

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА ТРАВМИРОВАНИЯ МЕХАНИЗАТОРОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Олег Гнатюк¹, Александр Покутний², Тамара Билько³

¹*Министерство аграрной политики и продовольствия Украины
Украина, г. Киев, ул. Крещатик, 24*

²*Институт математики Национальной академии наук Украины
Украина, г. Киев, ул. Терещенковская, 3*

³*Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
Украина, г. Киев, ул. Героев Оборона, 15*

Oleg Gnatyuk¹, Oleksandr Pokutniy², Tamara Bilko³

¹*Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine
Str. Khreschatyk, 24, Kiev, Ukraine*

²*Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Ukraine
Str. Tereschenkivska, 3, Kiev, Ukraine*

³*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Str. Heroiv Oborony, 15, Kiev, Ukraine*

Аннотация. В статье на примере наезда трактора на механизатора во время запуска двигателя внутреннего сгорания продемонстрировано применение непрерывных цепей Маркова для оценки риска травмирования механизаторов агропромышленного комплекса.

Ключевые слова: непрерывные цепи Маркова, механизаторы агропромышленного комплекса, опасная ситуация, граф состояний процесса, потоки событий, интенсивности вероятностей перехода.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Несмотря на постоянное снижение уровня производственного травматизма, наблюдаемое в последние годы, аграрный сектор экономики государства продолжает оставаться одной из наиболее травмоопасных отраслей народного хозяйства. Среди профессий, которые применяются в агропромышленном комплексе Украины, наиболее травмоопасной является профессия тракториста-машиниста (механизатора). Это подтверждается статистическими данными Госгорпромнадзора Украины (в течение 2008-2012 годов в аграрном секторе экономики Украины было смертельно травмировано 97 механизаторов). Больше всего случаев с летальным исходом среди механизаторов произошло:

от наездов мобильных машинно-тракторных агрегатов (МТА) при маневрировании и запуска двигателя внутреннего сгорания (ДВС) (44 %);

от воздействия движущихся и вращающихся деталей и механизмов рабочих органов машин и т.д. (30 %);

от опрокидывания при движении на склонах и при дорожно-транспортных происшествиях (12 %).

Существующие исследования по оценке риска травмирования механизаторов аграрного производства при эксплуатации мобильных машинно-тракторных агрегатов не позволяют провести количественный анализ прохождения травмоопасных ситуаций. Поэтому дальнейшие исследования наиболее приемлемых методов количественного определения профессионального риска нанесения вреда здоровью или смерти механизаторов агропромышленного производства остаются актуальными.

Применение имеющихся методов и способов для исследования причин производственного травматизма, в том числе и среди трактористов-машинистов, и их влияния на прохождение травмоопасных ситуаций, не дают возможность описать развитие и течение опасных процессов, снижает точность и достоверность получаемых результатов исследований, а затем и поиск адекватных путей решения проблемы безопасности труда механизаторов аграрного производства.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА ТРАВМИРОВАНИЯ МЕХАНИЗАТОРОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Именно для восполнения пробелов, обусловленных недостатками указанных методов исследований производственного травматизма, в данной работе применено соответствующую методику, в основу которой положен математический аппарат марковского случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем. Это позволило основательно проанализировать в динамике процесс течения травмоопасной ситуации со всеми возможными ее последствиями.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проблема риска травмирования работников различных отраслей производства и снижение его уровня до приемлемых границ привлекает внимание многих специалистов. Изучая научные публикации как отечественных, так и зарубежных авторов, можно отметить существование многих подходов и способов исследования проблематики профессионального риска и производственного травматизма. В то же время, среди этих исследований ученые сосредотачивают свое внимание только на причинах нанесения производственных травм, не раскрывая их сути, не проводя качественного и количественного анализа процесса прохождения травмоопасной ситуации, что может привести к негативному последствию – производственной травме [1–6].

Кроме того, преимущественно исследования аварий и травм на производстве проводились на предприятиях промышленности, в частности, химической и нефтегазодобывающей, атомной энергетики, транспорта и связи и т.д. [7–9]. В аграрной отрасли такие исследования имели менее интенсивный характер.

В последнее время для исследования указанных явлений стали шире использовать методы логического и математического моделирования. Они позволяют точнее определять риск возникновения аварий и получения производственных травм, что позволяет разрабатывать и внедрять эффективные меры по их предупреждению.

