

УДК 621.43.068.4-634.8

doi: 10.32620/aktt.2019.7.12

В. С. КОРНИЕНКО¹, Р. Н. РАДЧЕНКО², Ю. Г. ЩЕРБАК³¹ Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова,
Херсонский филиал, Украина² Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина³ Черноморский национальный университет им. П. Могилы, Украина

СОКРАЩЕНИЕ ВЫБРОСОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ ВОДОТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ С ИСПОЛЬЗАНИЕМ ЭФФЕКТА "МИКРОВЗРЫВОВ"

Требования международных организаций в области охраны окружающей среды, уменьшения тепловых потерь и тепловых выбросов при сжигании органических топлив, повышение экономичности и надежности эксплуатации как стационарных, так и судовых энергетических установок (СЭУ) остро ставят вопрос разработки комплексных технологий очистки. Целью исследования является разработка технологии комплексной очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Для решения задач по технологии предлагаемого способа очистки выхлопных газов было предусмотрено 6 этапов технологического процесса. Установлено, что первостепенным и решающим фактором для решения поставленных задач в разработке комплексной системы улучшения экологических показателей, уменьшения коррозии и тепловых выбросов является организация процесса сжигания в ДВС водотопливных эмульсий (ВТЭ) на основе сернистых топлив с водосодержанием около 30 % и использованием эффекта "микровзрывов" капель воды. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при сжигании ВТЭ с водосодержанием $W^r = 30\%$ в газах создается эквимолярное (или близкое к этому) соотношение $NO_2 : NO$ необходимое для активизации абсорбционных свойств выхлопных газов. Результаты исследований показали, что при этих условиях проходит пассивация поверхности металла с температурой ниже температуры точки росы паров H_2SO_4 и поэтому появляется возможность существенного снижения низкотемпературной коррозии конденсационной поверхности. Это дало возможность установить на выходе из утилизационного котла после ДВС низкотемпературную конденсационную поверхность нагрева с температурой поверхности ниже температуры точки росы паров серной кислоты. Анализ экспериментальных данных показал, что: 1 м² конденсационной поверхности поглощает 3,4 мг/м³ NO_x и 0,89 мг/м³ SO_2 , что позволяет снизить концентрацию NO_x в 1,55 раза, а SO_2 - в 1,5 раза. Кроме того, происходит процесс осаждения твердых зольных и сажевых частиц от 150...170 мг/м³ (на выходе из двигателя при сжигании ВТЭ с $W^r = 30\%$) до 70...90 мг/м³ после конденсационной поверхности. Разработанная комплексная система может использоваться для очистки газов ДВС до уровня, рекомендованного IMO.

Ключевые слова: водотопливные эмульсии; скруббер; утилизация; загрязнения; низкотемпературная коррозия.

Введение

Требования международных организаций в области охраны окружающей среды, уменьшения тепловых потерь и выбросов при сжигании органических топлив, повышение экономичности и надежности работы энергетических установок остро ставят вопрос разработки комплексной технологии решения указанных задач на всех этапах: подготовки топлива к сжиганию; самого процесса горения; снижения скорости низкотемпературной коррозии (НТК), глубокой утилизации с использованием не только явной теплоты, но и теплоты конденсации паров H_2SO_4 и H_2O , содержащиеся в выхлопных

газах; очистки газов от токсичных ингредиентов. Это требует соответствующей организации физико-химических процессов.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

В данное время широко применяются физико-механические и физико-химические методы, способы и оборудование для очистки выхлопных газов от загрязняющих веществ и содержащихся в них вредных примесей [1-3].

К наиболее известным и широко применяемым за рубежом технологиям снижения концентрации загрязняющих веществ в выхлопных газах энергети-

ческих установок относятся: технологии фирмы Alfa Laval (Aalborg Industries) [1]; технологии, предлагаемые фирмой Wärtsilä [2]; технология CSNOx фирмы Ecospec [3].

