

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНОЙ ПЛЕНОЧНОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ СВАРОЧНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ

**Р. Х. Садыков, В. Н. Стаценко**

*ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,  
Владивосток, Россия*

**Ключевые слова:** абсорбция; аэрозоли; вода; жидкостная нейтрализация; критериальное обобщение; пленка; сварочные процессы; экспериментальный стенд.

**Аннотация:** Для снижения концентрации вредных аэрозолей (твердых мелкодисперсных частиц) в сварочных процессах предложено использовать жидкостную нейтрализацию, при которой организовано пленочное течение жидкости по вертикальным пластинам. При движении газов или загрязненного твердыми мелкодисперсными частицами воздуха между пластинами пленка жидкости интенсивно абсорбирует газообразные и твердые загрязняющие вещества. На экспериментальном стенде проведено исследование интенсивности абсорбции в пленку воды аэрозолей твердых мелкодисперсных частиц. В экспериментах изменялись скорость газа, расход жидкости, концентрация вредных веществ в газе. Полученные результаты обобщены в широком диапазоне изменения концентраций газа, расходов жидкости и скорости движения загрязненного аэрозолями газа в виде зависимости между числами Шервуда, Рейнольдса и Шмидта.

### Введение

Среди различных составляющих экологического кризиса наиболее угрожающий характер приняла проблема загрязнения незаменимых природных ресурсов – воздуха, воды и почвы – отходами промышленности. В связи с этим в современном обществе резко возрастают роль и задачи инженерной экологии, призванной на основе оценки степени вреда, приносимого природе индустриализацией производства, разрабатывать и совершенствовать инженерно-технические средства защиты окружающей среды.

---

Садыков Руслан Ханафьевич – аспирант департамента промышленной безопасности, e-mail: sadykov\_rh@bk.ru; Стаценко Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор департамента промышленной безопасности, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия.

Ручная электродуговая сварка электродами с покрытиями и сварка в защитных газах плавящимся электродом сопровождаются выделением мелкодисперсной пыли, которая состоит из частиц размером от  $10^{-3}$  до 50 мкм. Химический состав и валовые выделения вредных веществ при сварке зависят в основном от состава сварочных материалов (проволоки, покрытий, флюсов) и в меньшей степени – от химического состава свариваемых металлов. Относительно небольшим пылевыведением характеризуется процесс сварки под флюсом, поскольку флюс препятствует непосредственному контакту расплавленного металла с кислородом воздуха, тормозит процессы окисления и испарения.

Газовая и плазменная резка металлов также сопровождается выделением аэрозолей и вредных газов. Аэрозоли представляют собой конденсат оксидов металлов и неметаллов, их химический состав определяется главным образом маркой обрабатываемого материала [1].

Из применяемых методов жидкостной нейтрализации наибольшую степень извлечения токсичных газов и аэрозолей имеет химическая абсорбция, а наибольшее распространение, как наиболее простой, дешевый и доступный метод – физическая абсорбция, абсорбентом в которой используется обычная пресная вода [2 – 5].

Жидкостные пленочные массообменные аппараты широко используются в химической технологии в качестве абсорберов газообразных сред и аэрозолей в жидкость, нисходящее движение которой организуется внутри вертикальных труб или на плоской вертикальной поверхности [6 – 8]. Такие аппараты возможно использовать и для очистки уходящих газов и аэрозолей, выделяемых, например, при сжигании органического топлива или проведении различных технологических операций, связанных с выбросами значительного количества токсичных газов и аэрозолей [9, 10].

В результате исследований [11] процесса абсорбции окиси и двуокиси углерода и серы в пленочном жидкостном аппарате сделан вывод, что при использовании воды в качестве абсорбирующей среды оптимальная скорость движения газов составляет  $V_{\text{воз}} = 0,8...1$  м/с, оптимальное значение орошения  $\Gamma_V = (3,3...3,8) \times 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с, при этом концентрация газов CO и CO<sub>2</sub> снижается на 30 – 45 %, SO<sub>2</sub> – в 1,5 – 2 раза.

*Цель статьи* – исследовать и обобщить в критериальной форме интенсивность снижения концентрации твердых мелкодисперстных частиц. Для реализации поставленной цели разработаны методики экспериментов и методология их проведения, а также методика их критериальной обработки, получены численные значения критериальных зависимостей на основе полученных экспериментальных результатов.