Наиболее широкое применение для исследования аварий и травм в ведущих отрас-

лях экономики нашли вероятностные методы анализа, где количественные и качественные характеристики риска травмирования определяются с помощью метода «дерева отказов» [10–13]. Этот метод по оценке риска травмирования является достаточно эффективным и удобным, однако он имеет определенное ограничение в применении относительно количественного и качественного анализа прохождения травмоопасной ситуации в динамике. В частности, он не позволяет определять вероятности переходов системы «механизатор-МТА-производственная среда» из одного состояния в другое, возвращение системы в прежнее состояние, приблизительное время пребывания указанной системы в том или ином состоянии и т.д., что позволяют делать методы теории дифференциальных уравнений. В свою очередь, методы теории дифференциальных уравнений не позволяют определять степень влияния каждого первичного события-причины на главное событие-следствие. Таким образом, только сочетание метода «дерева отказов» с методами теории дифференциальных уравнений позволит точно исследовать процессы зарождения, формирования и наступления травмоопасных ситуаций в последовательности «первичные причины – поверхностные причины – непосредственные (прямые) причины» в терминологии [14, 15].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью исследований является вероятностный анализ системы «механизатор-МТА-производственная среда», а также количественная и качественная характеристика процесса прохождения травмоопасной ситуации при эксплуатации механизаторами агропромышленного производства мобильных МТА.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Глубокое и всестороннее изучение причин несчастных случаев, которые произошли с трактористами-машинистами агропромышленного производства при эксплуатации различной сельскохозяйственной техники указывает на определенные закономерности их прохождения. С другой стороны, исходя

из системного подхода к исследованию явления производственного травматизма, изучаем машинно-тракторный агрегат любой конфигурации и механизатора, а в отдельных случаях и факторы производственной среды как элементы целостной системы, которые находятся в постоянном взаимодействии друг с другом. Поэтому, учитывая указанное, изменение состояния любого из элементов этой системы под влиянием различных производственных факторов непременно приведет к изменению ее первоначального состояния [16].

Для математического описания прохождения процесса зарождения, формирования и наступления несчастного случая был применен математический аппарат, разработанный в теории вероятностей для марковских случайных процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем, при котором переход системы «механизатор-МТА-производственная среда» из одного состояния в другое возможен в любой, заранее не известный, случайный момент времени t .

При рассмотрении случайных процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем удобно представлять переходы системы S из одного состояния в другое как такие, которые происходят под влиянием определенных потоков событий или в материализованном представлении производственных опасных факторов как «опасных воздействий энергии» [14]. При этом плотности вероятностей перехода λ получают содержание интенсивностей соответствующих

потоков событий. Процесс, протекающий в системе S , будет марковским, если все указанные потоки событий будут пуассоновскими (ординарные, без последствия, с постоянной или зависимой от времени интенсивности) [17–21].

Для примера было избрано одно из самых типичных нежелательных событий, которые случаются с механизаторами агропромышленного производства при эксплуатации различных МТА и самоходных сельскохозяйственных машин, а именно наезд машинно-тракторного агрегата на механизатора во время запуска двигателя внутреннего сгорания за пределами кабины, последствиями чего могут стать несчастные случаи различной степени тяжести.

Граф состояний процесса прохождения указанного нежелательного события представлен на рис. 1.

С рис. 1 видно, что с момента введения МТА в эксплуатацию система работает в исправном состоянии S_0 , в котором она может находиться весь период своей работы, вплоть до вывода из эксплуатации. Однако, на практике, через некоторый период времени, под воздействием потоков событий с интенсивностью λ_{01} система может перейти в неисправное состояние S_1 (в данном случае, например, работать без электростартерного запуска ДВС). Впрочем, это еще не влияет на ее работоспособность и она может продолжать работать в штатном режиме.

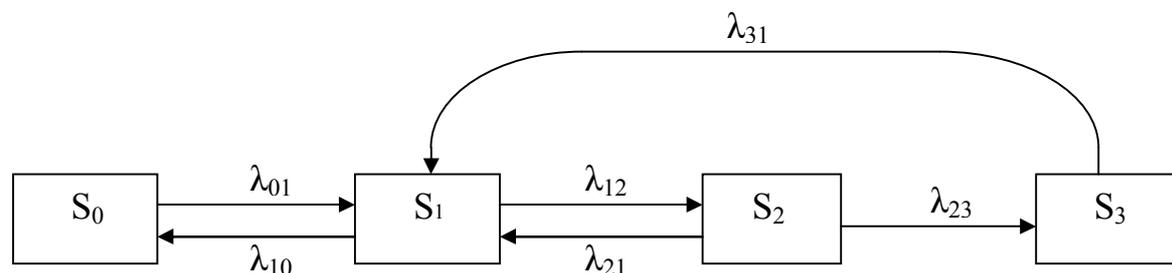


Рис. 1. Граф состояний процесса прохождения нежелательного события «наезд машинно-тракторного агрегата на механизатора при запуске ДВС за пределами кабины»:

S_0 – система работает в исправном состоянии; S_1 – система работает в неисправном состоянии (без электростартерного запуска ДВС); S_2 – попадание механизатора в опасную ситуацию (движение МТА при запуске ДВС за пределами кабины на включенной передаче); S_3 – переход опасной ситуации в критическую ситуацию (наезд МТА на механизатора с последующим его повреждением)

Fig. 1. State graph of the passage of undesirable events "hitting machine-tractor unit on the machine operator when starting engine outside the cabin"

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА
ТРАВМИРОВАНИЯ МЕХАНИЗАТОРОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Работая в состоянии S_1 под воздействием потоков событий с интенсивностью λ_{10} , система может вернуться через некоторое время назад в состояние S_0 (восстановление электростартерного запуска ДВС).

С другой стороны, через определенные ошибки механизатора, под воздействием потоков событий с интенсивностью λ_{12} , система может перейти в состояние S_2 , который характеризуется попаданием механизатора в опасную ситуацию (движение МТА при запуске ДВС за пределами кабины на включенной передаче). Далее существуют несколько вариантов развития нежелательного события:

а) под воздействием потоков событий с интенсивностью λ_{21} система возвращается в состояние S_1 , в котором может остаться работать и в дальнейшем, или впоследствии под воздействием потоков событий с интенсивностью λ_{10} возвращается в состояние S_0 ;

б) под воздействием потоков событий с интенсивностью λ_{23} система переходит в состояние S_3 , которое характеризуется переходом опасной ситуации в критическую (наезд МТА на механизатора с последующим его повреждением) и возвращением под воздействием потоков событий с интенсивностью λ_{31} в состояние S_1 , в котором система, подобно к обстоятельствам согласно пункту а, может работать и в дальнейшем, или впоследствии под воздействием потоков событий с интенсивностью λ_{10} вернуться в состояние S_0 . Зная размеченный граф состояний, можно определить вероятности состояний $P_0(t), P_1(t), P_2(t)$ и $P_3(t)$ как функции времени. А именно, указанные вероятности удовлетворяют системе дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, в которых неизвестными функциями являются вероятности состояний системы [17-18]:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_{01}P_0(t) + \lambda_{10}P_1(t), \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_{01}P_0(t) - (\lambda_{10} + \lambda_{12})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{31}P_3(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12}P_1(t) - (\lambda_{21} + \lambda_{23})P_2(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{23}P_2(t) - \lambda_{31}P_3(t), \end{cases}$$

с нормировочным условием:

$$P_0(0) + P_1(0) + P_2(0) + P_3(0) = 1.$$

Вводя к рассмотрению вектор-функцию $\vec{P}(t) = (P_0(t), P_1(t), P_2(t), P_3(t))$ и матрицу интенсивностей

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -\lambda_{01} & \lambda_{10} & 0 & 0 \\ \lambda_{01} & -\lambda_{10} - \lambda_{12} & \lambda_{21} & \lambda_{31} \\ 0 & \lambda_{12} & -\lambda_{21} - \lambda_{23} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{23} & -\lambda_{31} \end{pmatrix},$$

можем переписать систему уравнений Колмогорова в виде следующей линейной матричной системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{P}(t)}{dt} = \Lambda \vec{P}(t), \\ i\vec{P}(\cdot) = \sum_{i=0}^3 P_i(0) = 1, P_i(0) \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для решения системы (1) можно применять преобразования Лапласа. Согласно [20] для функции $f(t)$ ее преобразование Лапласа имеет вид $F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt$. Тогда про-

изводной $f'(t)$ будет соответствовать функция $pF(p) - f(0)$.

