УДК 621.577

СИРОТА А.А., Николаевский государственный гуманитарный университет им. Петра Могилы, г. Николаев
БЕС Т., Щецинский политехнический университет, г. Щецин
РАДЧЕНКО Н.И., КОНОВАЛОВ Д.В., Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, НИИ проблем экологии и энергосбережения, г. Николаев

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСНОЙ КОГЕНЕРАЦИИ В СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Розглянуто охолодження циклового повітря в суднових дизельних двигунах ежекторними холодильними машинами, що використовують теплоту відхідних газів і наддувного повітря, та застосування малих добавок водню до палива. Показано ефективність застосування такої комплексної когенерації в суднових дизельних установках.

Cooling of cyclyc air in marine diesel engines by ejector refrigeration machines using heat of waste gas and scavenge air and adding small amounts of hydrogen to fuel have been considered. The effectiveness of aplication of such a complex cogeneration in marine diesel power plants has been proved.

1. Анализ структуры расходования топливно-энергетических ресурсов на современных дизельных судах рыбопромыслового флота

Рациональное расходование топливно-энергетических ресурсов является необходимым условием повышения конкурентоспособности и удовлетворения требований мирового рынка судов. В качестве главных двигателей на судах применяются в основном двигатели внутреннего сгорания (ДВС): малооборотные дизели (МОД) и мощные среднеоборотные (СОД), а в качестве дизельгенераторов – среднеоборотные и высокооборотные дизели (ВОД). Анализ энергетического баланса судовых дизельных энергетичеких установок (ДЭУ) показывает, что их экономичность определяется экономичностью собственно дизелей, а также степенью использования вторичных энергоресурсов и режимами работы [1]. О наличии в этом направлении значительных резервов свидетельствуют результаты анализа статей расходования топлива по судну. На рис. 1, 2 приведены доли расхода топлива на производство тепла (пара) и холода (электроэнергии для систем рефрижерации и кондиционирования воздуха), а также на обеспечение хода от суммарного потребления топлива по судну в целом для транспортных рефрижераторов универсального типа по перевозке мороженой рыбы, фруктов и других продуктов, а также промысловых судов. За основу были взяты данные по современным и модернизированным проектам транспортных рефрижераторов для перевозки мороженой рыбы и фруктов, больших морозильных рыболовных траулеров (БМРТ). При этом учитывались относительная продолжительность основных режимов работы энергооборудования (0,6…0,65 – траловые операции; 0,2…0,25 – поиск; 0,1…0,15 – сдача продукции, прием топлива, переходы к плавбазам, ремонт) и степень его загрузки. Продолжительность рейсов морозильных рыболовных траулеров принята равной шести месяцам, исходя из практики эксплуатации рыбопромыслового флота Украины в основных районах промысла: центральная, юго-западная и юго-восточная Атлантика.

Анализ результатов расчетов показывает, что

на транспортных судах и, в частности, транспортных рефрижераторах, основная доля топлива приходится на обеспечение хода судна (рис. 1). На промысловых судах на судовые электростанции подается электроэнергия, вырабатываемая в большинстве случаев валогенераторами. Поэтому при меньшей (по сравнению с транспортными судами) доле топлива на обеспечение хода основной статьей его расхода и на этих судах остается потребление топлива главным двигателем (70…80 %): сумма статей 1, 2 и 4 на рис. 2. Таким образом, очевидной является целесообразность повышения эффективности именно главного двигателя как универсального источника механической и электрической энергии, и прежде всего за счет утилизация его вторичных энергоресурсов (ВЭР).

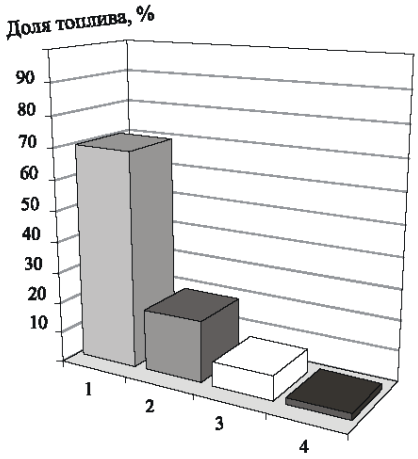

Рис. 1. Статьи расходования топлива на транспортном рефрижераторе:
1 – ход судна; 2 – холодильная установка; 3 – котельная установка; 4 – остальные потребители

