

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 газоздушные 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 ЗДНиГ 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 полужамкнутого 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»,

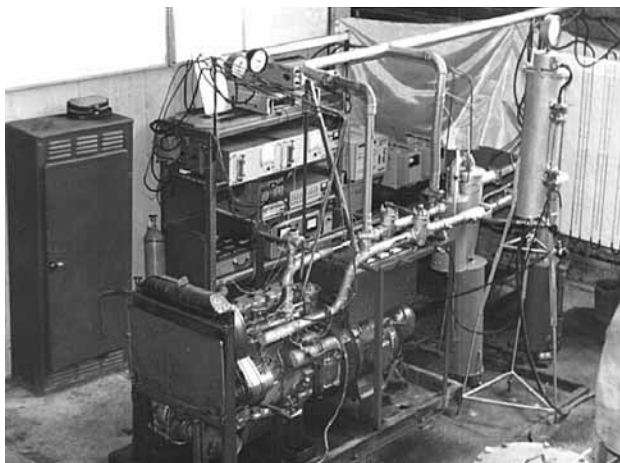


Рис. 1. Макетный образец дизельной энергоустановки мощностью 10 кВт с гидролизной системой генерации кислорода

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

Третий этап исследований по созданию ДЭУ СЦ (1993–2003) был направлен на проведение опытно-конструкторских работ (ОКР) совместно с предприятиями промышленности, а также на разработку и исследование различных вариантов анаэробных ЭУ на базе поршневых ДВС для малых подводных лодок по заказу СПМБМ «Малахит». Научным руководителем работ в ВИТУ был назначен начальник кафедры ДЭУ д.т.н. профессор А.Н. Агафонов

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].

Накопленный опыт по созданию ДЭУ СЦ для систем

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, термолизным способом генерации кислорода и последующим поглощением двуокиси 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

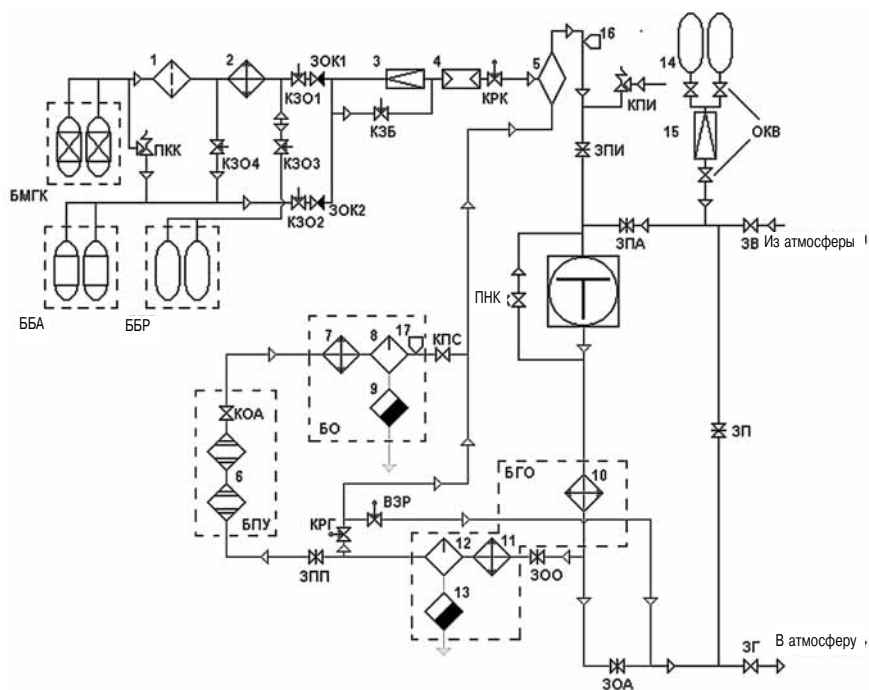


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема работы ДЭУ СЦ по «сухому» циклу:

БМГК — блок модулей генераторов кислорода; ББА — 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 газопылевого 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 адсорбера; 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; ПНК — предохранительный клапан кислородный

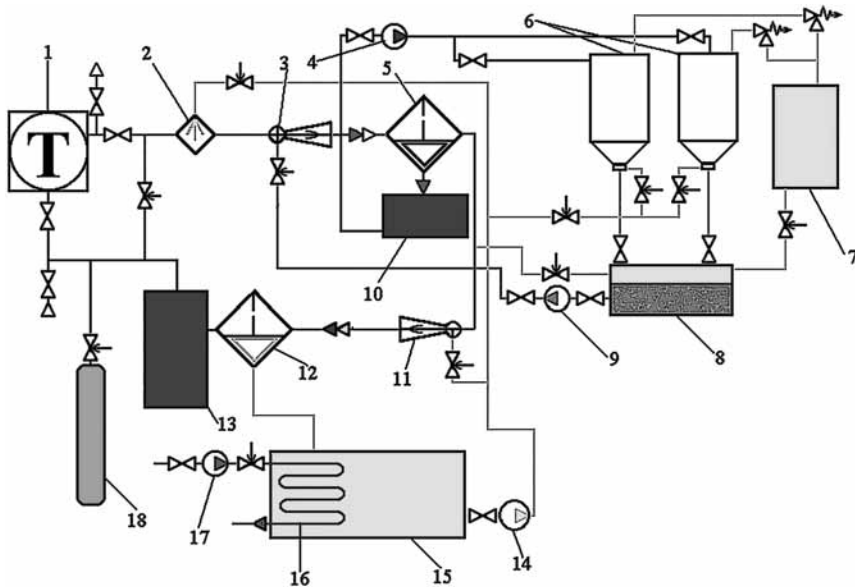


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема анаэробной энергоустановки мощностью 100 кВт:

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 двуокси 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 гидрозольным 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 ТамбовНИХИ.

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 газообразного 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

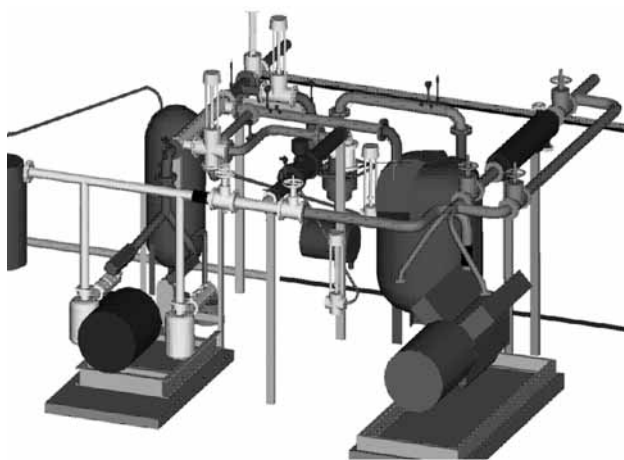


Рис. 4. 3D-модель экспериментальной ДЭУ СЦ мощностью 100 кВт

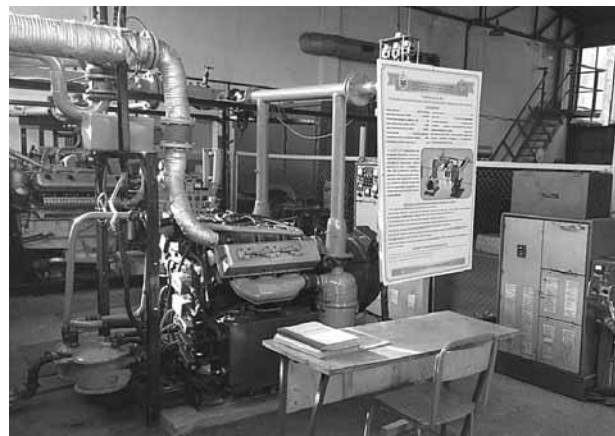


Рис. 5. Экспериментальная ДЭУ СЦ мощностью 100 кВт

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 сохранят светлую память о Валентине Гавриловиче Кривове