

ОЦЕНКА ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ В ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МЕТОДОМ ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА

Н.М. ПУЗЫРЕВ, канд. техн. наук, Д.В. МАРТЫНОВ, канд. техн. наук,
Н.Б. БАРБАШИНОВА, доцент, А.С. ЕМЦЕВ, аспирант

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: puzyrevfdpo@rambler.ru

© Пузырев Н.М., Мартынов Д.В.,
Барбашинова Н.Б., Емцев А.С., 2021

Приведены характеристики опасных и вредных производственных факторов в такой эргатической системе, как электросварочное производство, описано их вредное воздействие на персонал. На основе дисперсионного анализа установлена взаимосвязь между воздействием этих факторов на работников и частичной утратой ими работоспособности с учетом индивидуальных особенностей. Предложена методика решения задач по оценке уровня безопасности на производстве с использованием методов дисперсионного анализа, показывающая, что улучшение экономических показателей деятельности предприятия зависит от создания более безопасных условий труда, приводящих к сокращению потерь рабочего времени.

Ключевые слова: системный анализ, эргатическая система, производственная безопасность, опасный производственный фактор, вредный производственный фактор, дисперсионный анализ.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-91-97

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности эргатической системы, которой является любая система, работающая при участии человека и включающая используемые им технические устройства и среду на рабочем месте, – это приоритетная и социально значимая задача во всех видах производственной деятельности. При создании или повышении уровня безопасности условий труда в таких системах необходимо принимать во внимание большое число факторов производственной среды, требований, условий и ограничений, установленных нормативно-правовыми документами при эксплуатации, обслуживании технических устройств и технологических процессов, задействованных в промышленном производстве.

Степень воздействия опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) на работников, занятых в производственной сфере, характеризуется такими показателями, как концентрация вредных веществ в воздушной среде рабочего места, уровни физического воздействия (вибрации, шума, излучения, которые превышают предельно допустимые значения), и многими другими. Комплексную оценку воздействия на персонал ОВПФ можно также произвести, основываясь на показателях экономических потерь, к которым относятся компенсации за утрату работоспособности персонала, затраты на обеспечение безопасности и др. Такие потери и затраты могут быть прямыми и косвенными. К прямым можно отнести компенсацию за временную нетрудоспособность; оплату штрафов; расходы на устройство или усовершенствование средств безопасности, на приобретение или обновление средств индивидуальной и (или) коллективной защиты. К косвенным – частичную остановку производства из-за

отсутствия основного исполнителя по причине временной утраты трудоспособности; поиск; обучение других работников. Ко второй категории также нужно отнести и средства, затрачиваемые на проведение мероприятий по профилактике профессиональных заболеваний, страховые выплаты и др.

Вредные производственные факторы по воздействию на организм работника, занятого в любой производственной сфере (включая сварочное производство), подразделяют на факторы, приводящие к хроническим заболеваниям (в том числе усугубляющие уже имеющиеся заболевания) за счет длительного относительно низкоинтенсивного воздействия, и факторы, приводящие к острым заболеваниям (отравлениям, поражениям) или травмам за счет кратковременного (одиночного и/или практически мгновенного) относительно высокоинтенсивного воздействия [1].

В машиностроении, строительстве и других отраслях промышленного производства широко проводятся ручные электросварочные работы, применяется сварка на автоматических и полуавтоматических машинах в среде углекислого газа с использованием электрической дуги. При выполнении этих видов работ возникают такие ОВПФ, как повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучения сварочной дуги; электромагнитные поля; искры и брызги; выбросы расплавленного шлака и металла.

Сварочный процесс сопровождается обильными пылевыделениями, т.е. в производственном помещении образуется большая запыленность токсичной мелкодисперсной пылью, газы выделениями, действующими негативно на организм работника. Наиболее вредными пылевыделениями являются оксиды железа, приводящие к механическому раздражению легочной ткани, хроническому отравлению, дерматозу, поражению центральной нервной системы. Оксиды марганца вызывают заболевания нервной системы, легких, печени и крови, а соединения кремния оказывают разрушающее действие на легкие, что приводит к постоянной одышке, боли в груди, сухому кашлю. Соединения хрома способны накапливаться в организме человека, вызывая головные боли, воспаление желудочно-кишечного тракта, общую слабость. Соединения алюминия вызывают механическое раздражение легочной ткани, снижение гемоглобина в крови. При отсутствии надлежащих средств защиты у электросварщиков могут быть поражены органы зрения (воспаление, электроофтальмия, катаракта и т.п.), могут появиться ожоги кожных покровов. Кроме того, возможно поражение электрическим током, отравление продуктами сварки.

Основными факторами оценивания трудового процесса являются тяжесть труда и его напряженность [2]. Тяжесть труда – это характеристика, отражающая нагрузку на опорно-двигательный аппарат и функциональные системы организма (сердечно-сосудистую, дыхательную и др.). Напряженность труда – характеристика, отражающая нагрузку на центральную нервную систему, органы чувств, эмоциональную сферу.

На основе проведенной на экскаваторном заводе специальной оценки условий труда электросварщиков, выполняющих сварку стрел и рукоятей в среде углекислого газа, были установлены следующие классы условий труда по вредным производственным факторам: по химическому фактору, наличием аэрозолей преимущественно фиброгенного действия и по тяжести трудового процесса – класс 3.1 (вредный), по шуму – класс 3.2 (также вредный).

Подобные условия труда могут вызвать заболевания различной формы и тяжести, снижение работоспособности, отрицательно повлиять на здоровье потомства. В зависимости от количественной характеристики (например, уровня излучения, звукового давления, концентрации вредных вещества и других показателей вредности) и продолжительности воздействия вредный производственный фактор может стать опасным, в результате чего будет велика вероятность возникновения профессионального

заболевания. На предприятии это приведет к потерям рабочего времени и, соответственно, потерям экономическим. Кроме того, стоит отметить, что расходы на оплату труда работников, занятых на участках с тяжелыми и вредными условиями, значительно выше, чем на оплату труда сотрудников, имеющих такую же квалификацию, но занятых на участках с нормальными условиями.

ЦЕЛИ И МЕТОДЫ ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Для анализа затрат и экономических потерь, включая потери рабочего времени в зависимости от степени вредности производственного процесса, предлагается использовать дисперсионный анализ. Затраты и потери могут быть вызваны не только состоянием производственной среды. К ним могут относиться затраты на компенсацию потерь в связи с временной нетрудоспособностью, на улучшение условий труда, на средства индивидуальной и коллективной защиты, на проведение профилактических мероприятий и др. При этом потери рабочего времени бывают ненормируемыми (или незапланированными). В этом случае они не запланированы изначально, а поэтому несут в себе угрозу эффективной деятельности предприятия и являются следствием определенных проблем, вызванных различными обстоятельствами, включая условия труда. Именно ненормируемые потери рабочего времени должны сокращаться в первую очередь. Они могут зависеть от состояния здоровья, возраста работников, их квалификации, других индивидуальных характеристик и особенностей организма. Эти и другие зависимости следует оценивать с помощью дисперсионного анализа.

Дисперсионный анализ представляет собой набор статистических методов, предназначенных для обработки экспериментальных данных, зависящих от большого количества одновременно действующих факторов. Целью анализа является оценка влияния факторов на результирующий признак и выявление наиболее значимых из них.

Метод служит для исследования статистической значимости различия средних значений количественного признака для разных уровней категориальных факторов. Его применяют с целью установления влияния некоторого категориального фактора F_i , имеющего несколько уровней ($F_1, F_2, \dots, F_p$), на зависимую переменную X . Категориальный фактор выступает в роли независимой переменной, влияющей на зависимую переменную. При однофакторном дисперсионном анализе исследуется влияние одной независимой переменной, имеющей несколько уровней, на одну зависимую переменную [3, 4].

Для производственного участка, где электросварщики выполняют ручную и полуавтоматическую электросварку стрел и рукоятей экскаваторов в среде углекислого газа в условиях с ОВПФ, с помощью однофакторного дисперсионного анализа было проведено исследование оценки длительности частичных потерь работоспособности в зависимости от такой индивидуальной особенности сварщиков, как возраст. Численным показателем потерь работоспособности было принято количество дней нетрудоспособности по медицинским показаниям. Все 12 сварщиков, занятых на рабочих местах с вредными производственными факторами, были разделены на 3 возрастные группы. Требовалось установить, насколько возрастные показатели работников влияют на издержки предприятия в результате частичной утраты работоспособности вследствие воздействия на работников ОВПФ при выполнении ими ручной и полуавтоматической электросварки стрел и рукоятей. В трех классах градации фактора F_p (1, 2 и 3-я возрастные группы) собраны данные о потерях рабочего времени в течение 4 лет (таблица).

Продолжительность временной утраты работоспособности
в зависимости от возраста сварщиков

Год	F ₁ возрастная группа (18–45 лет)	F ₂ возрастная группа (46–55 лет)	F ₃ возрастная группа (56 лет и старше)
	Количество дней нетрудоспособности		
2017	3	4	6
2018	0	3	9
2019	4	8	12
2020	6	7	9
Среднее $\bar{X}_i$	3,25	5,50	9,00
Дисперсия S_i^2	6,25	5,67	6,00

Число классов градации фактора (групп) $a = 3$ и в каждом классе (группе) $n_i = 4$ наблюдения. Общее число наблюдений $n = 12$.

Числа степеней свободы:

$$\begin{aligned}v_a &= a - 1 = 3 - 1 = 2; \\v_e &= n - a = 12 - 3 = 9; \\v &= n - 1 = 12 - 1 = 11.\end{aligned}$$

Дисперсия S_i^2 для каждой группы рассчитывается по формуле

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}{n_i - 1}.$$

Общее среднее наблюдений

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n X_{ij}}{n} = \frac{71}{12} = 5,92.$$

Вычислим суммы квадратов отклонений.

Объясненная влиянием фактора a сумма квадратов отклонений

$$\begin{aligned}SS_a &= \sum_{i=1}^a n_i (\bar{X}_i - \bar{\bar{X}})^2 = \\&= 4 \cdot (3,25 - 5,92)^2 + 4 \cdot (5,50 - 5,92)^2 + 4 \cdot (9,00 - 5,92)^2 = 67,17.\end{aligned}$$

Сумма квадратов отклонений ошибки

$$\begin{aligned}SS_e &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 = \sum_{i=1}^a (n_i - 1) s_i^2 = \\&= (n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2 + (n_3 - 1) s_3^2 = \\&= 3 \cdot 6,25 + 3 \cdot 5,67 + 3 \cdot 6,00 = 53,75.\end{aligned}$$

Общая сумма квадратов отклонений:

$$SS = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X})^2 = \\ = (3 - 5,92)^2 + (0 - 5,92)^2 + \dots + (9 - 5,92)^2 = 120,92.$$

Вычислим дисперсии:

$$MS_a = \frac{SS_a}{a-1} = \frac{67,17}{2} = 33,58; \\ MS_e = \frac{SS_e}{n-a} = \frac{53,75}{9} = 5,97.$$

Вычислим фактическое отношение Фишера:

$$F = \frac{MS_a}{MS_e} = \frac{33,58}{5,97} = 5,62.$$

Критическое значение отношения Фишера:

$$F_{кр}(0,05; 2; 9) = 4,26.$$

Фактическое отношение Фишера больше критического:

$$F = 5,62 > F_{кр}(0,05; 2; 9) = 4,26.$$

В таком случае при уровне значимости $\alpha = 0,05$ можно сделать вывод, что из-за частичной утраты работоспособности (болезни) потери рабочего времени работников, задействованных на сварочном участке, зависят от индивидуальных особенностей, в данном случае от возраста. Это сказывается на издержках предприятия вследствие воздействия на работников ОВПФ при выполнении ими ручной и полуавтоматической электросварки стрел и рукоятей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дисперсионный анализ позволил провести исследование статистической значимости различия средних значений количественного признака для разных уровней категориальных факторов и сделать соответствующие выводы. С его помощью можно проводить оценку других рисков, присущих рассматриваемому производству, исследовать влияние различных характеристик производственной среды на степень вредности, травмоопасности, оценить экономические показатели предприятия. Учет и анализ в наиболее полном объеме составляющих затрат и ущерба дают возможность обоснованно сформировать план финансирования мероприятий, благодаря которому можно при минимальных затратах получить наибольший эффект от внедрения мероприятий по охране труда, а также дать наиболее объективную оценку влияния уровня безопасности труда на экономические показатели организации [5].

С экономической точки зрения целесообразно принимать все возможные меры для улучшения условий труда, предотвращения несчастных случаев, поскольку исполнение предприятиями обязанностей по выплате страховых взносов и

компенсаций в связи с утратой работоспособности из-за несчастных случаев существенно влияет на экономические показатели. Принято считать, что размер потерь до 10 % от общего рабочего времени является нормальной ситуацией, а в некоторых случаях (в зависимости от конкретного вида деятельности предприятия и должности сотрудника) потери рабочего времени могут составлять и больший процент, являющийся нормой. Однако в большинстве ситуаций показатели свыше означенных указывают на наличие определенных технологических, технических, организационных и кадровых проблем. Если же объем потерь доходит до уровня 50 %, то ситуация может стать критической. Таким образом, анализ потерь рабочего времени следует вести на научной основе, используя методы системного и дисперсионного анализа. Как показывают расчеты, издержки предприятия от отсутствия одного сварщика по причине временной нетрудоспособности (включая упущенную выгоду по выручке, издержки по поиску и замене его другим работником, издержки в период адаптации основного работника, приступившего к работе после излечения) могут составить до 500 и более тысяч рублей в месяц.

Средством устранения негативных факторов производственной среды может стать проведение различных организационно-технических мероприятий по снижению уровня травматизма и профзаболеваемости. В соответствии с действующим законодательством на каждом предприятии в первую очередь нужно создать систему управления охраной труда, при которой, как правило, устанавливается политика в соответствующей области и формируются цели работодателя. В этой системе должны быть предусмотрены процедуры организации и оценки условий труда, управления профессиональными рисками, наблюдения за состоянием здоровья работников, обучения персонала безопасным приемам труда, а также обеспечение сотрудников средствами индивидуальной и коллективной защиты, установление режимов труда и отдыха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисперсионный анализ можно применять и для решения других задач по установлению и оценке влияния факторов на результирующий признак вредности, опасности, а также выявлению наиболее значимых из них. Интегрирующим показателем при этом могут быть экономические показатели затрат на обеспечение безопасных условий труда и компенсационные выплаты. Полученные результаты можно использовать для принятия обоснованных решений по улучшению условий труда, проведению организационно-технических мероприятий, направленных на снижение профзаболеваемости, оптимизацию издержек при создании и поддержании на требуемом уровне безопасных условий труда.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М.: Стандартинформ, 2016. 16 с.
2. Руководство Р 2.2.2006-05. Гигиеническая оценка факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда // *Бюллетень нормативных и методических документов Госсанэпиднадзора*. 2005. № 3 (21), 142 с.
3. Шеффе Г. Дисперсионный анализ. М.: Наука, 1980. 512 с.
4. Статистические методы анализа данных: учебник / под общ. ред. Л.И. Ниворожкиной. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2017. 331 с.
5. Сердюк В.С., Кузнецов В.П., Бакико Е.В. Мотивация предотвращения несчастных случаев на производстве и профзаболеваний: учебное текстовое

электронное издание. Омск: Омский государственный технический университет, 2016. 90 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/60879.html> (дата обращения: 25.09.2021).

Для цитирования: Пузырев Н.М., Мартынов Д.В., Барбашинова Н.Б., Емцев А.С. Оценка опасных и вредных производственных факторов в эргатических системах методом дисперсионного анализа // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 4 (12). С. 91–97.

ASSESSMENT OF HAZARDOUS AND HARMFUL PRODUCTION FACTORS IN ERGATIC SYSTEMS BY THE METHOD OF DISPERSION ANALYSIS

N.M. PUZYREV, Cand. Sc., D.V. MARTYNOV, Cand. Sc.,
N.B. BARBASHINOVA, Lecturer, A.S. YEMTSEV, postgraduate

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: puzyrevfdpo@rambler.ru

The characteristics of hazardous and harmful production factors in such an ergatic system as electric welding production, their harmful effects on personnel are given. Based on the analysis of variance, a relationship is established between the impact of these factors on personnel and the partial loss of their working capacity, taking into account individual characteristics. A method for solving problems of assessing the level of safety at work using the methods of analysis of variance is proposed, showing that the improvement of the economic performance of an enterprise depends on the creation of safer working conditions, leading to a decrease in losses of working time.

Keywords: system analysis, ergatic system, industrial safety, hazardous production factor, harmful production factor, analysis of variance.

REFERENCES

1. GOST 12.0.003-2015. Sistema standartov po bezopasnosti truda. Opasnyye i vrednyye proizvodstvennyye faktory. Klassifikatsiya. Moscow: Standartinform, 2016. 16 p.
2. Rukovodstvo R 2.2.2006-05. Gigiyenicheskaya otsenka faktorov rabochey sredy i trudovogo protsessa. Kriterii i klassifikatsiya usloviy truda. *Byulleten normativnykh i metodicheskikh dokumentov Gossanepidnadzora*. 2005. № 3 (21), 142 p. (In Russian).
3. Sheffe G. Dispersionnyy analiz [Analysis of variance]. Moscow: Nauka, 1980. 512 p.
4. Statisticheskiye metody analiza dannykh: uchebnik [Statistical methods of data analysis: a textbook] / pod obshch. red. L.I. Nivorozhkinoy. Moscow: RIOR: INFRA-M, 2017. 331 p.
5. Serdyuk V.S., Kuznetsov V.P., Bakiko Ye.V. Motivatsiya predotvrashcheniya neschastnykh sluchayev na proizvodstve i profzabolevaniy: uchebnoye tekstovoye elektronnoye izdaniye [Motivation for the prevention of industrial accidents and occupational diseases: educational text electronic edition]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2016. 90 p. URL: <https://www.iprbookshop.ru/60879.html> (date accessed: 25.09.2021).

Поступила в редакцию/received: 21.09.2021; после рецензирования/revised: 29.09.2021;
принята/accepted: 05.10.2021