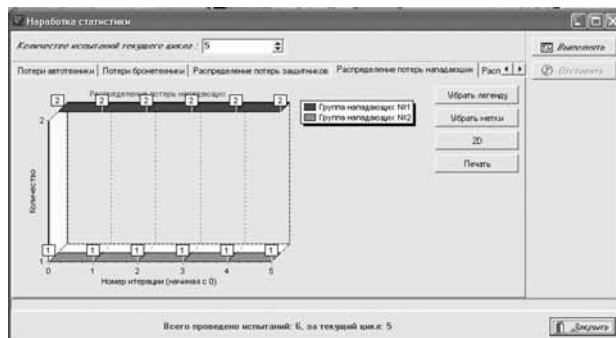


Рис. 5. Информация о распределении потерь нападающих



Рис. 6. Результаты моделирования уязвимости объекта (с разбивкой по участкам) при нападении группы из 6 человек

сил нападения на гипотетический объект представлена на рис. 1.

Задача сил нападения сводилась к проникновению на объект, совершению диверсии и возвращению обратно. Было сделано допущение, что индивидуальные параметры персонала охраны и сил нападения равны.

В ходе исследования были получены следующие данные (см. рис. 2–5):

- > отношение побед сил охраны к победам сил нападения;
- > потери живой силы;
- > потери технических средств сил защиты;
- > потери нападающей стороны.

> подробный журнал ведения всех действий, как составом караула, так и силами нападения.

Разработанная методика позволяет выявлять наиболее уязвимые участки СФЗ КВО, где вероятность защиты силами охраны недостаточна. Пример результатов моделирования уязвимости объекта при нападении группы из 6 человек представлен на рис. 6.

Для выбора наилучшей стратегии действий сил защиты и анализа возможных действий сил нападения был разработан математический аппарат, позволяющий решить данную задачу.

Разработана математическая модель боевых столкновений сил охраны и нарушителей, которая основана на аппарате теории игр. Для разработки математической модели боевых столкновений сил охраны и сил нападения формировались варианты (стратегии) защиты КВО. Математическая модель боевых столкновений позволяет дать оценку возможных вариантов действий как защищаемой стороны, так и нападающей стороны и возникающих в этом случае ситуаций.

Выбор вариантов (стратегии) защиты КВО зависит от конкретной задачи сил охраны. В нашем случае используются следующие показатели, как для защищаемой стороны, так и для стороны нападения: потери сил охраны, потери технических средств, потери сил нападения. Это важные показатели, однако наиболее существенным является вероятность защиты объекта: максимальная для защищаемой стороны, минимальная для стороны нападения.

При этом рассматривается антагонистическая игра (двух лиц) с нулевой суммой. Оба игрока

Стратегии	Участок 19	Участок 49	Участок 50	Участок 20	Участок 51	Участок 52	
	Победа сил охраны	Победа сил охраны	Победа сил охраны	Победа сил охраны	Победа сил охраны	Победа сил охраны	
Увеличение времени задержания инженерных сооружений	80	50	50	40	30	100	30
Увеличение радиуса обнаружения противника	70	50	10	70	20	80	10
Увеличение вероятности попадания	90	100	50	60	30	100	30
Введение дополнительных патрулей	70	10	60	80	30	100	10
Введение дополнительных постов	90	90	30	80	70	100	30
Введение дополнительных постов и дополнительных патрулей	90	100	70	100	100	100	70
Стандартная стратегия обороны	60	40	10	40	40	90	40
	90	100	70	100	100	100	

Рис. 7. Порядок упрощения матрицы при нападении группы из четырех человек

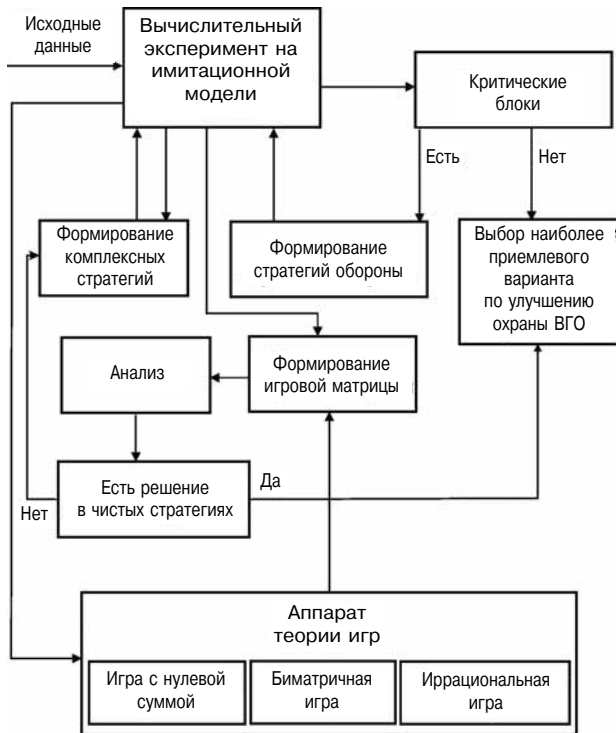


Рис. 8. Структурная схема математической модели боевых столкновений сил охраны и нарушителей

действуют исходя из необходимости $\max(\min)$ вероятности защиты объекта.

В выполненном исследовании рассмотрены еще две модели. Первая модель с ненулевой суммой основана на том, что у каждого из игроков имеются собственные критерии принятия решения. Например, у сил защиты — $\max$ защиты объекта нападения, а у сил нападения — $\max$ числа оставшихся в живых, $\min$ потерь. Критерий сил защиты — вероятность защиты КВО, при этом его требуется максимизировать. Критерий сил нападения — максимизация числа оставшихся в живых нападающих.

Вторая модель иррационального поведения основана на том, что наиболее важно для сил нападения: совершение акции или $\min$ потерь (число оставшихся в живых).

В нахождении наиболее приемлемой стратегии сил охраны (варианта) реализован следующий алгоритм:

1. Ищем игру в чистых стратегиях.
2. Если седловой точки нет, то ищем решение в смешанных стратегиях.
3. Упрощаем матрицу: вычеркиваем дублирующие и заведомо невыгодные стратегии (пример упрощения матрицы при нападении на КВО группы, состоящей из четырех человек, представлен на рис. 7).

4. Составляем систему линейных неравенств, осуществляем ее решение методом линейного программирования.

После решения системы линейных неравенств

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2, \\ \dots\dots\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m; \end{cases} \quad (1)$$

$$F = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \rightarrow \max(\min) \quad (2)$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \quad (3)$$

получаем следующие результаты:

$$v = 1/f(x^*), \text{ где } v — \text{цена игры;}$$

$p_j = x_j/v$, где p_j — оптимальная вероятность применения той или иной стратегии.

Итогом решения задачи являются наиболее приемлемые стратегии (варианты) действий сил охраны.

Структурная схема математической модели боевых столкновений сил охраны КВО и нарушителей представлена на рис. 8.

Применение разработанной методики осуществляется в два этапа. Первый этап — оценка эффективности существующей системы безопасности. Второй — проверка вариантов с целью повышения эффективности системы безопасности при использовании конкретных мер направленных на ее совершенствование.

На первом этапе выполняется обработка исходных данных, собранных на КВО в ходе обследования объекта и необходимых для проведения численного эксперимента. Непосредственно сам эксперимент осуществляется с использованием имитационной модели для выявления уязвимых участков КВО.

На втором этапе с использованием математической модели боевых столкновений осуществляется поиск решения по выбору оптимальной стратегии (варианта) защиты силами охраны КВО. Варианты стратегии сил охраны могут не просто проверяться, но и обсчитываться на имитационной модели. Возможно комплексирование стратегий обороны для совершенствования безопасности КВО.

Данная методика создана для информационно-аналитической поддержки принятия решений в системе управления с целью совершенствования безопасности объектов энергетики.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ДИЗЕЛЕЙ (материалы конгресса CIMAC-2016)

Настоящий обзор посвящен развитию методов измерения выбросов частиц и газообразных компонентов отработавших газов дизелей и газовых двигателей в составе мотор-генераторов и пропульсивных комплексов судов. Выбросы двигателя зависят от его назначения, размерности и мощности, а также от вида и состава применяемого топлива. Это означает, что существует необходимость в измерениях множества различных компонентов отработавших газов, как твердых, так и газообразных.

Измерения выбросов твердых частиц двигателей, работающих на топливах различного вида и качества, выполняют с использованием новейших анализаторов (например, Dekati ELPI+ и датчика сажевых частиц фирмы AVL). При проведении исследований использовались как новые, так и традиционные методы измерения содержания частиц (ИСО 8178 и 9096). Одним из любопытных

результатов исследования стал тот факт, что количество черного углерода (BC) в частицах при работе дизеля на жидких топливах со сверхнизким содержанием серы (LFO) и на тяжелом высокосернистом топливе (HFO) оказалось примерно одинаковым. Однако при работе на газовом топливе выбросы BC снижаются более чем на 90%.

Приведено описание высокотехнологичных газоанализаторов, позволяющих существенно увеличить точность и ускорить процесс измерения в сравнении с традиционными приборами, позволяющими выполнять измерения мгновенных значений NO_x и ΣHC . Эти данные могут быть использованы для оптимизации рабочего процесса двигателя по вредным выбросам.

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником

ИЗМЕРЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЧАСТИЦ И ОТДЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ — МЕТОДЫ И ЗАДАЧИ НА БУДУЩЕЕ

*Juha Heikkila, Sven Ingo,
Wartsila Corporation Research & Development*

Введение

«Измерить — значит узнать» — гласит старая поговорка, автором которой считают лорда Кельвина. Эта истина в полной мере относится к измерениям вредных выбросов — накопление знаний требует проведения измерений, потребность в которых непрерывно растет. Одновременно увеличивается как количество измеряемых величин, так и диапазон измерений. При этом необходимо учитывать ряд факторов, в числе которых — ужесточение экологических нормативов, растущее разнообразие видов топлива, наличие систем очистки газов, требования заказчиков и т. п.

