

## ОЦЕНКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ СУДОВЛАДЕЛЬЦЕВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ SCR-ТЕХНОЛОГИИ НА СУДАХ

Новиков Л.А., к.т.н., с.н.с.  
ООО «ЦНИДИ-Экосервис»  
Корчинский В.С., к.т.н., с.н.с.  
ВИ (ИТ) Военной академии МТО

Выполнен анализ повышения эксплуатационных затрат судовладельцев при использовании SCR-технологии очистки отработавших газов судовых дизелей от выбросов  $\text{NO}_x$ , которая рассматривается как основное техническое решение для достижения требований стандарта IMO Tier 3. Показано, что применение SCR-технологии для снижения выбросов  $\text{NO}_x$  судовых дизелей связано с возникновением технологических и эксплуатационных рисков, последствия которых почти в два раза повышают эксплуатационные затраты судовладельцев при работе судов в зонах контроля выбросов.

### Введение

Одним из основных результатов работы 65-й сессии КЗМС ИМО, состоявшейся в мае 2013 г., было принятие по инициативе Российской Федерации решения о переносе на пять лет (до 01.01.2021) введения зоны контроля выбросов (Emission Control Area for Nitrogen Oxides — NECA) и стандарта на Балтийском море. Решение было принято большинством стран членом ИМО, согласившихся с аргументами России о неготовности промышленного освоения коммерчески доступных технологий, а также неготовности инфраструктуры портов к эксплуатации судовых двигателей, соответствующих заявленным нормативам. Как показал анализ опытной эксплуатации судов с двигателями, оборудованными SCR реакторами, за прошедшие три года известные недостатки SCR-технологии, к которым относятся большие габариты, высокая стоимость, низкий ресурс работы дорогостоящих катализаторов и отсутствие технологий их утилизации, так и не были устранены.

Для России отсрочка во введении стандарта IMO Tier 3 была крайне необходимой, поскольку о проблеме промышленного освоения технологий и оборудования для предотвращения загрязнения атмосферы магистральным (не автомобильным), в том числе водным транспортом, производители отечественных судовых двигателей могли позволить себе попросту забыть почти на двадцать лет.

Этому способствовала техническая политика государства (точнее полное отсутствие таковой) в области развития двигателестроения, вследствие чего национальные стандарты РФ, регулирующие ограничение выбросов в атмосферу, длительное время не пересматривались и до настоящего времени не гармонизированы с зарубежными. Как известно, в Европе и США на ближайшую перспективу (2016–2021 гг.) нормы вредных выбросов для дизелей различного назначения, по сравнению с действующим в настоящее время уровнем, будут снижены на 60–80 % [1, 2].

Введение ограничений выбросов  $\text{NO}_x$  на уровне IMO Tier 3 распространяется только на так называемые «зоны контроля выбросов» (ECA — Emission Control Areas). В этих зонах уже введены ограничения на выбросы  $\text{SO}_2$  (за счет снижения содержания серы в топливе до уровня  $<1000 \text{ ppm}$  с 01.01.2015), а также планируется ограничить выбросы частиц (PM). Применение тяжелого топлива с высоким содержанием серы допускается только при наличии системы очистки газов от  $\text{SO}_2$  или использовании двух видов топлива: малосернистого — в зонах ECA и тяжелого — за пределами этой зоны.

В соответствии с требованиями стандарта IMO Tier 3 норма выбросов  $\text{NO}_x$  для судовых дизелей в зависимости от номинальной частоты вращения устанавливается на уровне 3,40–1,97 г/кВт·ч. Агентством по охране окружающей среды США (EPA Marine Tier 4) для судов прибрежного плавания в 2015 г. установлена норма выбросов  $\text{NO}_x = 1,8 \text{ г/кВт·ч}$ , что очень близко к нормативу IMO Tier 3, при этом содержание частиц (PM) в отработавших газах не должно превышать 0,04 г/кВт·ч. Наиболее жесткие нормы на выбросы  $\text{NO}_x$  и частиц установлены в США нормативом EPA Stationary Tier 4 с 2011 г. для промышленных дизель-генераторов, что составляет по  $\text{NO}_x = 0,67 \text{ г/кВт·ч}$ , и по частицам (PM) = 0,03 г/кВт·ч.

Приведенные данные лишней раз подтверждают стремление развитых стран к реализации ранее обозначенной стратегии радикального снижения уровня экологических показателей поршневых двигателей и постепенного сведения

их «практически к нулевым выбросам», что, в конечном итоге, приведет к значительному повышению стоимости их полного жизненного цикла, включая производство, обслуживание и утилизацию. В отношении двигателей для водного транспорта, который характеризуется наименьшим вкладом в глобальное загрязнение атмосферы, эта стратегия принята природоохранными ведомствами стран Европы и США и сформулирована ими же в качестве одного из основных общественных вызовов, по-видимому, только для того, чтобы создать экономически оправданную конкурентную среду для развития дорогостоящих альтернативных источников энергии, например топливных элементов или накопителей электрической энергии (аккумуляторов и суперконденсаторов).

