

УДК 621.43.068.4-634.8

doi: 10.32620/aktt.2019.8.10

В. С. КОРНИЕНКО¹, Р. Н. РАДЧЕНКО², Ю. Г. ЩЕРБАК³¹ *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Херсонский филиал, Украина*² *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*³ *Черноморский национальный университет им. П. Могилы, Николаев, Украина*

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКРУББЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭФФЕКТА "МИКРОВЗРЫВОВ" КАПЕЛЬ ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ

Правила международных организаций в области охраны окружающей среды последовательно ужесточают требования к уровню вредных выбросов в атмосферу как от стационарных, так и судовых энергетических установок (СЭУ). Для обеспечения этого уровня необходимо использование скрубберной технологии и гибридной системы при их одновременном или последовательном использовании. Целью исследования является разработка схемы мокрого скруббера для комплексной системы очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Проведенные экспериментальные исследования показали, что в конце зоны горения водотопливной эмульсии (ВТЭ) с водосодержанием 30 % вследствие влияния интенсивной турбулентности, создаваемой при микровзрывах капель ВТЭ в зоне активного горения, в газах автоматически создается эквимолярное (или близкое к этому) соотношение $NO_2 : NO$, необходимое для активизации абсорбционных свойств выхлопных газов перед скруббером. Установлено, что при сжигании ВТЭ с водосодержанием $W^r = 30\%$ содержание токсичных ингредиентов в выхлопных газах перед скруббером будет находиться на значительно более низком уровне по сравнению с системой очистки при $W^r = 2\%$. Разработана схема мокрого скруббера, позволяющего осуществить очистку выхлопных газов от трех токсичных ингредиентов выхлопных газов одновременно с подогревом воды для питания котлов и подсушкой влажных газов после мокрого скруббера за счет теплоты промежуточного теплоносителя. Установлено, что теплоты этого промежуточного теплоносителя достаточно не только для подогрева питательной воды утилизационного котла, но и для обеспечения системы горячего водоснабжения судна, так как в скруббере в результате конденсации водяного пара выхлопных газов выделяется до 8 % низшей теплоты сгорания топлива, сжигаемого во всех топливосжигающих агрегатах СЭУ. Анализ расчетных исследований показал, что использование мокрого скруббера снижает содержание NO_x с 258 ppm до 52 ppm, SO_2 - с 107 ppm до 22 ppm, CO_2 - с 3,1% до 0,93 %. Разработанная схема мокрого скруббера может использоваться для обеспечения необходимого уровня очистки выхлопных газов, рекомендуемого ИМО (International Maritime Organization).

Ключевые слова: водотопливные эмульсии; скруббер; микровзрывы; абсорбция.

Введение

Постоянный рост стоимости жидкого топлива привел к необходимости сжигания в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) тяжелых сернистых топлив, что влияет на эксплуатационные и экологические показатели энергетических установок. Правила международных организаций в области охраны окружающей среды последовательно ужесточают требования к уровню вредных выбросов в атмосферу как от стационарных, так и судовых энергетических установок (СЭУ). Чтобы выполнить требования ИМО (International Maritime Organization) по третьему уровню эмиссии SO_x и NO_x , необходимо

использование скрубберной технологии, в которой используется отдельно забортная или пресная вода и гибридной системы (при их одновременном или последовательном использовании).

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Известны способы очистки выхлопных газов ДВС от токсичных ингредиентов [1-4].

В системе очистки SCR [2] осуществляется только очистка от NO_x с помощью дорогих катализаторов и ввода в качестве восстановителя раствора мочевины и аммиака. Систему SCR обязательно

нужно сопровождать последующей скрубберной технологией очистки от SO_x .

В системе очистки от SO_x , которая предлагается Wartsila [3], для компенсации потерь пресной воды (5% от производительности при сжигании дизельных топлив и больше при работе СЭУ на тяжелом топливе) надо обеспечить запас пресной воды или дополнительную производительность опреснительной установки.

В [4] рассматривается система очистки выхлопных газов CSNO_x , 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 .

При этом в технологии не рассматривается ухудшение состояния и надежности работы газоходов и дымовой трубы, которые размещены до и после скруббера, в связи с наличием паров и капель H_2SO_4 , H_2O , H_2SO_3 . Причина в том, что температура газов после скруббера ниже температуры точки росы паров серной кислоты (130 °C) и сернистой кислоты (60 °C), и потому будет иметь место увлажнение поверхности металла с газовой стороны, которая приведет к интенсификации коррозии металла газоходов и дымовой трубы и снижения надежности и долговечности их работы.