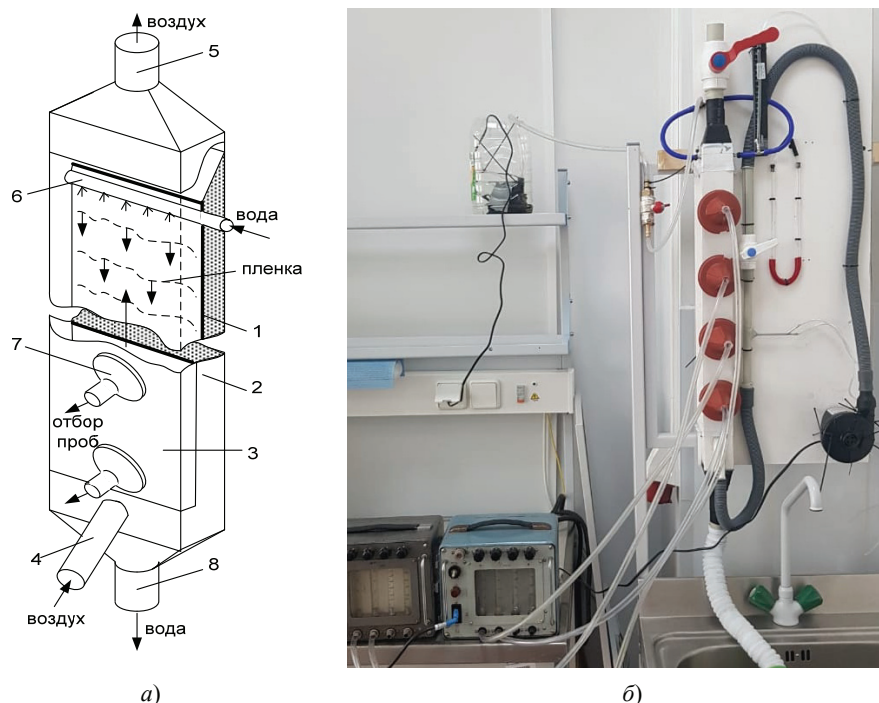
### **Материалы и методы**

В работе для очистки воздуха от газовых выбросов и мелкодисперстных частиц (аэрозолей) предлагается использование жидкостного пленочного нейтрализатора [11]. Такая установка представляет собой закрытый корпус с вертикально установленными пластинами, в верхней части которых закреплены пленкообразующие устройства, с их помощью жидкость растекается по обеим сторонам пластин в виде пленки. Загрязненный мел-

кодисперсными частицами газ поступает в корпус снизу через входной патрубок и движется вверх между пластинами. Благодаря большой площади контакта пленка жидкости, как абсорбент, интенсивно поглощает газообразные и твердые загрязняющие вещества и, стекая вниз по пластинам, удаляется из корпуса нейтрализатора. Жидкость после очистки и нейтрализации может подаваться на пленкообразующие устройства для повторного использования. Нейтрализаторы такого типа обладают существенным достоинством – низким гидравлическим сопротивлением, малым брызго- и влагоуносом, что является важным фактором для судовых энергетических и портативных установок.

Для изучения рабочих процессов, происходящих с аэрозолями в жидкостном пленочном нейтрализаторе, проведены исследования на экспериментальном стенде, основным элементом которого является латунная пластина длиной 600 мм (рис. 1) [11], жестко закрепленная в корпусе с патрубками входа загрязненного и выхода очищенного воздуха. Подача воды на латунную пластину осуществлялась через пленкообразующее устройство, пленка воды двигалась вниз по поверхности рабочей пластины, очищаемый воздух – вверх, при их контакте происходили процессы абсорбции газов в пленку жидкости.

Для измерения скорости воздуха использовалась трубка Прандтля с U-образным жидкостным манометром, расход жидкости определялся объемным способом и контролировался по жидкостному манометру.



**Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) лабораторного стенда:**  
 1 – пластина; 2 – корпус; 3 – крышка; 4, 5, 8 – патрубки соответственно подачи загрязненного воздуха, выхода чистого воздуха и слива загрязненной воды;  
 б – пленкообразователь; 7 – аллонжи

Основная задача исследований – определение зависимости изменения концентрации аэрозольных загрязнений по длине рабочей пластины. Эти загрязнения моделируются порошками для газотермического напыления, которые используются в судостроении для восстановления различных деталей ДВС, с разными насыпными плотностями: АО6 ( $\rho = 1830 \text{ кг/м}^3$ ), ПХ1М ( $\rho = 3320 \text{ кг/м}^3$ ), ПТЮ5Н ( $\rho = 3830 \text{ кг/м}^3$ ), керамика ( $\rho = 3980 \text{ кг/м}^3$ ). Порошки перед экспериментом просушивались, просеивались, в результате оптических измерений оценивались размеры гранул, которые не превышали 140...170 мкм со средним квадратичным отклонением 20 – 25 %. Дозированная подача порошков в воздушный поток рабочего канала проводилась через входной патрубков компрессора.