#### **Риски применения SCR технологии на судах**

В соответствии с регламентом работы Комитета по предотвращению загрязнения морской среды (КЗМС) ИМО решение о сроках введения стандарта ИМО Tier 3 в зонах NECA может быть принято при выполнении трех обязательных условий:

- наличия репрезентативных данных о доминирующем (или, по меньшей мере, значительном) вкладе выбросов от судового трафика в общее загрязнение атмосферы;
- наличия промышленно освоенных и коммерчески доступных технологий, обеспечивающих выполнение заявленных технических нормативов выбросов;
- отсутствия при использовании промышленно освоенных и коммерчески доступных технологий образования токсичных отходов, требующих утилизации.

В обеспечение первого условия рабочая группа Балтийской комиссии по предотвращению загрязнения морской среды Хельсинского Комитета (HELCOM) в феврале 2011 г. подготовила и распространила от имени Балтийских государств предложение о придании статуса NECA Балтийскому морю [3], оценив долю выбросов  $\text{NO}_x$  от судового трафика в Балтийском море явно завышенной величиной в 10 %. Все предыдущие экспертные оценки выбросов с судов оценивались величиной, не превышающей 5 %, и только в локальных зонах интенсивного судоходства (порты, проливы) [4]. Затем был опубликован прогноз международной каталитической ассоциации IACCSEA (International Association for the Catalytic Control of Ship Emissions to Air) из Великобритании [5], утверждающий, что к 2020 г. вклад судоходства в загрязнение атмосферы в прибрежных мегаполисах Северного и Балтийского морей превысит выбросы от автотранспорта и составит величину порядка 30 %. Начиная с 2012 г. Агентство по охране окружающей среды Евро-

союза (ЕЕА) упоминает водный транспорт в Европе как один из источников «серьезной экологической угрозы» региону Балтийского моря. Именно эта негативная терминология все более настойчиво навязывается общественному мнению чиновниками ЕЕА в отношении коммерческого судоходства, что носит очевидные признаки тенденциозного отношения к проблемам судоходства, и скорее всего ситуация обостряется для стимулирования коммерческих проектов под флагом охраны окружающей среды.

Научно-техническим и технологическим обеспечением второго условия для объявления зоны NECA в Балтийском и Северном морях можно считать результаты комплекса НИР по созданию судовых дизелей со сверхнизкими значениями вредных выбросов с кодовым названием HERCULES [6], который был инициирован и финансировался Евросоюзом и завершен в 2015 г. Результатами исследований, выполненных в рамках проекта HERCULES, а также других независимых исследований [7, 8] было показано, что возможности имеющихся технологий для управления кинетикой образования вредных веществ при горении жидкого топлива в цилиндре дизеля недостаточны для достижения требований стандартов ИМО Tier 3, EPA Marine Tier 4 и тем более EPA Stationary Tier 4. Выполнение этих требований принципиально возможно только за счет установки внешних систем очистки газов, прежде всего технологии селективного восстановления  $\text{NO}_x$  аммиаком (Selective Catalist Redustion — SCR)

При переходе к испытаниям технологии SCR на судах она оказалась дорогостоящей и недостаточно эффективной и, кроме прочего, требующей развития соответствующей инфраструктуры, необходимой для поддержания ее функционирования. Именно отсутствие инфраструктурной готовности для поддержания технологии SCR в части заправки судов мочевиной, сбора и утилизации отработавших ресурс катализаторов, содержащих тяжелые металлы и токсичные компоненты, стало одной из причин для переноса сроков объявления Балтийского и Северного морей зоной NECA.

Однако эксперты Европейского объединения компаний двигателестроения EUROMOT [9] и международной каталитической ассоциации IACCSEA [5] продолжают упорно и не всегда обоснованно настаивать на том, что наиболее готовой технологией для промышленного освоения в целях обеспечения требований стандарта ИМО Tier 3 (гарантированно обеспечивающей снижение выбросов  $\text{NO}_x$  на 80 %) является технология селективного каталитического восстановления  $\text{NO}_x$  аммиаком, выделяющемся при

термическом разложении водного раствора мочевины (SCR-процесс). Процесс восстановления может осуществляться в присутствии различных катализаторов на основе металлов второй группы, однако оптимальному соотношению по критерию цена–качество в наибольшей степени соответствует рецептура титан-ванадиевых катализаторов.

До принятия в 2000 г. первой редакции Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78 эта технология на судах практически не применялась в силу присущей ей ряда серьезных недостатков, трудно сочетаемых с условиями на судах. Подробно недостатки SCR-процесса рассмотрены в работе [4], здесь же ограничимся их простым перечислением:

- большие габариты и вес реакторов, сопоставимые с габаритами двигателя вследствие низких скоростей процесса каталитического восстановления окислов до элементарного азота;

- неполное соответствие «температурного окна» реакции с температурой отработавших газов судового дизеля, в особенности на режимах работы с малой нагрузкой, что заметно снижает эффективность процесса, вплоть до его прекращения;

- опасность появления в выпускной системе дизеля не вступившего в реакцию газообразного аммиака, не менее токсичного чем  $\text{NO}_x$ , из-за работы двигателей на режимах с низкой и переменной нагрузкой и с учетом тепловой инерции катализаторов;

- необходимость хранения запаса восстанавливающего реагента (32,5 % водного раствора мочевины специального качества) в количестве не менее 20 % от запаса топлива;