Среднеоборотные судовые двигатели находят множество применений в самых различных областях. Они, в частности, используются в качестве пропульсивных двигателей, в составе электрогенераторов и могут работать на самых разных топливах, как жидких, так и газообразных. Все двигатели должны соответствовать определенным экологическим требованиям. В то же время уровень выбросов конкретного двигателя может зависеть, например, от его назначения, вида и состава применяемого топлива. Так, два по

существу одинаковых двигателя, установленных на одном объекте, могут быть использованы по разным назначениям, один — в качестве главного судового, другой — в составе дизель-генератора. Они могут работать на одном и том же топливе, при этом различаться по уровню вредных выбросов. Уже сегодня требования к выбросам от одного и того же судна могут отличаться в зависимости от его местонахождения. Существуют зоны контролируемых выбросов (ECA) по окислам серы (SO_x), при нахождении в которых двигатели либо должны работать только на малосернистом топливе, либо отработавшие газы должны проходить очистку в скруббере. Вполне вероятно, что в дальнейшем количество зон ECA будет возрастать, при этом число нормируемых компонентов выбросов также будет увеличиваться. По мнению некоторых специалистов, например, Lindstad и др. [1] следует вводить более детальные уровни нормативов в зависимости от местных условий и реальных условий работы судна. В портах и прибрежных зонах будут вводиться (и уже вводятся) более жесткие ограничения, в то время как при плавании в открытом море целесообразно использовать высокосернистые топлива. Это хотя и вызовет некоторый рост выбросов SO_x и NO_x , но в то же время будет в определенной мере парировать эффект глобального потепления. Отсюда следует, что необходимо освоить методы измерения множества

различных компонентов выбросов, как твердых, так и газообразных, причем в широком диапазоне.

Практика такова, что различные нормативные документы предусматривают применение различных методов измерений и разного измерительного оборудования. Для повышения эффективности измерений при создании новых двигателей производитель просто обязан использовать несколько методов параллельных измерений. Анализ результатов одновременных измерений выбросов различными методами позволяют взглянуть на экологические показатели двигателя с разных точек зрения. Полученная при этом ценная информация может быть использована в дальнейших НИОКР: чем больше данных получено, тем менее вероятна необходимость повторных испытаний для восполнения недостающих данных.

Результаты исследования выбросов твердых частиц в двухтопливном двигателе (Wartsila W6L34DF) выполнены с использованием инновационных анализаторов частиц. В ходе испытаний использовались: топливо со сверхнизким содержанием серы (LFO), тяжелое высокосернистое топливо (HFO с массовым содержанием серы порядка 1 %) и природный газ (LNG). В сравнении с традиционными методами измерения новые анализаторы выдают результаты измерений в режиме реального времени, что дает возможность получать больше информации, касающейся, например, временных зависимостей, распределения частиц, а также физико-химических свойств среды.

Быстродействующие датчики HC (общих углеводородов) и NO (окиси азота) с быстродействием порядка нескольких миллисекунд расширяют возможности для исследований рабочего процесса среднеоборотного газового двигателя. В частности, они обеспечивают возможность пробоотбора непосредственно до и после точки достижения пиковых значений давления и температуры в цилиндре.

Проведение испытаний

Измерение выбросов твердых частиц

Широко используемый метод определения массовой концентрации частиц (PM) в отработавших газах (ОГ) судового двигателя по ИСО-8178/1 дает результаты, которые сильно зависят от содержания серы и зольности топлива. Так, для HFO выбросы PM могут в 4–10 раз превышать аналогичный показатель для LFO. То же самое можно сказать о показателе FSN (дымовое число фильтра). Обычно FSN рассматривается как показатель «дымности» двигателя. Спрашивается, что характеризует дымовое число фильтра, если оно не зависит от качества топлива?

График зависимости FSN от параллельно измеряемой концентрации BC (черного углерода

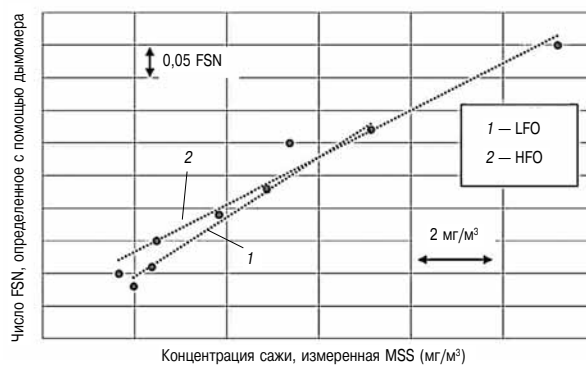


Рис. 1. Зависимость дымового числа фильтра от концентрации сажи в LFO и HFO, измеренной с помощью MSS

или сажи) показывает четкую корреляцию между ними. Это означает, что дымовое число фильтра зависит главным образом от концентрации сажи в составе PM, и значительно в меньшей степени — от концентрации остальных компонентов ОГ в составе частиц (рис. 1).

Концентрация сажи измерена с помощью многоспектрального сканирующего устройства (MSS). При использовании различных топлив наблюдается небольшое расхождение в корреляционных зависимостях, по-видимому обусловленное наличием других компонентов ОГ (соединения серы, зола, тяжелые несгоревшие углеводороды). Подробнее об этом смотри в работах [2, 3].

В отличие от измерения газообразных компонентов ОГ, показатель выброса частиц зависит от метода измерений. При этом показатели выброса частиц, определенные различными методами, часто несопоставимы. Одни методы измеряют только содержание твердых нелетучих фракций (сажа и зола); другие содержание летучих аэрозолей, таких как несгоревшие углеводороды и соединения серы.

Помимо нормативов, ограничивающих массовое содержание частиц, существуют также нормативные документы, лимитирующие количество частиц в ОГ автомобильных двигателей. Аналогичные нормативы (по числу частиц) предложены для судов внутреннего плавания стран ЕС. Показатель числа частиц, в отличие от показателя массового содержания, не является консервативным, поэтому пользоваться им следует с большой осторожностью.

Метод определения выброса частиц по ИСО-8178, требует разбавления пробы газов перед фильтрацией. Как показано в ряде работ ([2, 4 и [5]), на результат измерения влияют условия пробоотбора (степень разбавления, температура или материал фильтра). Поэтому условия пробоотбора для достижения надежных

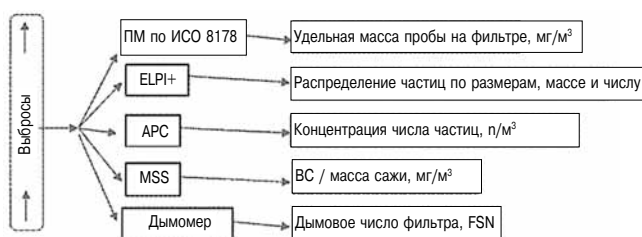


Рис. 2. Схема исследования выброса частиц

и воспроизводимых результатов при измерении выброса частиц должны быть стабильными.

На рис. 2 представлены различные методы измерения содержания частиц, описанные в настоящем докладе. С целью более глубокой оценки ведется одновременное измерение выбросов частиц несколькими приборами. Это позволяет лучше понять происходящие процессы и повысить достоверность результатов испытаний. Дальнейшее углубление анализа возможно, если дополнить исследование методами, основанными на фильтрации частиц по ISO-8178 с использованием импактора ELPI+ (устройство для фракционного осаждения частиц).

Измерение газообразных выбросов

Содержание газообразных выбросов в ОГ определять проще, чем содержание частиц, так как в последнем случае возможно использование химических методов. Для тех или иных составов могут, разумеется, использоваться разные методы и анализаторы. При этом возможное несовпадение полученных результатов объясняется эффектами взаимовлияния и погрешностями самого метода, а не тем, что другой состав требует другого метода измерений.

Впрочем, существует одно исключение, а именно, измерение общих углеводородов (ΣHC) с помощью FID (пламенно-ионизационного детектора). Анализатор FID измеряет ток, возникающий под воздействием атомов углерода, ионизированных в пламени горящего водорода. Результат такого измерения до некоторой степени подвержен влиянию всех разновидностей углеводородов и некоторых окислителей, из-за чего удается определить только общую концентрацию ΣHC , но не их состав.

При работе двигателя на жидком топливе и на газе состав ΣHC совершенно различен. При работе на жидком топливе ΣHC состоит, главным образом, из тяжелых углеводородов, тогда как при использовании газа в качестве топлива ΣHC состоит преимущественно из более легких компонентов несгоревшего топлива (например, метана и этана).

Приборы, используемые в экспериментах

Распределение частиц по размерам определялось с помощью прибора Dekati ELPI+.

Последний представляет собой электрический импактор низкого давления, способный измерять частицы размером от 6 нм до 10 μm ([6, 7]). Попадающие в импактор частицы предварительно заряжены с помощью коронного разряда. В импакторе частицы сортируются по размерам, при этом каждая частица отправляется в один из 14 сборников — в зависимости от ее диаметра. Частицы, собранные в импакторе, индуцируют измеряемый электрический ток. При известных заряжающих свойствах частиц на основании распределения измеренных токов можно вычислить распределение частиц по размерам.

Счетчик аэрозольных частиц AVL (APC, [8]) является анализатором, допущенным для официальных измерений показателей выброса частиц согласно директиве UN/ECE-R49 [9]. Прибор включает в себя систему подготовки проб и оптический счетчик частиц. При этом регистрируются только частицы, размер которых превышает 23 нм.

Датчик микрочастиц сажи AVL (MSS, [10]), т. е. анализатор черного углерода, основан на фотоакустическом принципе. В MSS используется световой поток с длиной волны 808 нм, характерной для поглощения света черным углеродом (BC). Световой поток модулируется таким образом, что частицы BC отдают тепло окружающему воздуху, порождая тем самым волны давления. Эти волны давления измеряются акустическим способом. Датчик MSS настроен на черный углерод. Влияние остальных компонентов смеси на показания датчика MSS незначительно.

Метод измерения выбросов частиц (PM) по ИСО-8178 основан на взвешивании массы частиц, собранных на фильтре. Перед фильтром проба разбавляется, следовательно, условия разбавления могут в какой-то степени влиять на результаты. Предельно допустимые величины выбросов, например, нормы ЕС по выбросам двигателей автомобилей и внедорожной техники, предполагают использование методов, регламентированных стандартом ИСО-8178.

Одним из наиболее известных и широко распространенных показателей дымления двигателей автомобилей и внедорожной техники является дымовое число фильтра (FSN). Самым распространенным прибором для измерений по данному методу является дымомер AVL [11]*. Этот прибор измеряет световой поток, отраженный от фильтровальной бумаги с осажденными на нее частицами. В протокол испытаний заносится число FSN, определяемое по 10-балльной шкале, где 0 означает белый фильтр (т. е. частицы углерода отсутствуют, и весь свет от бумаги

* Метод измерения дымности и показатель FSN разработаны фирмой BOSCH в 1953 году.

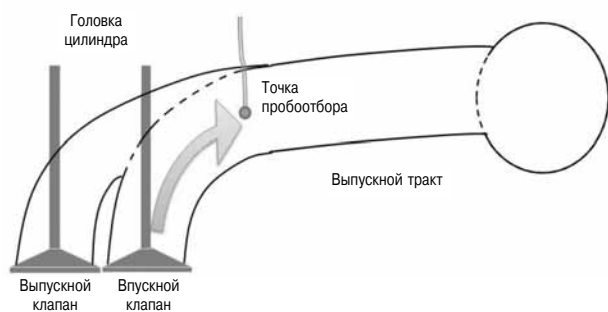


Рис. 3. Точка пробоотбора в выпускном тракте двигателя для анализаторов Combustion NO_x и ΣHC

отражается), а 10 — абсолютно черный фильтр (отражение света полностью отсутствует).

