

УДК 622.861: 622.6

В.Ю. Деревянский (инж.)

Государственный Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ТРАВМАТИЗМУ В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Сформулированы условия возникновения несчастных случаев в транспортных системах угольных шахт. Определено пространство состояний этих систем. Разработана математическая модель переходных процессов, приводящих к травматизму, учитывающая интенсивности переходов и вероятности состояний.

Ключевые слова: математическая модель, травматизм, шахтная транспортная система, пространство состояний, переходной процесс, причина несчастного случая.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

В 2012 г. на предприятиях угольной отрасли Украины произошел 121 случай смертельного травматизма. Наибольшее количество несчастных случаев (НС) зафиксировано на шахтном транспорте и подъеме – погибло 32 человека (26,4 % от общего числа погибших). Аналогичная тенденция наблюдается и с начала 2013 г. Поэтому важным направлением работ по предотвращению травматизма на угольных шахтах служит обеспечение безопасной эксплуатации оборудования шахтного транспорта.

Анализ исследований и публикаций.

Существующие подходы к решению этой задачи основаны на соблюдении требований нормативных документов по вопросам охраны труда (ОТ) [1, 2], обучении работающих и повышении их дисциплины [3-7], создании и внедрении средств защиты (ограждений, блокировок, различных автоматических устройств) [3, 6, 7], совершенствовании конструкции оборудования шахтного транспорта и технологии его эксплуатации [8, 9]. Проведенный анализ путей дальнейшего развития теории и практики работ по повышению безопасности шахтного транспорта показал: одним из перспективных направлений выступает исследование закономерностей возникновения НС и принятие на их основе управленческих решений по недопущению случаев травматизма в рамках действующей Системы управления произ-

водством и охраной труда (СУПОТ) [2].

Один из первых вопросов, возникающих в практической деятельности и при проведении теоретических исследований в области профилактики НС, состоит в следующем: почему работа с нарушениями требований ОТ не всегда заканчивается травмой? Почему в одних случаях при работе с нарушениями произошел НС, а в других (которых на практике гораздо больше) – нет? Средства доставки людей и грузов являются подсистемой шахтной транспортной эргатической системы «человек-машина-среда» (ШТС). Поскольку НС происходят не непрерывно, а в некоторые моменты времени, то можно сделать предположение о существовании разных (по критерию безопасности) состояний этой системы в случаях, когда происходит травмирование работника, и в остальных случаях. Данное предположение позволяет рассматривать процесс травмирования человека как процесс смены состояний эргатической системы. Поэтому необходимо разработать математическую модель переходных процессов в ШТС, приводящих к травматизму.

Постановка задачи.

Цель статьи: провести теоретическое исследование и разработать математическую модель переходных процессов в ШТС, приводящих к травматизму.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- исследовать условия возникновения случаев травматизма в ШТС, вследствие которых работа с нарушениями требований ОТ не всегда заканчивается травмированием работника;
- на основе полученных результатов определить пространство состояний ШТС;
- составить математическую модель переходных процессов в ШТС, приводящих к травматизму.

Изложение материала и результаты.

Как показывает практика, к травмированию работника приводят нарушения требований ОТ, которые выступают в роли причин НС. В то же время, работа с нарушениями ОТ далеко не всегда заканчивается травмой. Это свидетельствует о существовании условия достаточности нарушений требований ОТ (причин) для возникновения НС. Исследуем данную закономерность на конкретном примере.

08.06.2010 г. на шахте им. А.А. Скочинского государственного предприятия «Донецкая угольная энергетическая компания» рабо-

тавший в III-ю смену проходчик до окончания смены самовольно покинул рабочее место и направился в сторону клетового ствола для выезда на поверхность. По пути он сел в заднюю кабину электровоза – «спарки» 2АМ8Д, доставлявшего к стволу партию вагонеток, груженых углем. Во время движения состава по западной обгонной выработке гор. 1200м на стрелочном переводе электровоз сошел с рельсового пути, при этом сорвавшейся аккумуляторной батареей пострадавший был прижат и тяжело травмирован. Причины НС:

- самовольное досрочное оставление рабочего места пострадавшим без разрешения инженерно – технического работника (ИТР);
- самовольная посадка пострадавшего в заднюю кабину электровоза;
- машинист электровоза допустил перевозку постороннего лица в задней кабине электровоза;
- неудовлетворительное состояние путевого хозяйства;
- и.о. помощника начальника добычного участка, работником которого является пострадавший, не обеспечил соблюдение производственной дисциплины в руководимой смене;
- недостаточный уровень контроля за производственной дисциплиной со стороны ИТР участка шахтного транспорта.

В целях упрощения теоретических исследований из дальнейшего рассмотрения допустимо исключить необеспечение соблюдения производственной дисциплины и недостаточный уровень контроля за производственной дисциплиной со стороны ИТР, поскольку в данном случае эти нарушения имеют причинно-следственную связь с нарушениями требований ОТ пострадавшим и машинистом электровоза (т.е. выступают в роли причин второго порядка – причины причин); в качестве причин своевременного, до травмирования работника, устранения нарушений они рассматриваться не могут, т.к. в месте совершения нарушений требований ОТ пострадавшим и машинистом электровоза указанных ИТР не было.

Условие достаточности нарушений требований ОТ (причин) для возникновения НС сформулируем, используя принцип доказательства «от противного», в терминах естественного языка с помощью логической импликации, представляющей собой условное высказывание вида «если..., то...»:

- «если пострадавший не ушел раньше времени с рабочего места, то его не было в кабине электровоза при сходе по-

- следного с рельсового пути и он не травмирован сдвинувшимся батарейным ящиком»;
- «если пострадавший ушел раньше времени с рабочего места, но не сел в кабину электровоза, то его нет в кабине при сходе электровоза с рельсового пути и он не травмирован сдвинувшимся батарейным ящиком»;
 - «если пострадавший ушел раньше времени с рабочего места, сел в кабину электровоза, но машинист остановил электровоз и высадил его из кабины, то при сходе электровоза с рельсового пути он не травмирован сдвинувшимся батарейным ящиком»;
 - «если пострадавший ушел раньше времени с рабочего места, сел в кабину электровоза и машинист не остановил электровоз и не высадил пострадавшего из кабины, но рельсовый путь соответствует требованиям ОТ, то электровоз не сошел с рельсового пути и пострадавший не травмирован сдвинувшимся батарейным ящиком».

Таким образом, для возникновения данного НС необходимо наличие всех четырех причин. Исключение из приведенного перечня хотя бы одной причины делает возникновение НС невозможным. Отсюда следует условие достаточности нарушений требований ОТ (причин) для возникновения НС: к НС приводит не любая, произвольная, а только определенная комбинация нарушений требований ОТ (причин НС). Другим важным условием служит действие фактора случайности, способствовавшего травмированию человека. Фактор случайности в рассмотренном примере проявился в том, что не все случаи схода электровоза с рельсового пути сопровождаются смещением батарейного ящика.

Условия возникновения случаев травматизма объединим под общим названием «ситуация травмирования человека» (СТ) и запишем в виде элементарной конъюнкции (логического произведения) причин НС и фактора случайности

$$K = (x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_r) \cdot C^-, \quad (1)$$

где K – ситуация травмирования человека;

x_1, x_2, \dots, x_r – нарушения требований ОТ, приведшие к НС (причины НС);

r – количество причин в СТ (ранг конъюнкции);

C^- – фактор случайности (поскольку такой фактор может играть не только отрицательную, но и положительную роль, в его обозначении необходимо указывать знак).

Для условия возникновения НС знак « \rightarrow »).

СТ является пределом эволюции ситуаций во времени в данной ШТС. Возможные состояния системы образуют множество ее допустимых состояний, именуемых «пространством состояний». Условия возникновения НС (1) позволили определить пространство состояний ШТС. Состояние, когда работы ведутся с соблюдением всех требований ОТ, условно назовем безопасным состоянием ШТС (БС). Состояние ШТС, при котором имеется достаточная для возникновения НС комбинация нарушений требований ОТ (причин НС), но из-за отсутствия фактора C^- (иными словами, действия фактора C^+) не происходит травмирования человека, будем именовать опасным состоянием ШТС (ОС); состояние, когда происходит НС, обозначим как СНС. Промежуточное состояние, при котором имеются нарушения требований ОТ в количестве, меньшем чем в СТ (НС при этом не происходит), назовем потенциально опасным состоянием ШТС (ПОС). Таким образом, пространство состояний ШТС включает четыре состояния.

Движение ШТС в пространстве состояний подчиняется определенным закономерностям. На основе анализа материалов специального расследования НС был сформулирован закон поведения ШТС (он справедлив и для других систем): в каждый данный момент времени система может находиться только в одном из состояний.

С течением времени состояние ШТС не остается неизменным. Система движется в пространстве состояний, переходит из одного состояния в другое заранее неизвестным, случайным образом, в ней протекает случайный процесс. Предварительный анализ показывает, что такой процесс можно представить как цепь Маркова с дискретными состояниями и непрерывным временем [10]. Дискретные состояния – это такие состояния системы, которые можно заранее перечислить, при этом переход из состояния в состояние происходит скачком. Цепь с непрерывным временем означает, что моменты возможных переходов из состояния в состояние не фиксированы заранее, они случайны и могут осуществиться в любой момент.

Движение ШТС в пространстве состояний обусловлено появлением и устранением нарушений требований ОТ, которые представ-

ляют собой поток событий, следующих одно за другим в случайные моменты времени. Важной характеристикой потоков является их интенсивность (λ) – среднее число событий, приходящееся на единицу времени. С помощью значений интенсивностей переходов можно определить вероятностные характеристики состояний ШТС.

Для построения графа состояний введем следующие обозначения: ШТС обозначим через S ; λ_{ij} интенсивность потока событий, переводящего систему из состояния S_i в состояние S_j . Граф состояний приведен на рис. 1.

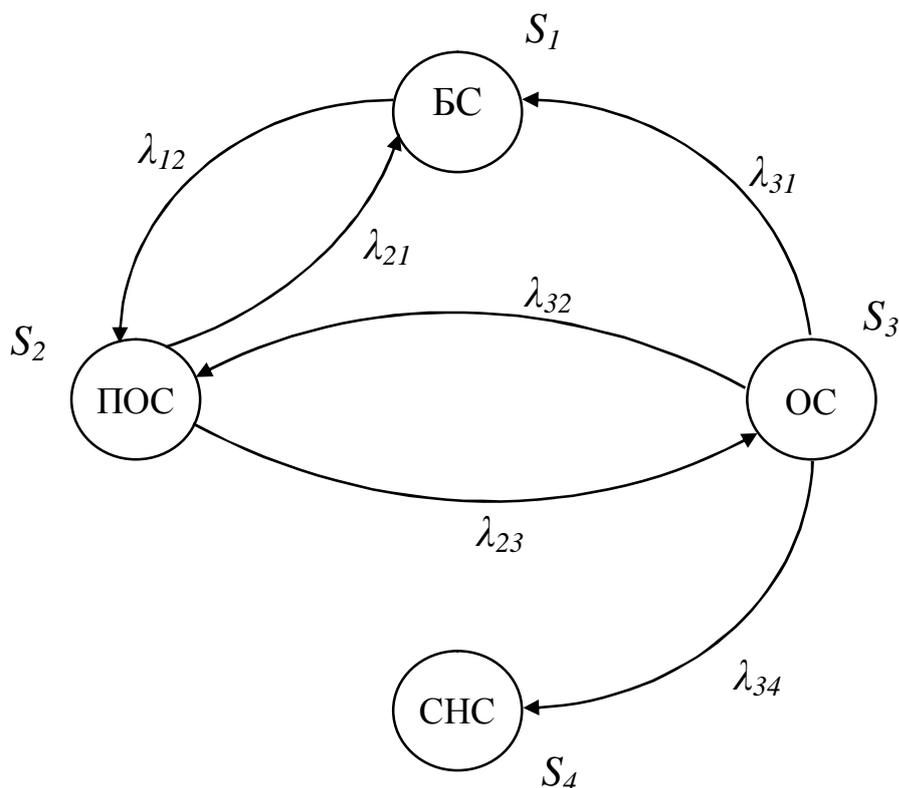


Рис. 1. Граф состояний ШТС
(с учетом состояния S_4)

На его основе можно построить математическую модель переходного процесса. Рассматриваемая система имеет состояния: S_1 , S_2 , S_3 , S_4 . Назовем вероятностью i -го состояния вероятность $P_i(t)$ того, что в момент времени t ШТС будет находиться в состоянии S_i . Для любого момента времени сумма всех вероятностей состояний равна единице. На основе графа состояний можно найти вероятности состояний $P_i(t)$. Для этого необходимо составить уравнения Колмогорова – дифференциальные уравнения, в которых неизвестными функциями являются вероятности состояний [10].

Граф состояний ШТС (рис. 1) дозволив скласти математическу модель переходних процесів, приводящих к травматизму, в виде системы дифференціальних уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda_{21} P_2(t) + \lambda_{31} P_3(t) - \lambda_{12} P_1(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{12} P_1(t) + \lambda_{32} P_3(t) - (\lambda_{21} + \lambda_{23}) P_2(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{23} P_2(t) - (\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34}) P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{34} P_3(t). \end{aligned} \right\}$$

Поскольку действие фактора случайности, приводящего к НС, вследствие своей значительности требует самостоятельного исследования, допустимо исключить из рассмотрения переменную S^- . Это значит что условием, достаточным для возникновения НС, является только наличие определенной комбинации нарушений требований ОТ (причин НС). При этом уравнение (1) примет вид

$$K = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_r. \quad (2)$$

Из условия (2) построен граф состояний ШТС, который не учитывает состояние S_4 (рис. 2).

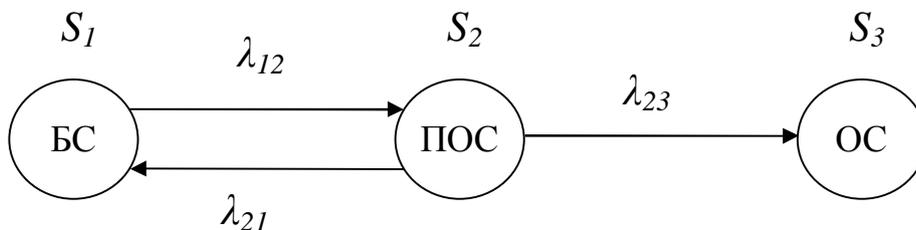


Рис. 2. Граф состояний ШТС
(без учета состояния S_4)

На основе рис. 2 составлена следующая математическая модель

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda_{21} P_2(t) - \lambda_{12} P_1(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{12} P_1(t) - (\lambda_{21} + \lambda_{23}) P_2(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{23} P_2(t). \end{aligned} \right\}$$

Подставив в нее данные, полученные в условиях конкретных ШТС, можно найти вероятностные характеристики состояний систем.

Выводы и направления дальнейших исследований.

Полученная математическая модель переходных процессов, приводящих к травматизму в ШТС, будет использоваться для оценки вероятностных характеристик безопасности работы этих систем.

В дальнейшем планируется получение с помощью разработанной модели вероятностных характеристик ШТС, оснащенных ленточными конвейерами, средствами канатного и локомотивного транспорта, и определение влияния отказов оборудования и средств защиты на вероятность возникновения НС.

Список литературы

1. Правила безпеки у вугільних шахтах: НПАОП 10.0-1.01-10 / Держгірпромнагляд України. – Офіц. вид. – К.: Охорона праці, 2010. – 430 с. – (Нормативний акт з охорони праці Держгірпромнагляду України).
2. Система управління виробництвом і охороною праці в вугільній промисловості України (типове керівництво): СОУ – П 10.1.00174088.018: 2009 / М-во вугільної промисловості України. – Офіц. вид. – Макеевка: МакНІІІ, 2010. – 317 с. – (Нормативний документ Мінуглепрома України).
3. Бабокин И. А. Система безопасности труда на горных предприятиях / И.А. Бабокин. – М.: Недра, 1984. – 320 с.
4. Барабаш В. И. Риск – причина аварийности и травматизма / В.И. Барабаш, О.Н. Терентьев // Безопасность труда в промышленности. – 1988. – № 6. – С. 62 – 64.
5. Шелест В. Психология безопасности / В. Шелест, А. Гудсков, В. Ляшко // Охрана труда. – 2000. – № 7. – С. 31, 34.
6. Лёвкин Н.Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины / Н.Б. Лёвкин. – Д.: Донбасс, 2002. – 392 с.
7. Теория и практика охраны труда на угольных шахтах / [Э.Н. Медведев, В.Д. Мартовицкий, О.И. Кашуба и др.]. – Луганск: «Редакция газеты «Сбойка», 2006. – 602 с.
8. Волкоедов В.Н. Основные направления совершенствования подземного транспорта / В.Н. Волкоедов, Г.Д. Морозов // Уголь Украины. – 2003. – № 9. – С.34 – 35.
9. Шибалов С.Ф. Состояние и направления развития подземного транспорта / С. Ф. Шибалов // Уголь Украины. – 2003. – № 10. – С.11 – 14.
10. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология: учеб. пособие для студ. вузов / Е.С. Вентцель. – М.: Высш. школа, 2001. – 208 с.

Стаття надійшла до редакції 08.10.2013

В.Ю. Дерев'янський. Державний Макіївський науково-дослідний інститут з безпеки робіт в гірничій промисловості

Математична модель перехідних процесів, що призводять до травматизму в транспортних системах вугільних шахт.

Сформульовані умови виникнення нещасних випадків в транспортних системах вугільних шахт. Визначений простір станів цих систем. Розроблена матема-

тична модель перехідних процесів, що призводять до травматизму, яка враховує інтенсивності переходів і вірогідності станів.

Ключові слова: математична модель, травматизм, шахтна транспортна система, простір станів, перехідний процес, причина нещасного випадку.

V.Dereviansky. State Makiivka Research Institute

A Mathematical Model of Transients, Resulting in Traumatism in Transport Systems of Coal Mines.

There are many accidents at the enterprises of coal industry in Ukraine. The most of victims are injured on mine transport. The article formulates the conditions under which the accidents in mine transport systems take place. The state space of these systems is defined. A mathematical model of transients resulting in traumatism is developed taking into account intensities of transitions and probability of states.

Keywords: mathematical model, traumatism, mine transport system, state space, transient, cause of accident.