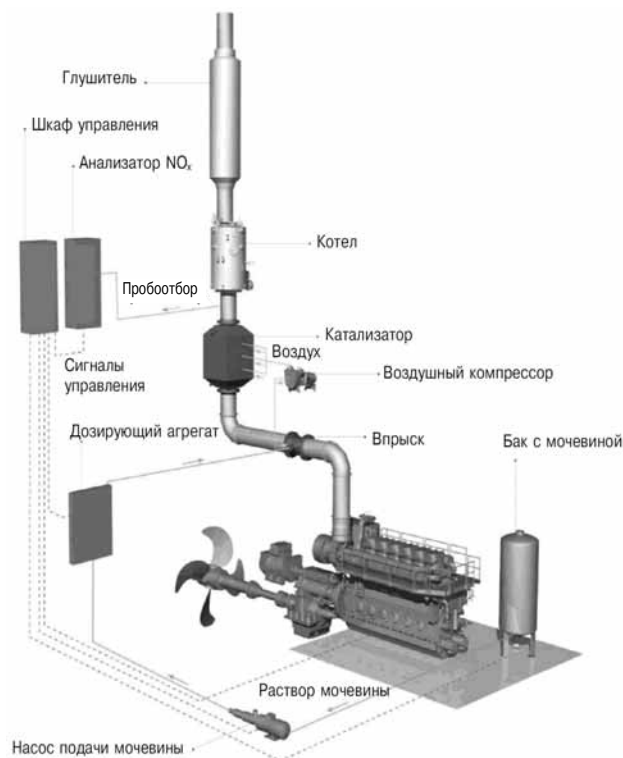
- высокие эксплуатационные риски необратимой дезактивации и необходимость преждевременной замены дорогостоящего катализатора вследствие низкого качества топлива или при авариях в топливной системе или в системе наддува;

- дополнительное выделение углекислого газа (суммарно до 3 %) из-за дополнительного расхода топлива вследствие повышения противодавления выпуску, а также в процессе гидролиза водного расхода мочевины.

В настоящее время в дизельных установках в качестве источника аммиака используется водный раствор мочевины, известный в Европе под торговой маркой AdBlue, а в США его обычно называют жидкостью для очистки отработавших газов дизелей (DEF — Diesel Exhaust Fluid).

Стандартная конфигурация среднеоборотного главного судового двигателя с SCR-реактором, предложенная фирмой «MAN Diesel & Turbo», приведена на рис. 1.

Как показал опыт эксплуатации реакторов SCR на судах — наибольшую сложность представляет



**Рис. 1. Стандартная конфигурация среднеоборотного судового дизеля с SCR-реактором**

согласование работы всех компонентов системы очистки газов, состоящей из двигателя, работающего с переменным составом и расходом газов, агрегата подачи мочевины в стехиометрическом соотношении с переменным массовым выбросом  $\text{NO}_x$  и контроля температурного режима реактора SCR. Это возможно только при наличии устройства интеллектуального управления подачей мочевины, встраиваемого в систему управления двигателя.

По данным ассоциации IACCSEA, к 2014 г., после вступления в силу норматива IMO Tier 2, в мире более пятисот судов с главными и вспомогательными двигателями различных производителей были оборудованы установками очистки газов с SCR-реакторами. Однако после контрольных проверок при первоначальных ходовых испытаниях в дальнейшем систематического наблюдения за эффективностью этих систем в условиях эксплуатации в течение многих лет не проводилось. При освидетельствованиях единственным критерием нормального функционирования системы был принят критерий соответствия расхода мочевины его расчетному значению. При этом официальная статистика по отказам, нарушениям функционирования, снижению эксплуатационной эффективности и ресурсу работы катализаторов полностью отсутствует.

В стандартной конфигурации системы предусмотрена периодическая очистка катализаторов, загрязненных сажей и аэрозолями, методом обдува сжатым воздухом от компрессора, который также используется для распыливания водного раствора мочевины. Однако эффективность этого метода защиты катализаторов вызывает обоснованные сомнения, поскольку обдув эффективен только в случае загрязнения катализаторов сухой сажей. Скорее всего, разработчиками обозначено таким образом понимание необходимости защиты катализаторов от загрязнения в условиях эксплуатации.

Результаты испытаний SCR-реактора на борту судна, полученные специалистами японских компаний «IHI Corporation» и «Diesel United Ltd.» [10], вносят некоторый диссонанс в общий одобрительный хор положительных отзывов об идеальной совместимости SCR-технологии с дизелями для достижения требований стандарта IMO Tier 3.

Было показано, что при возрастании концентрации сажи и аэрозолей в выпускном коллекторе дизеля примерно до  $90 \text{ мг/м}^3$  ( $\text{FSN} = 2,2$ ), что может быть вызвано загрязнением проточной части турбокомпрессора или возникновением не критичных неисправностей в работе форсунок, в несколько раз снижается ресурс работы катализаторов. Анализ отложений на поверхности показал, что сажа за несколько десятков часов покрывает активную поверхность катализатора блокирующим слоем толщиной приблизительно  $100 \text{ мкм}$ , что вызывает процесс его необратимой дезактивации.