Прибор Combustion CLD500 представляет собой датчик NO (окиси азота), время реакции которого измеряется миллисекундами [12]. Для измерения концентрации NO_x (суммы окислов азота) необходим преобразователь NO_x. Такой прибор в этом докладе не рассматривается, поскольку время его реакции значительно больше. Быстродействующий анализатор позволяет измерять мгновенные значения выбросов NO на протяжении одного цикла. При этом отбор проб может осуществляться из точек с высокими значениями давления и температуры (например, непосредственно после выпускного клапана). Combustion HFR500 является анализатором ΣHC, который по своим основным характеристикам аналогичен CLD500 [13]. В нашем случае для обоих датчиков использовалась одна и та же точка пробоотбора (рис. 3).

Стендовый двигатель и описание результатов испытаний

Испытания проводились на двигателе Wartsila в лаборатории Vaasa (Финляндия). Измерения выбросов частиц проводились на двухтопливном двигателе Wartsila W6L34DF. Этот двигатель может работать на природном газе, LFO и HFO. В газовом режиме двигатель реализует цикл Отто, при этом зажигание рабочей смеси осуществляется за счет самовоспламенения пилотного дизельного топлива. Номинальная мощность двигателя составляет 3 МВт при 750 об/мин [14]. Отбор проб производится из выпускной трубы на расстоянии 5 м от фланца турбокомпрессора.

Специальные измерения газообразных выбросов выполнялись на двигателе, работающем в газовом режиме. Отбор проб производился из выпускной трубы на расстоянии 5 м от турбокомпрессора.

Результаты

Выбросы частиц

Выбросы частиц двигателем W6L34DF измерялись одновременно с помощью приборов

Dekati ELPI+, AVL APC, AVL MSS, дымомера AVL, а также методом фильтрации проб по ИСО-8178. Двигатель при этом работал последовательно на топливах трех видов: HFO, LFO и LNG.

Концентрация ВС (измеренная датчиком AVL MSS) практически одинакова при работе на LFO и HFO (см. рис. 4 и 5). В то же время массовая концентрация частиц (по ИСО-8178) сильно различается. Соотношение ВС/PM изменяется в пределах от 3 до 23 %, в зависимости от нагрузки и вида топлива. Минимальное значение соотношения ВС/PM имеет место при 100 %-ной нагрузке (работа на HFO), а максимальное — при 25 %-ной нагрузке (работа на LFO). После переключения с LFO на газ (LNG) концентрация ВС падает более чем на 90 %. К сожалению, измерения PM (по ИСО-8178 или FSN) при работе на LNG не проводились. Верхняя часть столбцов диаграммы на рис. 4 и 5 соответствует концентрации PM, измеренных по ИСО-8178 за вычетом ВС. Поэтому можно заключить, что PM, определенные по ИСО-8178, содержат только незначительную часть черного углерода.

Ранее в работе Ristimäki и др. [2] сообщалось, что при использовании HFO концентрация ВС оказывается меньше, чем при работе на LFO. В упомянутой работе это объясняется присутствием в HFO металлосодержащих примесей (зольных соединений), понижающих температуру окисления элементарного углерода. Следует заметить, что в двигателях с объемными топливными насосами при работе на HFO большой вязкости одной из

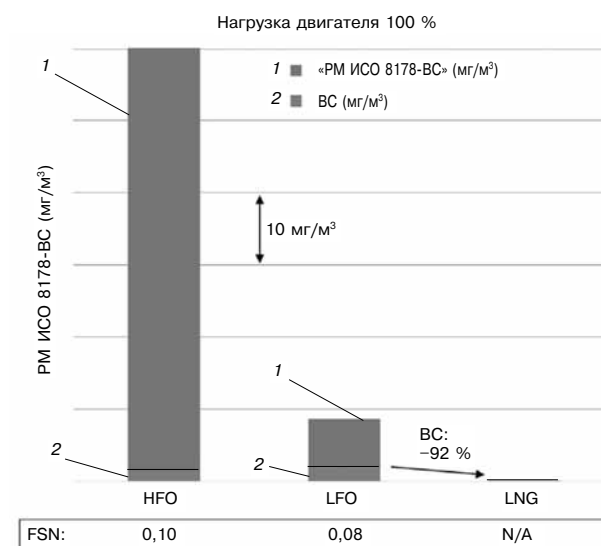


Рис. 4. Концентрация PM, измеренная по ИСО-8178 при работе на различных топливах при нагрузке двигателя 100 %. Верхняя часть столбцов диаграммы соответствует значениям PM по ИСО-8178 за вычетом ВС. Показаны также значения FSN для HFO и LFO

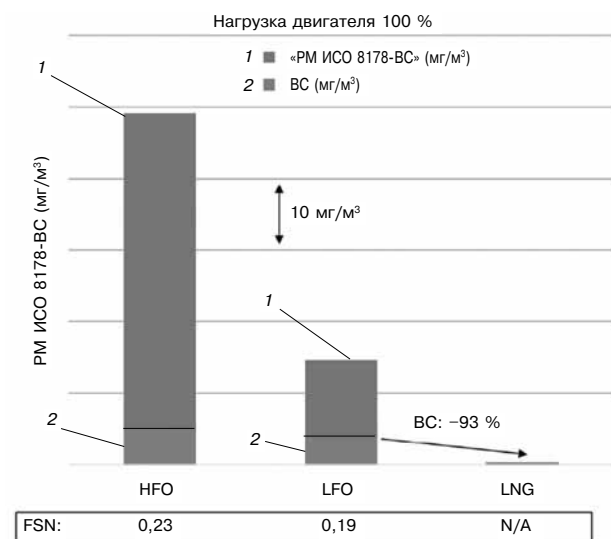


Рис. 5. Концентрация РМ, измеренная по ИСО-8178 при работе на различных топливах при нагрузке двигателя 25 %. Верхняя часть столбцов диаграммы соответствует значениям РМ по ИСО-8178 за вычетом ВС. Приведены также значения FSN для HFO и LFO

возможных причин указанного эффекта является более высокое давление впрыска, увеличивающее тонкость распыла топлива. На рис. 4 и 5 показаны также значения FSN для HFO и LFO. Видна отчетливая корреляция между FSN и концентрацией ВС. При работе на газе величина FSN не измерялась.

На рис. 6 показаны значения концентрации РМ (по числу частиц) при работе двигателя W6L34DF на различных видах топлива. Концентрация РМ (по числу частиц) здесь очевидно зависит от вида топлива. Максимальное число частиц в ОГ наблюдается при работе на HFO с высоким содержанием серы и золы. Однако

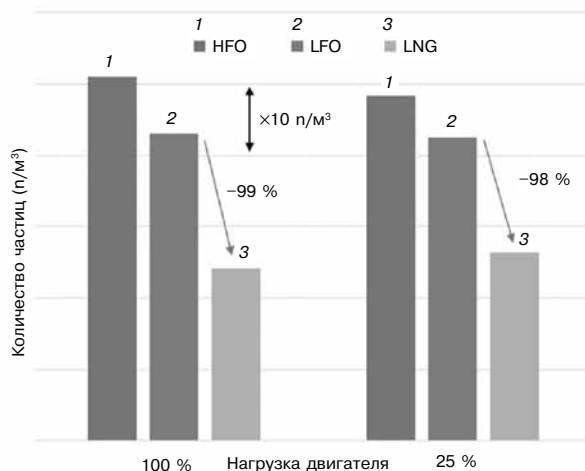


Рис. 6. Число частиц в ОГ двигателя W6L34DF при работе на различных топливах (измеренное с помощью прибора AVL APC). Градуировка оси ординат выполнена в логарифмическом масштабе

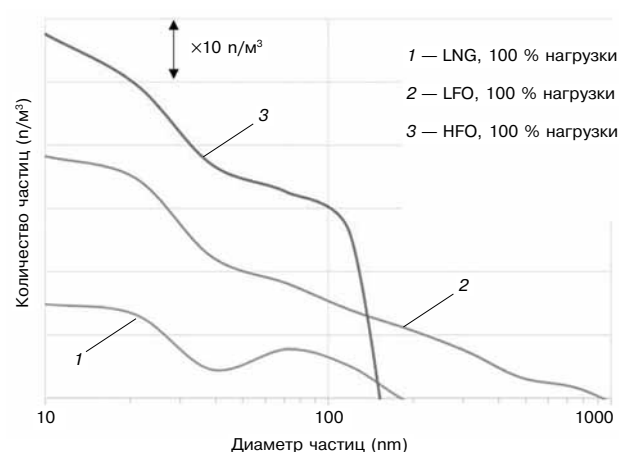


Рис. 7. Распределение частиц по размерам при работе двигателя W6L34DF на разных видах топлива (нагрузка 100 %). Коррекция по разбавлению отсутствует. Координаты X и Y — в логарифмическом масштабе

относительное снижение числа частиц при переходе с LFO на LNG более заметно, чем при переходе с HFO и LFO. При работе на LNG концентрация частиц сажи невелика (рис. 4). Кроме того, количество первичных (не коагулированных) частиц, несгоревших углеводородов, соединений серы и золы относительно мало по сравнению с работой на HFO и LFO. Количество несгоревшего масла во всех случаях предполагается одинаковым, независимо от вида топлива.

На рис. 7 и 8 показано распределение частиц по размерам при работе двигателя W6L34DF на различных топливах. Измерения производились с помощью анализатора Dekati ELPI+ в разбавленных пробах отработавших газов. Степень разбавления была одинакова для всех исследуемых видов топлива.

Форма кривой распределения во всех случаях была практически одинаковой. Кривая имеет два пика: пик зарождения первичных частиц (чуть

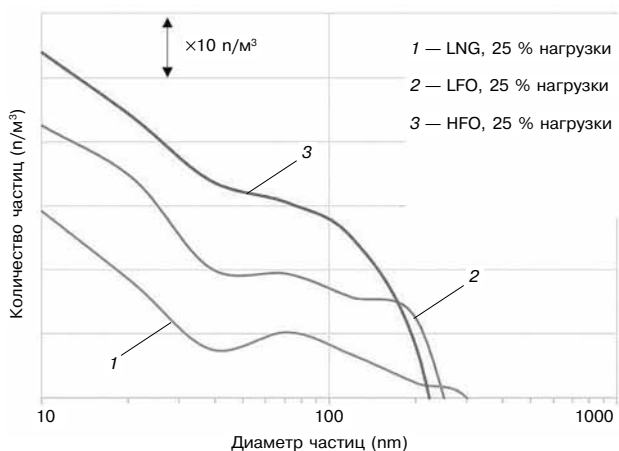


Рис. 8. Распределение частиц по размерам при работе двигателя W6L34DF на разных видах топлива. (нагрузка 25 %). Коррекция по разбавлению отсутствует. Координаты X и Y — в логарифмическом масштабе

ниже 30 нм) и пик сажеобразования с учетом коагуляции (в районе 70–100 нм). Это совпадает с результатами предыдущих исследований, проводившихся на дизельных двигателях [15, 16].