Отборы проб на концентрацию аэрозолей проводились с помощью фильтров типа АФА-ХП-20 (фильтр Петрянова), закрепленных в четырех аллонжах, находящихся в крышке рабочего канала. Отбор воздуха через фильтр обеспечивался электромеханическими аспираторами 822 серии. Расход воздуха через каждый отбор не превышал 10 – 12 % от его расхода в рабочем канале. В качестве адсорбирующей жидкости использовалась отстоянная пресная вода.

### Результаты экспериментов и обработка результатов

Анализ результатов, полученных в пленочном жидкостном аппарате, позволяет сделать следующие выводы (рис. 2, а): осаждение твердых частиц происходит на относительно небольшом участке длины контакта 0,3...0,4 м. При этом их содержание в потоке резко снижается с повышением плотности аэрозолей, их начальной концентрации и скорости воздушного потока. Так, при скорости воздуха 0,5 м/с на длине контакта 0,4 м для аэрозолей с разной плотностью концентрация снижается на 60 – 100 %. С увеличением скорости потока с 0,5 до 2 м/с для аэрозолей с низкой плотностью АО6 на той же длине контакта концентрация снижается на 50 – 100 %. Аналогичные данные получены для остальных аэрозолей с более высокой плотностью.

Обобщение результатов исследований абсорбции газов в пленку жидкости проведено в системе безразмерных критериев с учетом размерных параметров пленочного течения жидкости, представленного в [11].

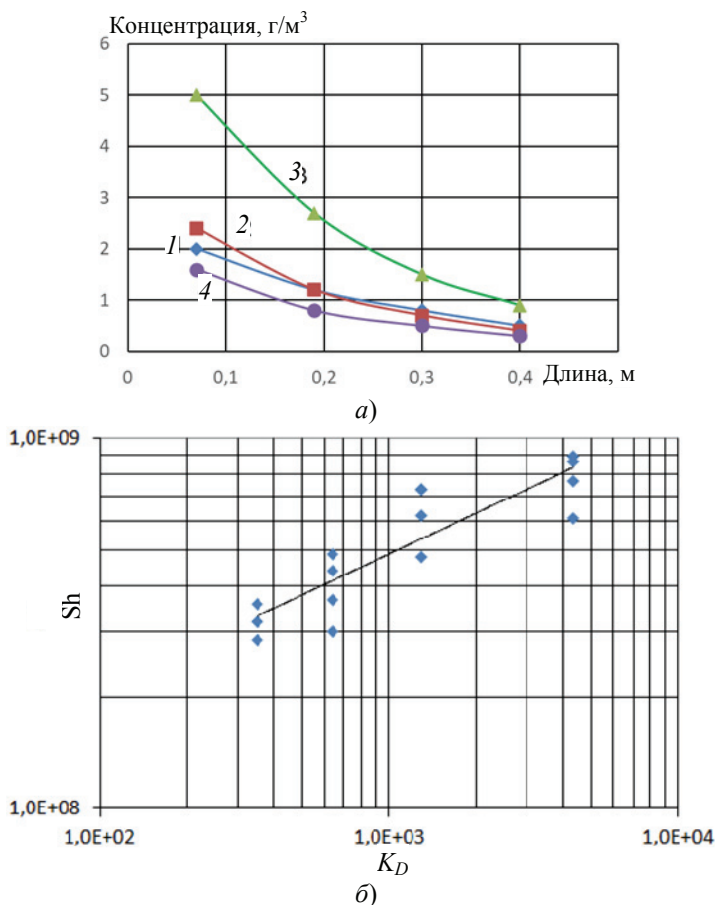
В качестве характеристик процесса абсорбции использовались критерии  $Re_{\Gamma}$  (газовый) и  $Re_{пл}$  (пленочный):

$$Re_{\Gamma} = \frac{V_{\text{воз}} d_{\text{экв}}}{\nu_{\Gamma}} ; \quad (1)$$

$$Re_{\text{пл}} = \frac{\Gamma_V}{\nu_{\text{пл}}} ; \quad (2)$$

$$d_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} ; \quad (3)$$

$$\Gamma_V = \frac{G_V}{\Pi} , \quad (4)$$



**Рис. 2.** Изменение концентрации аэрозолей по длине контакта при скорости воздуха  $V_{\text{воз}} = 0,5$  м/с (а), обработка в безразмерных координатах (б):  
1 – АОб; 2 – ПХ1М; 3 – ПТЮ5Н; 4 – керамика

где  $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр, м;  $S$  – площадь сечения рабочего канала, м<sup>2</sup>;  $\Gamma_V$  – орошение пластины, м<sup>2</sup>/с;  $G_V$  – объемный расход пленки, м<sup>3</sup>/с;  $\Pi$  – смоченный периметр, м;  $\nu_r$ ,  $\nu_{\text{пл}}$  – кинематические вязкости воздуха и пленки, м<sup>2</sup>/с.

Результаты обработки полученных данных по локальным значениям абсорбции аэрозолей в пленке пресной воды в широком диапазоне изменения критериев  $Re_r$ ,  $Re_{\text{пл}}$  показаны на рис. 2, б. Критерий  $K_D$  на графиках представляет собой комплекс критериев

$$K_D = Re_r^{0,6} Re_{\text{пл}}^{0,15} Sc^{0,33} \left( \frac{\delta}{L} \right). \quad (5)$$

Критериальное уравнение, описывающее результаты экспериментов для локальных значений на каждом участке рабочего канала, имеет вид

$$Sh = 4 \cdot 10^7 Re_r^{0,22} Re_{\text{пл}}^{0,055} Sc^{0,12} \left( \frac{\delta}{L} \right)^{0,366}, \quad (6)$$

где  $Sh = \beta\delta/\rho D$  – число Шервуда,  $\beta = g_r/\Delta C$  – коэффициент массоотдачи,  $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$ ;  $g_r = G_{аб}/S_{аб}$  – удельный поток абсорбированного газа,  $\text{кг}/(\text{м}^2/\text{с})$ ;  $G_{аб}$  – поток абсорбированного газа,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $S_{аб} = \Pi\Delta L$  – площадь абсорбции,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta L$  – участок канала,  $\text{м}$ ;  $\Delta C$  – концентрационный напор (движущая сила абсорбции),  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $\rho$  – плотность среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\delta$  – толщина пленки,  $\text{м}$ ;  $L$  – длина контакта,  $\text{м}$ ;  $Sc = \nu_{пл}/D$  – число Шмидта;  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

В расчетах критериев  $Re_r$ ,  $Re_{пл}$  и  $Sc$  использованы экспериментальные и справочные данные. Коэффициент диффузии аэрозолей в воде зависит от их размера, в данной работе коэффициент определялся экстраполяцией для размеров частиц, используемых в экспериментах, и задавался значением  $D = 8 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2/\text{с}$ . Погрешность обобщения экспериментальных данных составляет  $\pm 15 \%$ .

### Заключение

Полученные критериальные зависимости позволяют рассчитать значения коэффициентов массоотдачи и поток абсорбции аэрозолей разного размера и различной плотности в пленку жидкости по длине контакта и, соответственно, габаритные характеристики жидкостных пленочных массообменных аппаратов в широком диапазоне изменения концентраций аэрозолей, расходов жидкости и скорости движения загрязненного воздуха или газа.

#### Список литературы

1. Гришагин, В. М. Сварочный аэрозоль: образование, исследование, локализация, применение : монография / В. М. Гришагин. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
2. Игнатович, Р. С. Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания / Р. С. Игнатович, В. А. Седнин // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 65(6). – С. 524 – 538. doi: 10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538
3. Очистка технологических газов / под ред. Т. А. Семеновой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1977. – 488 с.
4. Механизм и кинетика хемосорбции углекислого газа водным раствором карбоната натрия / А. В. Старкова, А. Ф. Махоткин, А. С. Балыбердин, И. А. Махоткин // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 15. – С. 76 – 81.
5. Yu, C. -H. A Review of CO<sub>2</sub> Capture by Absorption and Adsorption / C.-H. Yu, C.-H. Huang, C.-S. Tan // Aerosol Air Qual. Research. – 2012. – Vol. 12, Issue 5. – P. 745 – 769. doi: 10.4209/aaqr.2012.05.0132
6. Бабак, В. Н. Массообмен в орошаемых плоскопараллельных каналах при прямоточном ламинарном движении жидкости и газа / В. Н. Бабак // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53, № 6. – С. 634 – 646. doi: 10.1134/S0040357119050014
7. Babak, V. N. Two-Phase Mass Exchange in Irrigated Tubular Packing for the Concurrent Laminar Phase Flow / V. N. Babak // Theor. Found. Chem. Eng. – 2015. – Vol. 49, No. 5. – P. 636.

8. Машиностроение : энциклопедия : в 40 т. / ред. совет: Фролов К. В. (председатель) [и др.]. Т. 4-12 : Машины и аппараты химических и нефтехимических производств / [М. Б. Генералов и др.]. – М. : Машиностроение, 2004. – 832 с.

9. Курников, А. С. Концепция повышения экологической безопасности судна : монография / А. С. Курников. – Н. Новгород : Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2002. – 80 с.

10. Вострикова, М. А. Анализ эффективности работы систем очистки дымовых газов морских судов от примесей при использовании абсорберов и скрубберов / М. А. Вострикова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 4. – С. 66 – 69.

11. Стаценко, В. Н. Исследование жидкостной пленочной нейтрализации сварочных газовых выбросов / В. Н. Стаценко, Р. Х. Садыков, А. В. Гридасов // Вопросы совр. науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского. – 2024. – № 1(91). – С. 25 – 34. doi: 10.17277/voprosy.2024.01.pp.025-034

### References

1. Grishagin V.M. *Svarochnyy aerosol': obrazovaniye, issledovaniye, lokalizatsiya, primeneniye: monografiya* [Welding aerosol: formation, research, localization, application: monograph], Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011, 213 p. (In Russ.)

2. Ignatovich R.S., Sednin V.A. [Analysis of the efficiency of technologies for extracting carbon dioxide from combustion products], *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG* [Power engineering. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2022, no. 65(6), pp. 524-538. doi: 10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Semenova T.A. (Ed.). *Ochistka tekhnologicheskikh gazov* [Cleaning of process gases], Moscow: Khimiya, 1977, 488 p. (In Russ.)

4. Starkova A.V., Makhotkin A.F., Balyberdin A.S., Makhotkin I.A. [Mechanism and kinetics of carbon dioxide chemisorption by an aqueous solution of sodium carbonate], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2011, no. 15, pp. 76-81. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Yu C.-H., Huang C.-H., Tan C.-S. A Review of CO<sub>2</sub> Capture by Absorption and Adsorption, *Aerosol Air Qual. Research*, 2012, vol. 12, issue 5, pp. 745-769. doi: 10.4209/aaqr.2012.05.0132

6. Babak V.N. [Mass Transfer in Irrigated Plane-Parallel Channels with Straight-Through Laminar Flow of Liquid and Gas], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 2019, vol. 53, no. 6, pp. 634-646. doi: 10.1134/S0040357119050014 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Babak V.N. Two-Phase Mass Exchange in Irrigated Tubular Packing for the Concurrent Laminar Phase Flow, *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2015, vol. 49, no. 5, pp. 636.

8. Frolov K.V. (Ed.); *Mashinostroyeniye: entsiklopediya* [Mechanical engineering: encyclopedia] in 40 vols. Vol. 4-12: M. B. Generalov [et al.] *Mashiny i apparaty khimicheskikh i neftekhimicheskikh proizvodstv* [Machines and apparatuses for chemical and petrochemical production], Moscow: Mashinostroyeniye, 2004, 832 p. (In Russ.)

9. Kurnikov A.S. *Kontsepsiya povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti sudna: monografiya* [Concept of improving the environmental safety of a vessel: monograph], N. Novgorod: Izdatel'stvo "VGAVT", 2002, 80 p. (In Russ.)

10. Vostrikova M.A. [Analysis of the efficiency of systems for cleaning flue gases of sea-going vessels from impurities using absorbers and scrubbers], *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov], 2015, no. 4, pp. 66-69. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Statsenko V.N., Sadykov R.Kh., Gridasov A.V. [Study of liquid film neutralization of welding gas emissions], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2024, no. 1(91), pp. 25-34. doi: 10.17277/voprosy.2024.01.pp.025-034 (In Russ., abstract in Eng.)

---

## **A Study of Liquid Film Neutralization of Welding Aerosol Emissions**

**R. H. Sadykov, V. N. Statsenko**

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Keywords:** absorption; aerosols; water; liquid neutralization; criterial generalization; film; welding processes; experimental setup.

**Abstract:** To reduce the concentration of harmful aerosols (solid fine particles) in welding processes, it is proposed to use liquid neutralization, in which a film flow of liquid is organized along vertical plates. When gases or air contaminated with solid fine particles move between the plates, the liquid film intensively absorbs gaseous and solid pollutants. The intensity of absorption of aerosols of solid fine particles into a water film was studied on the experimental setup. In the experiments, the gas velocity, liquid flow rate, and concentration of harmful substances in the gas were changed. Based on the findings, a generalization of the obtained results in a wide range of changes in gas concentrations, liquid flow rates, and the velocity of movement of aerosol-contaminated gas were compiled; the generalization was presented in the form of a relationship between the Sherwood, Reynolds, and Schmidt numbers.

---

© Р. Х. Садыков, В. Н. Стаценко, 2024