В качестве прототипа [3], рассматривается система очистки выхлопных газов CSNOx, разработанная компанией "Ecospec Global Technology", которая в отличие от ранее рассмотренных технологий, позволяет более интенсивно и одновременно снижать содержание трех токсичных ингредиентов - SO_2 , CO_2 и NO_x . В прототипной технологии не учитываются вопросы надежности работы газового тракта элементов энергетической установки, возможности увеличения глубины утилизации теплоты выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) за счет снижения их температуры ниже температуры точки росы (ТТР) паров серной кислоты (130°C) и водяных паров (ниже 48°C) и улавливания твердых частиц до скрубберов. Последовательность технологических процессов очистки потока газов не учитывает изменение условий в газовом тракте самого энергетического оборудования (ДВС, котлы), начиная от зоны горения топлива и до выхода газов из этих элементов энергетической установки.

Целью исследования является разработка технологии комплексной очистки выхлопных газов ДВС.

Методология исследований

Возможность решения сложных задач в предлагаемой технологии обеспечивается сжиганием водотопливных эмульсий (ВТЭ) со специально рекомендованным значением содержания воды ($W^r = 30\%$). Такой состав ВТЭ существенно влияет не только на протекание тепловых и физико-химических процессов по всему пути агрегатов сжигания топлива, но и направляет их в необходимом направлении.

Для решения задач по технологии предложенного способа предусмотрено 6 этапов технологического процесса:

1) подготовка воды необходимого качества для приготовления ВТЭ с целью обеспечения условий сжигания ВТЭ с водосодержанием около 30 %;

2) сжигание ВТЭ соответствующего качества с водосодержанием около 30 %, что приводит к получению эквимолярного или близкого к нему соотношения $\text{NO}_2 : \text{NO}$ в выхлопных газах на выходе из зоны горения, обеспечивающего снижение НТК, а также снижение эмиссии NO_x , SO_2 , CO_2 ;

3) установка конденсационных низкотемпературных поверхностей нагрева (НТПН), на поверхности которых создаются условия пассивации поверх-

ности металла и резкого снижения интенсивности НТК, а также условия со стороны газов и в конденсате для интенсификации абсорбции NO_x , SO_2 , CO_2 ;

4) продолжение интенсификации абсорбции на конденсационных поверхностях газоходов до скрубберной части (при обеспечении условий надежной работы металла) или поддержание температуры металла этих газоходов выше ТТР H_2SO_4 без абсорбции NO_x , SO_2 , CO_2 , но при обеспечении надежности работы (при низком уровне НТК);

5) применение интенсивных скрубберных технологий с применением процессов активизации абсорбции NO_x , SO_2 , CO_2 ;

6) защита металла газоходов после скрубберов.

Результаты исследований

Как показали проведенные нами научные исследования, связанные с развитием тепловых и физико-химических процессов в элементах СЭУ, первостепенным и решающим фактором для решения поставленных задач в разработке комплексной системы улучшения экологических показателей, уменьшение коррозии и тепловых потерь, повышение экономической эффективности является организация процесса сжигания в ДВС ВТЭ (на основе сернистых топлив) с водосодержанием около 30 % (второй этап) и использованием эффекта "микровзрывов" капель воды.

Для выполнения задачи активизации абсорбционных свойств выхлопных газов необходимо обеспечить эквимолярное (или близкое к этому) соотношение $\text{NO}_2 : \text{NO}$ в газах. Как показали наши исследования [4], такое соотношение (или близкое к нему) автоматически создается в конце зоны горения ВТЭ с водосодержанием $W^r = 30\%$ вследствие влияния интенсивной турбулентности, создаваемой при микровзрывах капель ВТЭ в зоне активного горения.