На кривой распределения частиц по размерам для НФО при полной нагрузке двигателя виден резкий провал концентрации частиц размером более 100 нм. Возможная причина этого эффекта состоит в особенностях алгоритма коррекции показаний прибора, а именно в избыточной коррекции для частиц большего диаметра [17].

Для всех видов топлива в кривых распределения характерно преобладание малых частиц (<30 нм), образующих так называемый пик (или режим) первичного сажеобразования. Известны многочисленные исследования, касающиеся механизма образования этих частиц, присутствующих в ОГ автомобильных двигателей [18, 19]. Согласно наиболее распространенной точке зрения, эти частицы имеют твердое ядро, на поверхности которого происходит конденсация летучих компонентов.

Тяжелые топлива в своем составе содержат большое количество первичных частиц, возникающих в режиме образования центров кристаллизации в виде сажи и присоединяющих окислы серы в виде серы (образующие серную кислоту). К тому же НФО состоят из более тяжелых, по сравнению с дистиллятными ЛФО, фракций, которые конденсируются на образовавшихся частицах при разбавлении и охлаждении отработавших газов в атмосфере.

В ЛФО сера практически отсутствует, а количество зольных фракций значительно меньше, чем в НФО. Газовое топливо не содержит ни серы, ни золы, ни тяжелых углеводородов. Согласно работе Alanen и др. [15], в газовом двигателе частицы в режиме первичного образования состоят из микроскопических (<1,5 нм) частиц, на которых конденсируются углеводороды и соединения серы. Источником таких частиц предположительно являются смазочное масло или продукты износа. Установлено, что их формирование происходит вблизи зоны горения, до того как начнется разбавление и охлаждение отработавших газов. Вклад мельчайших частиц в массовый выброс незначителен, и они не поддаются измерению счетчиком (реагирующим только на частицы, размер которых превышает 23 нм). С точки зрения исследователей и проектировщиков научиться измерять выбросы таких частиц весьма желательно, хотя (пока) нормативные документы их выбросы не регламентируют.

Выбросы частиц в двигателях, работающих на природном газе, чрезвычайно малы, при выборе любого критерия оценки — по массе, по числу, или по количеству черного углерода. В этом

состоит одно из главных преимуществ чистого газового топлива, хотя это же обстоятельство затрудняет достоверную оценку выброса твердого фильтрата.

Газообразные выбросы

Специальные измерения газообразных выбросов выполнялись на среднеоборотном двигателе в газовом режиме с использованием приборов CLD500 и HFR500, предназначенных для измерения содержания NO и ΣHC (далее подразумеваются мгновенные значения этих величин). Одновременно производились измерения следующих компонентов ОГ (O₂, CO, CO₂, ΣHC, NO_x) с помощью системы Horiba Mexa 7100 ([20]).

Поскольку концентрации ΣHC и NO измерялись в одной точке выпускного тракта, следовательно, результаты измерения могут считаться репрезентативными только для этой точки. Понятно, что временное и пространственное распределение состава ОГ в пределах выпускного тракта крайне неравномерно. Поэтому детальный анализ результатов и формулировка каких-либо заключений в этой части были бы преждевременными. Кроме того, при расчетах общего количества выбросов необходимо учитывать значительные колебания расхода отработавших газов.

На рис. 9 показано влияние фаз газораспределения на выбросы ΣHC и NO. Кривые (1) соответствуют стандартным углам газораспределения и перекрытия клапанов, а кривые (2) — опытному варианту с уменьшенным перекрытием клапанов. Мгновенная концентрация ΣHC в последнем случае уменьшается, а концентрация NO — увеличивается. Измерения с помощью системы Mexa показали, что фактические значения выбросов ΣHC в обоих случаях одинаковы (в пре-

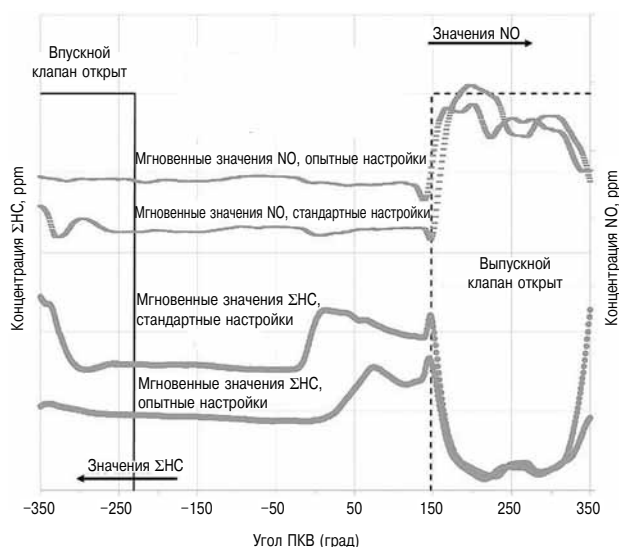


Рис. 9. Мгновенные значения концентрации HC и NO в стандартном и опытном вариантах настройки газораспределения

делах точности измерений), но выбросы NO_x для опытного варианта (с уменьшенным перекрытием клапанов) выросли на 8 %. Измерение мгновенных значений состава ОГ позволяет глубже понять механизмы образования выбросов. В то же время во избежание неверных выводов важно сочетать измерение мгновенных значений с измерениями стандартными методами.

Заключение

«Любое исследование сводится к измерению» — примерно так звучит недавнее высказывание, которое, как принято считать, принадлежит действующему президенту Конгресса СИМАК. В наше время оно более чем актуально. Нормативы выбросов для среднеоборотных двигателей в дальнейшем будут только ужесточаться. Ожидается также введение более детальных градаций предельных значений выбросов с учетом месторасположения и назначения силовой установки, а также большее число нормируемых компонентов. Одновременно ожидаются еще более значительные изменения химического состава топлив. При этом следует помнить о необходимости повышения КПД и других показателей качества двигателей. Чтобы оправдать ожидания заказчиков, необходимо поддерживать качество измерений на высшем уровне, что потребует значительных инвестиций в НИОКР. Для более глубокого изучения проблем снижения выбросов потребуются, помимо общепринятых, инновационные методы измерений и более широкая номенклатура измеряемых параметров. Это может быть достигнуто за счет использования новых анализаторов твердых частиц и газообразных компонентов.

В настоящем докладе обозначены перспективы углубленного изучения выбросов частиц в различных аспектах с тем, чтобы получить более полное представление о проблеме. Это необходимо не только для снижения вредных выбросов, но и для оптимизации параметров рабочего процесса, а также для повышения эффективности испытаний.

Литература

1. Lindstad H., Eskeland G., Psaraftis H., Sandaas I., Stramman A. Maritime shipping and emissions: A three-layered, damage-based approach, *Ocean Engineering*, Volume 110, Part B, 1 December 2015, Pages 94–101, ISSN 0029-8018, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.029>.
2. Ristimäki J., Hellen G., and Lappi M. : Chemical and Physical Characterization of Exhaust Particulate Matter

from a Marine Medium Speed Diesel Engine, CIMAC Congress, Bergen, Norway, 2010.

3. Tutuiano M. Instrumentation for marine black carbon measurements. Workshop on Marine Black Carbon Emissions, 9.-10.9.2014 Ottawa.

http://www.theicct.org/sites/default/files/ICCT_9_10th%20September_2014_Ottawa_AVL19.pdf

4. Hogstrom R., Karjalainen P., Yli-Ojanpera J., Rostedt A., Heinonen M., Makela J., Keskinen J. (2012) Study of the PM Gas-Phase Filter Artifact Using a Setup for Mixing Diesel-Like Soot and Hydrocarbons, *Aerosol Science and Technology*, 46:9, 1045–1052, DOI: 10.1080/02786826.2012.689118

5. Chase R., Duszkievicz G., Richer! J., Lewis D. et al., «PM Measurement Artifact: Organic Vapor Deposition on Different Filter Media» SAE Technical Paper 2004-01-0967, 2004, doi:10.4271/2004-01-0967.

6. Keskinen J., Pietarinen K. and Lehtimäki M. (1992) Electrical Low Pressure Impactor, *J. Aerosol Sci.* 23, 353–360.

7. Jarvinen A., Aitoma M., Rostedt A., Keskinen J. & Yli-Ojanpera J. 2014. Calibration of the new electrical low pressure impactor (ELPI+). 2014 *J. Aerosol Sci.* 69, P. 150–159.

8. <https://www.avl.com/-/apcplus-avl-particle-counter>

9. <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R049r6e.pdf>

10. <https://www.avl.com/-/mssplus-avl-micro-soot-sensor>

11. <https://www.avl.com/-/avl-smoke-meter>

12. <http://www.cambustion.com/products/cld500>

13. <http://www.cambustion.com/products/hfr500>

14. <http://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas-engines-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-34df>

15. Alanen J., Saukko E., Lehtoranta K., Murtonen T., Timonen H., Hillamo R., Karjalainen P., Kuuluvainen H., Harra H., Keskinen J., Ronkko T. The formation and physical properties of the particle emissions from a natural gas engine, *Fuel*, Volume 162, 15 December 2015, pages 155–161, ISSN 0016-2361, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.003>.

16. Ronkko T., Virtanen A., Kannosto J., Keskinen J., Lappi M., Pirjola L. Nucleation Mode Particles with Non-volatile Core in the Exhaust of a Heavy Duty Diesel Vehicle *Environmental Science & Technology* 2007 41 (18), 6384–6389 DOI: 10.1021/es0705339

17. DEKATI ELPI+ user manual, P. 68–69, ver. 1.22, 2013.

18. De Filippo A., Maricq MM. Diesel nucleation mode particles: semivolatile or solid? *Environ Sci Technol* 2008;42:7957–62.

19. Ronkko T., Virtanen A., Kannosto J., Keskinen J., Lappi M., Pirjola L. Nucleation mode particles with a non-volatile core in the exhaust of a heavy duty diesel vehicle. *Environ Sci Technol* 2007;41:6384–9.