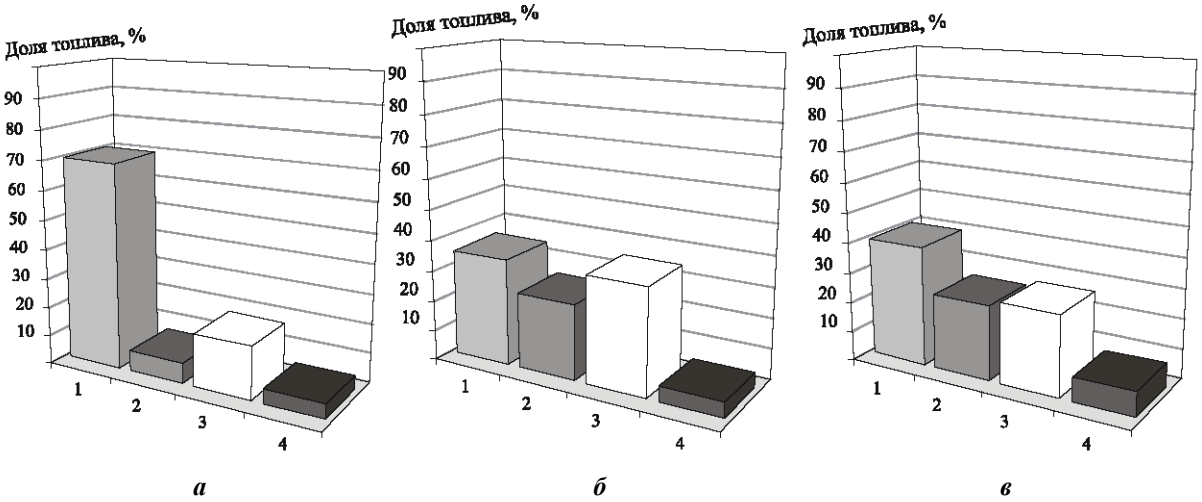

Рис. 2. Статьи расходования топлива на рыбопромысловом судне в разных режимах эксплуатации судна:
а – переходы на промысел и обратно; ***б*** – на промысле; ***в*** – в целом за рейс: 1 – ход судна; 2 – холодильная установка; 3 – котельная установка; 4 – остальные потребители

2. Анализ проблемы использования вторичных энергоресурсов судовых дизельных установок. Постановка цели исследования

Дизельные энергетические установки современных судов являются установками когенерационного типа, производящими помимо механической и электрической энергии, еще и тепловую (путем использования ВЭР дизелей). Создание высокоэкономичных высоконаддувных длинноходных МОД привело к изменению структуры их ВЭР, обусловленному понижением температуры выпускных газов $t_г$ до 250 °С и, наоборот, повышением температуры наддувочного воздуха $t_{нв}$ от 140 до 220 °С. При этом потери теплоты с выпускными газами сокращаются до 25...30 % химической энергии сжигаемого топлива, а с наддувочным воздухом, наоборот, возрастают до 5...10 %. Высокая температура наддувочного воздуха создает условия для использования

теплоты, отводимой от него в высокотемпературной ступени охладителя наддувочного воздуха (ОНВ), с целью нагрева воды до 130 °С и выше (при повышенном давлении) или производства пара низкого давления (0,2 МПа).

Однако при частичных нагрузках на ДВС наряду с уменьшением расхода наддувочного воздуха $G_{НВ}$, практически пропорциональным сокращению нагрузки N на ДВС уменьшается также, и весьма существенно, температура наддувочного воздуха $t_{нв}$ в отличие от температуры выпускных газов $t_г$, которая снижается всего лишь на 10...20 °С. Значительное уменьшение $t_{нв}$ (на 30...40 °С при снижении нагрузки на ДВС до 50 %) исключает возможность получения водяного пара давлением 0,2 МПа и нагретой до требуемой температуры воды.

Пониженная температура выпускных газов современных МОД, уменьшение расхода и температуры наддувочного воздуха на частичных режимах побуждают изыскивать дополнительные резервы более глубокой, с применением низкокипящих рабочих тел (НРТ), и комплексной утилизации теплоты ВЭР среднего и низкого потенциалов, поскольку традиционные методы утилизации ВЭР с использованием воды становятся мало эффективными.

Помимо утилизации ВЭР развитие судовых ДВС происходит и в традиционном направлении – путем совершенствования их рабочих процессов, обеспечивающего увеличение удельной мощности, уменьшения удельного расхода топлива, снижение теплонапряженности и сокращение вредных выбросов [2, 3]. При эксплуатации судового двигателя как на частичных режимах и соответственно при уменьшенной, по сравнению с номинальной, частоте вращения коленвала, и пониженных давлении и температуре наддувочного воздуха T_s, так и при повышенных температурах окружающей среды ухудшаются показатели качества рабочего процесса [4], во многом зависящие от температуры T_s.

Исходя из допустимой термической напряженности деталей цилиндропоршневой группы ведущие фирмы-изготовители судовых ДВС ограничивают температуру наддувочного воздуха T_s значением 55 ºС – для средних, согласно стандарту ISO, температур окружающего воздуха 25 ºС [5]. В жарких климатических условиях и при высоких давлениях наддува традиционные системы охлаждение наддувочного воздуха современных ДВС с применением рекуперативных теплообменников водяного охлаждения не могут обеспечить уменьшение его температуры до требуемых значений. При работе двигателя по внешней характеристике (при постоянных числе оборотов n = const и удельной цикловой подаче топлива $g_{ц.т}$ = const), которая является основной характеристикой главных судовых дизелей, под влиянием повышения температуры наддувочного воздуха T_s и, как следствие, снижения массы поступающего в цилиндры воздуха, уменьшается коэффициент избытка воздуха α, растут все характерные температуры рабочего цикла, в том числе температура выпускных газов, изменяются показатели динамики процесса сгорания, увеличиваются потери теплоты в охлаждающую среду, уменьшаются работа газов и индика-торный КПД, возрастают температура и теплонапряженность деталей цилиндропорш-невой группы (поршня, крышки и втулки цилиндров, выпускных клапанов), а также лопаток рабочего колеса газовой турбины наддувочного агрегата [6, 7].

Целью исследования является повышение эффективности эксплуатации судовых ДЭУ путем комплексной когенерации.

3. Анализ эффективности применения комплексной когенерации в судовых ДЭУ

Как отмечалось выше, традиционные рекуперативные системы водяного охлаждения не в состоянии обеспечить требуемые значения температуры наддувочного воздуха T_s при высоких температурах наружного воздуха и степенях наддува. Решение задачи охлаждения наддувочного воздуха современных высоконаддувных дизелей требует применения принципиально новых способов, и прежде всего с использованием машинного холода. Охлаждение наддувочного воздуха возможно в парокомпрессорных холодильных машинах с механическим или электрическим приводом компрессора. Однако с целью повышения топливной экономичности судовых дизелей для этих целей целесообразно использовать низкопотенциальные ВЭР ДЭУ в теплоиспользующих холодильных машинах (ТХМ). Применение низкокипящих рабочих тел (НРТ) обеспечивает глубокую утилизацию ВЭР.

Поскольку, с одной стороны, использование теплоты ВЭР ДЭУ ограничивается в большинстве случаев утилизацией теплоты охлаждающей ДВС воды в опреснительных установках, что не влияет на энергетические показатели ДВС и ДЭУ в целом, а с другой, эффективность ДЭУ в значительной степени зависит от температуры циклового воздуха ДВС (наружного на входе двигателей и наддувочного воздуха), то использование сбросной теплоты ДВС для снижения температуры воздуха путем производства холода является эффективным направлением повышения эффективности судовых ДЭУ.

Анализ эффективности применения теплоиспользующих систем охлаждения циклового воздуха дизелей на базе абсорбционных и эжекторных холодильных машин (АХМ и ЭХМ) подтвердил наличие значительных резервов в этом направлении энергетики. Хотя тепловая эффективность ЭХМ и ниже, чем АХМ, но

последним свойственны повышенные габариты из-за более низкой интенсивности теплоотдачи к растворам хладагента и абсорбента (по сравнению с чистым хладагентам) и наличия дополнительных теплообменников (абсорбера, дефлегматора, ректификатора).

Результаты расчетов, выполенные для МОД с утилизацией в ЭХМ теплоты уходящих газов с температурой около 250 °С и наддувочного воздуха, показали, что охлаждение циклового воздуха двигателей (наружного воздуха на входе и наддувочного) с использованием выработанного в ЭХМ холода обеспечивает абсолютное приращение КПД МОД η на 1,5…2,0 %. В случае СОД с температурой уходящих газов примерно 350 °С приращение КПД за счет предварительного и промежуточного охлаждения воздуха в ЭХМ составляет з = 2…4 % и даже выше.

При повышенных температурах атмосферного воздуха, соответственно и забортной воды, а также при эксплуатации ДВС на частичных нагрузках, когда из-за сокращения расхода уходящих газов и наддувочного воздуха эффективность утилизации и теплоиспользующих систем охлаждения наддувочного воздуха снижается, что приводит к повышению термической напряженности деталей цилиндропоршневой группы и расхода топлива. Кроме того, на частичных режимах глубина утилизации теплоты ограничивается опасностью возникновения сернистой коррозии. Поэтому целесообразным является использование комплексной когенерации – в комбинации с другими методами повышения эффективности двигателей, в частности, путем применения альтернативных топлив. К последним относится и водород.

Использование водорода в качестве основного топлива ДВС в настоящее время не представляется целесообразным из-за высокой стоимости водорода и трудностей его хранения в больших количествах. Очевидно, приемлемым для ДВС является частичная замена водородом углеводородного топлива, т.е. подача в цилиндры двигателя наряду с основным топливом небольших добавок водорода, что позволяет повысить эксплуатационную эффективность ДВС и их экологическую безопасность. Использование водорода в виде небольших добавок к органическому топливу двигателей СЭУ не создает проблем, связанных с его производством и хранением на борту судна. Использование экологически чистых водородных добавок особенно целесообразно при вхождении судов в прибрежные акватории и порты, когда основная нагрузка приходится на высокотоксичные дизельгенераторы.

Применение небольших добавок водорода к дизельному топливу позволяет улучшить качество смесеобразования и горения топлива в цилиндрах двигателя [8, 9]. Водородные добавки приводят к уменьшению скорости предпламенных процессов и увеличению периода задержки воспламенения. Сгорание топлива происходит с более высокими скоростями, что сокращает общую продолжительность периода сгорания, увеличивает его полноту, уменьшает конвективный и радиационный теплообмен: конвективный – за счет снижения температуры газов, а радиационный – как следствие уменьшения содержания сажи, температуры пламени. При этом происходит увеличение значения показателя адиабаты сжатия как в результате понижения температуры газов, так и благодаря увеличению содержания двухатомных газов в продуктах сгорания, обусловленному ростом коэффициента избытка воздуха.

В ходе теплотехнических испытаний четырехтактного среднеоборотного дизеля с наддувом 1ЧН 20/27 авторами было установлено, что применение добавок водорода с массовой долей 0,1 % к дизельному топливу обеспечивает уменьшение удельного расхода основного топлива примерно на 2…4 % при температуре наддувочного воздуха t_s = 20 ºС, а при увеличении t_s до 100 ºС – почти на 10 %. Поскольку применение в СОД холодильных машин, использующих теплоту уходящих газов с температурой около 350 ºС и наддувочного воздуха, обеспечивает помимо предварительного охлаждения наружного воздуха на входе ДВС еще и глубокое (дополнительно к водяному) охлаждение наддувочного воздуха, то при оценке эффективности комплесной когенерации принимали меньшую величину приращения КПД двигателя за счет применения водородных добавок, соответствующую температуре t_s = 20 ºС.

Следует отметить, что как охлаждение циклового воздуха, так и применение небольших добавок водорода приводят к снижению общего и локального температурного состояния рабочего тела в цилиндре двигателя, результатом чего является уменьшение как температуры пламени, так и температуры газов T_{max}. При этом имеет место некоторое возрастание максимального давления сгорания P_{max}. Максимальная температура цикла T_{max} становится ниже вследствие уменьшения цикловой подачи топлива, обеднения смеси и снижения теплоты ее сгорания, что в свою очередь приводит к уменьшению в отходящих газах дизеля содержания сажи в среднем до 40 % и NO_x до 30 %.

Снижение максимальной температуры цикла T_{max} создает условия для работы ДВС при повышенных температурах наддувочного воздуха на входе в цилиндры, когда системы его охлаждения, в том числе и теплоиспользующие, не справляются с повышенными тепловыми нагрузками. При этом термическая напряженность деталей цилиндропоршневой группы сохраняется на допустимом уровне.