Обратное преобразование Лапласа осуществляется следующим образом:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{t-i\infty}^{t+i\infty} e^{pt} F(p) dp.$$

Пусть вектор-функция $\vec{\pi}(p)$ имеет следующий вид:

$$\vec{\pi}(p) = (\pi_0(p), \pi_1(p), \pi_2(p), \pi_3(p)), \quad \text{где}$$

$\pi_i(p), i = \overline{0,3}$ – соответствующие образы

функций состояний $P_i(t), i = \overline{0,3}$ в случае преобразования Лапласа. Тогда дифференциальная система (1) превратится в линейную алгебраическую систему:

$$\vec{\pi} = Q\vec{\pi} + \vec{g}, \quad (2)$$

где матрица Q и вектор \vec{g} соответственно

$$\text{имеют вид } Q = \frac{1}{p} \Lambda,$$

$$\vec{g} = \frac{1}{p} (P_0(0), P_1(0), P_2(0), P_3(0)) \text{ или в развернутом виде:}$$

$$\begin{cases} \pi_0(p) = -\frac{\lambda_{01}}{p} \pi_0(p) + \frac{\lambda_{10}}{p} \pi_1(p) + \frac{P_0(0)}{p}, \\ \pi_1(p) = \frac{\lambda_{01}}{p} \pi_0(p) - \frac{(\lambda_{10} + \lambda_{12})}{p} \pi_1(p) + \\ + \lambda_{21} \pi_2(p) + \lambda_{31} \pi_3(p) + \frac{P_1(0)}{p}, \\ \pi_2(p) = \frac{\lambda_{12}}{p} \pi_1(p) - \frac{(\lambda_{21} + \lambda_{23})}{p} \pi_2(p) + \frac{P_2(0)}{p}, \\ \pi_3(p) = \frac{\lambda_{23}}{p} \pi_2(p) - \frac{\lambda_{31}}{p} \pi_3(p) + \frac{P_3(0)}{p}, \end{cases}$$

с условием $\sum_{i=0}^3 \pi_i(p) = \frac{1}{p}$.

Преобразуем систему (2) к виду:

$$(I - Q)\vec{\pi} = \vec{g}. \quad (3)$$

Возможны два случая:

1) $\det(I - Q) \neq 0$.

Тогда существует единственное решение матричной системы (3) в виде $\vec{\pi} = (I - Q)^{-1} \vec{g}$. Выполнение нормировочного условия проверяют непосредственной подстановкой полученного решения;

2) $\det(I - Q) = 0$.

В этом случае решение матричной системы (3) существует не для всех правых частей \vec{g} , а лишь для тех и только для тех \vec{g} , что удовлетворяют условию $P_{N((I-Q)^T)} \vec{g} = \vec{0}$. При выполнении этого условия множество решений данной системы будет иметь вид:

$$\vec{\pi} = (I - Q)^+ \vec{g} + P_{N(I-Q)} \vec{c},$$

для произвольного вектора $\vec{c} \in R^4$, где матрица $(I - Q)^+$ – псевдообратных за Муром-Пенроузом матрице $(I - Q)$ [15].

Выполняя обратное преобразование Лапласа и проверяя условие нормированности, находим искомое распределение состояний.

Для примера покажем расчет вероятностных функций состояний системы, состоящей из следующих элементов: «механизатор-МТА-производственная среда».

Для расчета коэффициентов интенсивностей переходов указанной системы использовались усредненные статистические данные: Госстата Украины относительно общего количества тракторов, которые находятся на

балансе сельскохозяйственных предприятий; Госсельхозинспекции Украины по количеству тракторов, эксплуатация которых запрещена из-за отсутствия электростартерного запуска ДВС; Госгорпромнадзора Украины о случаях травмирования механизаторов при эксплуатации технически неисправных тракторов, а также экспертные оценки специалистов относительно вероятностей отдельных состояний процессов прохождения травоопасных ситуаций.

В результате анализа соответствующих соотношений, характеризующих каждое состояние исследуемой системы, были получены следующие коэффициенты интенсивностей:

среднестатистическое количество тракторов – 149720 единиц;

количество исправных тракторов – 147474 единицы ($\lambda_{00} = 0,985$);

количество тракторов, запрещенных к эксплуатации – 2246 единиц ($\lambda_{01} = 0,015$);

количество тракторов, на которых восстановлен электростартерный запуск ДВС – 1123 единицы ($\lambda_{10} = 0,5$);

количество тракторов, продолжающих работать без электростартерного запуска – 898 единиц ($\lambda_{11} = 0,4$);

количество тракторов, которые привели к наступлению опасных ситуаций – 225 единиц ($\lambda_{12} = 0,1$);

количество опасных ситуаций, которые перешли в критические – 2 случая ($\lambda_{23} = 0,01$);

возвращение из опасных ситуаций в неисправное состояние – 223 случая ($\lambda_{21} = 0,99$);

возвращение из критических ситуаций в неисправное состояние – 2 случая ($\lambda_{31} = 1,0$).

Решая уравнение Колмогорова-Чепмена и учитывая нормировочное условие, получаем трехпараметрическую семью вероятностей состояний системы.

Вычисления проводились с округлением до сотых.

Полученные приближенные результаты можно использовать для многолетнего прогнозирования.

Приближенные функции состояний можно представить в следующем виде:

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА
ТРАВМИРОВАНИЯ МЕХАНИЗАТОРОВ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

$$\begin{aligned}
 P_0(t) &= 0.969 + (0.630 + a_{11})0.312^t + (-0.059 + a_{12})0.364^t + (-1.54 + a_{13})0.645^t, \\
 P_1(t) &= 0.028 + (-1.446 + a_{21})0.312^t + (0.116 + a_{22})0.364^t + (1.302 + a_{23})0.645^t, \\
 P_2(t) &= 0.003 + (0.871 + a_{31})0.312^t + (-1.106 + a_{32})0.364^t + (0.232 + a_{33})0.645^t, \\
 P_3(t) &= (-0.052 + a_{41})0.312^t + (1.048 + a_{42})0.364^t + (0.004 + a_{43})0.645^t,
 \end{aligned}$$

где коэффициенты находятся следующим образом:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= -0.628c_1 - 0.735c_2 - 0.039c_3, & a_{12} &= 0.061c_1 + 0.039c_2 + 0.061c_3, \\
 a_{13} &= 1.567c_1 + 0.674c_2, & a_{21} &= 1.444c_1 + 1.688c_2 + 0.101c_3, \\
 a_{22} &= -0.117c_1 - 0.117c_2 - 0.112c_3, & a_{23} &= -1.277c_1 - 0.571c_2 + 0.011c_3, \\
 a_{31} &= -0.869c_1 - 1.015c_2 - 0.061c_3, & a_{32} &= 1.105c_1 + 1.117c_2 + 1.06c_3, \\
 a_{33} &= -0.236c_1 - 0.102c_2 + 0.001c_3, & a_{41} &= 0.052c_1 + 0.06c_2 + 0.004c_3, \\
 & & a_{42} &= -1.048c_1 - 1.058c_2 - 1.004c_3, & a_{43} &= -0.004c_1 - 0.002c_3,
 \end{aligned}$$

а постоянные c_1, c_2, c_3 можно выбирать произвольным образом лишь с учетом того требования, чтобы функции состояний были неотъемлемыми.

Спрогнозируем, например, в доленом отношении (с округлением до третьего знака после запятой) вероятность попасть в одно из состояний через пять лет.

Для этого постоянные c_1, c_2, c_3 положим нулями, а время t положим равным 1825 дней (5 лет). Тогда получим следующие значения вероятностей состояний нашей системы $P_0(1825) = 0.969$, $P_1(1825) = 0.028$, $P_2(1825) = 0.003$, $P_3(1825) = 0$. Эти показатели показывают, какая доля тракторов окажется в каждом из состояний через пять лет.

Кроме того, данные вычисления показывают, что для достаточно большого времени t полученные вероятности будут стремиться к стационарному состоянию $P_0(t) = 0.969$, $P_1(t) = 0.028$, $P_2(t) = 0.003$, $P_3(t) = 0$, что говорит о том, что полученные количественные показатели являются достаточно стабильными.

Посчитаем теперь матрицу переходных вероятностей для рассматриваемого нами случая:

$$P = \begin{pmatrix} 0.985 & 0.015 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.99 & 0 & 0.1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Далее, посчитаем, как будут меняться интенсивности матрицы переходных вероятностей через k шагов (в данном случае шаги – это дни), согласно уравнению Колмогорова-Чепмена:

$$k=2, P^2 = \begin{pmatrix} 0.977 & 0.021 & 0.002 & 0 \\ 0.6925 & 0.2665 & 0.04 & 0.001 \\ 0.495 & 0.406 & 0.099 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$k=365, P^{365} = \begin{pmatrix} 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \end{pmatrix},$$

$$k=731, P^{731} = \begin{pmatrix} 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \end{pmatrix},$$

$$k=1066, P^{1066} = \begin{pmatrix} 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \end{pmatrix},$$

$$k=1431, P^{1431} = \begin{pmatrix} 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \\ 0.968 & 0.0291 & 0.0029 & 0 \end{pmatrix}$$

где k – количество дней. Понятно, что при малых k погрешность будет очень большой, и прогноз будет достаточно неточным. Но уже в конце года мы видим, что показатели этой матрицы стабилизируются и поэтому через пять лет прогноз не изменится. Мы снова приходим и при таких расчетах к стационарному состоянию.

Указанные результаты расчетов показывают, что из всего количества технически исправных тракторов 96,8 процента через год останутся в этом состоянии, а 2,91 процента перейдут в состояние S_1 .

Если начальный вектор распределения был $(1, 0, 0, 0)$ (что соответствует ситуации исправности всех тракторов), то он будет перераспределяться следующим образом:

$$v = (1, 0, 0, 0), \quad k = 1, \quad vP = (0.985, 0.015, 0, 0),$$

$$k = 2, \quad vP^2 = (0.977, 0.021, 0.002, 0),$$

$$k = 365, \quad vP^{365} = (0.968, 0.0291, 0.0029, 0),$$

$$k = 731, \quad vP^{731} = (0.968, 0.0291, 0.0029, 0),$$

$$k = 1066, \quad vP^{1066} = (0.968, 0.0291, 0.0029, 0),$$

$$k = 1431, \quad vP^{1431} = (0.968, 0.0291, 0.0029, 0).$$

Опять для малых k (одного и двух дней) прогноз будет очень неточным (и его лучше не учитывать), но уже в конце первого года показатели стабилизируются и могут быть использованы при достаточно достоверном прогнозе на будущее. Для пяти лет показатели не изменятся и будут говорить о процентном соотношении тракторов, которые окажутся в одном из четырех состояний. Следует также отметить, что моделирование непрерывным марковским процессом (что задается дифференциальными уравнениями) дает почти такие показатели (с погрешностью до тысячных), что говорит о согласованности в моделировании.

ВЫВОД

1. Применение непрерывных цепей Маркова как одного из методов вероятностного анализа случайных событий позволяет количественно оценивать риск травмирования трактористов-машинистов при эксплуатации мобильных машинно-тракторных агрегатов и позволяет находить искомые вероятности состояний системы в динамике (через определенное время) на всех этапах развития процесса прохождения нежелательного события.

2. Изложенный методический подход вероятностной оценки травмирования механизаторов потенциально можно применять к анализу других производственных опасностей с расширением масштаба их идентификации вне производственной среды. Например, относительно рисков техногенных или экологических опасностей производственной деятельности, на территориях с негативными