20. <http://www.horiba.com/us/en/automotive-test-systems/products/emission-measurement-systems/analytical-systems/standard-emissions/details/mexa-7000-version-3-930/>

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ И МЕТОДИКИ ПРОБООТБОРА
НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ
СУДОВЫМ ДИЗЕЛЕМ**

Leonidas Ntziachristos, Erkka Saukko,

Topi Ronkko, Jorma Keskinen,

Tampere University of Technology

Kati Lehtoranta,

VTT Technical Research Centre of Finland

Hilkka Timonen, Risto Hillamo,

Finnish Meteorological Institute

Реферат

Выполнены измерения газообразных и твердых выбросов четырехтактного среднеоборотного судового двигателя с турбонаддувом мощностью 1,6 МВт (Wartsila 4R32), установленного на лабораторном стенде. Пробоотбор производился в соответствии с рекомендациями стандарта ISO 8178, с помощью интеллектуального пробоотборника AVL (AVL Smart Sampler). Этот прибор позволяет произвольно задавать степень разбавления (DR).

Результаты анализа проб свидетельствуют о том, что при одной и той же нагрузке двигателя содержание РМ в его отработавших газах может колебаться диапазоне 10:1 и более, в зависимости от вида топлива и условий пробоотбора. Оценивая результаты, можно констатировать, что выбросы РМ на единицу вырабатываемой энергии (г/кВт · ч) при одной и той же нагрузке изменялись в диапазоне от норматива Euro I для автомобильных дизелей (ставшего уже историей) до Euro IV.

Анализ содержимого фильтров показал, что большая часть собранных частиц состояла из летучих и полуметучих веществ, как органических, так и минеральных. Основным компонентом частиц, присутствующих в ОГ двигателя при работе на LFO, является органический углерод. В случае работы двигателя на HFO, при малых степенях разбавления отработавших газов в составе РМ преобладают сульфаты и связанная вода.

Результаты данной работы приводят к выводу, что обоснованное нормирование выбросов РМ судовыми двигателями возможно лишь после того, как условия пробоотбора будут определены более четко, чем в стандарте ISO 8178, по меньшей мере, в части допустимой степени разбавления. Следовательно, если показатели выбросов РМ будут включены в состав проверяемых параметров серийных дизелей, то свойства испытательного топлива должны при этом жестко контролироваться.

Введение

Дизели являются наиболее распространенным видом главных судовых двигателей, что объясняется такими присущими им качествами, как экономичность, надежность и большой срок

службы. Для снижения вредного воздействия дизелей на окружающую среду введены жесткие законодательные ограничения на предельно допустимое содержание окислов азота (NO_x) в отработавших газах. Также ограничены выбросы окислов серы (SO_x) путем нормирования предельно допустимых значений содержания серы в топливе. Указанные нормативы обязательны для судов, находящихся в особо охраняемых, с точки зрения экологии, зонах плавания, причем существует тенденция постепенного распространения этих нормативов на плавание в открытом море. Важно отметить, что ограничений на выбросы частиц пока не существует, несмотря на значительный вклад судовых двигателей в концентрацию РМ в атмосфере. Тому есть несколько причин, включая, в частности, отсутствие достаточно надежных методов измерения выбросов РМ при использовании высокосернистых топлив и мазутов.

Частицы, содержащиеся в ОГ судовых двигателей, состоят, главным образом, из полуметучих фракций, в том числе сульфатов (SO_4) и органического углерода (ОС), а также золы и сажи, образующейся при сгорании топлива [2]. Доли отдельных компонентов в составе РМ зависят от вида топлива, типа двигателя и рабочих режимов [3]. Однако обстоятельства требуют разобраться в проблеме выбросов РМ от судов более глубоко. Во-первых, это связано с проблемой выбора или создания измерительной аппаратуры для контроля выбросов частиц. Во-вторых, необходимо определить относительный вклад каждого компонента, учитывая предстоящее обсуждение вопросов, связанных с неоднозначностью влияния выбросов судовых двигателей на качество атмосферного воздуха и изменение климата. Охлаждающий эффект сульфатных аэрозолей в ОГ судовых дизелей в значительной мере уравновешивается парниковым эффектом от двуокиси углерода (CO_2) и черного углерода (BC), также присутствующих в ОГ [4]. При этом неуклонно проводимая десульфуризация топлив приводит к тому, что выбросы сульфатов сокращаются, что, как ожидается, должно значительно уменьшить охлаждающий климатический эффект от судоходства [5, 6].

Достижение разумного компромисса между соотношением в составе частиц SO_4 и BC невозможно без достаточно точной количественной оценки содержания обоих веществ в ОГ судовых дизелей. Задача эта далеко не простая, учитывая, что, как и в случае с РМ, общепринятых методов измерения пока не существует. Это относится как к условиям пробоотбора, так и к средствам измерения. Большинство упоминаемых в литературе методов пробоотбора и количественной

оценки содержания РМ в ОГ судовых двигателей основываются на технологиях, используемых в объектах другого рода, в первую очередь в автомобильных дизелях. Однако получаемые при этом результаты не всегда репрезентативны ввиду различий в свойствах частиц из разных источников. Например, до сих пор не ясно, как условия пробоотбора могут повлиять на определение ВС, учитывая высокое содержание золы в ОГ судовых дизелей. Важность этого обстоятельства обусловлена тем, что для оценки выбросов ВС используются самые различные методы, чувствительность которых к отдельным компонентам сажи не определена.

Количественная оценка выбросов РМ судовыми двигателями тем более проблематична, что атмосферные процессы могут резко менять как количество аэрозолей в газах, выходящих из выпускной трубы, так и их состав. Поскольку значительная часть РМ, содержащихся в ОГ судовых дизелей, относятся к химически активным веществам (ионы и ОС), вторичные процессы могут существенно повлиять на характеристики аэрозолей, добавляя, или, напротив, удаляя вещества из твердой фазы и меняя при этом физико-химические свойства. Известны лишь единичные примеры исследования химических процессов, происходящих в факеле ОГ судового дизеля [7, 8].

Настоящая работа представляет собой первую попытку изучения того, как метод отбора проб влияет на свойства и трансформацию частиц в ОГ судовых дизелей. Данная проблема исследовалась в трех аспектах. Во-первых, необходимо установить влияние параметров пробоотбора, в первую очередь степень разбавления, на результаты определения РМ, собранных с фильтров. Во-вторых, чтобы информация была более подробной и учитывала размеры частиц, показать, как степень разбавления влияет на характеристики распределения частиц по размерам и на химические свойства первичных частиц. И наконец, дать количественную и качественную оценку превращения присутствующих в ОГ судовых дизелей аэрозолей в процессе их старения после выброса из выпускной трубы в атмосферу.

Экспериментальное исследование

Двигатель. Измерения газообразных и твердых выбросов проводились на четырехтактном среднеоборотном судовом двигателе с турбонаддувом мощностью 1,6 МВт (Wartsila 4R32), установленном на лабораторном стенде. Пробоотбор производился в соответствии с рекомендациями ISO 8178, при этом двигатель работал на двух нагрузочных режимах при номинальной частоте вращения 750 об/мин (25 и 75 % нагрузки). При этом наиболее интересен режим 75 %

нагрузки, поскольку он ближе к реальным условиям плавания в открытом море. Испытания проводились при работе двигателя на двух видах топлива последовательно, а именно, на тяжелом топливе (HFO) с плотностью 1005 кг/м³ и массовым содержанием серы ~1 %, и на легком топливе (LFO) с плотностью 820 кг/м³ и массовым содержанием серы <20 ppm.

Пробоотбор. Поток отработавших газов был разделен на две части, причем пробы РМ брались из той части потока, температура которой поддерживалась постоянной (300 °С), после чего проба подвергалась первичному разбавлению с помощью интеллектуального пробоотборника AVL (AVL Smart Sampler). Этот прибор позволяет произвольно задавать степень разбавления (DR) в заданном интервале, при этом температура фильтра РМ остается в допустимом диапазоне (<52 °С). Последовательно задавались три значения DR, а именно: 5:1; 10:1; и 30:1 — что находится в пределах требований стандарта ISO 8178 и позволяет установить влияние условий пробоотбора на массу собранных РМ. Осажденные на фильтрах РМ анализировались на количество сульфатов, связанной воды и органических веществ. Анализ на органический и элементарный (EC) углерод выполнялся термооптическим методом, описанным Birch и Cary [9]. Анализ на сульфаты выполнялся по методике IP 416/96.

Для дополнительного исследования физико-химических свойств частиц отбор проб осуществлялся из другой части потока газов, с регулируемой температурой, с помощью системы пробоотбора, представляющей собой модифицированный вариант неполнопоточной системы, разработанной Ntziachristos и Samaras [10], (рис. 1). Система пробоотбора была рассчитана на воспроизводство процессов разбавления и охлаждения отработавших газов в атмосфере, в том числе — конденсацию полелетучих компонентов отработавших газов. Система состоит из разбавителя с пористой трубкой (PTD), стаби-

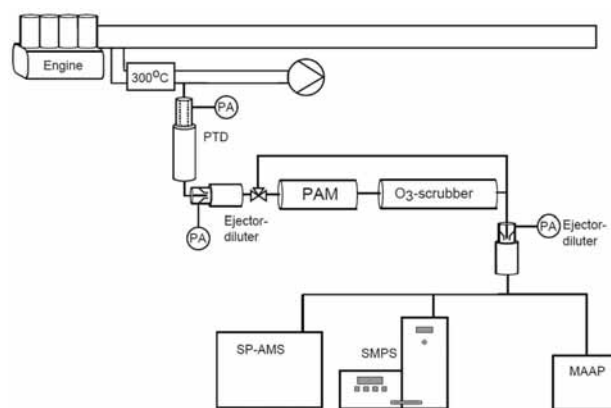


Рис. 1. Схема пробоотбора

лизационной камеры и устройства вторичного разбавления (с разбавителем эжекторного типа), что дает возможность гибко регулировать величину первичной DR, что важно для целей данного исследования. Диапазон изменения первичной DR составлял от 10:1 до 45:1. Это позволило варьировать расход газовой пробы, поддерживая постоянство расхода разбавляющего воздуха. Поскольку расход разбавляющего воздуха намного превышал расход газовой пробы, изменение DR мало влияли на температуру смеси. Для расчетов величины первичной DR использовались значения концентрации CO_2 , измеряемые перед и после PTD. Устройство вторичного разбавления обеспечивало $\text{DR} = 8:1$.

Для формирования вторичных частиц в целях имитации процесса их трансформации в атмосфере использовалась камера массы потенциальных аэрозолей (РАМ). Камера РАМ представляет собой проточную камеру, продуваемую окислителями — радикалами в виде озона (O_3), гидроксидом (OH) и гидропероксида (HO_2), и подвергается воздействию ультрафиолетовых (UV) лучей (2 ртутные лампы (BHK Inc., CA) с длиной волны соответственно 185 и 254 нм) для образования вторичного аэрозоля [11, 12]. Камера РАМ располагалась за устройством вторичного разбавления системы пробоотбора. Величина расхода через камеру РАМ составляла 5 л/мин, что обеспечивало длительность облучения газа перед отбором пробы порядка 3 минут.

