

Таким образом, сравнение результатов численных и экспериментальных исследований позволяет сделать вывод о целесообразности использования предложенной математической модели для оптимизации выбора рабочих параметров пульсационного воздействия в части подавления макродефектов усадочного и ликвационного характера. Использование модели для оптимизации технологических режимов пульсационной обработки в части подавления ликвационных и усадочных дефектов будет способствовать повышению качества продукции и снижению затрат в металлургическом производстве.

Список литературы

1. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. — М.: Металлургия, 1995. — 272 с.
2. Смирнов А.Н. Улучшение качества слитков и заготовок путем виброимпульсного воздействия при их затвердевании // Сталь, 1997. — № 4. — С. 14–20.
3. Пилюшенко В.Л., Смирнов А.Н. Оптимизация выбора технологической схемы виброимпульсной обработки для повышения качества промышленных слитков и заготовок // Металлы и литье Украины, 1997. — № 1. — С. 8–13.
4. Особенности формирования слитка в условиях перемешивания пульсирующей затопленной струей / А.Н.Смирнов, С.В.Пильгук, А.А.Троянский и др. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия, 1989. — № 6. — С. 16–19.
5. Огурцов А.П., Недопекин Ф.В., Белоусов В.В. Процессы формирования стального слитка: математическое моделирование заполнения и затвердевания. — Днепродзержинск: Изд-во ДГТУ, 1994. — 180 с.
6. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. — К.: Наук. думка, 1983. — 352 с.
7. Ефименко С.П., Пилюшенко В.А., Смирнов А.Н. Пульсационное перемешивание металлургических расплавов. — М.: Металлургия, 1989. — 168 с.

© Смирнов А.Н., Редько Г.А., 2001

ОТКИДАЧ В.В., ТЕМНОХУД В.А., ЖОВНИРЕНКО Т.Ю. (ДОНГТУ)

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА И ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

На основании энтропийной теории разработана концепция о природе возникновения опасностей и условий появления травматизма на производстве. С помощью аппарата теории массового обслуживания получена вероятностная модель критериев оценки производственного травматизма. Показано, что для оценки травматизма можно использовать распределение Пуассона. Предложена методика оценки уровня травматизма на предприятиях.

Системный подход применим и для системы управления охраной труда [1]. Поэтому в системе управления охраной труда, как и во всякой управляемой системе, необходимо определить и четко выделить основные принципы и направления, по которым будет осуществляться управляющее воздействие на систему. Особенности современных трудовых процессов на производстве позволяют интерпретировать их в виде функционирования системы «человек — машина — среда» (ЧМС), компоненты которых взаимодействуют между собой по заданной технологии и установленной организации работ. Активными компонентами таких систем есть люди. Функционирование систем ЧМС в целом должно рассматриваться системно. Поэтому к безопасности труда следует относиться как к функциональному свойству системы, а опасность — представлять как неотъемлемое свойство тех процессов, которые протекают с использованием энергии и информации. В связи с тем, что опасность реализуется в результате не-

желательного высвобождения механической, химической, электрической и других видов энергии (а это, как правило, приводит к травмированию людей, повреждению техники, загрязнению окружающей среды вредными веществами), поэтому можно считать, что происшествия всегда причинно обусловлены цепями предпосылок: ошибками, несанкционированными действиями работающих, отказами и неисправностями используемого оборудования, нерасчетными воздействиями на людей и технику окружающей среды [2].

Учитывая то, что природа триедина, а ее неразрывными компонентами являются материя, энергия и информация, сложность производственных систем рекомендуется оценивать по их энтропии [3]. Под энтропией мы будем понимать меру неопределенности (дезорганизации) системы, а под информацией — меру организации данной системы, т.е. информация — это энтропия с обратным знаком. Если обозначить энтропию через S , а информацию через I , тогда зависимость между данными величинами можно записать в дифференциальной форме [4]:

$$dI = -dS. \quad (1)$$

Из зависимости (1) следует, что при изымании из системы информации ($dI < 0$) увеличивается энтропия системы, и, наоборот, вливание информации в систему ($dI > 0$) приводит к уменьшению энтропии ($dS < 0$) системы. Таким образом, опасными являются не только производства, но и познавательная или творческая деятельность человека, направленная на пополнение своих знаний, т.е. на получение новой информации о производственной системе.

Правомерность предложенной концепции подтверждается опытом, а точнее, промышленными авариями, катастрофами и известными законами энтропии [3]. Так, Чернобыльская авария явилась следствием выброса большого количества тепловой энергии и радиоактивных веществ по причине наложения нескольких несанкционированных действий персонала и отказов оборудования, приведших к разгерметизации ядерного реактора. Железнодорожная катастрофа под Уфой — результат нерасчетного внешнего воздействия на проходящие пассажирские поезда (взрыва паров топлива из поврежденного продуктопровода). Другим аргументом справедливости предложенной концепции является непротиворечивость сделанных утверждений фундаментальным свойствам энтропии (объективное ее стремление к росту).

Энтропозенергетическая концепция подтверждает объективный характер опасностей и закономерность появления ущерба в тех системах, при функционировании которых наблюдается хотя бы временное уменьшение энтропии. Следовательно, при установлении необходимых и конкретных мер безопасности следует четко представлять себе, что такое опасность, когда она возникает, с чем она связана. Ответы на поставленные вопросы следует искать исходя из энтропозенергетической концепции. Для предупреждения аварийности и травматизма необходимо:

— исключать появление отдельных предпосылок (отказов, ошибок, внешних воздействий) за счет обеспечения должного качества «машины», «человека» и «среды» либо не позволять перерастать им в причинную цепь происшествия путем выбора соответствующей организации и технологии работ, включающих в себя действительно необходимые меры безопасности;

— при формулировании основных положений инструктажа работающих по технике безопасности необходимо исходить из практической невозможности создания со-

вершено безотказного и эргономичного оборудования, полного исключения ошибок и несанкционированных действий персонала;

— предусматривать мероприятия по своевременному предупреждению, выявлению и исключению возникновения отдельных предпосылок (ошибок, отказов, других воздействий).

Выбор соответствующей организации и технологии работ необходимо производить исходя из ответов на следующие вопросы.

В чем заключается опасность предстоящих работ?

Появление каких событий при их проведении недопустимо?

Почему каждое из них может произойти?

Следуя принятой концепции, ответ на первый вопрос в следующем: опасность выполняемых работ заключается в той энергии, которая используется в технологическом процессе.

Основная идея ответа на второй вопрос — не допустить любого нежелательного высвобождения используемой энергии, в особенности, если это приводит к возникновению происшествий.

Ответ на третий вопрос следует из методики его поиска. Поскольку происшествия причинно обусловлены, необходимо прогнозировать те ошибки, отказы и неожиданные или превышающие допустимые пределы внешние воздействия, которые в совокупности или порознь могут привести к нежелательному высвобождению энергии и воздействию ее на незащищенные компоненты производственной системы и окружающую среду.

Анализ производственного травматизма показывает, что несчастные случаи наступают в случайные моменты времени и их можно представлять, как последовательность однородных случайных событий. Вероятность, что произойдут несчастные случаи в любой промежуток времени, не зависит от того, произошли или не произошли несчастные случаи до начала рассматриваемого момента времени [5]. Появление двух или более несчастных случаев за малый промежуток времени практически невозможно, т.е. вероятность появления более одного несчастного случая за малый промежуток времени пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления только одного несчастного случая. Вероятность появления k несчастных случаев за промежуток времени t есть функция k и t . При этом можно считать, что в одинаковом по длине временном интервале среднее число происходящих случаев производственного травматизма будет одним и тем же, независимо от расположения интервалов на временной оси. Следовательно, процесс возникновения несчастных случаев с достаточной для практики точностью можно принять стационарным.

Если обозначить λ^* как интенсивность появления некоторого события, то вероятность появления одного несчастного случая в малом интервале времени dt равна $\lambda^* dt$ при условии, что интервал времени dt настолько мал, что вероятность появления в этом интервале двух или большего числа событий пренебрежимо мала. Вероятность $P(k, t + dt)$ появления k несчастных случаев в произвольном интервале времени $t + dt$ равна сумме вероятностей для следующих двух взаимно исключающих событий [6]:

— к моменту времени t с вероятностью $P(k, t)$ происходят k несчастных случаев, а в промежутке времени dt не происходит ни одного несчастного случая и вероятность этого события равна $(1 - \lambda^* dt)$. Вследствие независимости этих двух событий вероятность их совместного появления равна $(1 - \lambda^* dt)P(k, t)$;

— к моменту времени t с вероятностью $P(k-1, t)$ происходят $k-1$ событий, и в промежутке времени dt с вероятностью $\lambda^* dt$ происходит одно событие, т. е. один несчастный случай. Вследствие независимости этих двух событий вероятность их совместного появления равна $P(k-1, t) \cdot \lambda^* dt$.

Таким образом:

$$P(k, t+dt) = (1 - \lambda^* dt)P(k, t) + \lambda^* P(k-1, t)dt \Rightarrow \frac{P(k, t+dt) - P(k, t)}{dt} = \lambda^* [P(k-1, t) - P(k, t)]$$

Полагая, что $dt \rightarrow 0$, получаем:

$$\frac{dP(k, t)}{dt} = \lambda^* [P(k-1, t) - P(k, t)]$$

При $k=0 \Rightarrow \frac{dP(0, t)}{dt} = -\lambda^* P(0, t)$, так как $P(-1, t) \equiv 0$.

Решение полученного дифференциального уравнения при граничном условии $P(0, 0) = 1$ имеет вид:

$$P(0, t) = e^{-\lambda^* t}.$$

Аналогично решением дифференциального уравнения:

$$\frac{dP(1, t)}{dt} = \lambda^* [P(0, t) - P(1, t)] = \lambda^* [e^{-\lambda^* t} - P(1, t)],$$

при граничном условии $P(1, 0) = 0$ является:

$$P(1, t) = \lambda^* t e^{-\lambda^* t}.$$

Продолжая этот процесс, находим, что:

$$P(k, t) = \frac{(\lambda^* t)^k e^{-\lambda^* t}}{k!}.$$

Принимая, $\lambda^* t = \lambda$, получаем выражение для пуассоновского распределения:

$$F(k, \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}.$$

Вероятность того, что за время t произойдет не более m несчастных случаев, определяется функцией распределения:

$$F(m, t) = e^{-\lambda t} \sum_{k=0}^m \frac{(t\lambda)^k}{k!}.$$

Для инженерной практики представляет интерес закон распределения интервала времени T между двумя соседними несчастными случаями на производстве. В качестве оценки применяется вероятность того, что в контролируемом интервале времени человек получит травму. Тогда распределение интервала времени T между любыми двумя последовательными несчастными случаями является потоком Пальма. Действительно, возьмем на оси Ot начальную точку отсчета времени и совместим ее с моментом появления произвольного несчастного случая. Найдем сначала функцию распределения $F(t)$ случайной величины T . По определению:

$$F(t) = P\{T < t\}.$$

Для выполнения данного условия необходимо, чтобы интервал T принял значение меньше чем t , а на участке времени длиной t появился хотя бы один несчастный случай.

Число несчастных случаев $X(t)$, попадающих на интервал t , распределяется по закону Пуассону:

$$P\{X(t) = k\} = (t\lambda)^k \frac{e^{-t\lambda}}{k!}, \quad (2)$$

В выражении (2) принимают значения $k=0,1,2,\dots,m$.

Вероятность того, что несчастный случай не произошел за период времени T :

$$P\{T > t\} = P\{X(t) = k\} = e^{-t\lambda}, \quad (\text{при } k=0).$$

С другой стороны, вероятность того, что хотя бы один несчастный случай наступил на отрезке времени T , равна:

$$P\{T < t\} = 1 - P\{T > t\} = 1 - e^{-t\lambda}. \quad (3)$$

Тогда функция распределения интервала T между соседними несчастными случаями равна $F(t) = 1 - e^{-t\lambda}$, (при $t > 0$) и представляет показательное распределение с плотностью распределения $f(t) = \lambda t e^{-t\lambda}$, т.е. интервалы времени между соседними несчастными случаями распределены по показательному закону.

Таким образом, с помощью аппарата теории массового обслуживания получена вероятностная модель критериев оценки производственного травматизма. Степень близости эмпирического распределения и теоретического проверяется критерием Пирсона.

Для оценки безопасности труда принимается вероятность того, что в контролируемом интервале времени (распределение Пуассона) человек получит травму. Для применения распределения Пуассона, при оценке безопасности, необходимо вычислить параметр λ . Для чего используются статистические данные на рассматриваемом предприятии за определенный период времени T (год, несколько лет). Принимается (день, неделя, месяц, декада) квантования случайной величины k_i . Делается выборка числа несчастных случаев непосредственно из актов по форме Н-1. Получают определенное число периодов n_i с различным числом несчастных случаев.

Так, n_0 — число периодов, в которых не было несчастных случаев; n_1 — число периодов, в которых произошел один несчастный случай и т.д.

Тогда общее число периодов (интервалов): $n = n_0 + n_1 + \dots + n_k$, а сумма $0 \cdot n_0 + 1 \cdot n_1 + \dots + k \cdot n_k$ равна числу несчастных случаев, происшедших за время T . Затем вычисляется среднее арифметическое квантованной случайной величины k_i :

$$\bar{x} = \sum_{i=0}^n \frac{k_i \cdot n_i}{n}, \quad (4)$$

выборочная дисперсия:

$$D^* = \frac{\sum_{i=0}^n n_i (k_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=0}^n n_i - 1} \quad (5)$$

В качестве оценки параметра λ распределения Пуассона принимается выборочная средняя \bar{x} , т.е. $\lambda = \bar{x}$ и закон Пуассона принимает вид:

$$P(k, \bar{x}) = (\bar{x})^k \frac{e^{-\bar{x}}}{k!} \quad (6)$$

Положив $k=0,1,\dots,m$ находят вероятности P_k появления k несчастных случаев.

При проверке нулевой гипотезы о пуассоновском распределении несчастных случаев на производстве при уровне значимости α с помощью критерия Пирсона (χ^2 -критерий) придерживаются следующей последовательности действий [7]:

1) находят теоретические частоты по формуле:

$$n'_k = n \cdot P(k, \bar{x}); \quad (7)$$

2) сравнивают эмпирические и теоретические частоты с помощью критерия Пирсона, приняв число степеней свободы $m = s - 2$, где s - число различных групп выборки. Если производилось объединение малочисленных частот ($n_k < 5$) в одну группу, то s принимается как число оставшихся групп выборки после объединения частот. В этом случае и соответствующие им теоретические частоты также надо объединять. Результаты объединения частот заносятся в таблицу.

Из расчетной таблицы находят наблюдаемое значение критерия Пирсона ($\chi^2_{набл}$). Уровень значимости α при условии установившегося процесса производства и достоверных массивах статистики уровень значимости рекомендуется принимать 0,01–0,05 [8].

По таблице критических точек распределения χ^2 (Приложение 5 [9]), по уровню значимости α и числу степеней свободы m находят критическую точку право-сторонней критической области $\chi^2_{кр}$. Если выполняется неравенство $\chi^2_{набл} < \chi^2_{кр}$, то нет оснований отвергать гипотезу о распределении производственного травматизма по закону Пуассона, т.е. данные наблюдения согласуются с принятой гипотезой.

Отклонение эмпирического распределения от пуассоновского распределения наблюдается в моменты существенного изменения технологического процесса, а также в случае недостоверных статистических материалов [8]. После нормализации условий безопасности и достижения требуемых технологическими инструкциями параметров производственного процесса распределение производственных травм хорошо аппроксимируется пуассоновским распределением, но уже с другими значениями параметра λ .

Увеличение текущего значения параметра λ характеризует снижение уровня безопасности труда и необходимость разработки соответствующих мероприятий. Отклонение эмпирического распределения травм от пуассоновского (может быть проверено в конце каждого календарного периода) означает либо на данном объекте сокрытие случаев производственного травматизма, либо существенное отклонение технологического процесса от требуемого в течение этого периода.

Таким образом, сравнив вероятности появления несчастных случаев на предприятиях отрасли, можно провести их классификацию по условиям опасности травма-

тизма и наметить мероприятия по улучшению профилактической работы по охране труда.

Пример. В течение 5,5 лет (2000 дней) на металлургическом комбинате зафиксировано 210 несчастных случаев с работниками предприятия. Принимаем интервал квантования несчастных случаев — 20 дней. Число периодов n_k по k несчастных случаев в каждом периоде приведено в табл. 1.

Табл. 1 — Распределение несчастных случаев

Число несчастных случаев в периоде, k_i	0	1	2	3	4	5
Число периодов, n_i	8	28	31	18	9	6

Проверим гипотезу о том, что распределение числа несчастных случаев на комбинате подчиняется закону Пуассона. Уровень значимости принимаем $\alpha = 0,05$.

Функция распределения числа несчастных случаев с учетом зависимостей (2) и (4) имеет вероятность:

$$P(k, \lambda) = \sum_{k=0}^5 \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!},$$

с параметром:

$$\lambda = \bar{x} = \frac{\sum_{k=0}^n n_k k}{n} = \frac{8 \cdot 0 + 28 \cdot 1 + 31 \cdot 2 + 18 \cdot 3 + 9 \cdot 4 + 6 \cdot 5}{100} = 2,1.$$

Вычисляем теоретические вероятности с учетом зависимости (6):

$$p_k = \frac{(2,1)^k e^{-2,1}}{k!},$$

при $k=0,1,2,3,4,5$: $p_0=0,122$; $p_1=0,257$; $p_2=0,270$; $p_3=0,189$; $p_4=0,099$; $p_5=0,063$.

Дальнейшее вычисления производим по [9] с учетом зависимости (7). Результаты расчета критерия Пирсона приведены в табл. 2.

Табл. 2 — Результаты расчета критерия Пирсона

k	n_k	n'_k	$n_k - n'_k$	$(n_k - n'_k)^2$	$(n_k - n'_k)^2 / n'_k$
0	8	12,2	-4,2	17,64	1,45
1	28	25,7	2,3	5,29	0,21
2	31	27,0	4,0	16,00	0,59
3	18	18,9	0,9	0,81	0,04
4	9	9,9	0,9	0,81	0,08
5	6	6,3	-0,3	0,03	0,01
Σ	100	100			$\chi^2_{набл} = 2,38$

По таблице квантилей χ^2 — распределения по заданному уровню значимости $\alpha = 0,05$ и числу степеней свободы $m = s - 2 = 6 - 2 = 4$ находим критическое значение $\chi^2_{0,05;4} = 9,488$ [12]. Так как $\chi^2_{набл} = 2,38 < 9,488$, то нет оснований для отклонения гипотезы о том, что закон распределения числа несчастных случаев является законом Пуассона с параметром $\lambda = 2,1$.

Вероятность того, что на данном комбинате не возникнет несчастный случай, равна $p_0=0,122$. Следовательно, вероятность возникновения несчастных случаев во временном интервале в 20 дней по зависимости (3) равна $p=1-0,122=0,878$. Поскольку показатель p характеризует травмоопасность, то, определив этот показатель для ряда предприятий, можно разделить эти предприятия на группы в зависимости от величины показателя p .

В данной работе предлагается классифицировать предприятия по уровню травматизма следующим образом: малоопасные ($p=0-0,2$), повышенной опасности ($p=0,21-0,45$) и высокоопасные ($p=0,46-0,9$). Следует отметить, что данную классификацию нельзя рассматривать как окончательную, так как она должна определяться для каждой отрасли в зависимости от уровня применяемых технологий, оборудования, трудовых процессов, организации производства и т.д. С учетом предложенной классификации анализируемый металлургический комбинат можно отнести к высокоопасной категории. Эти данные подтверждают необходимость разработки на данном предприятии профилактических мероприятий по предупреждению травматизма. При этом следует начинать с поиска причин несчастных случаев из-за отклонения технологических режимов, отказов оборудования, неправильных действий персонала и т.д.

Для контроля эффективности применяемых мероприятий по снижению травматизма предлагается показатель p периодически определять заново на основе статистических данных за последние 5 лет или за любой другой срок. При этом снижение показателя p и текущего значения λ означает повышение уровня безопасности труда.

Таким образом, на основании энтропийной теории проведены теоретические исследования и разработана вероятностная модель, позволяющая анализировать уровень травматизма и аварийности на предприятиях. Рекомендуется оценивать уровень травматизма и аварийности по величине вероятности возникновения несчастных случаев (аварий) и по интенсивности их появления. При этом с позиции определения необходимости разработки профилактических мероприятий по предупреждению травматизма и аварийности предложено разработать классификацию предприятий по уровню травмоопасности.

Список литературы

1. **Откидач В.В., Цапов Г.П.** Охрана труда в огнеупорном производстве с элементами экологии и эргономики: Учеб. пособие. — К.: УМК ВО, 1991. — 224 с.
2. **Белов П.Г.** Уроки безопасности. 1. Как инструктировать работающих // Охрана труда и социальное страхование, 1991. — № 11. — С. 14–17.
3. **Откидач В.В., Темнохуд В.А., Бурлака П.М., Левченко А.В.** Энтропоэнергетическая концепция опасностей и условий появления на производстве аварийности, травматизма / Наука — практика: Научн.-метод. сб. Вып. 4 // Ред. кол.: В.В. Пак, Е.И. Казакова, Л.П. Мироненко и др. — Донецк: ДонГТУ, 1999. — С. 83–88.
4. **Пак В.В.** Инженер, математика и другие. Простые методы математического моделирования природных и технических процессов. — Донецк: ДонГТУ, 1995. — 224 с.
5. **Откидач В.В., Темнохуд В.А., Нестеренко А.Н.** Вероятностный подход к оценке производственного травматизма / Наука — практика: Научн.-метод. сб. Вып. 3 // Ред. кол.: В.В. Пак, Е.И. Казакова, Л.П. Мироненко и др. — Донецк: ДонГТУ, 1998. — С. 133–137.
6. **Хан Г., Шапиро С.** Статистические модели в инженерных задачах. — М.: Мир, 1969. — 395 с.
7. **Герасимович А.И., Матвеева Я.И.** Математическая статистика. — Минск: «Вышэйш. школа», 1978. — 200 с.
8. **Козлов В.И.** Методология охраны труда в человеко-машинных системах. — Рига: Зинатне, 1989. — 183 с.
9. **Гмурман В.Е.** Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учеб. пособие для студентов вузов. 3-е изд. — М.: Высш. школа, 1979. — 400 с.