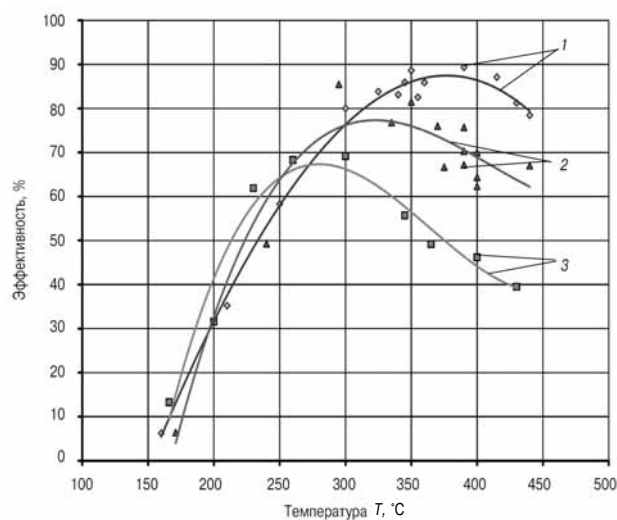
При оценке экономической эффективности применения технологии SCR на судах важнейшим показателем является ресурс работы катализаторов вследствие их высокой стоимости. При этом ресурс катализатора, пожалуй, — самый трудно прогнозируемый параметр системы. Различные производители катализаторов и оборудования для очистки газов от  $\text{NO}_x$ , работающего по SCR-процессу, декларируют ресурс работы катализаторов от 12 тыс. моторных часов. При этом ни один из производителей четко не формулирует браковочные критерии, по которым объективно можно дать заключение о том, что ресурс катализатора полностью выработан, и он подлежит замене. Работоспособность катализатора оценивается по его активности, устойчивости к отравляющему действию каталитических ядов, устойчивостью к загрязнению сажей и механической прочностью структуры носителя. С точки зрения необходимости обеспечения судовыми дизелями требований стандарта IMO Tier 3, изменение каждого из перечисленных критериев приводит к снижению эффективности катализатора в SCR-процессе.

В общем случае в процессах катализа под ресурсом понимается время работы катализатора до снижения его активности (эффективности) на 30 % по отношению к первоначальному уровню активности. При совместной работе установленного дизеля с SCR-реактором ресурсом работы катализаторов следует считать время, в течение которого выбросы  $\text{NO}_x$ , измеренные за реактором, продолжают соответствовать требованиям IMO Tier 3. Как показали результаты уже выполненных исследований, в большинстве случаев выбросы  $\text{NO}_x$  выходят за пределы нормы IMO Tier 3 после того, как эффективность SCR-процесса снижается до 70 %, то есть на 15–20 % по отношению к первоначальному уровню.

Приемлемым ресурсом для титан-ванадиевых каталитических блоков считается ресурс порядка 10–12 тыс. мото-часов, что примерно соответствует двухгодичной наработке главного судового двигателя. Названный ресурс обеспечивается при работе дизеля на малосернистых топливах (с содержанием серы не более 1000 ppm) и дымности отработавших газов не более 1,0 FSN ( $C \approx 30 \text{ мг/м}^3$ ).

Результаты выполненных в ЦНИДИ ресурсных испытаний титан-ванадиевых катализаторов, изготовленных по патенту РФ № 2061543, при имитации различных эксплуатационных рисков, приведены на рис. 2.

Как уже упоминалось, к наиболее характерным эксплуатационным рискам относятся возможные некритичные неисправности в системах дизеля



**Рис. 2. Снижение эффективности титан-ванадиевого катализатора во времени при различных эксплуатационных рисках:**

1 — базовая характеристика; 2 — наработка 300 часов ( $\text{FSN} = 1,8$ ); 3 — наработка 390 часов (содержание серы в топливе 0,5 %); условия эксперимента:  $V = 10 \cdot 10^3 \text{ л/ч}$ ;  $\text{NO}/\text{NH}_3 = 1,0$

и ошибки, связанные с человеческим фактором, например «залили не то топливо». Здесь следует пояснить, что в случае эксплуатации судна, оснащенного SCR-реактором за пределами зоны ЕСА, существует высокая степень вероятности бункеровки судна топливом с высоким содержанием серы, что вызывает риск быстрого химического «отравления» катализаторов.

Результаты ресурсных испытаний показали, что достаточно даже одного фактора эксплуатационного риска («залили не то топливо»), чтобы его последствия привели к необратимой потере активности катализатора и сокращению его ресурса по отношению к заявленному до 400 часов. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что в условиях эксплуатации необходимо выполнять инструментальный контроль эффективности SCR-процесса с периодичностью не более 500 часов.

#### **Оценка дополнительных затрат судовладельцев при эксплуатации судового дизеля с SCR-реактором**

При создании судового дизеля, соответствующего требованиям перспективных стандартов, прежде всего необходимо учитывать его конкурентоспособность по показателям первоначальной стоимости и эксплуатационным затратам на протяжении полного жизненного цикла, включая затраты на поддержание в рабочем состоянии системы очистки газов. Несколько странным выглядит то обстоятельство, что при наличии достаточно агрессивной рекламы SCR-процесса данные о дополнительных затратах судовладельцев по результатам опытной эксплуатации оборудования на судах не публикуются.

В то же время имеются некоторые данные таких оценок, выполненных по различным методикам поставщиками и потребителями оборудования, что позволяет ориентировочно оценить дополнительные затраты судовладельцев при совместной работе судового дизеля с системой очистки газов, работающей по SCR-процессу. Такая оценка стала возможной благодаря имеющемуся опыту тестовой эксплуатации SCR-технологии в судовых условиях, хотя результаты этих оценок, особенно в части эксплуатационных затрат, отличаются в несколько раз.

