

Научная статья
УДК 614.84

УСТРОЙСТВО ЛОКАЛЬНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ 10/0,4 КВ

Максим Владимирович Панов, Татьяна Васильевна Панова, Егор Федорович Степанченко
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

Аннотация. На сегодняшний день развитие энергетики и электрификации в значительной мере определяет уровень развития промышленности и народного хозяйства нашей страны. Ввод новых и модернизация действующих промышленных предприятий, дальнейшая электрификация производства, сельского и коммунально-бытового хозяйства приводит к непрерывному увеличению потребления электроэнергии и дальнейшему развитию распределительных электрических сетей. Основными звеньями электроэнергетики являются электростанции и трансформаторные подстанции. Данные объекты обеспечивают развитие промышленной и экономической сфер государства, социальное развитие и улучшение условий жизнеобеспечения людей. Ввиду практически завершенного строительства сельских электрических сетей, приоритетными задачами в настоящий момент являются гарантирование качества электроснабжения потребителей, обеспечения непрерывной и эффективной подачи электроэнергии, а также безопасная эксплуатация этих сетей. Следует отметить, что в любой, даже самой совершенной по техническому оснащению, электрической системе неизбежно возникают различные повреждения в процессе эксплуатации. Вероятность возникновения пожара на подстанции велика и возможные последствия возгорания могут стать трагичными. Пожар на электрической подстанции вызовет серьезные проблемы с энергоснабжением потребителей, а также создаст угрозу для работающего там персонала, аварийных бригад и людей, оказавшихся поблизости. Поэтому, как и на любом объекте хозяйствования, необходима организация условий труда, включая разработку и внедрение норм пожарной безопасности. Причины аварийных ситуаций в электроустановках многообразны, однако наиболее частыми являются несвоевременное выявление и устранение дефектов оборудования, некачественный монтаж и недостаточный уровень эксплуатации. Помимо этого, аварии могут быть спровоцированы воздействием атмосферных явлений на электроустановки. В данной работе мы представим технические мероприятия, направленные на минимизацию материальных потерь, потерь сотрудников, осуществляющих эксплуатацию и обслуживание подстанции, а также сокращение негативного экологического воздействия на прилегающей к подстанции территории.

Ключевые слова: пожарная безопасность, пожар, трансформатор, устройство локального пожаротушения.

Для цитирования: Панов М.В., Панова Т.В., Степанченко Е.Ф. Устройство локального пожаротушения для трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 1 (107). С. 68-74.

Original article

LOCAL FIRE EXTINGUISHING DEVICE FOR A 10/0.4 KV TRANSFORMER SUBSTATION

Maksim V. Panov, Tat'yana V. Panova, Yegor F. Stepanchenko
Bryansk State Agrarian University, Bryansk region, Kokino, Russia

Abstract. Today, the development of energy and electrification largely determines the level of development of industry and the national economy of our country. The introduction of new and modernization of existing industrial enterprises, further electrification of production, agriculture and public utilities leads to a continuous increase in electricity consumption and further development of electric distribution networks. The main links of the electric power industry are power plants and transformer substations. These facilities ensure the development of the industrial and economic spheres of the state, social development and improvement of people's living conditions. Due to the almost completed construction of rural electric networks, the priority tasks at the moment are to ensure the quality of electricity supply to consumers, ensure continuous and efficient power supply, as well as the safe operation of these networks. It should be noted that in any electrical system, even the most technically advanced, various damages inevitably occur during operation. The probability of a fire at the substation is high and the possible consequences of a fire can be tragic. A fire at an electrical substation will cause serious problems with the power supply to consumers, as well as pose a threat to personnel working there, emergency crews, and people in the vicinity. Therefore, as at any business facility, it is necessary to organize working conditions, including the development and implementation of fire safety standards. The causes of emergency situations in electrical installations are diverse, but the most

common are the late detection and elimination of equipment defects, poor-quality installation and insufficient level of operation. In addition, accidents can be triggered by the effects of atmospheric phenomena on electrical installations. In this paper, we will present technical measures aimed at minimizing material losses, losses of employees who operate and maintain the substation, as well as reducing the negative environmental impact on the territory adjacent to the substation.

