

УДК 631.358:634.739.2:[631.158:658.345]

В. В. АЗАРЕНКО¹, А. Л. МИСУН²

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН И УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОПАСНОЙ СИТУАЦИИ В ПРОЦЕССЕ УБОРКИ КОРМОВЫХ КУЛЬТУР

¹Президиум НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: azarenko@presidium.bas-net.by

*²Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь,
e-mail: LLM_90@mail.ru*

Исследованы причины и вероятность возникновения опасной ситуации в технологических операциях уборки кормовых культур в системах «оператор–комбайн–производственная среда–транспорт». Получено выражение для определения безопасности кормоуборки от профессиональной подготовки комбайнера, установлена зависимость безопасности функционирования «человеко-машинной» системы кормоуборки от условий труда и эксплуатационной надежности комбайна.

Ключевые слова: безопасность труда, оператор, комбайн, производственная среда, транспорт, кормоуборка, технические средства.

V. V. AZARENKO¹, A. L. MISUN²

INVESTIGATION OF THE REASONS AND CONDITIONS OF A DANGEROUS SITUATION DURING FODDER CROPS HARVEST

*¹National Academy of Sciences of Belarus, Department of Agricultural Sciences, Minsk, Belarus,
e-mail: azarenko@presidium.bas-net.by*

²Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: LLM_90@mail.ru

The paper deals with the reasons and probability of a dangerous situation during fodder crops harvest in the systems: operator, harvester, manufacturing environment, transport. The formula for safety of fodder harvest has been obtained, the dependence of safety of the “man” system of fodder harvest on labour conditions and service reliability of a harvester is established.

Keywords: labour safety, operator, harvester, manufacturing environment, transport, fodder harvest, technical means

Как любые факторы производственной обстановки, так и любые целесообразные действия персонала в трудовом процессе становятся опасными для работника только в определенной взаимосвязи в рамках опасной производственной ситуации. Функционирование уборочно-транспортного процесса кормоуборки с позиции теории вероятностей можно рассматривать как последовательность наступающих поочередно одно за другим в случайные моменты времени таких событий (технологических операций), как скашивание растительной массы, ее измельчение с одновременной погрузкой в транспортное средство и отвозкой массы к месту хранения, т. е. как поток событий и отказов, возникаемых в процессе выполнения технологических операций в течение рабочего дня по причинам «оператора», «комбайна», «производственной среды», «транспорта». Полностью ликвидировать вредные и опасные производственные факторы, имеющие место при уборке, например, кормовых культур, практически невозможно, так как некоторые из них являются неотъемлемой частью технологического процесса. В то же время их вредное воздействие может и должно контролироваться. Установлено, что большая часть травм происходит от вредных и опасных факторов, проявляющихся при проведении технологических регулировок и устранении отказов кормоуборочного комбайна, а наибольший удельный вес несчастных случаев всех категорий тяжести связан с операциями очистки рабочих органов. В сложившейся ситуации необходимо переходить к определению уровня безопасности выполняемого процесса

кормоуборки с учетом профессиональной подготовки комбайнера, технологической надежности комбайна, состояния производственной среды, что в конечном итоге будет способствовать уменьшению профессиональных рисков работников.

Цель исследований – повышение безопасности труда операторов кормоуборочных комбайнов путем совершенствования системы управления уборочно-транспортным процессом кормоуборки.

Рассматривая поток событий кормоуборки как «простейший», необходимо отметить следующее. Свойство стационарности для этого потока событий с определенной долей приближения можно считать приемлемым. Плотность потока отказов принимается постоянной. Также при возникновении «отказа» и, как следствие, остановки комбайна, например, по причине технологического отказа, мы можем констатировать, что появление этого события не зависит от того, какие отказы возникали раньше или возникнут в будущем, а также от их количества. Свойство «ординарность» потока событий, т. е. вероятность наступления двух или более событий за бесконечно малый промежуток времени Δt , – это бесконечно малая величина более высокого порядка, чем Δt :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_k(\Delta t)}{\Delta t} = 0, \quad k = 2, 3, \dots, n, \quad (1)$$

где $P_k(\Delta t)$ – вероятность наступления не менее двух событий за промежуток времени Δt .

Для рассматриваемого потока событий практически невозможно одновременно появление двух, трех и более событий – отказов кормоуборочного комбайна, поэтому поток отказов обладает свойством «ординарность».