Поскольку в РФ системные исследования экономических последствий введения зон контроля выбросов ЕСА и стандарта IMO Tier 3 не проводились и не предвидятся, информация, приведенная в этой работе, основана главным образом на результатах исследования, выполненного рабочей группой HELCOM при участии университета Турку (University of Turku) и Центра Морских Исследований (Centre of Maritime Studies) [3].

#### **Инвестиционные затраты**

Оценки инвестиционных (капитальных) затрат, выполненные рабочей группой HELCOM, достаточно конкретны, поскольку они основаны на некоторой обобщенной рыночной стоимости производства и реализации оборудования для очистки газов, работающего по технологии SCR, сложившейся в регионе.

Производители двигателей выполнили независимую оценку инвестиционных затрат на установку двигателя с SCR-реактором на судне как единого энергетического агрегата, соответствующего требованиям стандарта IMO Tier 3. Помимо стоимости оборудования, в инвестиции включены дополнительные затраты на обеспечение совместной работы двигателя и SCR-реактора, которые составляют стоимость интеграции системы очистки газов в систему управления двигателем (блок управления, программное обеспечение, исполнительные устройства, соединительные силовые и управляющие кабели). Результаты оценки дополнительных инвестиционных затрат приведены в табл. 1.

Следует отметить, что оценка стоимости оборудования, работающего по SCR-процессу, выполнена производителями двигателей для главных среднеоборотных двигателей мощностью более 4500 кВт. При этом в анализе вообще отсутствует упоминание о затратах, относящихся к вспомогательным двигателям мощностью более 130 кВт, которые также должны быть оборудованы системами SCR. Поскольку установленная мощность вспомогательных судовых дизелей для некоторых типов судов достигает 20 % от мощности главных, то было бы логично дополнить данными о дополнительных инвестициях, относящихся к установке SCR-реакторов на высокооборотные вспомогательные судовые двигатели.

Таблица 1

#### **Инвестиционные затраты на установку двигателя с SCR-реактором на судне**

Тип и диапазон мощности двигателя		Удельные инвестиционные затраты, EUR/кВт	
Тип двигателя (вид топлива)	Диапазон мощности двигателя, кВт	Оценка затрат HELCOM	Оценка затрат производителями двигателей
Среднеоборотный (дистиллят с содержанием серы <1 %)	4500–18 000	32–64	29–70
Малооборотный (дистиллят с содержанием серы <1 %)	8500–48 000	36–59	36–59
Курс обмена валюты: 1 EUR = 1,2894 \$ (среднее значение на август 2010 г.)			

Так, например, при средней цене в Европе установленной мощности главного судового дизеля, равной  $\approx 300$  EUR/кВт, полная стоимость судового дизеля мощностью 10 МВт составит около 3 млн EUR.

Из приведенных данных следует, что в этом наиболее востребованном мощностном диапазоне размер удельных инвестиций на установку SCR-реактора в 2010 г. планировался на уровне 60 EUR/кВт или 600 000 EUR за агрегат. Действительная рыночная стоимость SCR-реактора для двигателя мощностью 10 МВт в 2014 г. составляла 1 000 000 EUR, то есть к планируемой дате введения стандарта IMO Tier 3 выросла на 40 %. Таким образом, стоимость судового двигателя, соответствие которого требованиям стандарта IMO Tier 3 обеспечивается за счет применения технологии SCR, возрастет не менее чем на 30–35 %.

#### Эксплуатационные затраты

Оценка эксплуатационных затрат выполнена с учетом опыта эксплуатации SCR-технологии в судовых условиях, хотя некоторые позиции этих оценок существенно расходятся с данными, выполненными при проведении настоящего исследования (табл. 2).

Приведенные в табл. 2 данные HELCOM и производителями двигателей расходятся в не-

сколько раз, поэтому для выполнения экономических прогнозов и ведения официальных дискуссий с оппонентами они должны быть подвергнуты критическому анализу с ниже-следующими комментариями.

При оценке эксплуатационных затрат, выполненной Канадой и США (MEPC 59/6/5), приняты во внимание только затраты на расход восстанавливающего реагента, равные 7,5 % от расхода топлива.

Оценка эксплуатационных затрат, выполненная HELCOM, кроме расходов на восстанавливающий реагент, а также расходов на осмотр и очистку катализаторов, выполняемых вручную, декларирует необходимость замены катализаторов каждые пять лет с указанием того, что эти затраты составят 60 % от первоначальной стоимости оборудования. Общие затраты на замену катализатора определены достаточно корректно, однако суммарные удельные эксплуатационные расходы, составляющие 2,55 EUR/МВт·ч, оказались более чем в два раза меньше, чем расходы на раствор мочевины (4–6 EUR/МВт·ч) по оценке производителей двигателей. По этой причине выполненная HELCOM оценка затрат может считаться существенно заниженной.

