

Ал-й Л. Мисун, А. В. Гаркуша, Ал-р Л. Мисун

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: LLM_90@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПЕРАТОРОВ МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ (НА ПРИМЕРЕ ТРАКТОРИСТА-МАШИНИСТА)

Аннотация. Сделан анализ методов комплексной оценки профессиональной безопасности (профессиональная подготовка, успешность, пригодность) трактористов-машинистов. Предложена математическая модель состояния профессиональной безопасности работников с учетом их психофизиологических показателей.

Ключевые слова: тракторист-машинист, психофизиологические показатели, методы моделирования, математическая модель, профессиональная безопасность.

Al-i L. Misun, A. V. Garkusha, Al-r L. Misun

El “Belarusian State Agrarian Technical University”

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: LLM_90@mail.ru

MODELING OF PROFESSIONAL SAFETY OF MOBILE AGRICULTURAL MACHINERY OPERATORS (USING THE EXAMPLE OF A TRACTOR DRIVER)

Abstract. The analysis of methods of complex assessment of professional safety (professional training, success, suitability) of tractor drivers-machinists is made. A mathematical model of the state of professional safety of workers taking into account their psychophysiological indicators is proposed.

Keywords: tractor driver-machinist, psychophysiological indicators, modeling methods, mathematical model, professional safety.

Введение

Формирование личности безопасного типа – это научно обоснованная система мероприятий, направленных на коррекцию и развитие индивидуальных способностей личности, выявленных при профотборе, благодаря которым удается достичь совершенно новых качественных результатов по повышению производственной безопасности и работоспособности человека. Эта система включает проведение профессионального отбора, повышение качества профессиональных навыков, активизацию уровня психофизиологических показателей и др. [1].

Основная часть

Для проведения исследований был осуществлен поиск наиболее корректного метода оценки профессиональной безопасности (профессиональная подготовка, успешность, пригодность) операторов мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ) на примере тракториста-машиниста, позволяющего по известным психофизиологическим показателям получить теоретические значения оценки профессиональной безопасности и сравнить их с экспертными оценками, данными руководителями агропредприятий, которые хорошо знают этих работников.

Экспериментальная оценка профессиональной безопасности работников исследуемой профессии проведена на агропредприятиях Браславского и Глубокского районов Республики Беларусь (таблица 1).

Таблица 1 – Парк тракторов «Беларус», находившихся под наблюдением (2023–2024 гг.; агропредприятия Браславского и Глубокского районов)

Наименование агропредприятия	Год выпуска трактора	Гос. номер трактора	Стаж работы трактористом-машинистом
УП «За Родину»	2009	ВВ–25 026	27
ОАО «Браславский райагросервис»	2009	ВВ–25 031	24
ОАО «Сельцы»	2010	ВК–21 646	13
ОАО «Браславский райагросервис»	2010	ВВ–26 046	9
УП «За Родину»	2011	ВВ–26 938	26
СУП «Мерецкие»	2011	ВВ–26 974	14
СУП «Мерецкие»	2012	ВВ–26 993	4
СУП «Мерецкие»	2012	ВВ–26 994	28
СХФ «Прошково» ОАО «Глубокский райагросервис»	2013	ВА–28 703	30
ГП «Озерцы»	2013	ВВ–26 958	24
УП «За Родину»	2014	ВВ–27 438	30
СУП «Мньюто»	2014	ВВ–27 948	25
УП «Короли»	2015	ВВ–27 971	19
КУСП «Браславский»	2015	ВВ–27 993	16
УП «За Родину»	2016	ВВ–28 150	30
СУП «Мерецкие»	2016	ВК–23 022	5
УП «За Родину»	2017	ВВ–29 142	10
СУП «Мерецкие»	2017	ВК–21 553	17
ГП «Ломашино-Агро»	2018	ВК–22 830	30
УП «Короли»	2019	ВК–23 574	15

Программа исследований включала оценку таких профессионально-значимых психофизиологических показателей, как сенсомоторная реакция на световой раздражитель, память, внимание, координация движений. Необходимое количество экспертов (m) определялось по следующей формуле [2]:

$$m = \frac{\chi^2_{\beta; (n-1)}}{(\delta + 1)(n - 1) \cdot W_o}, \quad (1)$$

где $\chi^2_{\beta; (n-1)}$ – квантиль распределения, соответствующий доверительной вероятности β и числу степеней свободы $(n - 1)$; n – число оцениваемых факторов ($n = 4$); δ – заданная точность результатов исследований ($\delta = 0,950$); W_o – критическое значение коэффициента конкордации ($W_o = 0,100$).

Подставив значения показателей $\chi^2_{\beta; (n-1)}$ [3], δ , n и W_o в формулу (1), получим m равное четырем экспертам.

Наблюдаемые трактористы-машинисты, согласно полученным оценкам у экспертов (5; 4 и 3 балла), были разделены на три подгруппы, для каждой из которых рассчитаны математическое ожидание $m_i^{(N)}$, дисперсия $D_i^{(N)}$, среднеквадратическое отклонение $\sigma_i^{(N)}$, корреляционный момент $K_{ij}^{(N)}$ между случайными величинами X_i, X_j ($i = 1, 2, 3 \dots n$; $j = 1, 2, 3 \dots n$) и коэффициент корреляции $K_{ij}^{(N)}$ переменной величины X_i события N по следующим формулам:

$$m_i^{(N)} = \frac{\sum_{j=1}^{K_N} X_{ij}^{(N)}}{K_N}, \quad (2)$$

$$D_i^{(N)} = \frac{\sum_{j=1}^{K_N} (X_{ij}^{(N)} - m_i^{(N)})^2}{K_N - 1}, \quad (3)$$

$$\sigma_i^{(N)} = \sqrt{D_i^{(N)}}, \quad (4)$$

$$K_{ij}^{(N)} = \frac{\sum_{i=1}^{K_N} \sum_{j=1}^{K_N} (X_i^{(N)} - m_i^{(N)}) (X_j^{(N)} - m_j^{(N)})}{K_N - 1}, \quad (5)$$

$$r_{ij} = \frac{K_{ij}^{(N)}}{\sigma_i^{(N)} \sigma_j^{(N)}}, \quad (6)$$

где $X_{ij}^{(N)}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, K_N$) – значение случайной величины X_i (соответствующий психофизиологический параметр), которая принадлежит одному из событий N (вероятность появления оценок 5; 4 или 3 балла).

Для проведения исследований использовались следующие методы: плотностей, геометрический и вероятностный. Первый метод основан на понятии плотности распределения системы случайных величин $X_1, X_2, \dots, X_n$, которая в каждом событии N принималась по многомерному нормальному закону [4]. Из теории вероятностей известно, что в этом примере случайная величина X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) также подчиняется нормальному закону [5]. Пусть имеется N событий случайных величин $X_1, X_2, \dots, X_n$. В нашем случае событиями будет появление оценок 5; 4 или 3 балла, а случайными величинами – психофизиологические показатели: время сенсомоторной реакции на световой раздражитель, параметры внимания, памяти, частота сердечных сокращений и другие параметры, оцениваемые до и после рабочей смены. По экспериментальным данным (таблица 2) выбирается многомерный закон распределения плотности вероятности случайных величин. В нашем случае за основу был взят нормальный закон распределения. Для экспериментальных значений случайных величин $X_1, X_2, \dots, X_n$ находилась плотность распределения вероятности в каждом событии N . За меру отклонения принималось отношение найденной плотности к ее максимальной величине (плотности) в событии N . Событие, в котором это отношение было наибольшим, принималось за достоверное.

При нормальном законе распределения случайной величины плотность вероятности $f^{(N)}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ равна [5]

$$f^{(N)}(X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{\sqrt{|C^{(N)}|}}{(2\pi)^{N^2}} \exp \frac{1}{2} R^{(N)}, \quad (7)$$

$$R^{(N)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (C_{ij}^{(N)} (X_i - m_i^{(N)}) (X_j - m_j^{(N)})), \quad (8)$$

где $|C^{(N)}|$ – определитель матрицы; $C^{(N)} = \|C_{ij}^{(N)}\|$ – матрица, обратная корреляционной матрице $K_{ij}^{(N)}$.

Из (7) следует, что максимальное значение плотности вероятности $f_{\max}^{(N)}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ имеет место при $X_i = m_i^{(N)}$:

$$f_{\max}^{(N)}(m_1^{(N)}, m_2^{(N)}, \dots, m_n^{(N)}) = \frac{\sqrt{|C^{(N)}|}}{(2\pi)^{N^2}}. \quad (9)$$

Обозначая через $\sigma^{(N)}$ меру отклонения плотности вероятности $f^{(N)}$ к ее максимальному значению $f_{\max}^{(N)}$, получим выражение, позволяющее моделировать процесс изменения состояния профессиональной безопасности тракториста-машиниста в зависимости от его психофизиологических показателей

$$\sigma^{(N)} = \exp\left(-\frac{1}{2R^{(N)}}\right). \quad (10)$$

Подставляя в соотношение (10) значение случайной величины $X_1, X_2, \dots, X_n$ для каждого события N , находим $\sigma^{(N)}$. В качестве достоверного события выбираем то событие N , в котором $\sigma^{(N)}$ наибольшее. В том случае, если случайные величины $X_1, X_2, \dots, X_n$ некоррелированные, то плотность вероятности $f^{(N)}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ находится по формуле [4]:

$$f^{(N)}(X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{1}{(2\pi)^{N^2} \cdot \prod_{i=1}^n \sigma_i^{(N)}} \exp\left[-\frac{1}{2} R^{(N)}\right], \quad (11)$$

где $\prod_{i=1}^n \sigma_i^{(N)}$ – произведение среднеквадратических отклонений $\sigma_1^{(N)}, \sigma_2^{(N)}, \dots, \sigma_n^{(N)}$.

$$R^{(N)} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - m^{(N)}}{\sigma_i} \right)^2, \quad (12)$$

Из выражения (10) следует, что $\sigma^{(N)}$ будет наибольшим, когда величина $R^{(N)}$ – наименьшей. Значению $R^{(N)}$ можно дать геометрическую интерпретацию. Если значения случайных величин взять безразмерными $X_1/\sigma_1, X_2/\sigma_2, \dots, X_n/\sigma_n$, то $R^{(N)}$ будет равно квадрату расстояния от точки с координатами $X_1/\sigma_1, X_2/\sigma_2, \dots, X_n/\sigma_n$ до точки с координатами $\frac{m_1^{(N)}}{\sigma_1^{(N)}}, \frac{m_2^{(N)}}{\sigma_2^{(N)}}, \dots, \frac{m_n^{(N)}}{\sigma_n^{(N)}}$. Для одного параметра, воспользовавшись выражением (10), можно записать

$$\sigma^{(N)} = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{X - m^{(N)}}{\sigma^{(N)}} \right)^2\right]. \quad (13)$$

Таблица 2 – Результаты исследований психофизиологических показателей трактористов-машинистов

Значение психофизиологических показателей					
X_1 время реакции (хронорефлекс), мс	X_2	X_3	X_4	X_5 память (таблица Шульце), с	X_6 частота сердечных сокращений (ЧСС), уд/мин
	внимание (по табл. Анфимова)				
	количество знаков		число ошибок		
	просмотренных	зачеркнутых			
205/291	340/294	52/54	0/0	41/52	75/79
212/291	418/380	49/46	0/2	40/59	77/77
196/249	549/537	50/48	1/5	47/55	60/69
185/257	594/548	53/45	3/6	50/54	86/88
208/277	412/385	45/41	0/9	53/60	82/82
214/290	572/547	47/39	2/4	49/52	80/80
197/260	538/545	49/40	4/8	52/59	83/84
218/284	592/571	57/53	3/5	56/64	85/90
215/292	390/365	46/42	1/4	50/61	81/92
221/278	576/580	47/48	0/3	55/69	86/94
224/312	459/349	56/42	3/5	52/64	77/82
227/282	482/394	50/49	1/3	48/52	75/80
208/318	441/385	52/40	3/4	55/62	81/92
223/294	442/390	56/47	4/5	63/75	79/89
208/262	579/557	41/36	1/4	49/57	76/82
220/293	506/487	47/42	3/8	48/59	80/81
217/313	284/401	53/40	3/9	51/67	78/80
202/297	579/525	57/54	5/8	42/63	77/86
214/358	472/566	50/34	3/9	62/76	84/87
251/381	583/489	49/48	3/6	52/72	89/90

П р и м е ч а н и е: в числителе – значения психофизиологических показателей до работы; в знаменателе – после работы.

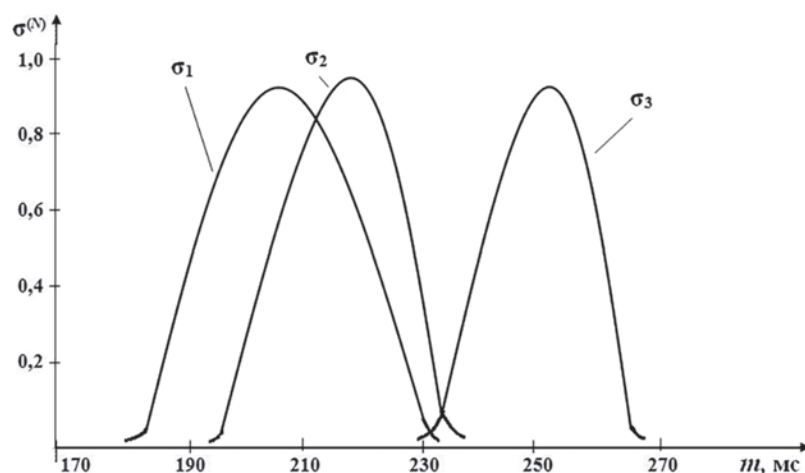


Рисунок 1 – Комплексная оценка профессиональной безопасности тракториста-машиниста (метод плотностей)

На рисунке 1 приведены графики, характеризующие величину отклонения плотности вероятности $\sigma^{(N)}$ от скорости сенсомоторной реакции (m) (таблица 3) на световой раздражитель у трактористов-машинистов ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), соответствующие оценкам 5; 4 и 3 балла.

Таблица 3 – Время реакции на световой раздражитель, мс, у трактористов-машинистов (до начала рабочей смены)

Баллы	Число обследованных трактористов-машинистов												Среднее значение скорости реакции (m), мс	Среднеквадратическое отклонение (σ)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
5	183	189	192	194	199	202	–	–	–	–	–	–	193,2	10,1
4	206	207	211	213	214	216	220	223	225	227	–	–	216,2	6,4
3	229	232	255	264	–	–	–	–	–	–	–	–	245,0	12,3

Предлагаемый метод плотности вероятности распределения системы случайных величин для математического моделирования профессиональной безопасности трактористов-машинистов позволяет оценивать и прогнозировать их готовность к безопасному выполнению работ непосредственно как в течение рабочей смены, так и в перспективе.

Для сравнительного анализа полученных результатов были проведены исследования оценки состояния профессиональной безопасности тракториста-машиниста в зависимости от психофизиологических его показателей с использованием и других методов – геометрического и вероятностного. На рисунках 2–4 представлены графики функции $Z = f(x_i)$ ($i = 1; 2 \dots, 8$), которые позволяют прогнозировать (геометрический метод) профессиональную безопасность тракториста-машиниста в зависимости от частоты сердечных сокращений, скорости реакции, параметров памяти и внимания [6]. В таблице 4 приведены теоретическая оценка профессиональной безопасности трактористов-машинистов, рассчитанная по методам плотности распределения системы случайных величин, геометрическому и вероятностному, а также экспертная оценка. Сравнительный анализ показателей подтверждает, что совпадение теоретической и экспертной оценок достаточно высокое.

Установлено [1], что безопасность и оперативность выполнения оператором МСХТ управленческих технологических воздействий зависит от степени его утомляемости, уровень которой определяется с учетом психофизиологических показателей работника [7]. Согласно результатам исследований и проведенным расчетам, утомляемость у трактористов-машинистов к концу рабочего дня увеличивалась на 21 %, при этом у 95 % поддерживался «высокий» или «средний» уровень профессиональной безопасности, что характеризовало их как успешно пригодных работников с большой вероятностью готовности к безопасному труду.

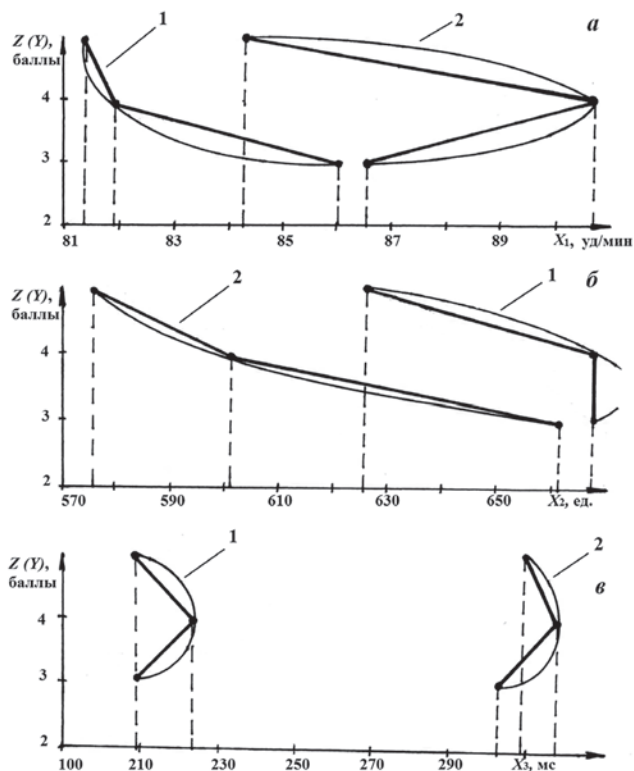


Рисунок 2 – Геометрический метод моделирования профессиональной безопасности трактористов-машинистов по психофизиологическим показателям: 1 – начало рабочей смены; 2 – конец рабочей смены; а – пульс; б – число просмотренных знаков; в – скорость реакции (простая сенсомоторная реакция на белый свет)

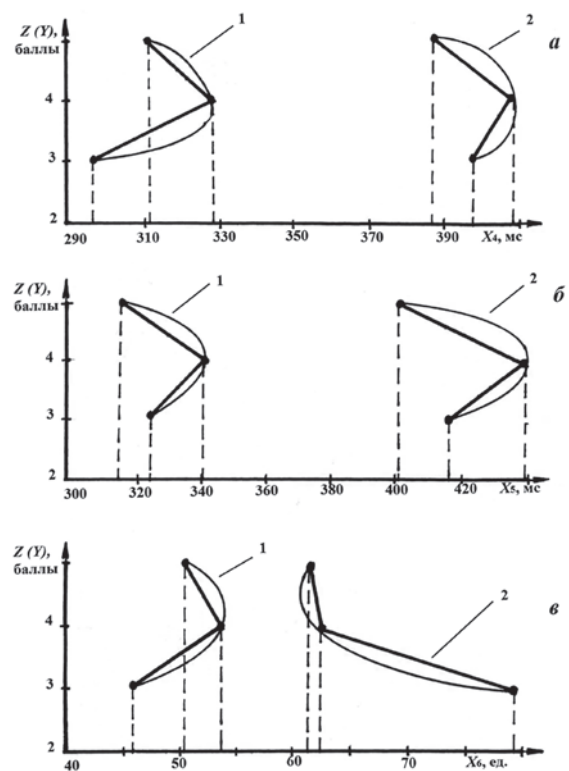


Рисунок 3 – Геометрический метод моделирования профессиональной безопасности трактористов-машинистов по психофизиологическим показателям: 1 – начало рабочей смены; 2 –конец рабочей смены; а – скорость реакции (сложная сенсомоторная реакция на белый свет); б – скорость реакции на красный свет (сложная сенсомоторная реакция); в – параметры памяти

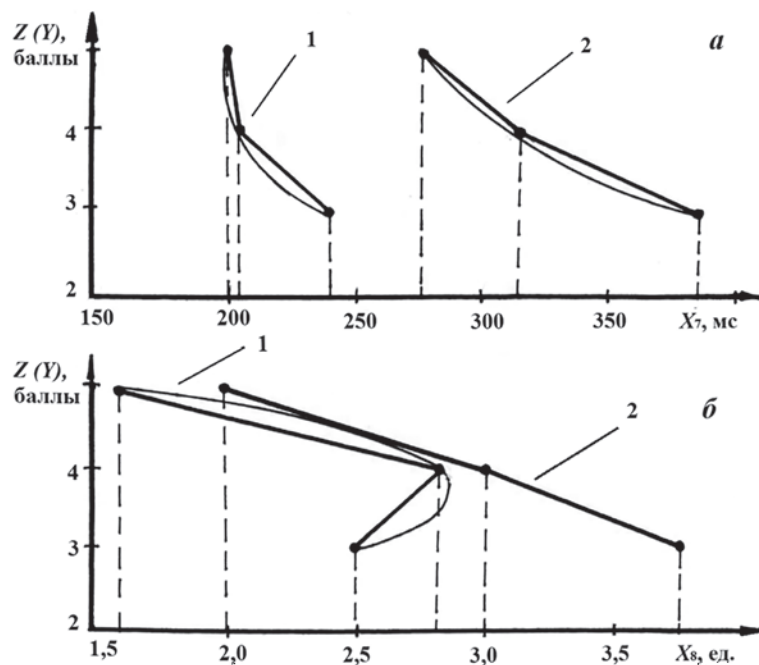


Рисунок 4 – Геометрический метод моделирования профессиональной безопасности трактористов-машинистов: 1 – начало рабочей смены; 2 – конец рабочей смены; а – сенсомоторная реакция; б – внимание (число допущенных ошибок)

Таблица 4 – Теоретическая и экспертная оценки профессиональной безопасности трактористов-машинистов

Теоретическая оценка, балл				Экспертная оценка, балл
метод плотностей		геометрический метод	вероятностный метод	
расчетное значение	усредненное значение			
5,00/4,92	5	5,00/4,90	5,00/4,90	5
5,00/4,98	5	5,00/5,00	5,00/5,00	5
5,00/5,00	5	5,00/5,00	5,00/5,00	5
4,35/4,63	4	4,40/4,56	4,40/4,56	5
4,41/3,92	4	4,88/3,78	4,88/3,78	5
3,52/4,77	4	3,50/4,90	3,55/4,90	5
4,81/5,00	5	4,76/5,00	4,76/5,00	5
3,89/4,35	4	3,94/4,28	3,94/5,00	4
4,92/3,97	4	5,00/3,94	5,00/3,90	4
4,13/4,23	4	4,02/4,00	4,02/4,02	4
4,02/4,19	4	3,98/4,00	3,94/4,04	4
5,00/4,67	5	4,72/5,00	5,00/4,94	4
3,90/4,23	4	3,86/5,00	4,12/3,70	4
4,01/3,84	4	3,78/4,00	3,86/3,68	4
4,80/3,92	4	5,00/4,00	5,00/4,68	4
3,67/4,18	4	3,86/4,00	3,44/3,80	4
4,31/4,24	4	4,02/4,00	4,18/3,92	4
4,40/4,42	4	4,08/4,00	4,38/4,04	4
4,29/3,30	4	4,06/4,00	4,00/4,12	4
3,09/3,42	3	3,00/3,00	3,00/3,02	3

Примечание: в числителе – значения психофизиологических показателей до работы; в знаменателе – после работы.

Заключение

Предложена математическая модель комплексной оценки состояния профессиональной безопасности трактористов-машинистов, что позволяет определить готовность работников к безопасному выполнению работ и прогнозировать успешность их профессиональной деятельности в будущем.

Список использованных источников

1. Мисун, Ал-й Л. Научно-методические основы повышения техносферной безопасности на объектах АПК : монография / Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Мн. : БГАТУ, 2025. – 388 с.
2. Азаренко, В. В. Моделирование влияния природно-климатических и агрохимических факторов на эффективность и безопасность промышленного выращивания крупноплодной клюквы в условиях контролируемой производственной среды / В. В. Азаренко, В. Л. Мисун, Ал-й Л. Мисун // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2025. – № 2. – С. 18–24.
3. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения : учеб. пособие / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Высш. шк. – 2000. – 480 с.
4. Невская, Г. Ф. Разработка метода плотности вероятности распределения случайных величин для моделирования комплексной оценки успешности профессиональной деятельности человека / Г. Ф. Невская, З. И. Губонина, Е. Б. Горбачев // Жизнь и безопасность. – 1998. – № 4. – С. 15–20.
5. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учебник / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
6. Мисун, Ал-й Л. Физиологические и медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности : пособие / Ал-й Л. Мисун, Л. В. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Мн. : БГАТУ, 2024. – 312 с.
7. Мисун, Л. В. Техносферная безопасность : пособие / Л. В. Мисун, Ал-й Л. Мисун, Ал-р Л. Мисун. – Мн. : БГАТУ, 2023. – 212 с.