Поток событий отказов относится к простейшему и в том случае, когда суммарный поток состоит из большого числа независимых между собой стационарных потоков, каждый из которых мало влияет на действия суммарного. В качестве отдельно взятых потоков событий могут служить потоки отказов, классифицированные по признаку их принадлежности не только к «комбайну», но и к «оператору», «производственной среде», «транспорту», появляющиеся независимо друг от друга. Таким образом, представляя уборочно-транспортный процесс кормоуборки как функционирование технологической системы «оператор – комбайн – производственная среда – транспорт», состояния которой изменяются под воздействием простейшего потока событий, можно считать «марковским процессом». К тому же соблюдается одно из основных требований, характерных для такого процесса: для любого момента времени t_0 вероятности всех состояний системы в будущем ($t > t_0$) зависят только от состояния системы в настоящем ($t = t_0$) и не зависят от ее поведения до этого момента ($t < t_0$) (отсутствие последствия). Практически это свойство означает, что дальнейшее состояние процесса не зависит от его состояния в прошлом, потому что события, под влиянием которых система меняет свои состояния, появляются в случайные моменты времени независимо друг от друга. Следует также подчеркнуть, что «марковские процессы», протекающие в системе с дискретными состояниями и непрерывным временем, характеризуются вероятностями состояний $P_i(t)$ в любой момент времени t , которые определяются системой дифференциальных уравнений Колмогорова. Для наглядной иллюстрации таких процессов используют теорию графов, согласно которой обозначается состояние системы.

Наиболее важной операцией (основной операцией) уборочно-транспортного процесса уборки кормовых культур является непосредственное комбайнирование, транспортная же операция служит вспомогательной. Однако без нее основная технологическая операция становится невозможной: при «отказе» компоненты «транспорт» система переходит в неработоспособное состояние. В этой связи рекомендуется изучить временные характеристики «отказов» компоненты «транспорт», например, показатели времени отсутствия транспорта, его ожидания, подъезда к комбайну, и обосновать снижение простоев комбайнов за счет совершенствования организации системы их транспортного обслуживания. Компоненты технологической системы уборочно-транспортного процесса кормоуборки и граф ее состояний показаны на рис. 1, 2.



Рис. 1. Компоненты уборочно-транспортного процесса кормоуборки [1]

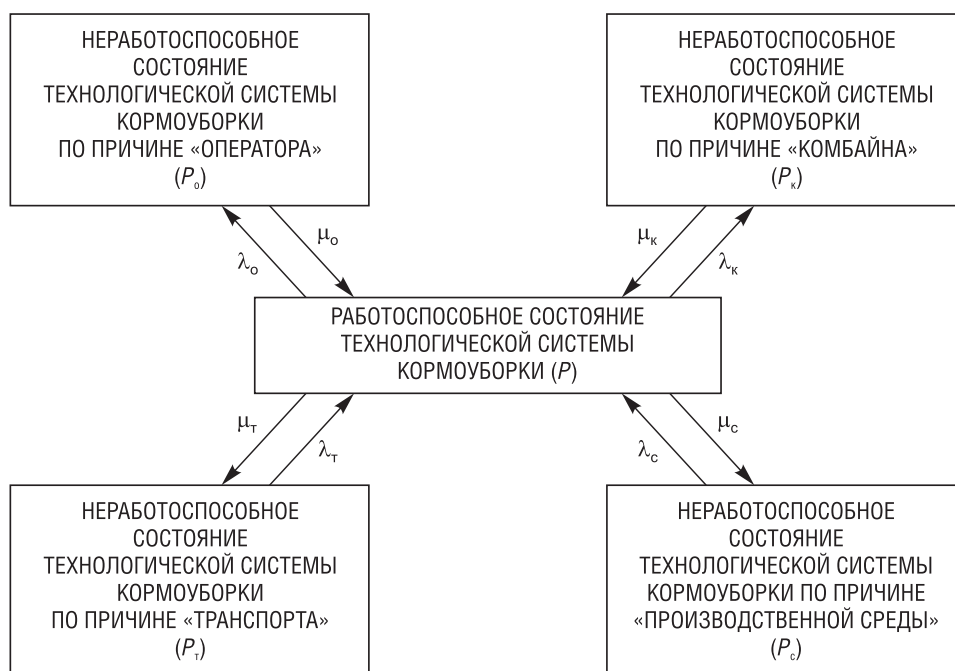


Рис. 2. Граф состояний технологической системы кормоуборки

В рассматриваемом подходе построения графа состояний (рис. 2) технологической системы кормоуборки используются следующие обозначения: P – вероятность безотказной работы системы; P_o, P_k, P_t, P_c – вероятности неработоспособного состояния системы по причинам «отказа» ее компонентов – «оператора», «комбайна», «транспорта», «производственной среды» соответственно; $\lambda_o, \lambda_k, \lambda_t, \lambda_c$ – параметр потока отказов системы по причинам «оператора», «комбайна», «транспорта», «производственной среды» соответственно; $\mu_o, \mu_k, \mu_c, \mu_t$ – параметр потока восстановлений компонентов системы.