последствиями производственных аварий и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lapin A., Studennikova N., Orlov V. 2008: Travmatizm so smertelnym i tyazhelym iskhodom v krestyanskikh (fermerskikh) khozyaystvakh, yego prichiny i preduprezhdeniye // Okhrana truda i tekhnika bezopasnosti v selskom khozyaystve. – М. – № 4. – 23–28.
2. Ponomarenko V. 2002: Prichini travmatizmu ta yogo profilaktika na pidpriyemstvakh APK // Okhorona pratsi. – К. – № 4. – 18–21.
3. Faktorov I. Travmatizm v selskom khozyaystve i yego profilaktika // Okhrana truda. – К. 1995. – № 7. – 22–24.
4. Tewari V.K., Ashish Kr. Shrivastava. 2013: An Industry Perspective of Tractor Safety against Rollover. // Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America. Vol. 44, – № 3, Summer. – 61–69.
5. Bugayev S.S. 2001: Statisticheskiye metody analiza prichin travmatizma. // Bezopasnost truda v promyshlennosti. – М. – № 1. – 41–43.
6. Burenko L., Ivleva I., Zotov N. 2008: Trebovaniya tekhnicheskoy, ekologicheskoy bezopasnosti i okhrany truda pri ekspluatatsii i obsluzhivanii traktorov i samokhodnykh selskokhozyaystvennykh mashin. // Okhrana truda i tekhnika bezopasnosti v selskom khozyaystve. – № 6. – 48–52.
7. Lysyuk S.D. 2005: Raschet veroyatnosti otravleniya khlorgazom s ispolzovaniyem koda IRRAS // Problemi okhoroni pratsi v Ukraini. – К.: NNDIOP. – 46–55.
8. Imovirnisniy 2000: Imovirnisniy analiz bezpeki atomnikh stantsiy (IAB): Navch. posibnik / V.V. Byegun, O.V. Gorbunov, I.M. Kashchenko ta in. – К. – 568.
9. Antonov G.N., Mozhayev A.S. 1999: O novikh podkhodakh k postroyeniyu logiko-veroyatnostnykh modeley bezopasnosti strukturno-slozhnykh sistem // Problemy bezopasnosti pri chrezvychnykh situatsiyakh. – М.: VINITI. – Vyp. 9. – 14–27.
10. Novitskiy A.V., Banniy O.M. 2011: Analiz nadiynosti zasobiv dlya prigotovannya i rozdavannya kormiv metodom dereva vidmov. / A.V. Novitskiy, O.M. Banniy // MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. Tom 13B. Lublin. – 117–124.

11. Belov P.G. 1999: Modelirovaniye opasnykh protsessov v tekhnosfere. Metodicheskoye posobiye. – K.: KMUGA. – 124.
12. Ryabinin I.A. 2000: Nadezhnost i bezopasnost strukturno-slozhnykh sistem. – SPb.: Politekhnik. – 248.
13. Grazhdankin A.I., Lisanov M.V., Pecherkin A.S. 2001: Ispolzovaniye veroyatnostnykh otsenok pri analize bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'yektov // Bezopasnost truda v promyshlennosti. – M. – № 5. – 33–36.
14. Levashov S. 2013: Tekhnologiya analiticheskogo rassledovaniya prichin neschastnykh sluchayev i intsidentov // Okhorona pratsi. Na dopomogu spetsialistu z okhoroni pratsi. – K. – № 3. – 50–52.
15. Lekhman S. 2013: Osobennosti vzaimodeystviya transportnykh sredstv, kak ergaticheskikh sistem, pri vzniknovenii DTP / Stepan Lekhman, Mariya Panfilova // MOTROL. Motoryzatsiya i energetyka rolnictva. – Lublin. T. 15C. – 343–347
16. Gnatyuk O.A. 2008: Metodika zastosuvannya neperervnykh lantsyugiv Markova dlya otsinki profesiynogo riziku operatoriv mobilnykh mashinno-traktornikh agregativ (MTA) na virobnichikh protsesakh v APK Ukraini / Visnik Kharkivskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu silskogo gospodarstva im. Petra Vasilenka. Vip. 75 Mekhanizatsiya 2008: «Mekhanizatsiya silskogo-spodarskogo virobnitstva». T. 2. – Kharkiv. – 347–351.
17. Buslenko N.P. 1978: Modelirovaniye slozhnykh sistem. – M.: Nauka. – 355.
18. Venttsel Ye.S. 1972: Issledovaniye operatsiy. – M.: Sov. radio. – 551.
19. Venttsel Ye.S., Ovcharov L.A. 1991: Teoriya sluchaynykh protsessov i yeye inzhenernyye prilozheniya. – M.: Nauka. – 383.
20. Karlin S. 1971: Osnovy teorii sluchaynykh protsessov. – M.: Mir. – 536.
21. Boychuk A.A., Zhuravlev V.F., Samoylenko A.M. 1994: Obobshchenno-obratnyye operatory i neterovy krayevyye zadachi. – K.: Naukova dumka. – 315.

**APPLICATION FOR EVALUATION
PROBABILISTIC ANALYSIS OF RISK
OF INJURY TO MACHINE OPERATORS
AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX**

Summary. In paper for collision tractor mechanic during the launch of internal combustion engine demonstrated the application of continuous Markov chains to evaluate the risk of injury mechanization of agriculture.

Key words: continuous Markov chain, machanizators of agro-industrial complex, dangerous situation, the state graph process streams of events, the intensity of the transition probabilities.