Измерительные приборы. Все приборы для измерения содержания частиц располагались за камерой РАМ, а газы перед ними подвергались третьему разбавлению. Распределение частиц по размерам устанавливалось с помощью сканирующего классификатора мобильных частиц (SMPS), состоящего из двух приборов: DMA 3071 (TSI Inc., US) и CPC 3775 (TSI Inc., US), совместно обеспечивающих измерение размеров в диапазоне от 5,9 до 225 нм. Время сканирования составляло 12 с, при этом в ходе каждого испытания выполнялось не менее трех сканов. Для анализа химического состава РМ использовался масс-спектрометр (SP-AMS) [13]. Масс-спектрометр для определения сажевых аэрозольных частиц обладает высоким разрешением с времяпролетным детектором аэрозолей (HR-ToF-AMS, Aerodyne Research Inc., US), дополненный лазерным (с внутренним резонатором Nd:YAG, 1064 нм) испарителем [14]. Двойная система испарения представляет собой дальнейшее развитие системы AMS, и, в дополнение к функциям последней, обеспечивает измерение в реальном времени массы РМ, а также распределение по размерам нетермостойких субмикронных частиц, огнестойких ВС и некоторых других

элементов и металлов. Интервал измерений составлял 1 минуту.

Дополнительно черный углерод определялся с помощью многоугольного абсорбционного фотометра (МААР) [15], измеряющего массу осевших на фильтре частиц ВС. Измерение основано на поглощении аэрозолем света с длиной волны 670 нм. Расход пробы через МААР был равен 6 л/мин, интервал измерений — 5 минут.

Результаты исследования

Уровни выбросов РМ. Результат анализа проб свидетельствуют о том, что при одной и той же нагрузке двигателя содержание РМ в его ОГ может колебаться в диапазоне 10:1 и более, в зависимости от вида топлива и условий пробоотбора. В целом наблюдалась тенденция снижения выбросов РМ при увеличении степени разбавления и при переходе от HFO к LFO. Когда двигатель работал на тяжелом топливе, то при уменьшении степени разбавления DR от 31:1 до 5,5:1 содержание РМ в ОГ увеличивалось в 2,5 раза. Это совпадает с результатами, полученными ранее Ristimäki и др. [2]. Таким образом, новая серия измерений еще раз подтверждает тот факт, что диапазон разбавления и условия пробоотбора, разрешенные стандартом ISO, слишком широки для нормирования допустимых выбросов РМ судовыми двигателями. Данный стандарт нуждается в уточнениях, прежде чем его можно будет рассматривать как часть нормативной базы применительно к судовым дизелям.

При сравнении двух видов топлива нетрудно заметить, что выбросы РМ в обоих случаях существенно различаются независимо от выбранного значения DR. Средний уровень удельных выбросов РМ при одной и той же нагрузке двигателя составлял для HFO 343 мг/кВт·ч, для LFO — 60 мг/кВт·ч. Это значит, что вид и качество топлива судовых двигателей может стать одним из эффективных средств снижения

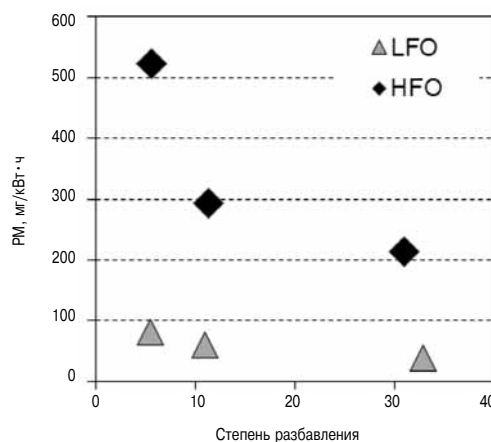


Рис. 2. Влияние степени разбавления на выбросы РМ для различных видов топлива при нагрузке 75 %

выбросов РМ. С другой стороны, столь большая чувствительность данного показателя к свойствам топлива означает дополнительные сложности в случае придания ему нормативной силы. Свойства топлив для испытаний должны быть крайне тщательно оговорены, и не только в виде установления предельно допустимых значений его состава. Это задача сама по себе достаточно сложная, учитывая то, насколько трудно обеспечить независимый контроль свойств НФО. Поэтому инженерный подход к оценке содержания частиц в ОГ двигателя должен дополнительно включать нормирование не только свойств топлива, но и некоторых показателей качества смазочного масла (например, зольности) — до того как нормативы предельно допустимого содержания РМ обретут силу закона.

Чтобы были понятны причины столь большой чувствительности показателя РМ к степени разбавления, обратимся к данным рис. 3, где упрощенно показан химический состав РМ. Заметим, что масштаб графиков по оси ординат для НФО в пять раз больше, чем для LFO. Количество воды рассчитывалось из ее содержания

в гидрированном сульфате ($\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 6,5 \text{H}_2\text{O}$), который обычно находится в частицах, содержащихся в ОГ судовых дизелей [17]. В обоих случаях общая восстановленная масса довольно точно соответствует массе частиц, определенной с помощью взвешивания фильтра, в пределах погрешностей обоих методов. К тому же содержание золы не определялось, хотя зола должна быть также добавлена к восстановленной массе.

В случае НФО доля веществ, не обладающих термостойкостью (ОС, сульфаты и связанная вода) в общей массе частиц больше, чем в случае LFO. Фактически, когда двигатель работает на НФО, более 90 % общей массы частиц (при использовании низкой степени разбавления DR), по-видимому, состоит из летучих и полунлетучих компонентов. Хотя при увеличении DR их доля в общей массе частиц снижается, она все же остается достаточно заметной. Поэтому следует ожидать, что изменение DR будет влиять на концентрацию и, соответственно, на коэффициент насыщения указанных веществ в точке пробоотбора, в результате чего будет меняться их распределение между газообразной и твердой фазами. Учитывая большую долю этих веществ в ОГ судовых дизелей, такие мероприятия, как более строгий контроль DR и (по тем же причинам) температуры в точке пробоотбора, представляются наиболее очевидными шагами, которые надлежит предпринять в направлении совершенствования стандарта.

Из данных рис. 3 также видно, насколько сильно вид топлива влияет на химический состав РМ. Очевидно, сульфаты со связанной водой составляют большую долю в составе РМ в случае использования НФО, содержащего серы примерно в 500 раз больше, чем LFO. Кроме того, НФО по сравнению с LFO содержат в 3–4 раза больше ОС. В состав НФО, по сравнению с LFO, входят более тяжелые органические вещества, и изменение их фазового состояния в камере сгорания двигателя требует более значительных затрат энергии. В результате в выпускном тракте оказывается большее количество несгоревшей органики, обнаруживаемой в составе РМ в виде ОС.

Что же касается элементарного углерода (ЕС), то здесь влияние состава топлива и DR на результаты анализа объяснить несколько сложнее. Казалось бы, следует ожидать, что влияние DR на уровень ЕС окажется минимальным, так как последние относятся к числу нелетучих термостойких компонентов. В нашем случае уровни ЕС, по-видимому, следуют той же тенденции, что и уровни ОС, т. е. при увеличении DR они падают, а для НФО они примерно в три раза выше, чем для LFO. Однако интерпретация этих результатов требует известной осторожности. Опреде-

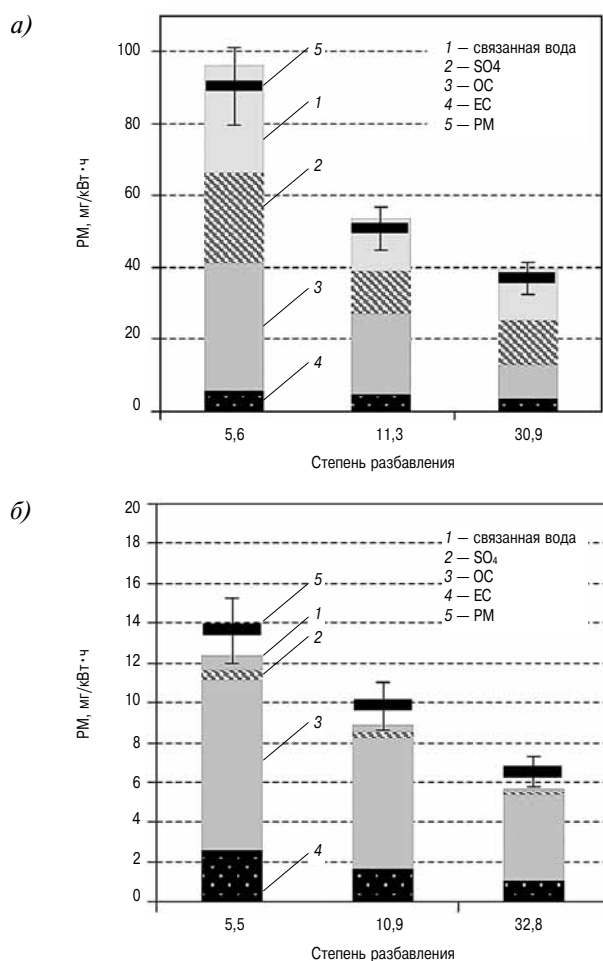


Рис. 3. Химический состав проб РМ в функции степени разбавления при 75 % нагрузки для (а) НФО, (б) LFO

Таблица 1

Показатели выбросов ВС
при нагрузке двигателя 75 %

Топливо	HFO		LFO	
Степень разбавления	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая
BC±95 % CI, мг/кВт·ч	20,9±1,1		13,8±1,6	
BC/PM, %	4,0	9,8	17	35

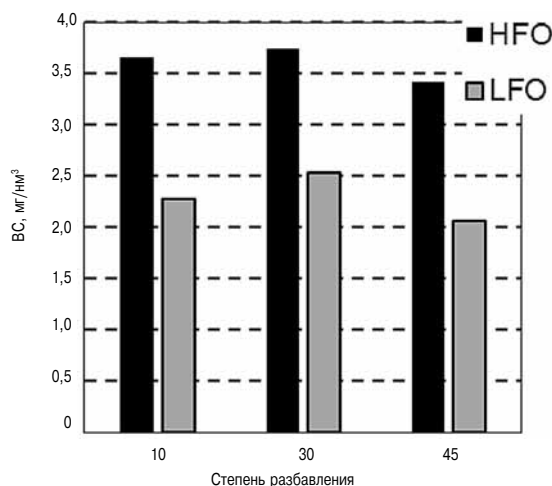


Рис. 4. Влияние степени разбавления на значения черного углерода, измеренные МААР, при нагрузке двигателя 75 % для различных видов топлива

ление ЕС основано на том, что сначала в инертной атмосфере удаляются летучие и полулетучие фракции путем повышения температуры, после чего оставшаяся часть пробы окисляется, чтобы затем можно было рассчитать ЕС по количеству CO_2 , образовавшейся при сгорании. В нашем случае, кроме того, определялась масса органического углерода (продукт сгорания), подвергшегося пиролизу вследствие роста температуры. Эта масса должна быть отнесена к ОС, а не к ЕС [9]. Однако данный метод разрабатывался, главным образом, применительно к атмосферному уровню ЕС, а оптическая поправка на ОС является полуэмпирической. Поэтому погрешность метода при достаточно большом соотношении ОС/ЕС (как в нашем случае) может быть весьма значительной.