Для определения вероятности неработоспособного состояния технологической системы кормоуборки по причине отказа компоненты «оператор» необходимо знать степень его профессиональной подготовки, характеризующуюся способностью оператора к безопасному выполнению им управленческих воздействий для устранения отказов комбайна, качественному восприятию информационных потоков. Этот показатель P_o может быть оценен такими факторами, как эффективный объем правильно выполненных оператором управленческих воздействий в технологическом процессе уборки кормовых культур (ν) и затраты оператором времени на эти воздействия при устранении отказов комбайна (фактор τ) [2]:

$$P_o(\nu, \tau) = ae^{b\tau\nu^c}, \quad (2)$$

где P_o – показатель квалификации оператора мобильной сельскохозяйственной техники; a, b и c – параметры зависимости.

Нами была поставлена задача – обосновать пределы изменения факторов τ и ν , определить значения параметров (a, b, c), получить зависимость для оценки профессиональной подготовки оператора кормоуборочного комбайна к безопасному управлению технологическим процессом. В нашем случае значение ν определялось с использованием теста механической понятливости оператора (теста Беннета), ориентированного на выявление технических способностей испытуемых [3]. Установлен следующий диапазон варьирования этого фактора: ν изменялся от 0,42 (низкий уровень развития общетехнических способностей) до 1,0 (очень высокий). Значения фактора τ – доли эффективного времени, затрачиваемого оператором на управленческое воздействие и определяемого как отношение фактического времени, затрачиваемого оператором на управленческие воздействия, к нормативному, необходимому для обеспечения безопасного управления кормоуборочным комбайном, изменялось от 1,0 до 1,5.

Значения параметров a , b , c (формула (2)) определяли с учетом принятых ограничений ($P_k = 1, v = 1,0, \tau = 1,0; P_k = 0,7, v = 0,5, \tau = 1,0; P_k = 0,35, v = 0,42, \tau = 1,5$) из системы уравнений

$$\begin{cases} 1,0 = ae^{b \cdot 1,0} \cdot 1,0^c; \\ 0,7 = ae^{b \cdot 1,0} \cdot 0,5^c; \\ 0,35 = ae^{b \cdot 1,5} \cdot 0,42^c, \end{cases}$$

или с учетом преобразований

$$\begin{cases} 1,0 = ae^b; \\ 0,7 = 0,5^c; \\ 0,35 = e^{b \cdot 1,5} \cdot 0,42^c. \end{cases} \quad (3)$$

Из второго уравнения системы (3) находили значение параметра c :

$$c = \frac{\ln 0,7}{\ln 0,5} = \frac{-0,357}{-0,693} = 0,515.$$

Подставляя значение параметра c в третье уравнение системы (3), определяли параметр b :

$$0,35 = e^{0,5b} \cdot 0,42^{0,515},$$

откуда

$$b = \frac{\ln 0,547}{0,5} = -\frac{0,603}{0,5} = -1,206.$$

Значение параметра a находили из первого уравнения системы (3):

$$a = \frac{1}{e^{-1,206}} = \frac{1}{0,299} = 3,344.$$

Подставив значения параметров a , b и c в формулу (3), получили выражение для оценки профессиональной подготовки оператора кормоуборочного комбайна к безопасному управлению технологическим процессом (P_k):

$$P_k = 3,344e^{-1,206\tau v^{0,515}}. \quad (4)$$

Известно [4], что распределение времени работы оператора мобильной сельскохозяйственной техники до момента возникновения опасной ситуации можно описать несколькими в равной степени удобными функциями, а именно: функцией распределения $F(t)$, плотностью вероятности $f(t)$ и интенсивностью потока $\lambda(t)$. При этом выбор конкретного вида распределения затрудняется многообразием и часто противоположной направленностью факторов производственной среды, различиями в конструктивных решениях проблемы безопасности труда на сельскохозяйственных машинах и психофизиологическими особенностями оператора, а при наличии определенных ограничений поток опасных ситуаций достаточно близок к пуассоновскому, в котором интервалы времени между событиями взаимонезависимы и распределены экспоненциально, а стационарное значение параметра потока опасных ситуаций интерпретируется как вероятность того, что опасная ситуация, не возникшая в интервале времени $(0; t)$, наступит в интервале $(t; t + \Delta t)$. Исходя из этого время работы оператора мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ) до момента возникновения такой ситуации, т. е. время безопасной его работы, можно охарактеризовать функцией распределения

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t),$$

плотностью вероятностей

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$$

и параметром потока опасных ситуаций

$$\lambda(t) = \lambda.$$

При этом следует подчеркнуть, что основными источниками возникновения опасных ситуаций являются отказы технологической системы, в нашем случае кормоуборки, возникающие по причинам «оператора», «комбайна», «производственной среды», «транспорта», а количественными характеристиками опасных ситуаций могут служить математическое ожидание их числа в течение смены ($N(t_0) = \lambda t_0$) и суммарной длительности опасных ситуаций за смену $M(\tau)$ соответственно.

Математическое ожидание суммарной продолжительности опасных ситуаций определяется по статистическим данным:

$$M(\bar{\tau}) = N(t_0)$$

($\bar{\tau}$ – математическое ожидание длительности опасной ситуации).

Результаты ранее проведенных исследований [4] позволяют констатировать следующее:

– безопасность труда оператора МСХТ при выполнении им производственного задания рациональнее оценивать по вероятности отсутствия опасной ситуации в любой выбранный момент рабочего времени, т. е. по вероятности безопасной работы:

$$P_0 = 1 - t_0^{-1} M(\bar{\tau}). \quad (5)$$

– сравнить уровень безопасности труда на мобильной сельскохозяйственной технике различной конструкции, но одного назначения, можно сравнить, используя коэффициент удельной травмоопасности K_y :

$$K_y = W^{-1} N(t_0), \quad (6)$$

определяемый отношением числа опасных ситуаций (N) на единицу выполненной за смену работы (W).

Но все же более полную оценку уровню безопасности труда (травмирования операторов МСХТ) при эксплуатации кормоуборочных комбайнов можно получить, на наш взгляд, если рассматривать такие компоненты уборочно-транспортного процесса, как «оператор» и «комбайн» во взаимосвязи, т. е. рассмотреть безопасность функционирования «человеко-машинной системы», в которой должны быть отражены, с одной стороны, уровень профессиональной подготовки оператора, с другой – показатель надежности комбайна. При этом следует подчеркнуть, что статистически определяемую частоту производственного травматизма можно рассмотреть как некоторую случайную величину, а отдельно взятую травму представить как случайное событие A , вероятность которого $P\{A\}$ есть количественный признак проявления отдельных факторов производственной деятельности. С другой стороны, травматизм является реализацией производственного риска работы некоторого, например, усредненного оператора кормоуборочного комбайна:

$$M_{K_q} = P\{A\} \cdot 1000, \quad (7)$$

где M_{K_q} – математическое ожидание случайной величины K_q .

Допустим, что ни один из операторов кормоуборочных комбайнов в течение сезона работы не будет травмирован (событие B), тогда вероятность наступления этого события $P\{B\}$ можно определить по формуле

$$P\{B\} = 1 - P\{A\}. \quad (8)$$

Следует отметить, что эта вероятность ($P\{B\}$) достаточно мала и может случиться так, что операторы (комбайнеры) проработают несколько лет подряд без травм. Поэтому для дальнейшего анализа безопасности кормоуборки воспользуемся следующим выражением [5]:

$$\text{Lim} P\left\{ \left| \frac{\xi}{n} - P \right| < \{\xi\} \right\} = 1, \quad (9)$$

где ε – число травм, наблюдаемых среди n -х комбайнеров в течении выбранного отрезка времени; n – среднесписочный состав комбайнеров; ξ – сколь угодно малая фиксированная положительная величина.