На рис. 3 приведены результаты анализа

эффективности совместного применения теплоиспользующих систем охлаждения на базе ЭХМ и водородных топливных добавок (массовая доля около 0,1 %) для ряда судовых МОД фирмы “Ман-Бурмейстер и Вайн” [10] при температуре уходящих газов 250 °С, а на рис. 4 – для СОД при температуре уходящих газов 350 °С.

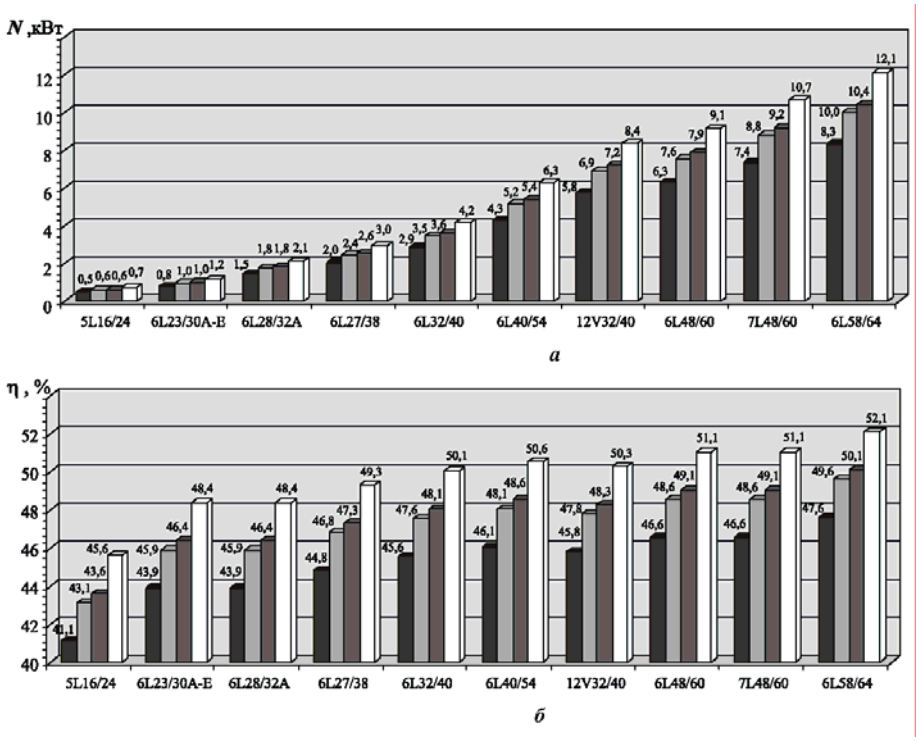

Рис. 3. Мощности *N* (*а*) и КПД η (*б*) МОД фирмы “Ман-Бурмейстер и Вайн”:
черный цвет – базовый вариант; серый – применение водородных добавок; темный – применение теплоиспользующих ЭХМ; белый – комплексная когенерация с применением ЭХМ и водородных добавок

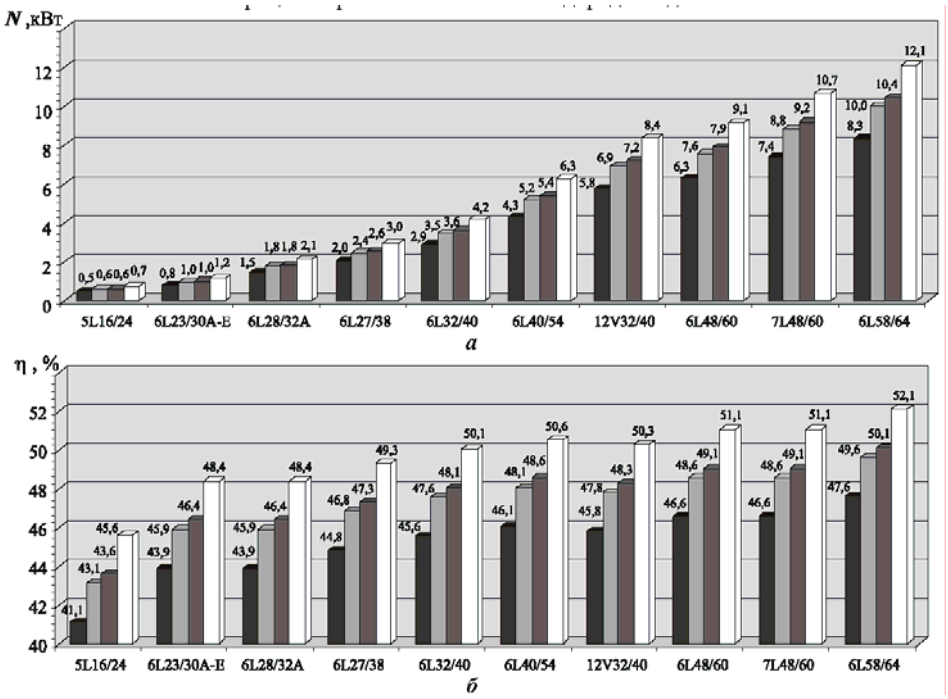

Рис. 4. Мощности *N* (*а*) и КПД η (*б*) СОД фирмы “Ман-Бурмейстер и Вайн”:
черный цвет – базовый вариант; серый – применение водородных добавок; темный – применение теплоиспользующих ЭХМ; белый – комплексная когенерация с применением ЭХМ и водородных добавок

При мощности ДВС более 5 МВт теплопроизводительность УК превосходит потребности судна в теплоте, и пар из УК может быть использован для привода утилизационного турбогенератора (УТГ), обеспечивающего потребители электроэнергией на ходу судна (вместо дизельгенераторов). Мощность УТГ может составлять $N_e^{УТГ}$ = (0,04…0,1) $N_e^{ГД}$. На транспортных судах с мощными дизелями электрическая мощность УТГ превосходит нагрузку судовой электростанции на ходовом режиме, и ее избыток может использоваться для производства в электролизерах водорода, применяемого в качестве добавок к традиционному топливу.

4. Выводы

1. Охлаждение циклового воздуха судовых дизелей с помощью эжекторных холодильных машин, использующих теплоту ВЭР, обеспечивает повышение эффективности главных и вспомогательных дизелей с уменьшением удельного потребления ими топлива на 1,5…4 по сравнению с традиционным водяным охлаждением.
2. Небольшие (около 0,1 % по массе) добавки водорода к основному топливу приводят к сокращению потребления топлива судовыми ДВС на примерно на 2 %, снижению в отходящих газах содержания вредных выбросов (сажи и NO_x).
3. Применение комплексной когенерации с совместным использованием эжекторных холодильных машин для охлаждение циклового воздуха судовых дизелей и небольших водородных добавок к топливу обеспечивает экономию топлива ДЭУ на 3…6 %, снижение термической напряженности деталей цилиндропоршневой группы и улучшает экологические показатели двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брук М.А., Виксман А.С., Левин Г.Х. Работа дизеля в нестационарных условиях. – Л.: Машиностроение, 1981. – 220 с.
2. Самсонов Л.А. Двигатели внутреннего сгорания с управляемым временем протекания процессов рабочего цикла // Двигателестроение. – 2007. – № 2. – С. 6-10.
3. Седаков Л.П., Баракан Г.Х., Калинина Л.И. Резервы повышения экономичности современных судовых дизельных энергетических установок // Судостроение. – 1987. – № 11. – С. 20-25.
4. Суворов П.С. Управление режимами работы главных судовых дизелей. – Одесса: ЛАТСТАР, 2007. – 238 с.
5. Гольтраф И.С. Охлаждение воздуха в судовых дизелях. – Л.: Судостроение, 1966. – 200 с.
6. Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, 2005. – 15 p. – http://www.mandiesel.com/files/news/filesof762/5510-0005.00pr_low.pdf.
7. Ермаков В.Ф. Экономичность работы судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1982. – 160 с.
8. Матиевский Д.Д., Вагнер В.А. Осуществление присадки водорода к топливу и ее влияние на показатели работы дизеля // Двигателестроение. – 1985. – № 2. – С. 53-56.
9. Сирота А.А. Повышение экономичности судовых ДВС путем использования водорода в качестве добавок к топливу // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. научн. трудов ХПИ. – Харьков: ХПИ, 2006. – Вып. 1. – С. 63-67.
10. Project Guide Two-stroke Engines. MC Programme. Vol. 1. – Copenhagen, 1986.

Надійшла до редколегії 24.03.07.