Более надежное определение термостойких веществ может быть обеспечено путем одновременного использования устройства МААР. С помощью этого прибора можно определять термостойкие компоненты, поглощающие свет с определенной длиной волны, известные как черный углерод (BC). На рис. 4 показано изменение выбросов BC в зависимости от вида топлива и DR. Выбросы BC практически не зависят от DR, и колебания результатов их измерения являются следствием скорее приборной погрешности, нежели какого-либо систематического эффекта.

Сравнение значений ЕС и BC на рис. 3 и 4 показывает, что, по крайней мере, для судовых двигателей, методы определения двух видов углерода нельзя считать взаимозаменяемыми. Более того, с точки зрения показателей выбросов BC, применение HFO приводит к росту выбросов на единицу производимой энергии на 50–60 % (табл. 1). Как установили Ristimäki и др. [2], перевод двигателя с LFO на HFO ведет

к уменьшению количества сажи в ОГ и к увеличению дымового числа фильтра при высоких нагрузках. Следовательно, методы определения элементарного углерода, черного углерода, сажи и дымового числа фильтра, а также эквивалентность этих показателей применительно к судовому двигателю требуют дальнейшего изучения.

Для выявления некоторых причин возникновения погрешностей, измеренные уровни BC следует также рассматривать с учетом общей массы выброса частиц. В табл. 1 показан как абсолютный уровень BC, так и относительный (т. е. доля BC в общей массе выбросов PM). Относительные величины PM приведены для двух значений степени разбавления с учетом разных уровней PM (см. выше). Максимальное относительное значение BC составляет 10 % от общей массы PM для тяжелых топлив, и 35 % — для легких топлив. Ввиду относительно малой доли BC в общем количестве PM наличие в составе PM некоторых других компонентов с меньшим светопоглощением (таких как зола, смола, другие тяжелые органические вещества, часто именуемые «коричневым углеродом») может искажать результаты измерений, так как эти компоненты будут ошибочно суммироваться с реальным черным углеродом.

Распределение первичных частиц по размерам.

Чтобы лучше понять, как вид топлива и характер пробоотбора влияют на показатели количества PM, нужно обратиться к распределению частиц по размерам. На рис. 5 показано распределение частиц по размерам для HFO и LFO, измеренное после отбора проб с помощью разбавителя с пористой трубкой, камеры для стабилизации аэрозоля и последующих вторичных разбавителей эжекторного типа, задача которых — уменьшить измеряемые значения настолько, чтобы они уместились в рабочий диапазон прибора SMPS. В показанное на рис. 5 распределение частиц по размерам вносятся поправки на DR, чтобы обеспечить их сопоставимость с точки зрения выбросов. Для каждого вида топлива распределение частиц по размерам измерялось при трех существенно различных значениях первичного разбавления DR.

С увеличением DR средний размер частиц сдвигается в сторону меньших значений. Для HFO

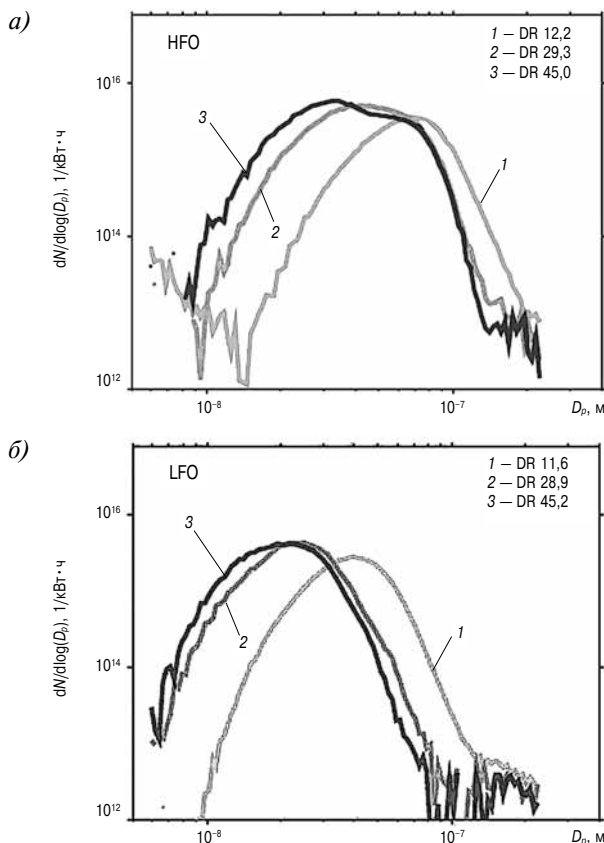


Рис. 5. Численно-взвешенное распределение частиц по размерам для (а) НФО и (б) ЛФО, в функции от степени разбавления

этот сдвиг был довольно заметным, в особенности при изменении величины DR с 12:1 до 29:1, хотя дальнейший рост DR (до 45:1) на размер частиц, особенно малых, влиял незначительно. Данная закономерность подтверждается результатами определения массы РМ (рис. 2), где хорошо виден рост этой массы при значениях $DR \leq 10:1$.

При увеличении DR меняется также профиль распределения частиц по размерам. При малых величинах DR распределение является практически мономодальным, в особенности для НФО. Для ЛФО оно также выглядит мономодальным, но в нем все же можно разглядеть хотя и слабую, но все же различимую сажевую составляющую, появляющуюся при размерах частиц более 130 нм, тогда как соответствующая составляющая для НФО почти не различима. Предполагая, что сажевая составляющая численно, как минимум, равна ВС, можно сказать, что распределение частиц аэрозоля по размерам достаточно хорошо следует соотношениям ВС/РМ (см. табл. 1).

Распределение по размерам также меняется с ростом DR. Во-первых, появляется новая (хотя и слабая) составляющая, которая особенно заметна в случае НФО. Кроме того, концентрация числа частиц возрастает. Эти изменения проис-

Таблица 2

Общее число частиц на кВт·ч для различных видов топлива в функции степени разбавления при нагрузке 75 %

Номинальная DR	НФО (1015/ кВт·ч)	ЛФО (1015 кВт·ч)
10	1,24	0,96
30	2,38	1,57
45	2,85	1,71

ходят несмотря даже на то, что проба после первичного разбавления проходит камеру выдержки со временем пребывания порядка 2,5 с для стабилизации аэрозоля. Высокое значение соотношения летучих/термостойких компонентов означает, что при данных условиях аэрозоль сохраняет хорошие динамические качества. Следовательно, увеличение объема и уменьшения числа частиц при падении DR объясняется коагуляцией частиц нанометрического диапазона, а также конденсацией. Эти же частицы при работе двигателя на НФО могут быть причиной явления, наблюдаемого на нижнем конце кривой распределения, образуя отвод конденсированных паров полуметучих компонентов. Учитывая, что по зольности НФО намного превосходит ЛФО, можно предположить, что менее стабильный характер распределения для НФО в диапазоне размеров ≤ 10 нм объясняется присутствием именно таких частиц золи.

Общее количество частиц для каждой конфигурации сведено в табл. 2. Эти количества были получены следующим путем: применение одного или двух логарифмически нормальных распределений к размерам частиц, минимизация средне-квадратичной ошибки и расчет общей суммы распределений, а также, в случае необходимости, экстраполяция результатов за пределы диапазона измерений SMPS. В составе ОГ при работе на НФО содержится больше летучих составляющих, чем при работе на ЛФО, поэтому численность частиц при работе на тяжелом топливе больше на 30–70 %. Разница минимальна при малой величине DR, с ростом DR она монотонно увеличивается. При снижении DR усиливается конденсация и коагуляция, что приводит к сближению размерных распределений для различных топлив.

Химический состав первичных и вторичных частиц. Химический состав частиц субмикронного диапазона отдельных твердых компонентов определялся с помощью масс-спектрометра для определения сажевых аэрозольных частиц (SP-AMS, Aerodyne Research Inc.). Прибор позволяет определить химический состав частиц, состоящих из нитратов (NO_3), аммония (NH_4), сульфата (SO_4) и хлорида (Cl), а также различных видов органики. Здесь метод анализа отличается от представленного на рис. 3, поскольку SP-AMS определяет хими-

ческий состав частиц, еще находящихся во взвешенном состоянии, и мало приспособлен к пробоотбору и адсорбции частиц, осевших на фильтре. Прибор, использованный в настоящем исследовании, реагирует на частицы, размер которых превышает ≈ 30 нм, хотя точный порог здесь указать нельзя, так как чувствительность фактически зависит от размеров и концентрации частиц. Как уже отмечалось, относительный вклад сульфатов более заметен в случае НФО, при этом органика и сульфаты составляют, по сути, более 97 % нетермостойких веществ, из остального можно заметить только следы аммония и ионы хлора. Следы хлора можно найти в топливе, в масле и в воздушном заряде, особенно когда речь идет о реальных эксплуатационных условиях. Интересно отметить отсутствие нитратов в первичных частицах. Это значит, что в ОГ судового двигателя образуется не нитрат аммония, а более стабильный сульфат аммония.

Непрерывное уменьшение относительной доли сульфата при работе на НФО, или, что то же самое, увеличение относительной доли органики, по всей видимости, свидетельствует о росте DR до степени насыщения различных компонентов. На рис. 1 видно, как при увеличении DR уменьшается общая масса нетермостойких веществ. Однако в НФО содержится большое количество тяжелых органических соединений, давление паров которых меньше, чем давление паров серной кислоты и некоторых ее солей. Поэтому при увеличении DR они в составе частиц могут оказаться более устойчивыми, чем сульфаты. При работе на LFO можно ожидать, что общий профиль органики будет сдвигаться в сторону более легких материалов. В действительности увеличение DR не вызывает заметного сдвига соотношения органики и сульфатов. Если в составе органики и остается какое-то место для аммиака и хлоридов, то лишь в пределах точности измерений. Таким образом, данные измерений с помощью AMS говорят о том, что DR влияет не только на распределение частиц по массе и количеству, но и на химический состав отдельных частиц.

Частицы, сформировавшиеся после первичного разбавления в факеле отработавших газов судового двигателя, претерпевают дальнейшую трансформацию в атмосфере. Камера РАМ использовалась в настоящей работе для имитации фотоокисления летучих компонентов ОГ в атмосфере путем обработки частиц мощным UV-излучением в течение примерно 3 минут. Это равносильно их нахождению в течение нескольких дней (до недели) в атмосферных условиях.