Формула (9) содержит в себе утверждение, что при достаточно большом n частота события A сколь угодно мало отличается от ее вероятности $P\{A\}$. Тем самым утверждается существование вероятности $P\{A\}$. В теории вероятностей часто встречается такой характер приближения одних величин к другим, причем для его описания введен специальный термин – «сходимость по вероятности» [5]. Установлено, что рассматриваемая случайная величина (частота производственного травматизма) может сходиться к величине, распределенной по закону Пуассона [6]. Что же касается определения вероятности безопасной эксплуатации «человеко-машинной системы» $P_{\text{чм}}$, то ее можно рассчитать, используя следующее выражение [7]:

$$P_{\text{чм}} = 1 - P_{\text{отк}}, \quad (10)$$

где $P_{\text{отк}} = \frac{K_{\text{ч}}}{1000}$ – вероятность отказа человеко-машинной системы.

Для обеспечения безопасности оператора (комбайнера) необходимо установить зависимость риска его травмирования от изменения параметров «человеко-машинной системы». Если воспользоваться положениями теории вероятностей относительно оценок случайных событий, каковыми являются факты травмирования, то вероятность отказа функционирования «человеко-машинной» системы $P_{\text{отк}}$ соответственно при независимом или зависимом виде связи между составляющими ее элементами равна:

$$P_{\text{отк}} = p_{\text{о}} p_{\text{к}}, \quad (11)$$

$$P_{\text{отк}} = p_{\text{о}} + p_{\text{к}} - p_{\text{о}} p_{\text{к}}. \quad (12)$$

Здесь $p_{\text{к}}$ – вероятность отказа кормоуборочного комбайна; $p_{\text{о}}$ – вероятность опасного действия оператора, приводящего к отказу кормоуборочного комбайна:

$$p_{\text{о}} = 1 - p_{\text{п}}, \quad (13)$$

где $p_{\text{п}}$ – вероятность безопасной (надежной) работы оператора, управляющего кормоуборочным комбайном:

$$p_{\text{п}} = p_{\text{пр}} \prod_{i=1}^n p_i \quad (14)$$

($p_{\text{пр}}$ – вероятность принятия оператором правильных решений на кормоуборке:

$$p_{\text{пр}} = \frac{m}{N},$$

$$p_{\text{пр}} \geq \frac{p_{\text{п}}}{\prod_{i=1}^n p_i},$$

где m – число правильных решений; N – общее число технологических решений; p_i – вероятность безотказной работы в течение рабочего времени суток i -го узла (элемента) кормоуборочного комбайна).

При заданном $p_{\text{п}}$ и известных p_i должно выполняться следующее условие:

$$p_{\text{пр}} \geq \frac{p_{\text{п}}}{\prod_{i=1}^n p_i}. \quad (15)$$

Функциональное напряжение организма оператора МСХТ в процессе работы на кормоуборочном комбайне носит энергетический и информационный характер, при этом имеет место физический и умственный труд. С другой стороны, напряженность деятельности оператора может

быть операционной и эмоциональной: первая определяется сложностью выполняемой работы, вторая (эмоциональная) – характеризуется воздействием на оператора эмоциогенных раздражителей и развивается в результате появления отрицательных эмоций [8]. Для определения напряженности работы оператора кормоуборочного комбайна проводится инженерно-психологический анализ условий его деятельности с учетом оценки сложности выполняемой работы и реакций организма на предъявляемую информационную нагрузку или перегрузку, которая имеет место, когда

$$X_i > x_{i\text{доп}} \quad (i = 1, 2, \dots, k),$$

где X_i – i -й параметр, свидетельствующий об информационной перегрузке; $x_{i\text{доп}}$ – максимально-допустимое значение X_i -го параметра.

Поскольку X_i величина случайная, вероятность возникновения напряженности в работе (q_i) за счет i -го фактора равна

$$q_i = P\{(X_i) x_{i\text{доп}}\} = \int_{x_{i\text{доп}}}^{\infty} \varphi_i(X_i) dx \quad (16)$$

($\varphi_i(X_i)$ – функция плотности вероятности величины X_i).

Тогда вероятность информационной перегрузки (q) рассчитывается как вероятность суммы совместных событий [5]:

$$q = P\left(\sum_{i=1}^k A_i\right). \quad (17)$$

Напряженность работы оператора (комбайнера) (γ) определяется с учетом максимально допустимых значений выбранных физиологических показателей организма работника ($y_{i\text{max}}$) и значений этих показателей (y_i) в реальных условиях работы:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i}{y_{i\text{max}}}\right)^2}. \quad (18)$$

Приведенные теоретические зависимости (10)–(18) позволяют спрогнозировать функциональное состояние «человеко-машинной системы» в процессе кормоуборки.