Наиболее корректная оценка ожидаемых эксплуатационных затрат выполнена производителями

Таблица 2

Дополнительные затраты на эксплуатацию двигателя с SCR-реактором

Статьи затрат при использовании технологии SCR на судне	Удельные эксплуатационные затраты по оценке различных источников		
	Оценка затрат Канадой и США (MEPC 59/6/5)	Оценка затрат HELCOM	Оценка производителей двигателей
Стоимость мочевины	EUR 1,18 за галлон (32,5 % раствор мочевины)	EUR 170 за тонну мочевины	EUR 150 за тонну мочевины, доставленной на судно в Стокгольме (Fred Holmberg & Co)
Расход мочевины в % от удельного расхода топлива	7,5 % от удельного расхода топлива	Не определялось	10 % от удельного расхода топлива (4–6 EUR/МВт·ч)
Ожидаемый полный срок службы оборудования	Не определялось	12,5 лет	15–25 лет
Срок до капитального ремонта оборудования SCR (замена катализаторов)	Не определялось	Каждые 5 лет при содержании серы в топливе <1 %	Каждые 5 лет при содержании серы в топливе <1 %
Стоимость капитального ремонта оборудования SCR (замена катализаторов)	Не определялось	Ориентировочно 60 % от основной стоимости оборудования SCR	Ориентировочно (0,35–0,75 EUR/МВт·ч)
Периодичность очистки катализаторов системы SCR	Не определялось	6 раз в каждые 1000 часов эксплуатации (один раз через каждые 155 часов)	Автоматическая очистка катализатора от сажи продувкой воздухом (приблизительно 1 раз в час). Визуальный контроль 1 раз в год
Затраты на очистку катализаторов системы SCR	Не определялось	4–6 чел.·час в год (150 EUR/1000 час)	1 чел.·день в год (сжатый воздух и энергозатраты на автоматическую очистку от сажи продувкой)
Средние эксплуатационные расходы	Не определялись	Среднее значение (2,55 EUR/МВт·ч)	Среднее значение (5,0–7,5 EUR/МВт·ч)

двигателей, уже имеющих некоторый опыт интегрирования судового дизеля с системой SCR в единый силовой агрегат.

Стоимость водного раствора мочевины по предварительным оценкам производителями двигателей составляет наибольшую статью затрат в общих эксплуатационных расходах (до 60 %), однако это справедливо только при условии ресурса работы катализаторов не менее 5 лет. Вместе с тем рыночная стоимость этого продукта подтверждена значительным колебаниям (рис. 3).

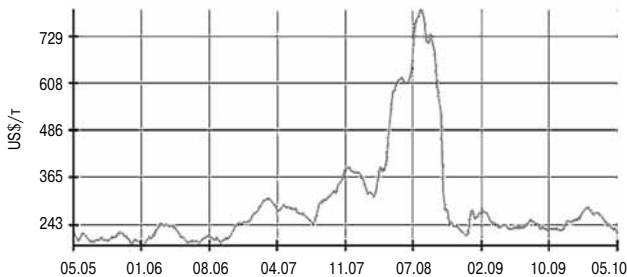


Рис. 3. Изменение стоимости химически чистой (нерастворенной) мочевины

Резкий рост рыночной цены химически чистой нерастворенной мочевины, которая используется для приготовления восстанавливающего реагента торговых марок AdBlue (32,5 % водный раствор мочевины) или DEF (Diesel Exhaust Fluid), не случайно пришелся на 2008 г., предшествующий введению новых нормативов выбросов вредных веществ для двигателей автомобильной и внедорожной техники. В настоящее время рыночная цена AdBlue стабилизировалась на уровне 270 EUR/т, то есть почти в два раза выше, чем указано в табл. 2, при этом нет никаких гарантий, что накануне введения стандарта IMO Tier 3 не возникнет очередного повышения рыночной цены на мочевину.

Ожидаемый полный срок службы оборудования SCR, определенный HELCOM периодом 12,5 лет, оказался вдвое меньше полного срока службы судна, который в Европе обычно составляет около 25 лет. При этом трудно предположить, какие экономические стимулы могут заставить судовладельца заменить или модернизировать оборудование SCR и интегрировать его в единый силовой агрегат с двигателем старой постройки.

Однако как уже было показано, самым проблемным и дискуссионным вопросом является оценка ресурса и срока службы катализатора. В настоящее время производители декларируют ресурс работы катализаторов, превышающий 12 тыс. часов, только при условии безаварийной работы дизеля на малосернистом топливе. При этом во внимание не принимаются различные технологические и эксплуатационные риски,

возникающие при работе дизеля совместно с SCR-реактором, которые, как показали результаты выполненного исследования, необратимо снижают активность катализатора и сокращают ресурс его работы в несколько раз.

В разделе, посвященном исследованию эксплуатационной эффективности SCR-процесса, было показано, что главный судовый (двухтактный или четырехтактный) дизель с SCR-реактором обеспечивает требования стандарта IMO Tier 3 по выбросам  $\text{NO}_x$  при двух условиях:

- дизель без системы очистки газов должен соответствовать требованиям стандарта IMO Tier 2;

- эффективность процесса очистки газов в поле совместных режимов работы двигателя и SCR-реактора должна быть не ниже 80 %.

Предельная эксплуатационная эффективность SCR-процесса превышает 80 % в достаточно ограниченном диапазоне температуры отработавших газов (от 330 до 420 °C), поэтому даже незначительного снижения первоначальной эффективности катализатора (всего на 15 %) будет достаточно, чтобы выбросы  $\text{NO}_x$  превысили норму.

В условиях безаварийной работы судового дизеля на малосернистом топливе (что в эксплуатации бывает крайне редко), при годовой наработке главных судовых дизелей в 6000 часов, ожидаемый ресурс работы катализаторов, по нашим данным, составит не более двух лет, вместо пяти, указанных в табл. 2. Здесь необходимо еще раз подчеркнуть, что под ресурсом работы катализатора следует считать время, в течение которого выбросы  $\text{NO}_x$ , измеренные за реактором, продолжают соответствовать требованиям IMO Tier 3. Катализатор при этом продолжает сохранять свою работоспособность, но при снижении его эффективности (например до 70 %) соответствие двигателя требованиям стандарта IMO Tier 3 уже не обеспечивается.

Таким образом, ресурс работы катализаторов, по нашему мнению, значительно завышен, а удельные затраты на замену катализатора соответственно занижены в 2,5 раза. Удельные затраты на замену катализатора с учетом уточненного определения ресурса, составят ориентировочно (0,85–1,75 EUR/МВт·ч). Именно при этих скорректированных значениях удельных затрат на замену катализатора результирующая средняя величина эксплуатационных затрат составит указанные в таблице значения (5,0–7,5 EUR/МВт·ч).

В табл. 2 отсутствуют данные по стоимости приема на утилизацию отработавших ресурс катализаторов. Стоимость сбора и утилизации катализаторов пока не определена из-за неизвест-

ных объемов предстоящей переработки старых катализаторов, которые относятся к классу токсичных отходов. Пока SCR-реакторов, находящихся в опытной эксплуатации, достаточно мало, производители принимают отработавшие ресурс катализаторы на утилизацию бесплатно, поскольку их объемы невелики, а стоимость переработки скорее всего включена в цену катализатора при продаже. Однако с ростом объемов переработки отходов этот процесс, скорее всего, будет платным и достаточно дорогим.

В соответствии с данными оценок, выполненных изготовителями двигателей, дополнительные эксплуатационные затраты, возникающие у судовладельца при установке на борту судна главного дизеля мощностью 10 МВт с SCR-реактором, за каждый год работы ориентировочно составят:

$$6,5 \text{ [EUR/МВт}\cdot\text{ч]} \cdot 10 \text{ [МВт]} \cdot 6000 \text{ [ч]} = \\ = 390 \text{ 000 EUR.}$$

Для оценки общих дополнительных затрат к этой сумме необходимо добавить амортизацию от вложенных инвестиций (1 000 000 EUR), что при нормативном сроке окупаемости оборудования, равном 10 лет, составит еще 100 000 EUR, то есть общие дополнительные годовые затраты составят 490 000 EUR.

Наиболее наглядна для судовладельцев сравнительная оценка затрат, выполненная для случая работы условного судна с мощностью главного двигателя 10 МВт в зоне ECA (например, Балтийское море) и вне зоны ECA (например, Черное море). Указанная оценка выполнена с коррекцией изменения действующих цен на топливо и реагенты, необходимые для работы системы SCR, при следующих исходных данных (табл. 3).

Таблица 3

**Исходные данные для расчета годовых затрат при эксплуатации судна с главным двигателем мощностью 10 МВт в зоне ECA**

Наименование показателей	Значение
Цена тяжелого топлива HFO, EUR/т	320
Цена малосернистого топлива MGO ( $S = 0,1 \%$ ), EUR/т	440
Цена реагента AdBlue (32,5% мочевины), EUR/т	270
Годовая наработка главного двигателя, ч	6000
Мощность главного двигателя, МВт	10,0
Расход топлива главным двигателем, т/год	5400
Расход реагента AdBlue (10 % от расхода топлива), т/год	540
Инвестиции на установку SCR на судне, EUR	1 000 000
Стоимость катализаторов на замену, EUR	600 000

Таблица 4

**Сравнение годовых затрат при эксплуатации судна с главным двигателем мощностью 10 МВт в зоне ECA и за ее пределами**

Наименование статей затрат (в расчете на один год)	Значение затрат, EUR/год	
	в зоне ECA (Балтийское море)	вне зоны ECA (Черное море)
Расходы на топливо HFO ( $S = 0,5 \%$ )	—	1 728 000
Расходы на топливо MGO ( $S \leq 0,1 \%$ )	2 376 000	—
Расходы на реагент AdBlue (32,5 % мочевины)	145 800	—
Амортизация инвестиций на установку SCR на судне (при сроке окупаемости 10 лет)	100 000	—
Амортизация стоимости катализаторов (при сохранении эффективности более 80% в течение 2 лет)	300 000	—
<b>Годовые затраты всего</b>	<b>2 921 800</b>	<b>1 728 000</b>

Результаты расчетов в форме, удобной для сравнения при работе судна в зоне ECA (Балтийское море) и вне зоны ECA (Черное море) приведены в табл. 4. Расчеты выполнены при допущении, что расход топлива и годовая наработка главным двигателем в сравниваемых вариантах примерно одинаковы.

Результаты расчета показали, что в структуре годовых затрат при использовании технологии SCR доминирует статья, предусматривающая перевод двигателя на малосернистое топливо (40 % в общих затратах). Это, как показали результаты исследования, вынужденная мера, которая не столько обеспечивает приемлемый ресурс работы катализаторов, сколько определяет саму возможность использования технологии SCR на судах.

Вопреки всеобщему мнению основу эксплуатационных расходов составляют вовсе не затраты на восстанавливающий реагент (12 % в общих затратах), а расходы на амортизацию (отчисление средств) для приобретения катализаторов на замену отработавших ресурс (25% в общих затратах).

Следует отметить, что суммарные годовые эксплуатационные затраты по оценке производителей двигателей (без учета затрат на малосернистое топливо) составили 490 000 EUR, что достаточно близко к результатам приведенного выше расчета (545 800 EUR). Исходя из этого, можно предположить, что общие удельные эксплуатационные затраты (5,0–7,5 EUR/МВт·ч) определены достаточно корректно, в то время как статья затрат на замену катализатора (случайно или намеренно) в значительной мере занижена.



При всей условности и простоте выполненного экономического анализа, а именно эта задача ставилась для выявления наиболее существенных статей затрат применения технологии SCR на судах, совершенно очевидно, что введение зон ЕСА в отдельных морях или портах ставит судовладельцев в несопоставимые конкурентные условия. При этом инициаторам выбранной технической политики и природоохранной стратегии предстоит осознать экономические последствия для коммерческого судоходства в морях и портах, где уже введены зоны ЕСА.

### Заключение

Современные требования к радикальному сокращению уровня выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей позволяют определить приоритетные потребительские свойства перспективного судового дизеля. Это дизель, который имеет приемлемый эффективный КПД (не менее 48 %) и низкий уровень выбросов, прежде всего окислов азота и частиц, соответствующий требованиям перспективных экологических стандартов, таких как IMO Tier 3 и EPA Marine Tier 4. Эти приоритетные потребительские свойства определяют конфигурацию перспективного судового двигателя, которая усложняется пропорционально снижению уровня вредных выбросов, что значительно повышает стоимость его эксплуатации.

Современный уровень развития технологий управления кинетикой горения топлива и образования вредных веществ в цилиндре дизеля (то есть воздействия на внутрицилиндровые процессы), при всем энтузиазме их сторонников, недостаточен для обеспечения требований перспективных экологических стандартов, прежде всего выбросов NO<sub>x</sub> и частиц, поэтому наличие системы очистки газов в конфигурации перспективного двигателя неизбежно.

При выполнении настоящего исследования ставилась задача дать оценку экологическим, техническим и экономическим последствиям придания статуса NECA Балтийскому морю. Оценка дополнительных затрат судовладельцев показала, что они достаточно высоки и решающим образом могут повлиять на экономику коммерческого судоходства.

Для адаптации технологии и оборудования, работающего по SCR-процессу в судовых условиях, необходимо продолжить научные исследования

по совершенствованию этой технологии в следующих направлениях:

- совершенствование рецептуры и химического состава катализаторов для повышения их ресурса и стойкости к химическому отравлению продуктами горения серы и других каталитических ядов;
- разработка и внедрение эффективных средств защиты катализаторов от загрязнения сажей и аэрозолями топлива и смазочного масла, а также средств их эффективной регенерации в условиях эксплуатации;
- разработка технологии регенерации катализаторов, отработавших ресурс;
- расширение температурного окна реакции восстановления NO<sub>x</sub> в область температуры отработавших газов, меньшей 300 °С, для обеспечения эффективной работы реактора на режимах малых нагрузок двигателя.

### Литература

1. Revised MARPOL 73/78 ANNEX VI. Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships. Resolution MEPC 176(58). IMO, London, October 10, year 2008.
2. DIRECTIVE 91/68/EC of the European Parliament and of the Council. Regulations for the Emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery. Official journal of the European Union. L 146 of 30 April 2004.
3. HELCOM 32/2011. Proposal to designate the Baltic Sea as an Emission Control Area for Nitrogen Oxides. Report of the NECA correspondence group, Document 4/4, Helsinki, Finland, March 2011, 88 p.
4. Новиков Л.А. Ограничение выбросов NO<sub>x</sub> на уровне IMO Tier 3 для судовых дизелей отложено до 2021 года // Двигателестроение. — 2013. — № 2 (252). — С. 26–32.
5. J. Briggs, J. McCarney (IACCSEA, UK). "Field experience of Marine SCR". CIMAC Congress 2013, Shanghai, China, Paper Nr. 220, 7 p.
6. N. Kyrtatos, L. Hellberg, C. Poensgen. Ten Years After: Results from the Major Program HERCULES A-B-C on Marine Engine R&D. CIMAC Congress 2013, Shanghai, China, Paper Nr. 18, 8 p.
7. Технологии снижения вредных выбросов дизелей. Состояние и перспективы развития (обзор материалов конгресса CIMAC 2010) // Двигателестроение. — 2011. — № 4 (246). — С. 48–56.
8. G. Tinschmann, D. Thum and others. Sailing towards IMO Tier III - Exhaust Aftertreatment versus Engine-Internal Technologies for Medium Speed Diesel Engines. MAN Diesel & Turbo SE, Germany. CIMAC Congress 2010, Bergen, Norway, Paper Nr. 274, 9 p.
9. Here Comes IMO Tier 3. Interview EUROMOT "Diesel & Gas Turbine Worldwide", July-August, 2014, p. 46–50.
10. Y. Izumi, H. Ohara, M. Irie, K. Moriyama. Urea-SCR system for pollution control in marine diesel engines. CIMAC Congress 2013, Shanghai, China, Paper Nr. 172, 7 p.