Целью исследования является разработка схемы мокрого скруббера для комплексной системы очистки выхлопных газов ДВС.

Результаты исследований

Чтобы обеспечить конечную очистку выхлопных газов от NO_x и SO_2 до уровня, соответствующего нормативным документами ИМО, необходимо использование скрубберных технологий в качестве четвертого этапа очистки, представленной в [5] технологии. Возможность решения сложных задач в представленной технологии [5] обеспечивается сжиганием водотопливных эмульсий (ВТЭ) со специально рекомендованным значением содержания воды ($W^r = 30\%$).

Как показали наши исследования [6], в конце зоны горения ВТЭ с водосодержанием $W^r = 30\%$ вследствие влияния интенсивной турбулентности, создаваемой при микровзрывах капель ВТЭ в зоне активного горения, в газах автоматически создается эквимолярное (или близкое к этому) соотношение $\text{NO}_2 : \text{NO}$. Это условие обеспечивало выполнение задачи активизации абсорбционных свойств выхлопных газов перед скруббером.

В случае сжигания ВТЭ с водосодержанием $W^r = 30\%$ благодаря использованию уже рассмотренных этапов [5] очистки газов в их составе содер-

жание токсичных ингредиентов перед скруббером будет находиться на значительно более низком уровне по сравнению с системой очистки [4] (при $W^r = 2\%$).

С целью очистки выхлопных газов с помощью скрубберных технологий после выхода газов из утилизационного котла (УК) после ДВС устанавливается на газоходе мокрый скруббер последовательной очистки газов от SO_2 , NO_x и CO_2 при сжигании высокосернистых топлив.

В отличие от существующих скрубберных технологий в предлагаемой системе очистки на орошение поверхности скруббера поступает католит от электродиализатора. Для повышения pH католита, увеличения количества ионов H^+ , OH^- установлен кавитатор, что обеспечивает повышение интенсивности абсорбционных процессов в скруббере.

В случае сжигания ВТЭ на основе высокосернистого мазута, когда образуется большое количество SO_2 , NO_x , рекомендуется установка скруббера с насадкой, которую можно и необходимо выполнить с некорродирующего материала (керамика, кислотоустойчивая пластмасса). Насадка орошается раствором католита, активированного в кавитаторах для интенсификации процесса абсорбции. Температура этого католита должна быть на уровне температуры заборной воды - обязательно ниже температуры точки росы паров H_2O , находящихся в выхлопных газах (при сжигании ВТЭ с $W^r = 30\%$ ее значение находится на уровне 48...50 °C). В этом случае будет обеспечена конденсация водяных паров газов, сопровождающаяся выделением большого количества теплоты (дополнительно к теплоте абсорбции). В результате вода на выходе из насадки после перемешивания с потоком газов подогреется до 80...90 °C (уровень температуры обеспечивается регулированием расхода католита на орошение насадки при обеспечении необходимого уровня абсорбции NO_x , CO , SO_2 , CO_2). При обеспечении соответствующего уровня щелочности воды, идущей на орошение и нейтрализацию кислотности, раствор на выходе из насадки будет нейтральным.

Благодаря получению в скруббере промежуточного теплоносителя (воды с нейтральными свойствами) и с температурой около 90 °C, появляется возможность при установке теплообменника обеспечить подогрев от 50 °C до 70 °C питательной воды котлов и системы горячего водоснабжения (ГВС) после теплого ящика (конденсационного бака), куда сбрасываются конденсаты после всех потребителей пара и горячей воды. При этом необходимо отметить, что теплоты этого промежуточного теплоносителя достаточно не только для подогрева питательной воды УК), но и для обеспечения системы ГВС судна, потому что в скруббере в результате конден-

сации водяного пара выхлопных газов выделяется до 8 % низшей теплоты сгорания топлива, сжигаемого во всех топливосжигающих агрегатах СЭУ. Так как раствор после скрубберов нейтрален, то подогреватель питательной воды котлов и для ГВС (в том числе и для подсушки газов) можно установить из углеродистой стали, что было невозможно при его обогреве коррозионноактивными выхлопными газами. Конструкция этого подогревателя может быть погружного или оросительного типов.

На рис. 1 более подробно рассмотрены особенности применения и работы конструкций элементов мокрого скруббера с подогревом воды и подсушкой газов горячей водой.