В ходе экспериментов замерялись уровни выбросов нетермостойких фракций и доли от-

дельных веществ в ОГ после камеры РАМ. Фотоокисление первичных компонентов ведет к увеличению общей массы частиц в 10–50 раз. Увеличение массы вызвано различными реакциями, протекающими в камере, в которых участвуют как органические, так и, по преимуществу, неорганические вещества.

В случае НФО в составе вторичных РМ преобладают сульфаты, составляющие 75 % от их общей массы. Это очень много, учитывая охлаждающий эффект сульфатных аэрозолей, и это означает, что влияние судоходства на изменение климата, если его рассчитывать только по выбросам первичных аэрозолей, окажется сильно недооцененным. Содержание органического углерода также возрастает, но не так резко, как содержание сульфатов, и составляет менее 20 % от общей массы аэрозоля.

Еще более впечатляющие трансформации претерпевает аэрозоль, генерируемый при использовании в качестве топлива LFO. Во-первых, его масса почти в 50 раз превышает исходную (т. е. содержащуюся в первичных выбросах), а разница в абсолютных значениях по сравнению с НФО гораздо меньше, чем в выбросах первичных РМ. Аэрозоль в этом случае по массе сильно уступает нитратам, присутствие которых в первичных выбросах было едва заметно. Более того, содержание аммония существенно возросло, что свидетельствует об интенсивном образовании нитрата аммония. В то же время окисление органического углерода привело к тому, что его содержание снижалось с содержанием вторичного ОС в случае НФО.

Увеличение массы аэрозоля при имитации фотоокисления в атмосфере изучалось в нескольких предыдущих работах, посвященных автомобильным двигателям. Однако объем этих исследований был значительно скромнее, особенно в части дизелей. Например, в работе [19] максимальное соотношение первичных и вторичных РМ в отработавших газах автомобильного двигателя, работающего на дизель-бензиновой смеси, не превышало 15. Поэтому количество высоколетучих компонентов РМ приводит к гораздо более динамичному поведению вторичных РМ, чем считалось (или прогнозировалось) раньше. Оценка этих новых результатов с точки зрения их влияния на состояние атмосферы и изменение климата требует дальнейших исследований.

Как и следовало ожидать, изменение состояния выбросов судовых дизелей под влиянием атмосферного воздуха вызывает также изменение распределения частиц по размерам (рис. 6). Имеет место также приращение массы РМ в результате конденсации и взаимодействия частиц.

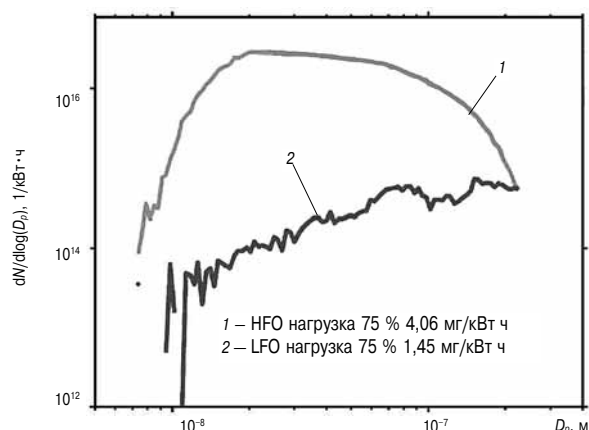


Рис. 6. Распределение по размерам вторичных частиц при работе на HFO и LFO с нагрузкой 75 %

В результате средний размер частиц значительно возрастает, при этом их распределение соответственно выравнивается. На рис. 6 распределение частиц по размерам при работе на топливе LFO, по-видимому, сильно выходит за пределы шкалы прибора SMPS. Становится понятным, почему масса частиц, полученная из распределения по размерам (1,45 мг/кВт·ч) оказывается значительно меньше, чем при определении прибором SP-AMS (~5 мг/кВт·ч).

Заключение

Результаты данной работы свидетельствуют о том, что нормирование выбросов РМ судовыми двигателями имеет смысл лишь после того, как условия пробоотбора будут определены более жестко, чем в стандарте ISO 8178. По крайней мере, это касается допустимого диапазона степени разбавления. Кроме того, если показатели выбросов РМ будут включены в состав контролируемых параметров серийных дизелей, то свойства испытательного топлива, а возможно, и масла, также должны жестко контролироваться. Впрочем, практическая реализация этого требования может оказаться трудновыполнимой. Ведь существующие нормативы регламентируют лишь максимально допустимые значения (содержания серы, зольности, плотности и т. п.), и использование разных топлив, укладываемых в эти нормативы, может дать совершенно разные показатели выбросов РМ. Поэтому необходимо продолжить исследования с тем, чтобы выяснить, какая часть выбросов частиц генерируется двигателем, и насколько они зависят от несгоревшего топлива.

Кроме того, полученные результаты в части определения выбросов элементарного и черного углерода свидетельствуют о том, что в судовых условиях эти величины могут не совпадать. Дальнейшие исследования должны выявить релевантность обоих параметров в свете предстоящего обсуждения воздействия судоходства на климат.

В ходе работ были проведены испытания с использованием камеры РАМ для имитации образования вторичного аэрозоля при фотоокислении компонентов в атмосфере. Как показали измерения, в процессе старения образуется значительное количество вторичных РМ. Среди них преобладают: для HFO — сульфаты и органические соединения, для LFO — нитраты и органические соединения.

Из-за эффекта вторичного формирования относительный вклад неорганических ионов, таких как сульфаты и нитраты, возрастает, а относительный вклад черного углерода падает, что приводит к изменению оптических свойств твердых частиц и, соответственно, к изменению оценки влияния судоходства на климат. Если указанные тезисы подтвердятся, это будет означать, что запрет на использование HFO в судовых двигателях окажет на климат земли еще более негативное влияние, чем предполагалось ранее.

Любые вновь разрабатываемые нормативы, регулирующие свойства топлив для главных судовых двигателей и уровни выбросов РМ, должны учитывать происходящие в атмосфере изменения массы и химического состава частиц. Иначе говоря, такие нормативы должны принимать во внимание вторичные трансформации РМ в атмосфере и их влияние на качество морского воздуха и окружающую среду.

Условные обозначения и сокращения

BC	Черный углерод (Black Carbon)
EC	Элементарный углерод (Elemental Carbon)
HFO	Тяжелое топливо (Heavy Fuel Oil)
LFO	Легкое топливо (Light Fuel Oil)
MAAP	Многоугловой абсорбционный фотометр (Multi-Angle Absorption Photometer)
OC	Органический углерод (Organic Carbon)
PAM	Масса потенциальных аэрозолей (Potential Aerosol Mass)
PM	Твердые частицы (Particulate Matter)
SP-AMS	Масс-спектрометр для определения сажевых аэрозольных частиц (Soot Particle Aerosol Mass Spectrometer)
UV	Ультрафиолетовые лучи (UltraViolet light)

Литература

1. Pirjola L., et al. «Mobile measurements of ship emissions in two harbour areas in Finland» Atmospheric Measurement Techniques, Vol. 7, 2014. — P. 149–161.
2. Ristimäki J., Hellen G., and Lappi M. «Chemical and physical characterization of exhaust particulate matter from a marine medium speed diesel engine» in 26th CIMAC Congress. 2010. Bergen, Norway.
3. Moldanova J., et al. «Physical and chemical characterisation of PM emissions from two ships operating in European Emission Control Areas» Atmospheric Measurement Techniques, Vol. 6, 2013, pp. 3577–3596.

4. *Eyring V., et al.* «Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping» *Atmospheric Environment*, Vol. 44, 2010, pp. 4735–4771.
5. *Righi M., Hendricks J., and Sausen R.* «The global impact of the transport sectors on atmospheric aerosol in 2030-Part 1: Land transport and shipping» *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 15, 2015, pp. 633–651.
6. *Partanen A.I., et al.* «Climate and air quality trade-offs in altering ship fuel sulfur content» *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 13, 2013, pp. 12059–12071.
7. *Murphy S.M., et al.* «Comprehensive Simultaneous Shipboard and Airborne Characterization of Exhaust from a Modern Container Ship at Sea» *Environmental Science & Technology*, Vol. 43, 2009, pp. 4626–4640.
8. *Cappa C.D., et al.* «A case study into the measurement of ship emissions from plume intercepts of the NOAA ship Miller Freeman» *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 14, 2014, pp. 1337–1352.
9. *Birch M.E. and Cary R.A.* «Elemental Carbon-Based Method for Monitoring Occupational Exposures to Particulate Diesel Exhaust» *Aerosol Science and Technology*, Vol. 25, 1996, pp. 221–241.
10. *Ntziachristos L. and Samaras Z.* «The Potential of a Partial-Flow Constant Dilution Ratio Sampling System as a Candidate for Vehicle Exhaust Aerosol Measurements» *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 60, 2010, pp. 1223–1236.
11. *Kang E., et al.* «Introducing the concept of Potential Aerosol Mass (PAM)» *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 7, 2007, pp. 5727–5744.
12. *Kang E., Toohey D.W., and Brune W.H.* «Dependence of SOA oxidation on organic aerosol mass concentration and OH exposure: experimental PAM chamber studies» *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 11, 2011, pp. 1837–1852.
13. *Cross E.S., et al.* «Real-Time Measurements of Engine-Out Trace Elements: Application of a Novel Soot Particle Aerosol Mass Spectrometer for Emissions Characterization» *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME*, Vol. 134, 2012.
14. *Schwarz J.P., et al.* «Measurement of the mixing state, mass, and optical size of individual black carbon particles in urban and biomass burning emissions» *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, 2008, pp. L13810.
15. *Petzold A., et al.* «Evaluation of multi-angle absorption photometry for measuring aerosol light absorption» *Aerosol Science and Technology*, Vol. 39, 2005, pp. 40–51.
16. *Petzold A. and Schonlinner M.* «Multi-angle absorption photometry - a new method for the measurement of aerosol light absorption and atmospheric black carbon» *Journal of Aerosol Science*, Vol. 35, 2004, pp. 421–441.
17. *Agrawal H., et al.* «Emissions from main propulsion engine on container ship at sea» *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Vol. 115, 2010.
18. *Ntziachristos L., et al.* «Particle Emissions Characterization from a Medium-Speed Marine Diesel Engine with two Fuels at Different Sampling Conditions» *Fuel*, Vol. submitted, 2016.
19. *Tkacik D.S., et al.* «Secondary Organic Aerosol Formation from in-Use Motor Vehicle Emissions Using a Potential Aerosol Mass Reactor» *Environmental Science & Technology*, Vol. 48, 2014, pp. 11235–11242.