Безопасность «производственной среды» как компоненты уборочно-транспортного процесса кормоуборки (см. рис. 1) может быть оценена таким показателем, как время вредного и потенциально опасного пребывания оператора на рабочем месте ($T_{\text{во}}$):

$$T_{\text{во}} = T_{\text{см}} (1 - K), \quad (19)$$

где $T_{\text{см}}$ – продолжительность рабочей смены, ч; K – комплексный коэффициент ($0 \leq K \leq 1$), учитывающий совокупное воздействие факторов условий труда [4]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_{\Phi 1}} + \frac{1}{K_{\Phi 2}} + \dots + \frac{1}{K_{\Phi n}} - (n-1)}, \quad (20)$$

где $K_{\Phi 1}$, $K_{\Phi 2}$, $K_{\Phi n}$, – факторные коэффициенты, показывающие долю сменной выработки, которая может быть реализована при производстве сельскохозяйственных работ за смену с пребыванием операторов мобильной сельскохозяйственной техники в кабине технического средства и при условии обеспечения безопасного и безвредного производственного процесса:

$$K_{\Phi i} = \frac{T_{\text{Ди}}}{T_{\text{см}}}, \quad (21)$$

где $T_{\text{Ди}}$ – время ежесменного безопасного и безвредного пребывания оператора на рабочем месте с учетом воздействия i -го фактора условий труда, ч, n – количество учитываемых факторов условий труда.

Следует также подчеркнуть, что приближение одного из факторов условий труда к нормативному значению повышает комплексный коэффициент (K) и, следовательно, снижает время вредного и потенциально опасного пребывания оператора МСХТ на рабочем месте.

Для оценки влияния транспорта на безопасность труда в процессе уборки кормовых культур необходимо знать квалификацию водителя и состояние транспортного средства, которое характеризуется коэффициентом удельной травмоопасности (K_y) [4]:

$$K_y = W^{-1}kN(t_0), \quad (22)$$

где W – пробег транспортного средства; N – число опасных ситуаций за смену работы; k – численность персонала, обслуживающего транспортное средство.

Для сравнения следует отметить, что повышение квалификации водителя транспортного средства способствует уменьшению вероятности возникновения опасной производственной ситуации более чем на 30 % [4].

Заключение. В результате проведенных исследований установлены условия возникновения опасной ситуации в технологической системе уборки кормовых культур по причинам – «оператор», «комбайн», «производственной среды», «транспорта». Обоснованы зависимости вероятности безопасного управления технологическим процессом кормоуборки от профессиональной подготовки оператора МСХТ и условий его труда.

Список использованных источников

1. Математическое моделирование технологических сельскохозяйственных процессов / Н.И. Овчинникова // Всесибирский конгресс женщин-математиков: к 150-летию со дня рождения С.В. Ковалевской: тезисы, Красноярск, 15–18 янв. 2000. – Красноярск, 2000. – С. 147.
2. Повышение безопасности человека-оператора при управлении мобильными сельскохозяйственными машинами / Ю.И. Аверьянов, К.В. Глемба, С.Ю. Попов // Вест. Челяб. гос. аграр. ун-та. – 2002. – Т. 37. – С. 101–104.
3. Профессиональная успешность и безопасность операторов мобильной сельскохозяйственной техники: психофизиологический отбор и прогнозирование / Л.В. Мисун, А.Н. Гурина. – Минск: БГАТУ, 2013. – 184 с.
4. Повышение эффективности транспортно-технологических процессов и улучшение условий труда работников АПК за счет инженерно-технических устройств / Ю.Г. Горшков, М.С. Дмитриев, И.С. Старунова. – Челябинск: ЧГАА, 2010. – 291 с.
5. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
6. Результаты теоретических исследований и моделирования условий безопасного функционирования человеко-машинных систем / Ю.Д. Олянич [и др.] // Охрана труда и здоровья работников АПК России: сб. тр. ВНИИОТ. – Орел, ВНИИОТ, 1993. – С. 32–40.
7. Исследование безопасности функционирования системы «оператор – машина – среда» в агропроизводстве / Л.В. Мисун [и др.] // Агропанорама. – 2012. – № 2. – С. 32–35.
8. Физиологические и медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности: практикум: в 2 ч. / Л.В. Мисун [и др.]. Ч. 2. Медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности. – Минск: БГАТУ, 2010. – 132 с.

Поступила в редакцию 30.07.2015