На рис. 1 изображен вариант схемы мокрого скруббера с подогревателем воды для питания котлов и подсушки влажных газов после мокрого скруббера. Оросительная поверхность скруббера состоит из трех секций очистки:

- 1) секция интенсивной очистки от SO_2 с расчетной эффективностью до 80 %;
- 2) секция интенсивной очистки от NO_x (эффективностью до 80 %);
- 3) секция интенсивной очистки от CO_2 (эффективностью до 70 %).

Последней по ходу газов установлена секция подсушки влажных газов для защиты от коррозии поверхности газоходов.

Выхлопные газы сначала подводятся к скрубберу Вентури, куда подводится активированный католит с щелочными свойствами, охлажденный в холодильнике, что обеспечивает частичную очистку газов и их охлаждение до скруббера. Затем газы направляются в нижнюю часть корпуса скруббера в противоток с орошающей водой (активированным католитом), охлажденным в холодильнике.

Католит подается отдельно на каждую из секций, что обеспечивает качественную и эффективную очистку газов от кислотных оксидов с помощью свежего охлажденного католита с щелочными свойствами и получения нейтральных растворов, и собирается в общий канал. Раствор подводится к верхней части пленочного теплообменника. Раствор движется по внутренней поверхности труб, внешне попеременно омываемых потоком воды, подаваемой из теплого ящика, а после подогрева направляется к котлам и в систему горячего водоснабжения. Часть этой горячей воды с температурой близкой к 80°C подается на змеевиковый подогреватель для подсушки влажных газов для обеспечения надежной работы газохода, отводящего подсушенные газы в атмосферу. После подогревателя вода сбрасывается в теплый ящик. Охлажденный раствор, щелочность которого должна находиться на уровне 6,5...7, что достаточно согласно экологических требованиям,

сбрасывается в цистерну для очистки или за борт (в окружающую среду).

На рис. 2 представлены результаты расчетных исследований использования скрубберной технологии.

Исследования показали: использование мокрого скруббера снижает содержание NO_x с 258 ppm до 52 ppm, SO_2 – с 107 ppm до 22 ppm, CO_2 – с 3,1% до 0,93 %.

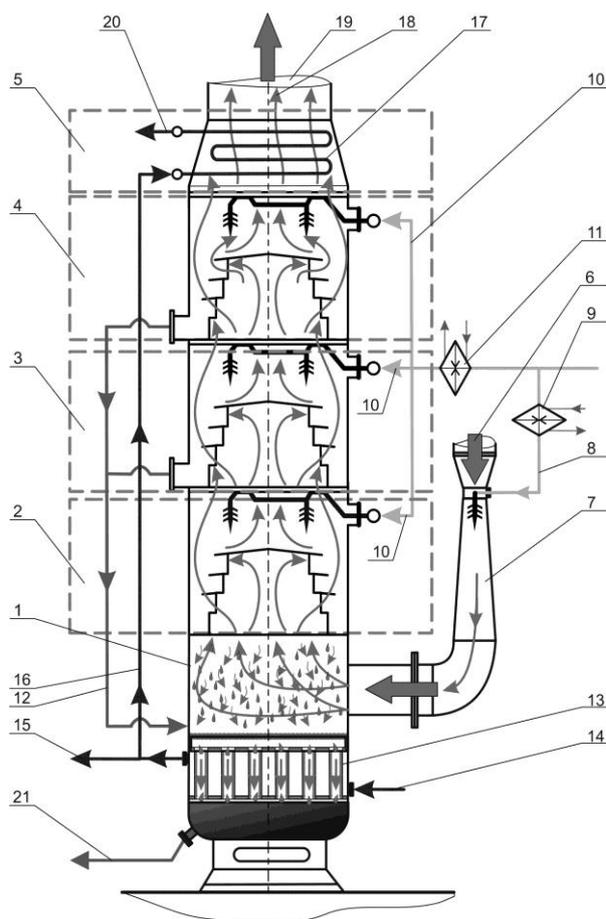


Рис. 1. Схема трехсекционного мокрого скруббера с подогревом воды и подсушкой газов горячей водой:

- 1 – оросительная поверхность скруббера;
- 2 – секция интенсивной очистки от SO_2 ; 3 – секция интенсивной очистки от NO_x ; 4 – секция интенсивной очистки от CO_2 ; 5 – секция подсушки влажных газов; 6 – выхлопные газы; 7 – скруббер Вентури; 8 – католит; 9 – холодильник;
- 10 – активированный католит; 11 – холодильник;
- 12 – канал; 13 – пленочный теплообменник;
- 14 – вода; 15 – система горячего водоснабжения;
- 16 – горячая вода; 17 – змеевиковый подогреватель;
- 18 – влажные газы; 19 – газоход; 20 – теплый ящик;
- 21 – охлажденный раствор