При этих условиях проходит пассивация поверхности металла с температурой ниже ТТР H_2SO_4 и поэтому появляется возможность существенного снижения НТК конденсационной поверхности, что подтверждается полученным патентом [4]. Это дает возможность установить на выходе из утилизационного котла (УК) после ДВС НТПН с температурой поверхности ниже ТТР паров серной кислоты (температура стенки t_{ct} может поддерживаться в диапазоне $130\ldots70^\circ\text{C}$) (третий этап) благодаря микровзрывам при конденсации паров на НТПН. В результате вся поверхность, например, экономайзера является конденсационной, покрытой слоем мокрых (от конденсата кислоты) загрязнений. Причем концентрация серной кислоты в этом диапазоне t_{ct} так-

же естественно (вследствие соответствующего прохождения физико-химических процессов) устанавливается на уровне 57 %, при котором наблюдается максимум абсорбции SO_2 (рис. 1).

На интенсивность абсорбционных процессов в конденсате на НТПН в котлах и газоходах влияет наличие загрязнений на этих поверхностях [5]. Поэтому важно, как развиваются процессы загрязнения поверхностей нагрева и газоходов при сжигании ВТЭ. В слое увлажненных кислотой загрязнений происходит активизация процесса абсорбции NO_x и особенно SO_2 раствором серной кислоты, имеющейся в загрязнениях. Обеспечение процесса абсорбции оксидов NO_x , SO_2 и CO_2 конденсатом серной кислоты на конденсационных поверхностях котлов рассматривается как третий этап очистки выхлопных газов от токсичных ингредиентов.

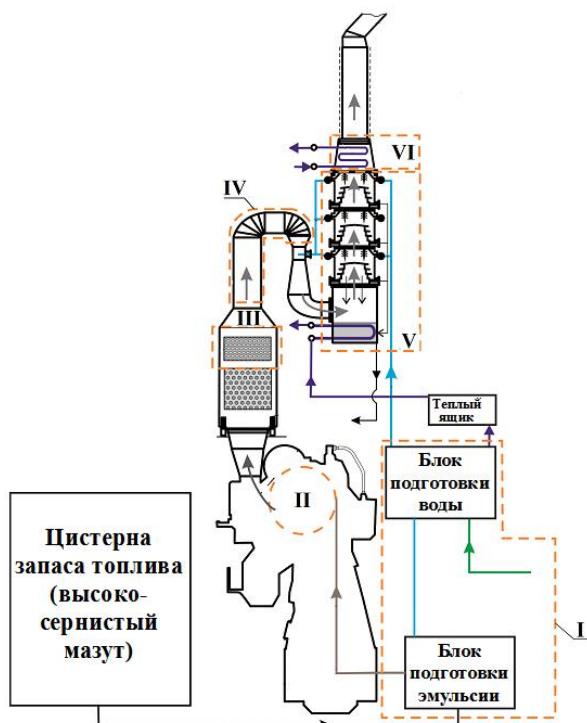


Рис. 1. Схема установки для комплексной очистки газов:

I – кавитационная обработка ВТЭ; II – уменьшение концентрации токсичных ингредиентов и твердых частиц в газах при сжигании ВТЭ с водосодержанием 30 %; III – процессы адсорбции, протекающие на конденсационных конвективных поверхностях УК; IV – процессы, протекающие на конденсационных поверхностях газоходов; V – скрубберная технология очистки газов; VI – подсушка газов

После конденсационной поверхности, установленной на выходе из УК, выхлопные газы попадают в газоход. Концентрация паров кислоты в газах становится ниже и соответственно снижается ее ТТР

H_2SO_4 , что облегчает защиту металла газохода после конденсационной НТПН.