Key words: fire safety, fire, transformer, local fire extinguishing device.

For citation: Panov M.V., Panova T.V., Stepanchenko E.F. Local fire extinguishing device for a 10/0.4 kV transformer substation // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2025. 1 (107): 68-74.

Электрическая подстанция - электроустановка, предназначенная для приема, преобразования и распределения электрической энергии, состоящая из трансформаторов или других преобразователей электрической энергии, устройств управления, распределительных и вспомогательных устройств [1].

Энергетическая система состоит из множества структурных элементов, каждый из которых выполняют свою функцию в процессе передачи электроэнергии от электростанций до конечного потребителя. Подстанции 10 на 0,4 кВ осуществляют последний этап преобразования электроэнергии: от данных подстанций электроэнергия поступает напрямую к потребителю - в населенные пункты и на производственные предприятия. Рассмотрим, как устроена трансформаторная подстанция 10 на 0,4 кВ. [1]

Конструкция трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ включает кронштейн для высоковольтных (ВВ) изоляторов, кронштейн для изоляторов с нейтральной вставкой (НВ), разрядник вентиляционный, кожух боковой, шкаф указатель высокого напряжения (УВН), защитный кожух трансформатора, шкаф распределительного устройства низкого напряжения (РУНН), силовой каркас подстанции, площадку для трансформатора, площадку обслуживания.

Тушение пожара в электроустановках сопровождается опасностью взрыва. Горящее маслонеполненное оборудование может взорваться в любой момент, так как пары масла очень взрывоопасны. Расстояние, на которое разлетятся осколки достаточно велико, тем самым приводят к материальному ущербу и поражению людей. [2]

Шаговое напряжение, так как возгорание электроустановки может спровоцировать однофазное замыкание на землю. При обрыве одного провода релейная защита не отключит подачу напряжения.

Таким образом, в результате однофазного замыкания на землю, располагающийся в непосредственной близости человек попадает под действие шагового напряжения.

Поражение электрической дугой возможно в случае, когда на установках напряжением выше 1000 В возникает пробой воздушного промежутка, поэтому приближение на расстояние, ближе допустимого может также привести к ожогу дугой и поражению электрическим током. [3]

На 1 января 2023 года Росстатом представлены следующие показатели (табл. 1):

Таблица 1 – Показатели ЕЭС России

Наименование	Значение
Установленная мощность электростанций ЕЭС России, ГВт	239,8
Электростанции мощностью свыше 5 МВт, шт.	748
Линии электропередач класса напряжения 110–1150 кВ	10700
Электрические подстанции класса напряжения 110–1150 кВ	8700
Генерирующие компании, шт.	688
Сетевые организации, шт.	556
Потребители электрической энергии, шт.	514

Анализ аварий на объектах электроэнергетики за 2022 год представлен на рисунках 1 и 2.

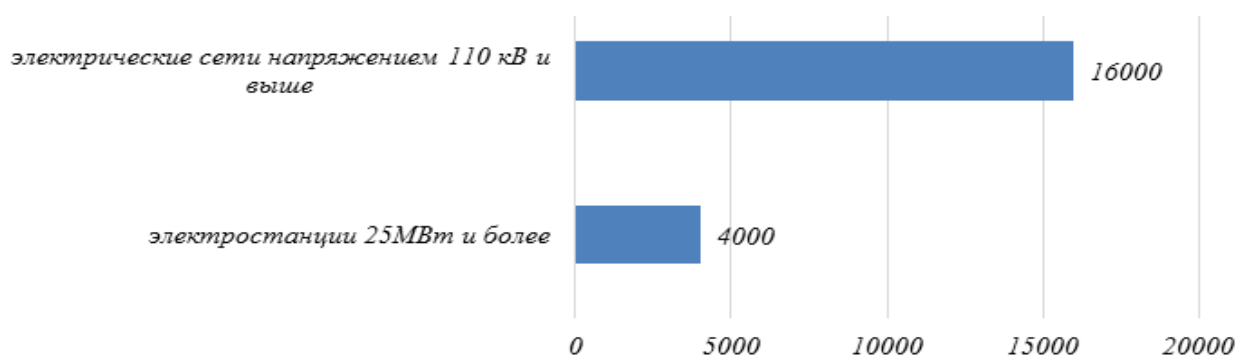


Рисунок 1 - Количество аварии на объектах электроэнергетики в 2022 году

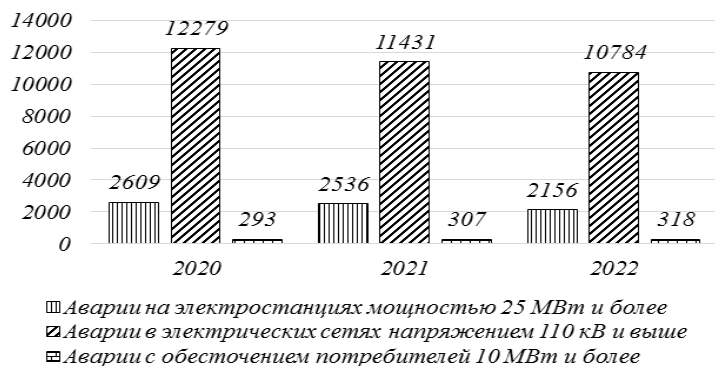


Рисунок 2 – Количество аварий на объектах электроэнергетики в ЕЭС России

В период 2017 – 2022 годов введено в эксплуатацию новое генерирующее оборудование (37,5 ГВт, 15% от Руст), что позволило снизить аварийность на электростанциях, а также снизить коэффициент использования старого оборудования 13,4 ГВт «старой» генерации, обладающего с повышенной степенью аварийности. Уменьшение аварийных ситуаций на электрических сетях позволило снизить аварийные отключения ЛЭП на 8%. [4]

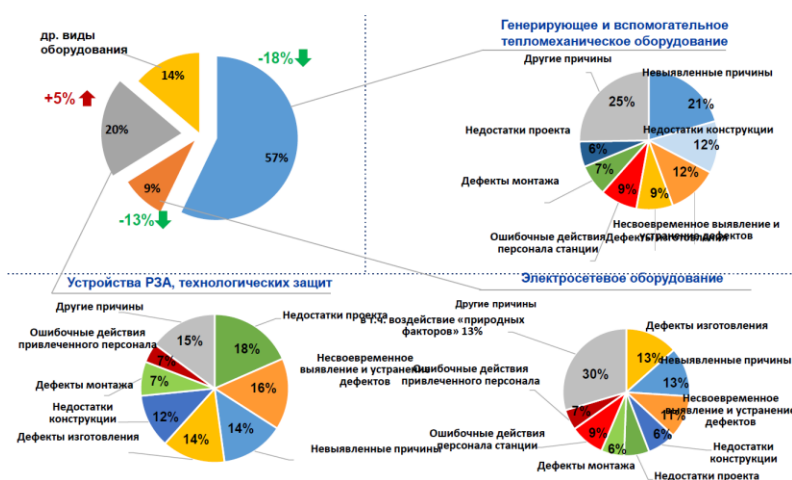


Рисунок 3 – Основные причины аварий на электрических станциях, установленной мощностью 25 МВт и выше

Рассмотрим, обеспечение пожарной безопасности трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ расположенной на территории села Кокино. Рядом с подстанцией располагаются гаражи, продуктовый магазин и очистные сооружения.



Рисунок 4 – Трансформаторная подстанция 10/0,4 кВ в с. Кокино

Прототипом предлагаемого устройства локального пожаротушения явился патент на полезную модель RU 132999 Противопожарная преграда с огнетушением / Курманов В.В., Усанович С.А., Букин С.В., Лумисте Е.Г., Панова Т.В., Панов М.В. Заявка № 2012141450/12 от 27.09.2012. Опубликовано: 10.10.2013 Бюл. № 28.

Предлагаемое устройство локального пожаротушения, предназначено для открытых площадок с оборудованием, отличающейся тем, что для тушения пожара внутри купола предусмотрена система огнетушения, состоящая из раструба, расположенного в верхней части, шланга, спускающегося от раструба к основанию установки, и насадки для подсоединения огнетушителя, а для объектов раз-

личных габаритов предусмотрен регулируемый каркас купола в виде овала, к которому с помощью болтов на люверсы крепится огнестойкий материал. На рисунке 5 а представлена противопожарная преграда в состоянии готовности. Противопожарная преграда состоит из короба, который устанавливается над трансформатором. Два направляющих стержня и нижняя Г-образная часть закреплены в бетонированном основании снизу, сверху они крепятся самоконтрящимися гайками к раме, так же они соединены между собой с возможностью регулирования натяжения талрепами. Купол выполнен из огнестойкого материала с расположенными по периметру ребрами-утяжелителями, имеющими кольца для движения по направляющим стержням. Один конец троса закреплён на электролебедке, другой с нижним ребром-утяжелителем купола. Рёбра-утяжелители выполнены из двух полукругов и прямых вставок различной длины для регулирования каркаса купола под габариты защищаемого объекта и соединённых между собой болтами. В основание вмонтированы две фиксирующие скобы для соединения с нижним ребром-утяжелителем купола посредством рычагов-защелок. Система огнетушения состоит из раструба, расположенного в верхней части установки, для подачи огнетушащего материала внутрь купола посредством шланга, спускающегося от раструба к основанию установки, соединённого насадкой, состоящей из двух частей для подсоединения огнетушителя [5].

Устройство работает следующим образом. При возникновении возгорания объекта или пространства возле объекта, происходит высвобождение и падение ребер-утяжелителей с куполом из огнестойкого материала по направляющим под воздействием силы тяжести. (рисунок 5 б) При полном раскрытии купола рычаги-защелки в его нижней части заходят в выступы скоб, закрепленных в бетонном основании защищаемого объекта, обеспечивая герметичность. Огнетушитель соединяется с системой огнетушения противопожарной преграды, и огнетушащее вещество через раструб подаётся к очагу возгорания под куполом. При возгорании вне купола подсоединение огнетушителя к системе огнетушения не требуется, а купол защищает оборудование от внешнего источника возгорания. После окончательного прекращения горения, рычаги-защелки освобождаются из выступов скоб, и с помощью электролебедки купол поднимается в короб, принимая нерабочее состояние. Таким образом, происходит локализация, огнетушение и защита объекта от воздействия огня. [5]

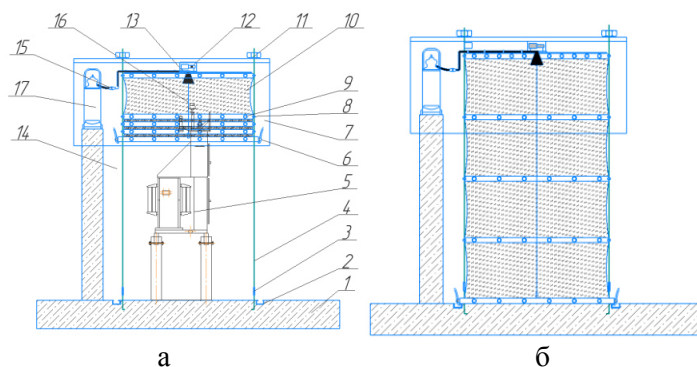


Рисунок 5 - Устройство локального пожаротушения в состоянии готовности и состоянии после срабатывания: 1 – основание, 2 – фиксирующая скоба, 3 – талреп, 4 – направляющий стержень, 5 - трансформатор, 6 – рычаг защёлка, 7 – короб, 8 - ребро-утяжелитель 8, 9 – болт, 10 – купол, 11 – самоконтрящаяся гайка, 12 – электролебедка, 13 – раструб, 14 – шланг, 15 – соединительная насадка, 16 - трос, 17 - огнетушитель

Исходя из теоретического анализа сценариев горения легковоспламеняющейся жидкости, скорость пламени, как функцию времени, можно представить графически (рисунок 6), введя следующие обозначения: $\tau_{\text{гаш}}$ – время гашения, с; $\tau_{\text{сиг}}$ – время поступления сигнала, с; $\tau_{\text{ср}}$ – время срабатывания датчиков от момента возгорания, с; $\tau_{\text{тл}}$ – время тления, с. [6]

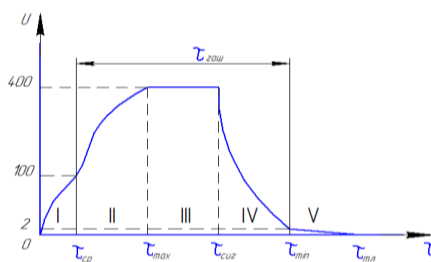


Рисунок 6 - Зависимость скорости пламени от времени: I – вспышка; II – процесс опускания пламени; III – стабилизированное горение обеднённого пламени; IV – процесс обеднения; V – предварительное тление

Скорости пламени для каждого из участков представим в виде системы уравнений

$$\begin{cases} v = \sigma_1 \cdot \tau^h \\ v = \sigma_2 \cdot e^{\lambda\tau} \\ v = \sigma_3 \cdot \tau \\ v = \sigma_4 \cdot e^{-\lambda\tau} \\ v = \sigma_5 \cdot (1 - \tau) \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$, - постоянные коэффициенты для каждого участка кривой, м/с.

С течением времени, согласно теории горения и взрыва, масса масла в локализованной с помощью устройства пожаротушения зоне должна уменьшаться по экспоненциальному закону (рис. 7).

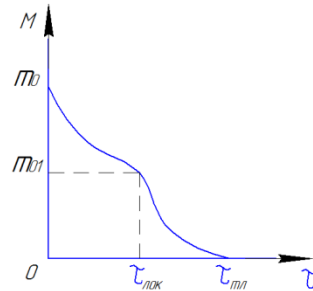


Рисунок 7 – Закон уменьшения массы масла с течением времени в локализованной зоне

$$\frac{dm}{d\tau} = -K_1 \cdot m \quad (2)$$

Проинтегрируем

$$\int_{m_0}^{m_{01}} \frac{dm}{m} = -\int_0^{\tau} K_1 d\tau \quad (3)$$

где m_0 – начальная масса масла, кг;

m_{01} – конечная масса масла, кг;

τ – время, с;

K_1 – постоянная горения.

По формуле Ньютона-Лейбница получим

$$\ln m \Big|_{m_0}^m = -K_1 \cdot \tau \quad (4)$$

следовательно

$$\ln \left| \frac{m_{01}}{m_0} \right| = -K_1 \cdot \tau \quad (5)$$

Потенцируя обе части

$$\frac{m_{01}}{m_0} = e^{-K_1 \cdot \tau} \quad (6)$$

На основании этого закона для массы сгорающего масла справедливо выражение

$$m_{01} = m_0 \cdot e^{-K_1 \tau} \quad (7)$$

Тогда конечная масса масла с учетом времени локализации горения $\tau_{лок}$

$$m_{01} = m_0 \cdot e^{-K_1 \tau_{лок}} \quad (8)$$

Постоянная горения K_1 определяется из выражения

$$K_1 = \frac{\ln \left(\frac{m_{01}}{m_0} \right)}{\tau_{лок}} \quad (9)$$

где $\tau_{лок}$ – время локализации горения, с (рис. 8).

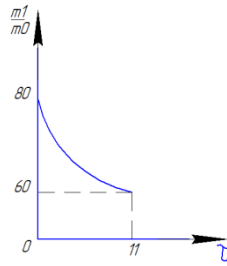


Рисунок 8 – Коэффициент горения

После локализации горения постоянная горения измениться и будет равна K'_1 , при этом определяться с учетом времени тления $\tau_{тл}$

$$K'_1 = \frac{\ln\left(\frac{m_{o1}}{m_{o2}}\right)}{\tau_{тл}} \quad (10)$$

где m_{o2} – масса масла после локализации горения, кг.

Время опускания купола УЛП $\Delta\tau$ определится из выражения

$$\Delta\tau = \tau_{лок} - \tau_{ср} \quad (11)$$

где $\tau_{ср}$ – время срабатывания датчиков, с.

На основании свободного падения купола можно также записать

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (12)$$

где h – высота стойки УЛП, м; $h = [3, 5]$.

Скорость падения купола УЛП (м/с)

$$g = \sqrt{2gh} \quad (13)$$

где h – высота стойки, м.

Скорость пламени как однозначно линейная функция в зоне горения может быть представлена графически (рис. 9).

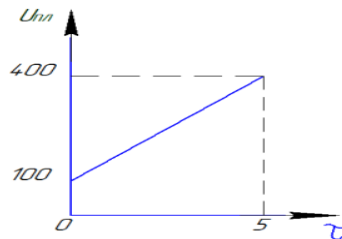


Рисунок 9 – Скорость пламени

Скорость падения купола УЛП $v = [8, 10]$, для сравнения – скорость пламени $U_{пл} = [100, 400]$.

Следовательно, уплотнение воздуха при падении купола УЛП не приведёт к растеканию пламени.

В зависимости от типов огнеупорных тканевых материалов и зоны обеднения кислородом (подкупольное пространство УЛП) график интенсивности горения I (кг·м/с) с учетом времени гашения $\tau_{гаш}$; времени поступления сигнала от датчиков $\tau_{сиг}$; времени срабатывания датчиков от момента возгорания $\tau_{ср}$; времени образования локализованной зоны, обусловленной опусканием шторы $\tau_{лзон}$, будет выглядеть следующим образом (рис. 10).

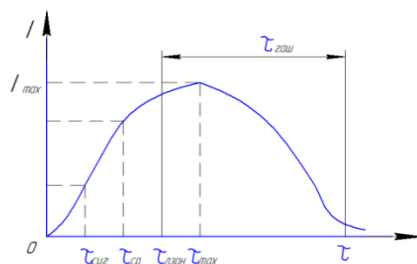


Рисунок 10 – График интенсивности горения

Время локализации пламени $\tau_{лок}$

$$\tau_{лок} = \tau_{ср} + \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (14)$$

где $\tau_{ср}$ – время срабатывания датчиков, с; $\tau_{ср}[5, 15]$;

$\tau_{лок}$ – время локализации пламени, с; $\tau_{лок}[6, 16]$.

Таким образом, применяя предложенное нами устройство локального пожаротушения мы можем обеспечить пожарную безопасность для людей и прилегающей территории.

Научно-практическая значимость данного устройства заключается в минимизации материальных потерь и уменьшении вероятности травмирования обслуживающего персонала и населения непосредственно около трансформатора и вблизи трансформатора в момент чрезвычайной ситуации.

Локализация пожара представлена как экспоненциальная функция развития сценария развития пожара.

Список источников

1. Ланге Ф.Д. Способы повышения надежности электроснабжения потребителей - Электроэнергетика и электротехника // Вестник науки. 2023. Т. 4, № 7 (64). С. 361-364.
2. НПБ 105-95. Определение категорий помещений и зданий по взрыво-пожарной и пожарной опасности.
3. Обеспечение электробезопасности в электрических сетях 20 кВ с низкоомным заземлением нейтрали / А.В. Майоров, М.Ю. Львов, А.А. Челазнов, С.Д. Никитина // Электрические станции. 2022. № 5. С. 20-26.
4. Лapidус А.В. Обзор аварий в энергосистемах. СПб.: НОУЧ ДПО ЦПКЭ, 2020. 40 с.
5. Противопожарная преграда с огнетушением: пат. 132999 Рос. Федерация / Курманов В.В., Усанович С.А., Букин С.В., Лумисте Е.Г., Панова Т.В., Панов М.В.; заявка № 2012141450/12; заявл. 27.09.2012; опублик. 10.10.2013, Бюл. № 28.
6. Пожарная безопасность объектов электроэнергетики: справочник / под ред. С.В. Собуря. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ПожКнига, 2021. 208 с.

Информация об авторах:

М.В. Панов – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации, физики и математики, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Т.В. Панова – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Е.Ф. Степанченко – студент, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Information about the authors:

M.V. Panov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation, Physics and Mathematics, Bryansk State Agrarian University.

T.V. Panova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Life Safety and Environmental Engineering, Bryansk State Agrarian University.

Ye.F. Stepanchenko – Student, Bryansk State Agrarian University.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.10.2024, одобрена после рецензирования 27.01.2025, принята к публикации 29.01.2025.

The article was submitted 10.10.2024, approved after reviewing 27.01.2025, accepted for publication 29.01.2025.

© Панов М.В, Панова Т.В., Степанченко Е.Ф.