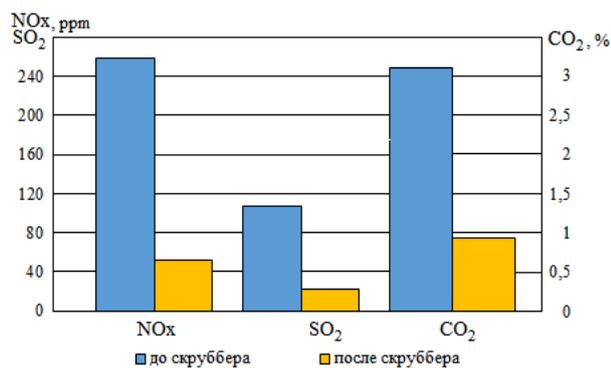


Рис. 2. Показатели выбросов токсичных ингредиентов при использовании скрубберной технологии

Выводы

1. При сжигании ВТЭ с водосодержанием 30 % содержание токсичных ингредиентов в выхлопных газах перед скруббером будет находиться на значительно более низком уровне по сравнению с системой очистки при $W^r = 2\%$.

2. Установка мокрого скруббера дает возможность снизить концентрацию NO_x, SO₂ – на 80 %, CO₂ – на 70 %.

3. Установка мокрого скруббера обеспечивает очистку выхлопных газов ДВС от токсичных ингредиентов до уровня, рекомендуемого ИМО.

Литература

1. Landet, R. D. *PM emissions and NO_x - reduction due to water in fuel emulsions in marine diesel engines* [Online] / R. D. Landet // Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology. Student thesis. – Available at: <http://ntnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:375078>. – 04.09.2013.
2. Wartsila NO_x reducer [Online]. – Available at: <https://www.wartsila.com/static/studio/assets/content/ss4/wartsila-nox-reducer-presentation.pdf>. – 1.04.2013.
3. PureSO_x Exhaust gas cleaning [Online]. – Available at: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/microsites/puresox/mdd00107en_lowres.pdf. – 23.03.2019).

4. Ecospec CSNO_xTM Brochure [Online]. – Available at: <http://www.ecospec.com/resources/ck/files/CSNOx.pdf>. – 23.03.2019.

5. Kornienko, V. S. System for complex exhaust gas cleaning of internal combustion engine with water-fuel emulsion burning [Text] / V. S. Kornienko // Refrigeration Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 55, No 1. – P. 28-33. DOI: 10.15673/RET.V55I1.1350.

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

References

1. Landet, R. D. *PM emissions and NO_x - reduction due to water in fuel emulsions in marine diesel engines*. Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology, Student thesis. Available at: <http://ntnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:375078/FULLTEXT01> (accessed: 04.09.2013).

2. Wartsila NO_x reducer. Available at: <https://www.wartsila.com/static/studio/assets/content/ss4/wartsila-nox-reducer-presentation.pdf> (accessed: 01.04.2013).

3. PureSO_x Exhaust gas cleaning. Available at: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/microsites/puresox/mdd00107en_lowres.pdf (accessed: 23.03.2019).

4. Ecospec CSNO_xTM Brochure. Available at: <http://www.ecospec.com/resources/ck/files/CSNOx.pdf> (accessed: 23.03.2019).

5. Kornienko, V. S. System for complex exhaust gas cleaning of internal combustion engine with water-fuel emulsion burning. *Refrigeration Engineering and Technology*, 2019, vol. 55, no 1, pp. 28-33. DOI: 10.15673/RET.V55I1.1350.

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

Поступила в редакцію 15.04.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ВИКОРИСТАННЯМ СКРУБЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ЕФЕКТУ "МІКРОВИБУХІВ" КРАПЕЛЬ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ

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

Правила міжнародних організацій в галузі охорони навколишнього середовища послідовно посилюють вимоги до рівня шкідливих викидів в атмосферу як від стаціонарних, так і суднових енергетичних установок (СЕУ). Для забезпечення цього рівня необхідне використання скрубберної технології і гібридної система при їх одночасному або послідовному використанні. Метою дослідження є розробка схеми мокрого скруббера для комплексної системи очищення вихлопних газів двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). Проведені