Важным для осуществления следующих этапов очистки выхлопных газов, оценки их коррозионного воздействия на металл газоходов паров H_2SO_4 и H_2O является то, что в ходе физико-химических процессов в слое конденсата и загрязнений, имеющихся на конденсационных поверхностях, снижается не только концентрация NO_x и, что важно, увеличивается содержание в них NO_2 , что обеспечивает эквимолярные соотношения $\text{NO} : \text{NO}_2$ в потоке газов после конденсационной теплообменной поверхности УК. Значит появляется возможность при наличии конденсата H_2SO_4 на внутренней металлической поверхности газохода (в районе и после НТПН) обеспечить пассивацию поверхности металла газохода при дальнейшем процессе очистки выхлопных газов от NO_x , SO_2 по тому же механизму, что и в предыдущей конденсационной поверхности нагрева на выходе из УК (способ защиты от НТК). Для обеспечения процесса конденсации газоход должен иметь такую толщину изоляции, чтобы обеспечить температуру стенки ниже ТТР H_2SO_4 в этом газоходе и перепад температур газов и стенки на уровне 10...15 °C, при котором будет проходить конденсация. При таком теплоперепаде обеспечивается минимальный уровень коррозии и дополнительно идет процесс пассивации металла, что повышает надежность поверхностей, и, кроме того, будет обеспечена дополнительная очистка газов от NO_x и SO_2 . Таким образом, указанные процессы обеспечивают четвертый этап очистки выхлопных газов.

Чтобы обеспечить конечную очистку выхлопных газов от NO_x и SO_2 до уровня, соответствующего нормативным документами IMO, необходимо использование скрубберных технологий [1]. С целью очистки выхлопных газов с помощью скрубберных технологий после выхода газов из УК устанавливается на газоходе мокрый скруббер последовательной очистки газов ДВС от SO_2 , NO_x и CO_2 при сжигании высокосернистых топлив (пятый этап).

Вследствие существенного снижения температуры выхлопных газов (ниже 50 °C) в скрубберах после ДВС (ГТД) и котла, в которых имеются пары воды с кислотными свойствами, возможна при этих условиях их конденсация на внутренней поверхности газоходов после скрубберов. Поэтому необходимо применить подсушку влажных выхлопных газов (шестой этап). Подсушка влажных газов после скруббера проводится за счет установки экономайзера. В трубках этих пленочных теплообменников движется горячая вода, а поперек трубок снаружи газы.

Экспериментальные исследования показали: 1 м² конденсационной поверхности абсорбирует

3,4 мг/м³ NO_x и 0,89 мг/м³ SO₂. При этом важно, что дополнительно имеет место процесс осаждения токсичных твердых зольных и сажистых частиц: от 150...170 мг/м³ (на выходе из топки при сжигании ВТЭ с W^r = 30 %) до 50...60 мг/м³ после конденсационной поверхности.

ВЫВОДЫ

При сжигании ВТЭ с водосодержанием 30 % снижается интенсивность НТК, что позволяет установить конденсационные поверхности нагрева в УК. Установка конденсационной поверхности нагрева в УК снижает содержание в газах NO_x на 55 %, SO₂ - на 50 %, а содержание твердых частиц - в 3 раза. Использование комплексной системы обеспечивает очистку газов от токсичных ингредиентов и тепловых выбросов до уровня, рекомендуемого IMO.

Литература

1. *Assessment of possible impacts of scrubber water discharges on the marine environment [Online]* / J. Kjølholt, S. Aakre, C. Jürgensen, J. Lauridsen // *The Danish Environmental Protection Agency, Environmental Project*. – 2012. – No.1431. – 92 p. – Available at: <http://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2012/06/978-87-92903-28-0.pdf>. – 01.04.2013.

2. *PureSOx Exhaust gas cleaning [Online]*. – Available at: <http://www.alfalaval.com/industries/marine/oiltreatment/Documents/PureSOx%20product%20brochure.pdf>. – 04.03.2013).

3. *Ecospec CSNOxTM Brochure [Online]*. – Available at: http://www.ecospec.com/upload/brochure/pdf/67_uez4cere8bt2axql5896mgz76wsbasv.pdf. – 04.09.2013.

4. Пат. 99408 Україна, МПК C23F 11/10, F22B 37/00, F23J 15/00. Спосіб захисту металу низькотемпературних поверхонь нагріву котла від сірчанокислотної корозії [Текст] / В. Ю. Горячкін, А. В. Горячкін, О. В. Акімов, В. С. Корнієнко ; заявник

ник НУК. – №a201110299 ; заявл. 23.08.11 ; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15. – 8 с.

5. Radchenko, M. *Semi-Empirical Correlations of Pollution Processes on the Condensation Surfaces of Exhaust Gas Boilers with Water-Fuel Emulsion Combustion [Text]* / M. Radchenko, R. Radchenko, V., M. Pyrysunko. – In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham. – 2020. – P. 853-862. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_85.

References

1. Kjølholt, J., Aakre, S., Jürgensen, C., Lauridsen, J. *Assessment of possible impacts of scrubber water discharges on the marine environment*, The Danish Environmental Protection Agency, Environmental Project, no. 1431, 92 p. Available at: <http://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2012/06/978-87-92903-28-0.pdf> (accessed: 01.04.2013).

2. *PureSOx Exhaust gas cleaning*. Available at: <http://www.alfalaval.com/industries/marine/oiltreatment/Documents/PureSOx%20product%20brochure.pdf> (accessed: 04.03.2013).

3. *Ecospec CSNOxTM Brochure*. Available at: http://www.ecospec.com/upload/brochure/pdf/67_uez4cere8bt2axql5896mgz76wsbasv.pdf (accessed: 04.09.2013).

4. Horyachkin, V. Yu., Horyachkin, A. V., Akimov, O. V., Korniyenko V. S. *Sposib zahistu metalu niz'kotemperaturnih poverhon' nagriva kotla vid sirchanokislotnoi korozii* [Method for metal protection of low-temperature surfaces of boiler heating from sulfuric-acid corrosion]. Patent UA, no 99408, 2012.

5. Radchenko, M., Radchenko, R., Kornienko, V., Pyrysunko, M. *Semi-Empirical Correlations of Pollution Processes on the Condensation Surfaces of Exhaust Gas Boilers with Water-Fuel Emulsion Combustion*. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham. 2020, pp. 853-862. doi: 10.1007/978-3-030-22365-6_85.

Поступила в редакцию 15.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

СКОРОЧЕННЯ ВИКІДІВ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕФЕКТУ "МІКРОВИБУХІВ"

B. С. Корнієнко, Р. М. Радченко, Ю. Г. Щербак

Вимоги міжнародних організацій в галузі охорони навколошнього середовища, зменшення теплових втрат і теплових викидів при спалюванні органічних палив, підвищення економічності та надійності експлуатації як стаціонарних, так і суднових енергетичних установок (СЕУ) гостро ставлять питання розробки комплексних технологій очищення. Метою дослідження є розробка технології комплексного очищення вихлопних газів двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). Для вирішення завдань з технології запропонованого способу очищення вихлопних газів було передбачено 6 етапів технологічного процесу. Встановлено, що першорядним і вирішальним фактором для вирішення поставлених завдань в розробці комплексної системи покращення екологічних показників, зменшення корозії і теплових викидів є організація процесу спалювання в ДВЗ водопаливних емульсій (ВПЕ) на основі сірчистих палив з водовмістом близько 30 % і використанням ефекту "мікровибухів" крапель води. Проведені експериментальні дослідження показали, що при

спалюванні ВПЕ з водовмістом $W_r = 30\%$ в газах створюється еквімолярне (або близьке до цього) співвідношення $\text{NO}_2 : \text{NO}$ необхідне для активізації абсорбційних властивостей вихлопних газів. Результати досліджень показали, що при цих умовах проходить пасивація поверхні металу з температурою нижче температури точки роси пари H_2SO_4 і тому з'являється можливість істотного зниження низькотемпературної корозії конденсаційної поверхні. Це дало можливість встановити на виході з утилізаційного котла після ДВЗ низькотемпературну конденсаційну поверхню нагріву з температурою поверхні нижче температури точки роси пари сірчаної кислоти (нижче 130°C). Аналіз експериментальних даних показав, що: 1 m^2 конденсаційної поверхні поглинає $3,4\text{ mg/m}^3 \text{NO}_x$ і $0,89\text{ mg/m}^3 \text{SO}_2$, що дозволяє знизити концентрацію NO_x - в 1,55 рази, а SO_2 - в 1,5 рази. Крім того відбувається процес осадження твердих зольних і сажових часток: від $150...170\text{ mg/m}^3$ (на виході з двигуна при спалюванні ВПЕ з $W_r = 30\%$) до $70...90\text{ mg/m}^3$ після конденсаційної поверхні. Розроблена комплексна система може використовуватись для очищення газів ДВЗ до рівня, рекомендованого IMO.

Ключові слова: водопаливні емульсії; скрубер; утилізація; забруднення; низькотемпературна корозія.

REDUCTION OF EMISSIONS FROM INTERNAL COMBUSTION ENGINE IN WATER-FUEL EMULSIONS COMBUSTION USING THE "MICROEXPLOSIONS" EFFECT

V. S. Kornienko, R. M. Radchenko, Y. G. Shcherbak

The requirements of international organizations in the field of environmental protection, reduction of heat losses and thermal emissions from the burning of organic fuels, increasing the efficiency and reliability of operation both stationary and ship's power plants (SPP) acutely raise the question of the development of complex cleaning technologies. The study aims to develop a system for complex exhaust gas cleaning of the internal combustion engine (ICE). For performing tasks in the technology of the proposed method were envisaged 6 stages of a technological process. It was established that the primary and decisive factor for solving the tasks in development a complex system for improving environmental indicators, reducing corrosion and heat emissions is the organization of the water-fuel emulsion (WFE) combustion process in the ICE based on sulfur fuels with water content of about 30% and using the effect of "microexplosions" drops of water. The conducted experimental studies have shown that when WFE is burned with water content $W_r = 30\%$, an equimolar (or almost this) $\text{NO}_2 : \text{NO}$ ratio necessary for activating the absorption properties of exhaust gases is created in gases. The results of studies have shown that under these conditions, passivation of the metal surface with a temperature below of dew point temperature of H_2SO_4 vapors takes place and therefore it becomes possible to significantly reduce the low-temperature corrosion of the condensation surface. This made it possible to install a low-temperature condensing heating surface with a surface temperature below the dew point of sulfuric acid vapor at the outlet of exhaust gas boiler after the ICE. Analysis of the experimental dates shows that: 1 m^2 of condensing surface absorbs 3.4 mg/m^3 of NO_x and 0.89 mg/m^3 of SO_2 , which makes it possible to decrease the NO_x concentration by 1.55 times and SO_2 - in 1.5 times. There is a process of precipitation of toxic solid ash and soot particles: from $150...170\text{ mg/m}^3$ (at the outlet of ICE when WFE is burnt with $W_r = 30\%$) to $70...90\text{ mg/m}^3$ after the condensing surface. Consumption of water with alkaline properties decreases when NO_x , SO_2 , CO_2 concentration is reduced in front of scrubbers. Reducing pollution of heating surfaces increases the cleaning period of EGB in 2.5 times. The developed complex system can be used to clean the ICE gases to the level recommended by IMO.

Keywords: water-fuel emulsions; scrubber; utilization; pollution; low-temperature corrosion.

Корниенко Виктория Сергеевна – канд. техн. наук, доц. без уч. зв. кафедри теплотехники, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Херсон, Украина.

Радченко Роман Николаевич – канд. техн. наук, доц. Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Шербак Юрий Георгиевич – канд. техн. наук, доц., Черноморский национальный университет им. П. Могилы, Украина.

Kornienko Victoria Sergiivna – PhD, Associate professor of Department of heat engineering, Kherson branch of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: kornienkovika1987@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-3524-2045.

Radchenko Roman Mykolayovych – PhD, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-8099-7327.

Shcherbak Yurii Georgiyovich – PhD, associate professor, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine.