

Младова Т. А., Муллер Н. В., Васильев А. А., Беседин М. А.
T. A. Mladova, N. V. Muller, A. A. Vasiliev, M. A. Besedin

ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА

APPROACHES TO MATHEMATICAL MODELING OF OCCUPATIONAL INJURY PROCESSES

Младова Татьяна Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

Tatyana A. Mladova – PhD in Engineering, Associate Professor, Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

Муллер Нина Васильевна – кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: only_nina@mail.ru.

Nina V. Muller – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: only_nina@mail.ru.

Васильев Алексей Александрович – студент кафедры «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Alexey A. Vasiliev – Student, Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Беседин Максим Александрович – студент кафедры «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Maxim A. Besedin – Student, Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В статье проведено исследование и анализ травматизма на примере предприятия металлургического производства. Применительно к массиву данных по травматизму предложена модель, которая позволит установить закономерности, вызывающие несчастные случаи. В ходе исследования проанализированы зависимости возникновения производственных травм от различных причин, сформированы группы категории опасности травмирования персонала по профессиям и в соответствии с выявленными приоритетными группами риска персонала рекомендованы к принятию соответствующие превентивные меры.

Summary. The article presents a study and analysis of injuries on the example of a metallurgical production enterprise. In relation to the data set on injuries, a model is proposed that will allow us to establish patterns that cause accidents. In the course of the study, the dependences of the occurrence of occupational injuries from various causes were analyzed, groups of personnel injury hazard categories were formed by profession, and in accordance with the identified priority risk groups of personnel, it is recommended to take appropriate preventive measures.

Ключевые слова: производственный травматизм, статистика, зависимость, математическая модель, мероприятия.

Key words: occupational injuries, statistics, dependence, mathematical model, events.

УДК 504.054

Многовековой практический опыт человеческой деятельности позволяет утверждать, что любой труд потенциально опасен, т. к. он связан с энергией. Причины травматизма, которые приводят к нетрудоспособности работников, можно классифицировать по признакам: организационные, технические, санитарно-гигиенические, психофизиологические.

Наиболее известными методами анализа прогнозирования процессов производственного травматизма, взаимодополняющими друг друга, являются: монографический, экономический, статистический и эргономический. В основе данных методов лежит расчёт коэффициентов травматизма: коэффициент частоты ($K_{\text{ч}}$), коэффициент тяжести ($K_{\text{т}}$), коэффициент со смертельным исходом ($K_{\text{с}}$), коэффициент потерь ($K_{\text{п}}$).

Для реализации управления уровнем риска травматизма необходимо знать значение не только этих коэффициентов, но и относительной величины уровня риска травматизма, по которой мы можем определять, является ли исследуемая фактическая величина уровня риска травматизма «положительной» или «отрицательной», т. е. превышает ли исследуемый уровень риска ориентировочное значение или находится в пределах допустимых норм.

Существуют относительные характеристики, применяемые в развитых странах, которые мы можем выбрать в качестве относительной оценки, характеризующей способность эффективного функционирования системы.

На функционирование предприятия влияет множество как внешних, так и внутренних аспектов, поэтому эффективная деятельность системы – это не точка, а область значений показателей, в которую следует стремиться. Если система способна длительно находиться в этой области, такую деятельность системы можно считать устойчивой. Уровень риска – это не что иное, как аккумуляция баланса сил и интересов как внутри самой системы, так и вне её. Можно предположить, что для разных систем (стран, городов) уровень допустимого риска имеет своё значение и это зависит от уровня развития системы, её социального и экономического благополучия. Чем выше уровень развития системы, чем более эффективно она функционирует, соответственно, тем меньше значение допустимого риска.

На рис. 1 изображена схема комплексных решений по систематизации несчастных инцидентов и происшествий для последующего расчёта критериев травматизма.

На рис. 2 наглядно представлена схема показателей и коэффициентов травматизма, принятых в общемировой и Российской системе учёта несчастных случаев.

В статье в качестве объекта исследования рассмотрим одно из металлургических предприятий, поскольку львиную долю экономики составляет именно металлургическое производство. Оно объединяет предприятия судостроения, авиационной, электротехнической промышленности, производство подъёмно-транспортного оборудования, оборудования для пищевой промышленности, производство транспортных средств.

В работе проведён анализ состояния травматизма по годам. На рис. 3 представлено общее количество несчастных случаев за период с 2018 по 2022 год.

Применим математическую модель прогнозирования производственного травматизма, главной задачей которой является установление закономерностей, вызывающих несчастные случаи.

Установленные категории риска травматизма позволят расставить приоритеты при разработке комплексных мероприятий по снижению уровня производственного травматизма и распределении денежных средств на их реализацию, а также разработать персонализированные мероприятия для конкретных работников.

В целях решения проблем травматизма используем данные исследуемой группы работников за определённый период времени и применим вейвлет-анализ. В области линейного преобразования, представленного функцией времени и частот, выделяются сигналы, недоступные в исходном виде. Мы рекомендуем использовать распределение по самоподобным функциям через прямое вейвлет-преобразование:

$$W_s(a, b) = (s(t), \psi_{ab}(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt,$$

где t – ось времени; b – момент времени; $\psi(t)$ – вейвлет-функция; $s(t)$ – параметр, обратный частоте; (*) означает комплексно-сопряжённое.

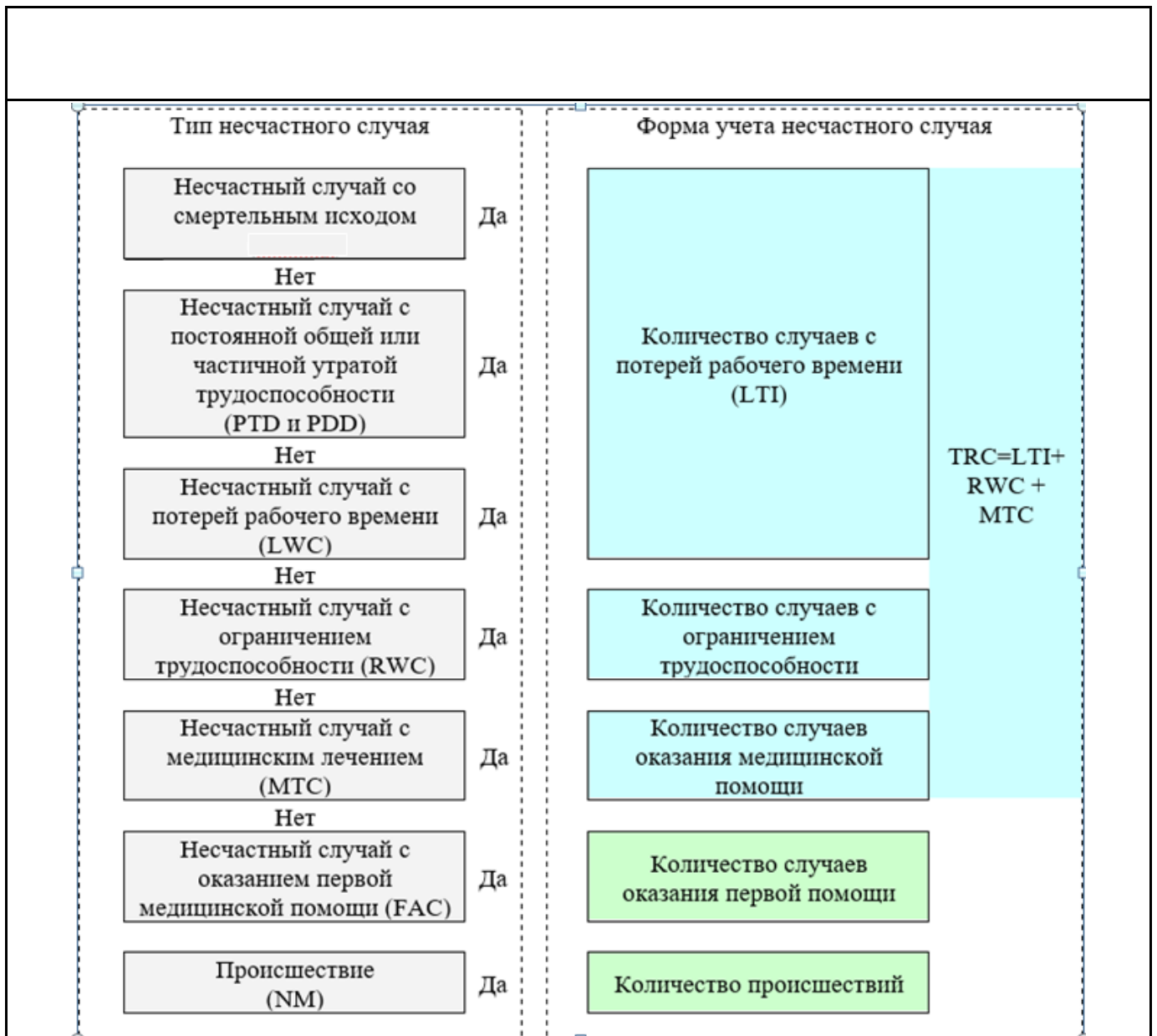


Рис. 1. Схема комплексных решений

Используем совокупность алгоритмического вычисления для вейвлет-преобразования во временной и частотной областях.

Для временной области рекомендуется применять следующий метод расчёта. Вначале определяем материнский вейвлет. Введём допущения, что имеется функция, удовлетворяющая нужным критериям: $\psi_0(\eta)$, где η – безразмерный период.

Показатели и коэффициенты					
Fatality					K_c
PTD и PDD	$LTI, LTIF$	$TRC, TRCF$	K_w	K_{II}	
LWC					K_T
RWC					
MTC					
FAC					
NM					

Рис. 2. Схема показателей и коэффициентов

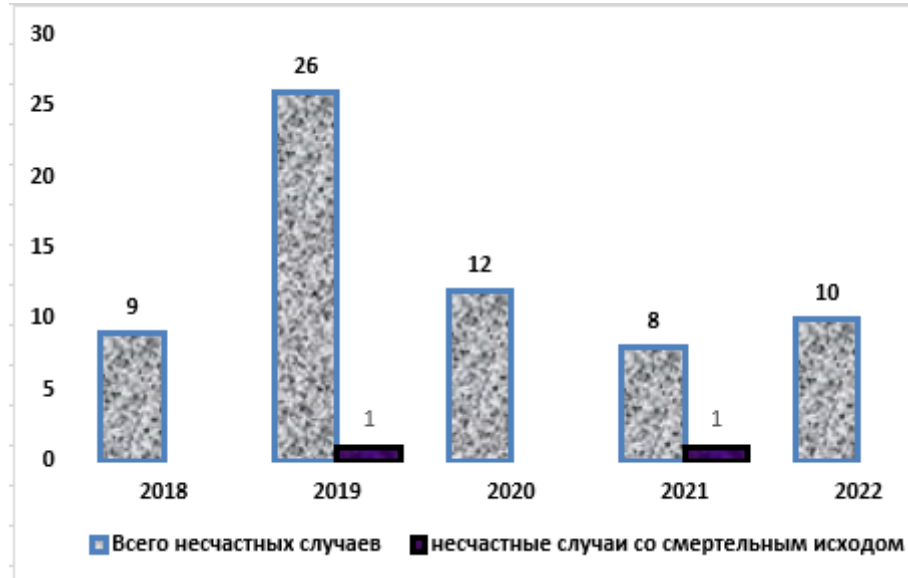


Рис. 3. Общее количество несчастных случаев

Имеются значения x_n , в моменты времени $n[0, N-1]$, где N – количество измерений и основная формула для материнского вейвлета; необходимо по возможности изменять размеры вейвлета. С этой целью строим «масштабированный» вейвлет следующего вида:

$$\Psi\left(\frac{(n'-n)dt}{a}\right) = \left(\frac{dt}{a}\right)^{1/2} \Psi_0\left(\frac{(n'-n)dt}{a}\right),$$

где a – параметр, обратный частоте.

Вычисление вейвлет-преобразования является свёрткой искомой временной серии с функцией-вейвлетом:

$$W_n(a) = \sum_{n'-1}^{N-1} x_{n'} \Psi * \left(\frac{(n'-n)dt}{a}\right),$$

где (*) означает комплексно-сопряжённое.

Результатом расчёта $W_n(a)$ будет комплексное число.

В частотной области предлагается использовать следующий алгоритм вычисления. Изначально определяем материнский вейвлет. Преобразование Фурье самого вейвлета сконцентрировано вокруг некоторой выделенной частоты $\omega_0 \neq 0$. Поэтому преобразование Фурье вейвлета, который растянут в a раз, сконцентрируется вокруг частоты ω_0 / a :

$$W_n(a) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \hat{\Psi} * (a\omega_k) e^{i\omega_k n dt},$$

где (*) означает комплексно-сопряжённое, а знак (^) – преобразование Фурье;

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i k n / N},$$

$$\hat{\Psi}(a\omega_k) = \left(\frac{2\pi a}{dt}\right)^{1/2} \hat{\Psi}_0(a\omega_k).$$

Для вычисления дискретного вейвлет-преобразования предлагается применение следующего вычислительного комплекса, основанного на свойстве вейвлетов по эффективной обработке случайных сигналов.

Идея вейвлет-представления сигнала $s(t)$ заключается в разбивке приближения $\tilde{s}_j(t)$ к сигналу на две составляющие: грубую (аппроксимирующую) $\tilde{s}_{j-1}(t_i)$ и утончённую (детализирующую) $\tilde{s}_{j-1}^d(t_i)$ – с последующим их уточнением итерационным методом:

$$\tilde{s}_j(t_i) = \tilde{s}_{j-1}(t_i) + \tilde{s}_{j-1}^d(t_i) = \sum_{k \in Z} a_{j-1,k} \phi_{j-1,k}(t_i) + \sum_{k \in Z} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(t_i),$$

где j характеризует уровень разрешения; $\phi_{j-1,k}(t_i), \psi_{j-1,k}(t_i)$ – соответственно масштабирующая (аппроксимирующая) и вейвлет-функция (детализирующая функция); $Z = \{\dots, -1, 0, 1, \dots\}$ – множество целых чисел; $a_1 = \{a_{j-1,k}\}$, $d_1 = \{d_{j-1,k}\}$ – соответственно наборы аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов разложения $(j-1)$ уровня разрешения.

Аппроксимирующие функции $\phi(t)$ – множество целых чисел. Аппроксимирующие функции $\phi(t)$ присущи далеко не всем вейвлетам, а только тем, которые относятся к ортогональным. Приближению соответствует начальный набор коэффициентов $a_0 = \{a_{j,k}\}$. В качестве $a_0 = \{a_{j,k}\}$ выбираем массив значений сигнала $s(t), a_{ji} = s(t_i)$.

Повторяя процедуру m раз, $m = 1..M$, разлагая каждый раз сглаженную функцию $\tilde{s}_{j-m}(t_i)$ на ещё более сглаженную часть $\tilde{s}_{j-m-1}(t_i)$ и детализирующую часть $\tilde{s}_{j-m-1}^d(t_i)$, получим вейвлет-разложение аппроксимации j -го уровня разрешения $\tilde{s}(t)$ для глубины разложения m :

$$\tilde{s}_j(t_i) = \tilde{s}_{j-m}(t_i) + \tilde{s}_{j-m}^d(t_i) + \dots + \tilde{s}_{j-1}^d(t_i);$$

$$\tilde{s}_j(t_i) = \sum_{k \in Z} a_{j-m,k} \phi_{j-m,k}(t_i) + \sum_{k \in Z} d_{j-m,k} \psi_{j-m,k}(t_i) + \dots + \sum_{k \in Z} d_{j-1,k} \psi_{j-1,k}(t_i).$$

Вейвлет-разложение изобразим в виде следующей схемы нахождения коэффициентов:

$$\tilde{s}_j(t_i) = a_0 \rightarrow \{a_1, d_1\} \rightarrow \{a_2, d_2, d_1\} \rightarrow \dots \rightarrow \{a_M, d_M, d_{M-1}, \dots, d_1\}.$$

Практическая обработка и представление реальных сигналов базируются на трактовке вейвлет-преобразований в частотной области и позволяют плодотворно использовать аппарат частотной фильтрации и методы быстрого вейвлет-преобразования.

Графическое представление обработки сигнала представлено на рис. 4.

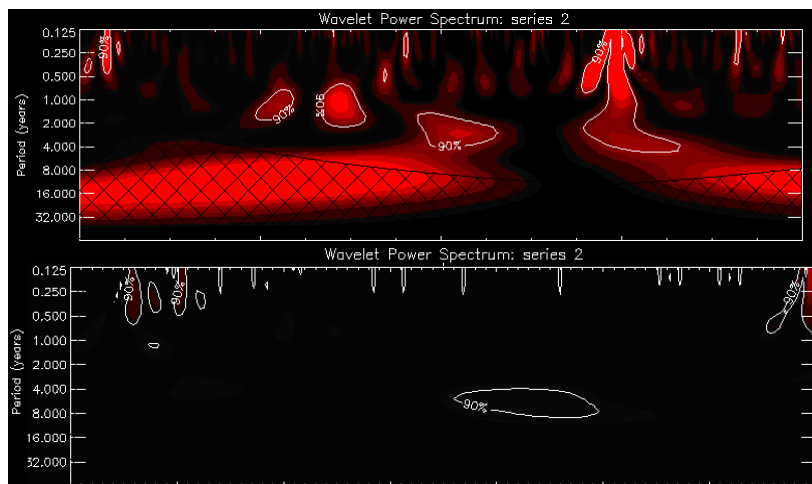
По результатам обработки массива данных применительно к предложенной модели получили, что самыми травмоопасными профессиями являются следующие профессии: слесарь-ремонтник, электромонтёр, ИТР и подручный сталевара, газорезчик и электросварщик, оператор машин. Все эти профессии связаны со сложными условиями работы, т. к. требуются постоянное внимание и опыт работы.

На основе вышеисследованных факторов можно провести суперпозиционирование групп риска путём наложения полученных графиков. При анализе уровня риска по профессиям в группу риска попали следующие профессии: шихтовщик, кузнец, прессовщик лома и отходов, обжигальщик извести, подручный сталевара.

Разделим всех работников на категории опасности травмирования.

1-я категория – «Чрезвычайно травмоопасная». В эту категорию вошла группа работников, занятых на производстве по профессии подручный сталевара. Данная группа является самой трав-

моопасной, необходимо применять не только меры предосторожности во время работы, но и превентивные меры.



Участок яркого цвета – максимальная вероятность появления травм.
Участок тёмного цвета – минимальная вероятность возникновения травм

Рис. 4. Вейвлет-спектры

2-я категория – «Высоко травмоопасная». В эту категорию вошли группы работников, занятых на производстве по следующим видам профессий: шихтовщик, газорезчик и электросварщик, электромонтёр, оператор машин, слесарь-ремонтник, ИТР.

3-я категория – «Умеренно травмоопасная». В эту категорию попали группы работников: кузнец, прессовщик лома и отходов, огнеупорщик, разлищик стали, машинист. Это группы работников, которые попали в травмоопасную зону по 3 факторам.

4-я категория – «Малотравмоопасная» – группа работников, попавших в травмоопасную зону по 2-3 факторам. При этом также необходимо учитывать степень важности факторов. Это такие профессии, как вальцовщик, обжигальщик извести, станочник, сталевар, кладовщик, котельщик, водитель, уборщик.

Для более углублённого анализа производственного травматизма проведём позиционирование по таким факторам, как подразделение, причины несчастных случаев и факторы, повлиявшие на образование несчастного случая.

Высокий уровень риска производственного травматизма создают такие причины, как неудовлетворительная организация работ и рабочих мест, личная неосторожность работников предприятия, нарушение инструкций по технике безопасности и недостаточность обучения персонала безопасным методам работы. Наиболее опасным производственным фактором является воздействие движущихся, вращающихся механизмов и движущихся, вращающихся и разлетающихся деталей, падение предмета, затем – воздействие вредных веществ и падение пострадавшего.

Основные направления разработки плана мероприятий:

- модернизация оборудования и транспортных средств;
- внедрение дистанционного управления оборудованием, подъёмно-транспортными средствами;
- совершенствование технологических процессов;
- изменение последовательности операций с перепланировкой рабочих мест;
- улучшение инженерно-технических средств безопасности (монтаж ограждений, предохранительных устройств, установка сигнальных цветов и знаков безопасности);
- общее улучшение условий труда;
- улучшение состояния воздушной среды, освещённости рабочих мест, борьба с шумом и вибрацией.

Материально-техническое обеспечение и приобретение:

- приборов для контроля за вредными факторами;
- СИЗ;
- сатураторных установок;
- моющих средств.

Предложенные в работе эффективные мероприятия позволяют добиться улучшения условий труда и снижения производственного травматизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко, Е. Г. Программа оценки результативности систем менеджмента качества предприятия / Е. Г. Кравченко, А. А. Китаева, Н. Ю. Коровина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 13-18.
2. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон РФ от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 07.03.2017) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/9046058> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
3. Об утверждении Рекомендаций по организации работы Службы охраны труда в организации: Постановление Минтруда России от 08 февраля 2000 г. № 14 (ред. от 12.02.2014) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901758673> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
4. Трудовой кодекс Российской Федерации: Федеральный закон РФ от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901807664> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
5. Носенко, А. М. Исследование и методология оценки профессиональных рисков в организациях нефтехимического комплекса / А. М. Носенко // Электронное периодическое издание «Аллея науки». – 2018. – № 5. – URL: http://alleyscience.ru/domains_data/files/514MAY2018/ISSLEDOVANIE%20I%20METODOLOGIYa%20OCENKI%20PROFESSIONALNYH%20RISKOVI%20V%20ORGANIZACIYaH%20NEFTEHIMICHESKOGO%20KOMPLEKSA.pdf (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный.
6. ГОСТ Р 12.0.230-2007. Система стандартов безопасности труда. Система управления охраной труда. Общие требования = Occupational safety standards system. Occupational safety and health management systems. General requirements: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 июля 2007 г. № 169-ст // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200052851> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
7. Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: Федеральный закон РФ от 24 июля 1998 г. № 125-ФЗ (ред. от 07.03.2018) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901713539> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
8. Об организации и осуществлении производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасном производственном объекте: Постановление Правительства РФ от 10 марта 1999 г. № 263 (ред. от 28.02.2018) // Справочно-правовая система «Техэксперт». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901728088> (дата обращения: 15.10.2023). – Текст: электронный. – Режим доступа: по подписке.
9. Денисов, Э. И. Управление профессиональными рисками: прогнозирование, каузация и биоинформационные технологии / Э. И. Денисов, Л. В. Прокопенко, И. В. Степанян // Вестник РАМН. – 2012. – № 6. – С. 51-56.
10. Соколова, Л. А. Оценка и управление профессиональным риском нарушения здоровья работников промышленного комплекса г. Архангельска / Л. А. Соколова, Л. В. Прокопенко // Медицина труда и промышленная экология. – 2009. – № 8. – С. 25-29.
11. Иванов, В. М. Интеллектуальные системы: учеб. пособие для вузов / В. М. Иванов; под науч. ред. А. Н. Сесекина. – М.: Юрайт, 2017. – 91 с.
12. Кудрявцев, К. Я. Методы оптимизации: учеб. пособие для вузов / К. Я. Кудрявцев, А. М. Прудников. – 2-е изд. – М.: Юрайт, 2019. – 140 с.