експериментальні дослідження показали, що в кінці зони горіння водопаливної емульсії (ВПЕ) з водовмістом 30 % внаслідок впливу інтенсивної турбулентності, що створюється при мікробухах крапель ВПЕ в зоні активного горіння, в газах автоматично створюється еквімолярної (або близьке до цього) співвідношення $\text{NO}_2 : \text{NO}$, необхідне для активізації абсорбційних властивостей вихлопних газів перед скруббером. Встановлено, що при спалюванні ВПЕ з водовмістом $W^r = 30\%$ вміст токсичних інгредієнтів у вихлопних газах перед скруббером буде знаходитись на значно нижчому рівні в порівнянні з системою очищення при $W^r = 2\%$. Розроблено схему мокрого скрубера, що дозволяє здійснити очищення вихлопних газів від трьох токсичних інгредієнтів вихлопних газів одночасно з підігрівом води для живлення котлів і підсушуванням вологих газів після мокрого скрубера за рахунок теплоти проміжного теплоносія. Встановлено, що теплоти цього проміжного теплоносія достатньо не тільки для підігріву живильної води утилізаційного котла, але і для забезпечення системи гарячого водопостачання судна, так як в скруббері в результаті конденсації водяної пари вихлопних газів виділяється до 8 % нижчої теплоти згорання палива, що спалюється в усіх паливоспалюючих агрегатах СЕУ. Аналіз розрахункових досліджень показав, що використання мокрого скрубера знижує вміст NO_x з 258 ppm до 52 ppm, SO_2 - з 107 ppm до 22 ppm, CO_2 - з 3,1 % до 0,93 %. Розроблена схема мокрого скрубера може використовуватись для забезпечення необхідного рівня очищення вихлопних газів, рекомендованого IMO (International Maritime Organization).

Ключові слова: водопаливні емульсії; скруббер; мікробухи; абсорбція.

IMPROVING ENVIRONMENTAL INDICATORS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE BY USING SCRUBBER TECHNOLOGIES AND EFFECT OF "MICROEXPLOSIONS" DROPS OF WATER-FUEL EMULSION

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

The rules of international organizations in the field of environmental protection are consistently tightening the requirements for the level of harmful emissions into the atmosphere from both stationary and ship power plants (SPP). To ensure this level, it is necessary to use wet scrubber technology and a hybrid system when used simultaneously or sequentially. The study aims to develop a wet scrubber scheme for complex exhaust gas cleaning system for an internal combustion engine (ICE). Experimental studies have shown that at the end of the combustion zone of a water-fuel emulsion (WFE) with a water content of 30 % due to the influence of intense turbulence created during microexplosions of WFE droplets in the zone of active combustion in gases, an equimolar $\text{NO}_2 : \text{NO}$ ratio is created automatically (or almost this). It is required to enhance the absorption properties of exhaust gases in front of the scrubber. It is established that when WFE is burnt with water content $W^r = 30\%$, the content of toxic ingredients in the exhaust gases in front of the scrubber will be at a much lower level compared to the cleaning system at $W^r = 2\%$. A scheme of a wet scrubber has been developed, which allows to clean exhaust gases from three toxic exhaust gas ingredients simultaneously with heating water to exhaust gas boiler and drying wet gases after a wet scrubber due to the heat of the intermediate coolant. It has been established that the heat of this intermediate coolant is sufficient not only to heat the feed water of the exhaust gas boiler, but also to provide a hot water supply system for the ship, since in the scrubber, as a result of exhaust water vapor condensation up to 8 % of the lower combustion heat of the fuel burned power units. Analysis of the calculated studies showed that the using of a wet scrubber reduces the NO_x content from 258 ppm to 52 ppm, SO_2 - from 107 ppm to 22 ppm, CO_2 - from 3.1 % to 0.93 %. The developed wet scrubber scheme can be used to clean the exhaust gases of internal combustion engines from toxic ingredients and to provide the necessary level of exhaust gas purification recommended by the IMO (International Maritime Organization).

Keywords: water-fuel emulsions; scrubber; microexplosions; absorption.

Корниенко Виктория Сергеевна – канд. техн. наук, доц. без уч. зв. кафедри теплотехники, Херсонський філіал Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Радченко Роман Николаевич – канд. техн. наук, доц. Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Николаев, Україна.

Щербак Юрий Георгиевич – канд. техн. наук, доц., Черноморський національний університет ім. П. Могилы, Николаев, Україна.

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 – Candidate of Technical Science, 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 Georgiyovych – candidate of technical sciences, associate professor, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine.