

DOI 10.15589/jnn20150412  
УДК 621.318  
P15

## ASSESSMENT OF TECHNOGENIC RISK OF HAZARDOUS MANUFACTURES EQUIPMENT USING MULTILEVEL SYSTEM ANALYSIS

### ОЦЕНКА ТЕХНОГЕННОГО РИСКА ОБОРУДОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ СИСТЕМНЫМ МНОГОУРОВНЕВЫМ АНАЛИЗОМ

Oleksandr V. Radionov  
ferrohydrodynamica@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-1112-5146

А. В. Радионов  
канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

**Abstract.** The analysis of major accidents of the last decade in the electric-power and coal industries has been carried out. It is shown that the common feature of these technogenic disasters was the accidents beginning with mechanical damage. A failure of a minor supporting element with a subsequent cascade development turned into a national catastrophe. It is shown that the cause of the failure for many types of processing equipment was the improper performance of the seals. The problem can be solved by using magnetic fluid sealing complexes. To compare the level of technogenic safety when using MFSC and traditional sealing systems, the advanced risk assessment method is suggested. It was developed due to the system analysis of sealing equipment complexes of hazardous manufactures for normal excitation synchronous motors at different operating conditions, power and rotating shaft speed. The assessment of technogenic risk shows that the level of technogenic hazard at the implementation of MFSC decreases by 1,5...4 times.

**Keywords:** technogenic risk; magnetic fluid sealing complex; safety.

**Аннотация.** Проведен анализ крупных аварий последнего десятилетия в электроэнергетике и угольной промышленности. Показано, что для многих видов технологического оборудования причиной отказа была неудовлетворительная работа уплотнений. Решение этой проблемы возможно применением магнитожидкостных герметизирующих комплексов. Для сравнения уровня техногенной безопасности при применении магнитожидкостных герметизирующих комплексов и традиционных уплотнительных систем предлагается усовершенствованный метод оценки риска, развитый за счет системного анализа герметизирующих комплексов оборудования опасных производств для синхронных электродвигателей типа СДН при различных режимах эксплуатации, мощности и оборотах вращающегося вала. Оценка техногенного риска показывает, что уровень техногенной опасности при внедрении герметизаторов снижается в 1,5...4 раза.

**Ключевые слова:** техногенный риск; магнитожидкостный герметизирующий комплекс; безопасность.

**Анотация.** Проведено аналіз великих аварій останнього десятиліття в електроенергетиці й вугільній промисловості. Показано, що для багатьох видів технологічного обладнання причиною відмови була незадовільна робота ущільнень. Вирішення цієї проблеми можливе застосуванням магніторідинних герметизуючих комплексів. Для порівняння рівня техногенної безпеки при застосуванні магніторідинних герметизуючих комплексів і традиційних ущільнювальних систем пропонується вдосконалений метод оцінки ризику, розвинутий за рахунок системного аналізу герметизуючих комплексів обладнання небезпечних виробництв для синхронних електродвигунів типу СДН при різних режимах експлуатації, потужності і оборотах обертового вала. Оцінка техногенного ризику показує, що рівень техногенної небезпеки за умови впровадження герметизаторів знижується в 1,5...4 рази.

**Ключові слова:** техногенний ризик; магніторідинний герметизуючий комплекс; безпека.

#### REFERENCES

- [1] Belov P. G. *Upravlenie riskami, sistemnyi analiz i modelirovanie* [Risk management, system analysis and modeling]. Moscow, Yurayt Publ., 2014. 728 p.
- [2] Belov S. A., Litvak V. V., Solod S. S. *Nadezhnost teploenergeticheskogo oborudovaniya TES* [Reliability of TPP thermal power equipment]. Tomsk, NTL Publ., 2008. 218 p.

- [3] Vambol S. A., Metelev A. V. *Sistema ekologicheskoy bezopasnosti s mnogofaznymi dispersnymi strukturami* [Environmental safety system with multiphase dispersion structures]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti — Technosphere safety technology*, 2013, no. 5, issue 49, pp. 1–7. Available at: <http://ipb.mos.ru/ttb>.
- [4] Kalkis V., Kristinsh I., Roy Zh. *Osnovnye napravleniya otsenki riskov rabochey sredy* [Main approaches of work environment risk assessment]. Riga, SIA «Jelgavas tipografija» Publ., 2005. 74 p.
- [5] Koval A. N., Melkovskiy V. I., Chekhlaty N. A. *Osnovnye napravleniya povysheniya tehnogennoy bezopasnosti i energeticheskoy effektivnosti statsionarnykh ustanovok na predpriyatiyakh ugolnoy otrasli* [Main directions of the improvement of technological safety and energetic efficiency of the fixed installations at coal industry facilities]. *Vestnik MANEB — Bulletin MANEB*. 2013, no. 2, pp. 23–28.
- [6] Likholetov V. V. *Sistemnyy analiz i proektirovanie sistem upravleniya* [System analysis and design of control systems]. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 2004. 160 p.
- [7] Khabaznya A. S., Radionov A. V., Vinogradov A. N., Kazakutsa A. V. *Osobennosti proektirovaniya magnitozhidkostnykh germetizatorov shahtnogo oborudovaniya* [Specific features of magnetic fluid seals of mining equipment]. *Ugol Ukrainy — Coal of Ukraine*. 2010, no. 2, issue 648, pp. 29–33.
- [8] Pavlishchev V. T. *Podshypnyky kochennia: osnovni parametry, konstruksii opor, zماشchuvannia, ushchilnennia ta rozrakhunky resursu* [Rolling bearings: basic parameters, supports constructions, lubrication, sealing and resource calculations]. Lviv, Lvivska politehnika Publ., 2001. 136 p.
- [9] Radionov A. V., Uvarov N. V. *Analiz opyta raboty magnitozhidkostnykh germetizatorov na SGPP «Obedinenie «Azot»* [Analysis of the experience in the magnetic fluid seals use at private agricultural company “Azot” association]. *Khimicheskaya tekhnika — Chemical Engineering*. 2003, no. 9, pp. 26–28.
- [10] Radionov A. V., Ryzhkov S. S. *Magnitozhidkostnye germetiziruyushchie komplekсы* [Magnetic fluid sealing complexes]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUS*. 2013, no. 4, pp. 44–50.
- [11] Radionov A. V. *Opyt ekspluatatsii magnitozhidkostnykh germetizatorov v promyshlennoy energetike* [Experience in the use of magnetic fluid seals in industrial power industry]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka — Mining Electromechanics and Automatics*. 2011, issue 87, pp. 134–138.
- [12] Radionov A. V., Vinogradov A. N. *Kombinirovannyye magnitozhidkostnye germetizatory — effektivnaya alternativa beskontaktnym uplotnениyam podshipnikovyykh uzlov s zhidkoy smazkoy* [Combined magnetic fluid seals as an effective alternative to non-contact bearing assemblies seals with liquid lubrication]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn — Mineral processing*. 2009, no. 35, issue 76, pp. 148–155.
- [13] Manets I. H., Hriadushchyi B. A., Levit V. V. et al. *Tekhnichne obsluhovuvannia ta remont shakhtnykh stovburiv* [Maintenance of mine shafts]. Donetsk, Yugo-Vostok Publ., 2010, vol. 1. 409 p.
- [14] Tolmachev V. V., Fedorova I. N. *Model dlya opredeleniya znachimosti riska ekspluatatsii bezshovnykh ballo-nov* [Model for the determination of the significance of the risk of seamless cylinders operation]. Available at: <http://asms.ru/kompet/2012/novbec/tolmachev42.pdf>.
- [15] Toporov A. A. *Novyy podkhod k analizu tekhnogenno opasnykh situatsiy na tekhnologicheskikh proizvodstvakh* [New approach to the analysis of technogenic hazardous situations at technological manufactures]. *Naukovi pratsi DonNTU. Seria: Khimiia i khimichna tekhnolohiia* [Scientific Publications of Donetsk National Technical University. Series: Chemistry and Chemical Engineering]. 2005, issue 95, pp. 126–130.
- [16] Chermenskiy O. N., Fedotov N. N. *Podshipniki kacheniya* [Rolling bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 576 p.
- [17] Shmandiy V. M., Starovoyda A. L. *Otsenka tekhnogennoy opasnosti, formiruemoй promyshlennymi predpriyatiyami* [Assessment of technogenic hazard formed by industrial enterprises]. *Visnyk KDPU — Bulletin KSPU*. 2002, no. 2, issue 13, section 2, pp. 77–80.
- [18] Marhavalas P. K., Koulouriotis D., Gemeni V. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, no. 24, pp. 477–523.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Итогом научно-технического прогресса в развитых странах явилось образование экологически опасных объектов, к которым относятся электростанции, металлургические, химические, нефтехимические и горнодобывающие предприятия, нефте- и газопроводы.

Существенно больший вред окружающей среде при кратковременных и долговременных последствиях оказывают не стационарные вредные выбросы этих объектов, а аварийные ситуации, которые в ряде случаев носят глобальный характер.

Для Украины экологическая ситуация усугубляется тем, что физическое и моральное старение оборудования все последние годы значительно опере-

жает темпы его замены и обновления [13]. В результате износ основных средств по вышеуказанным отраслям опасных производств характеризуется в пределах 50–90%, а обновление парка действующего оборудования в силу экономических причин затруднительно [5].

Анализ крупных аварий последнего десятилетия в электроэнергетике и угольной промышленности в США, России, Франции, Индии, Италии и Украине показывает, что в большинстве случаев их непосредственными причинами были механические неисправности. Общей чертой техногенных катастроф, вызванных механическим повреждением, являлось начало аварии с отказа вспомогательного, малозначительного элемента с последующим каскадным развитием в национальную катастрофу [2].

Статистические данные свидетельствуют, что для многих видов оборудования, широко применяющихся на вышеуказанных предприятиях (электродвигатели, редукторы, мешалки, вентиляторы и т. д.), наработка на отказ чаще всего определяется надежностью подшипниковых узлов [16].

В свою очередь, до 90 % случаев аварийных разрушений подшипниковых узлов вызвано неудовлетворительной работой уплотнений [8].

Анализ выхода из строя подшипниковых узлов обнаружил, что одной из причин стала невозможность обеспечения практически полной герметичности. Потенциальные возможности традиционных уплотнений в значительной мере себя исчерпали и обеспечить необходимый уровень герметичности не в состоянии.

Достаточно хорошо себя зарекомендовали для защиты подшипниковых узлов при тяжелых условиях эксплуатации (сильная запыленность, повышенная влажность, наличие абразивных частиц и т. д.) магнитожидкостные герметизирующие комплексы (МЖГК).

Наиболее широко МЖГК устанавливались в электродвигателях вентиляторов градирен и аппаратов воздушного охлаждения, электрических машинах и вентиляторах, поворотных редукторах угледобывающих и проходческих комбайнов и т. д. [7, 10, 11, 12].

Анализ проведенных испытаний, опытной и промышленной эксплуатации показывает снижение риска аварий уплотнительных систем, включающих МЖГК, по сравнению с традиционными уплотнениями за счет повышения безотказности и безаварийности работы технологического оборудования. Однако количественную оценку риска техногенных аварий можно дать только с учетом системного многоуровневого анализа.

Очевидно, что при оценке техногенной безопасности следует принимать во внимание общие принципы интегрированной системы рисков, включающей следующие компоненты — качество, безопасность, экология, охрана труда, которые регламентируются международными стандартами серий ISO 9000, 14000 и 18000.

Кроме того, нужно учитывать, что уровень техногенной безопасности является системной категорией. Сущность системной методологии состоит в трактовке безопасности как функционального свойства сложных динамических многоуровневых систем. Это связано с тем, что свойство системы есть нечто большее, чем простая сумма свойств ее компонентов. В общем случае методы системного анализа и синтеза рассматривают технологическое оборудование как одну из составных частей общей системы «человек–машина–окружающая среда». Изучение такой системы представляет собой задачу большой информационной сложности, однако является необходимым, т. к. анализируемая система содержит носители всех типов предпосылок к происшествиям — ошибок (человек), отказов (техника) и неблагоприятных воздействий на них извне (рабочая и внешняя среда).

Для анализа влияния на безопасность МЖГК применим принцип системности, который предполагает подход к новой технике как к комплексному объекту, представленному совокупностью взаимосвязанных частных элементов (функций), реализация которых обеспечивает достижение нужного эффекта. Кроме того, принцип системности предусматривает исследование объекта, с одной стороны, как единого целого, а с другой — как части более крупной системы, в которой анализируемый объект находится с остальными системами в определенных отношениях. Таким образом, принцип системности охватывает все стороны объекта [6], что позволяет преобразовать общую систему в трехуровневую иерархическую: «магнитожидкостный герметизирующий комплекс — технологическое оборудование — техногенная безопасность». Вопрос влияния МЖГК на обеспечение приемлемой безопасности можно интегрировать в предлагаемую систему как функциональное свойство такого сложного объекта. Важным является также то, что такую систему можно представить в виде модели, удобной для аналитического исследования и синтеза компонентов — подсистем.

В настоящее время нет общепринятого количественного показателя безопасности технического объекта или системы. Однако общепризнано, что пожары, взрывы, травмы и т. д. являются случайными событиями, для описания и количественной оценки которых могут быть применены известные показатели и методы теории вероятностей. Количественные показатели безопасности оборудования связаны с показателями безотказности и безаварийности, математические модели которых разработаны [1].

#### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Проведенный анализ литературных источников [3, 17, 18] показал, что основное внимание научных работ уделено вопросам оценки риска при реализации собственно процессов жизненного цикла продукции. Следует заметить, что вопросы оценки рисков,

возникающих при разработке, внедрении и/или модернизации технологического оборудования и его элементов практически совсем не рассматриваются. Соответственно в литературе очень мало освещаются вопросы климатических и экологических особенностей расположения предприятий, а также существующий технологический уровень в данной отрасли промышленности.

В работе [1], изданной в 2014 г., прямо указывается, что цель последующих исследований должна состоять в оценке степени влияния конкретных свойств человеко-машинной системы на условия проявления и величину техногенного риска, что, в первую очередь, относится к свойствам технических систем. Это связано с тем, что мелкие отказы могут в итоге спровоцировать значительные последствия: накопление скрытых повреждений, старение материалов, резкие качественные изменения вследствие усталостных динамических процессов в конструкциях. Фактор рабочей окружающей среды может оказаться существенным даже для однотипных технических систем в силу «возраста» и особенностей эксплуатации, а то или иное воздействие, нашедшее «уязвимое» звено в технической системе, может привести к цепной реакции отказов.

Основой анализа техногенного риска должно быть не сравнение с критериями приемлемости, а выявление «узких» мест в системе функционирования объекта для последующего обоснования мер безопасности.

На сегодняшний день в мировой практике при оценке рисков широко используются метод анализа видов и последствий потенциальных несоответствий (FMEA-Potential Failure Mode and Effects Analysis). Порядка 80 % разработок технических изделий и технологий проводится с применением метода FMEA или его модификации [18].

Важным для целей данного исследования является то, что указанный метод охватывает все этапы жизненного цикла продукции и любые технологические процессы, причем позволяет анализировать сложные технические системы как в целом, так и их составляющие [15]. С его помощью можно решать прямые и обратные задачи оценки безопасности. Прямые задачи позволяют определить величину риска для конкретного оборудования. Обратные задачи ставят целью обеспечить техническое решение таким образом, чтобы выполнять условие безопасности с заранее заданной количественной мерой риска.

Используя количественные показатели риска, возможно «измерять» потенциальную опасность и даже сравнивать опасности различной природы. К таким методам относится разновидность FMEA — метод Файн-Кинни (Fine & Kinney) [4], согласно которому техногенный риск  $R$  рассчитывается по формуле:

$$R = E \times A \times S, \quad (1)$$

где  $E$  (Existence) — вероятность возникновения опасной ситуации;  $A$  (Avoidance) — вероятность того, что опасная ситуация приведет к нанесению вреда;  $S$  (Severity) — тяжесть последствий.

Фактические величины, входящие в формулу, непрерывны, однако, на практике используют их дискретные значения. Каждому фактору присваивают значения по шкале от 1 до 10 в соответствии с результатами оценки, приведенными в [4, 14, 18] (см. табл. 1, 2).

Этот метод учитывает также степень подверженности человека воздействию вредных факторов при техногенной угрозе. Поэтому его решено было усовершенствовать для оценки техногенного риска.

Величина техногенного риска  $R$  в результате может иметь значения от 1 до 1000. Для  $R$  заранее должен быть установлен критерий  $R_{\text{пред}}$  (граничное значение) техногенного риска. Согласно рекомендациям [18], граничное значение  $R_{\text{пред}}$  задается в пределах  $100 < R_{\text{пред}} < 125$  (как произведение средних оценок  $R_{\text{пред}} = 5 \times 5 \times 5 = 125$ ). Предприятия, давно использующие эту методологию, в особо ответственных случаях работают в диапазоне  $20 < R_{\text{пред}} < 40$  [18].

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — усовершенствование метода оценки техногенных рисков за счет системного многоуровневого анализа герметизирующих комплексов оборудования опасных производств для изучения влияния МЖГК на техногенную безопасность.

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Надежность и достоверность результатов анализа во многом определяется полнотой исходных данных. Исходными данными для анализа были результаты стендовых, опытно-промышленных испытаний и эксплуатации МЖГК на различном технологическом оборудовании. Использовались журналы технического состояния технологического оборудования, где внедрены МЖГК. С учетом срока эксплуатации МЖГК, который на ряде объектов составляет 15–20 лет, получалась достаточно достоверная статистическая выборка по оценке надежности и безаварийности работы оборудования. Также использованы анализы работы МЖГК, проводимые техническими службами заводов, где эксплуатируются МЖГК [9]. Кроме того, технические службы заводов предоставили статистические материалы в виде банка данных по отказам, поломкам, несчастным случаям, авариям, происшедшим по вине традиционных уплотнений (лабиринтные, манжетные и т.д.).

Исходными данными для анализа также стали: полная документация об объекте, его технические характеристики, режимы работы, диапазон изменения параметров, проектировочные, проверочные расчеты физических процессов, протекающих в объекте, данные о различных системах объекта и характер взаимосвязи между системами. Использовались



данные, полученные на других видах оборудования, но имеющие какие-то сходные характеристики. Дополнялись эти сведения имеющимися рекламациями и претензиями потребителей, эксплуатирующих это оборудование, к заводам-изготовителям.

С учетом специфики внедрения МЖГК (в основном либо на дорогостоящем, либо ответственном оборудовании) принято решение о недостаточности накопленной статистической базы для применения методов теории вероятности. В связи с этим проведен качественный анализ с помощью группы методов, также входящих в FMEA, где исходные данные с привлечением экспертных оценок сводятся в квалиметрические табличные шкалы значимости, характеризующие возникновение опасной ситуации и тяжесть ее последствий, что позволяет получать количественные характеристики риска.

Предварительные расчеты по формуле (1) и анализ полученных результатов показал, что ряд факторов, влияющих на уровень техногенной безопасности, не учтен в квалиметрических таблицах 1 и 2, приведенных в [4, 14, 18]. Обеспечить достоверность результатов уровня техногенной безопасности предложено за счет дополнительного учета степени подверженности человека воздействию вредных факторов от механических повреждений и состояния оборудования. Для этого формула (1) преобразована к виду:

$$R = E \times A \times S \times K, \quad (2)$$

где шкала оценки тяжести последствий  $S$  разработана на основе обработки исходных данных, используемых при анализе работы МЖГК, с учетом степени подверженности человека воздействию вредных факторов при механических повреждениях и представлена в табл. 3.

$K = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6$  — поправочные коэффициенты, учитывающие:

$K_1$  — срок эксплуатации оборудования ( $K_1 = 1,0 \dots 1,1$ );

$K_2$  — влияние физического и морального старения оборудования на его ремонт ( $K_2 = 1,0 \dots 1,1$ );

$K_3$  — введение новых технических решений на этапе модернизации ( $K_3 = 0,9 \dots 1,0$ );

$K_4$  — изготовление технологического оборудования, и его комплектующих на сертифицированных участках ( $K_4 = 0,9 \dots 1,0$ );

$K_5$  — коэффициент, учитывающий взаимное расположение опасных объектов ( $K_5 = 1,0 \dots 1,2$ );

$K_6$  — условия обслуживания и наличие резервирования оборудования ( $K_6 = 0,9 \dots 1,0$ ).

Поправочные коэффициенты получены экспертным путем на основании результатов эксплуатации.

В данном случае ввиду того, что подробно анализируется только один вид опасности, связанный с уплотнительными системами, целесообразно рассматривать предельное значение техногенного риска в диапазоне  $15 < R_{\text{пред.}} < 30$ .

Предложенный метод позволяет обосновать выбор мероприятий по обеспечению уровня техногенного риска путем соотношения величины риска, определенного по формуле (2) с предельными значениями категорий риска разработанных автором на основе условий эксплуатации оборудования опасных производств и изложенных в табл. 4.

Результаты расчетов техногенных рисков согласно формуле (2) на примере синхронных электродвигателей типа СДН, выпускаемых АО «Завод крупных электрических машин» («ЗКЭМ») (г. Новая Каховка), при комплектации выносных подшипниковых стоек лабиринтными уплотнениями и МЖГК представлены на рисунках 1, 2, 3. Указанные электродвигатели применяются в качестве привода для водяных, шламовых насосов; цементных, углеразмольных, рудоразмольных и других промышленных мельниц; шахтных вентиляторов главного проветривания; на магистральных нефте- и газопроводах и т.д. Они могут эксплуатироваться как в помещениях, так и на открытом воздухе. Окружающая среда при эксплуатации синхронных машин может содержать значительное количество влаги, пыли, абразива (цементная, угольная пыль,

**Таблица 1.** Шкала оценки вероятности возникновения опасной ситуации,  $E$

Критерий вероятной последовательности события или случайного обстоятельства	Оценка $P_1$ , балл
Один раз в течение срока эксплуатации (20 лет)	1
Один раз между освидетельствованиями (5 лет)	2
Пять раз между освидетельствованиями — ежегодно	3
Десять раз между освидетельствованиями — два раза в год	4
Ежемесячно	5
Два раза в месяц	6
Еженедельно	7
Два раза в неделю	8
Ежедневно	9
Постоянное присутствие опасности	10

**Таблица 2.** Шкала оценки вероятности причинения вреда,  $A$

Критерий вероятности причинения вреда, $P_2$	Оценка $P_2$ , балл
Ничтожная (совершенно невозможно)	1
Незначительная (практически невозможно)	2
Весьма небольшая (почти невозможно)	3
Небольшая (вероятность немного менее 50 %)	4
Умеренная (вероятность около 50 %)	5
Большая (вероятность приблизительно 50–60 %)	6
Весьма большая (вероятно)	7
Высокая (очень вероятно)	8
Очень высокая (почти гарантировано)	9
Определенная (неизбежно)	10

штуб и т. д.). Из рис. 1 видно, что условия эксплуатации электродвигателей одинакового года выпуска (начала 90-х гг.), одинаковой мощности и оборотов вращающегося вала достаточно сильно влияют на уровень техногенного риска. Более комфортные условия эксплуатации у привода водяных насосов, расположенных в закрытых помещениях. Это иллюстрируется низким уровнем риска и, наверное, объясняет тот факт, что МЖГК для таких условий не устанавливались.

Потребность во внедрении МЖГК для всех других электродвигателей существует на заводах постоянно. Наиболее тяжелые условия эксплуатации у шахтных вентиляторов главного проветривания, т. к. при этом обязательно происходит налипание пыли на поверхность лопаток, что приводит к дисбалансу ротора и появлению повышенной вибрации подшипниковых узлов. Это немного увеличивает величину техногенного риска для МЖГК.

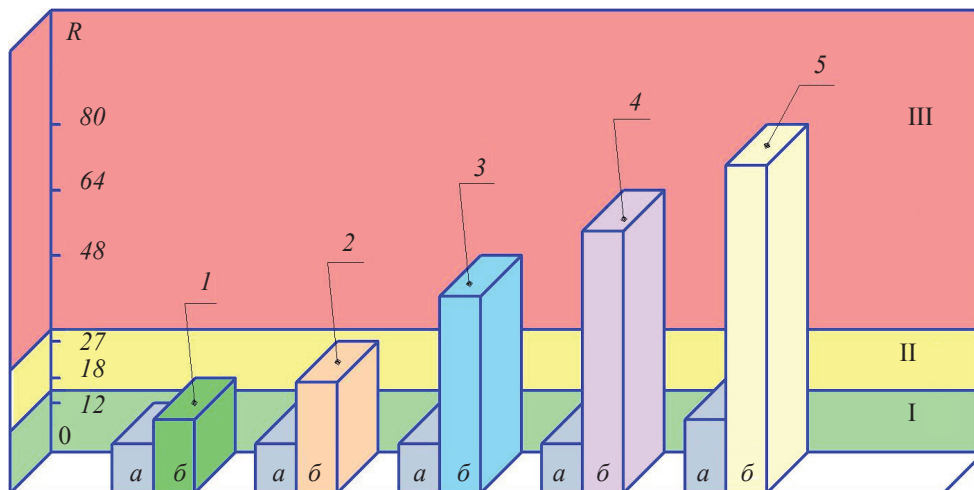
Таблица 3.\* Шкала оценки тяжести последствий S

Критерий тяжести последствий, S		Оценка S, балл
Для человека	Для технологического оборудования	
Травмы, ранения, ожоги или ушибы отсутствуют	Функциональный сбой в оборудовании или процессе без потенциальной опасности	1
Небольшие повреждения и полное восстановление без необходимости отсутствия на рабочем месте	Достаточно имеющиеся технические средства и защитные мероприятия	2
Полное восстановление и возвращение после отсутствия на рабочем месте менее 3 дней	Необходимость проведения стандартных процедур в сфере ремонта, экологической безопасности и охраны труда	3
Полное восстановление и возвращение после отсутствия на рабочем месте от трех дней до трех недель	Частичное повреждение оборудования, необходимость ремонта с заменой комплектующих, быстрая ликвидация повреждений	4
Полное восстановление и возвращение после отсутствия на рабочем месте более трех недель	Частичное повреждение оборудования, необходимость ремонта с заменой комплектующих, невозможность быстрой ликвидации повреждений	5
Возвращение на рабочее место после отсутствия более трех недель, проблемы со здоровьем	Серьезное повреждение оборудования, необходимость специальных мер защиты и безопасности, длительное время для устранения последствий	6
Постоянное слабое снижение способности к трудовой деятельности	Невозможность полного восстановления оборудования, отсутствие условий придерживаться ряда технических характеристик (например, повышение вибрации и т. д.) при эксплуатации оборудования	7
Постоянная серьезная инвалидность	Разрешение эксплуатации оборудования на ограниченный срок специальным сертификационным центром либо отраслевым институтом, имеющим соответствующую лицензию после устранения всех полученных от них замечаний	8
Постоянная полная инвалидность	Авария, невозможность восстановления оборудования, возможность серьезных последствий для окружающей среды	9
Смерть	Техногенная катастрофа	10

\* Для определения техногенного риска R выбирается более весомый критерий тяжести последствий S

Таблица 4. Категория риска

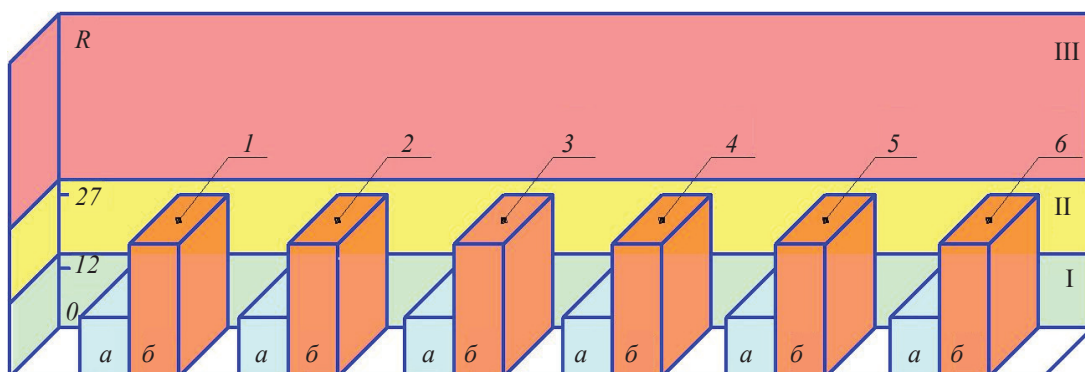
Категории риска	Техногенный риск, R	Описание и необходимые мероприятия
I. Незначительный риск	$\leq 15$	Специальные мероприятия не нужны. Документировать риски необязательно
II. Приемлемый риск	15–30	Специальные мероприятия для уменьшения риска не нужны, но рекомендуется оценить, какие мероприятия могли бы быть реализованы с минимальными затратами. Риск все же необходимо контролировать
III. Терпимый риск	30–125	Необходимы мероприятия для уменьшения риска, но их необязательно реализовывать немедленно, необходимо принимать во внимание экономические соображения. Мероприятия необходимо проводить, по крайней мере, в течение 3–5 месяцев после оценки риска
IV. Значительный риск	125–400	Работу нельзя продолжать, пока не приняты меры для уменьшения или устранения риска. Если работу невозможно прервать, то мероприятия (коллективные) необходимо провести в течение 1–2 месяцев в зависимости от количества работников, подверженных риску. Необходимо своевременно приобрести средства индивидуальной защиты
V. Недопустимый риск	$\geq 400$	Уменьшение риска обязательно. Если из-за недостатка средств нет возможности осуществить превентивные мероприятия, то работа в опасной зоне категорически запрещается



**Рис. 1.** Зависимость техногенного риска электродвигателей типа СДН в зависимости от его назначения:

*a* — с комплектацией МЖГК; *б* — с комплектацией лабиринтными уплотнениями;

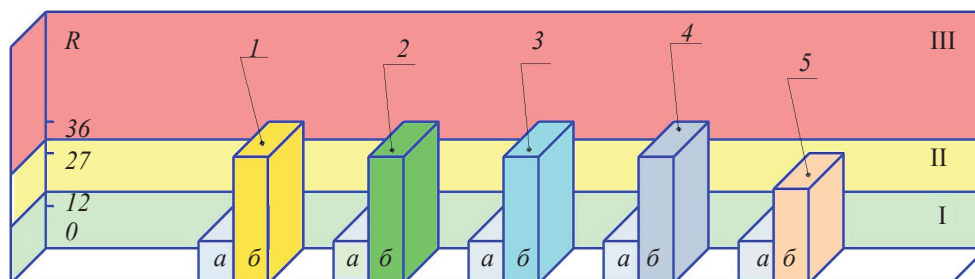
1 — для привода водяных насосов в закрытых помещениях; 2 — для привода водяных насосов на открытом воздухе; 3 — для привода цементных мельниц; 4 — для привода углеразмольных мельниц; 5 — для привода шахтных вентиляторов



**Рис. 2.** Техногенный риск электродвигателей серии СДН-14 и СДН-15 с различным диапазоном мощности:

*a* — с комплектацией МЖГК; *б* — с комплектацией лабиринтными уплотнениями;

1 — при мощности 800 кВт; 2 — при мощности 1,25 МВт; 3 — при мощности 1,25 МВт; 4 — при мощности 1,6 МВт; 5 — при мощности 2,5 МВт; 6 — при мощности 3,2 МВт



**Рис. 3.** Зависимость техногенного риска электродвигателей типа СДН в зависимости от частоты вращения вала:

*a* — с комплектацией МЖГК во всем диапазоне частот; *б* — с комплектацией традиционными уплотнениями;

1 — 375 об/мин; 2 — 500 об/мин; 3 — 600 об/мин; 4 — 750 об/мин; 5 — 1000 об/мин

Возможность МЖГК обеспечить практически полную герметичность позволяет поддерживать техногенную безопасность на постоянном и достаточно высоком уровне.

Далее проанализирован техногенный риск при применении электродвигателей серий СДН-14 и СДН-15 при 1000 об/мин и различным диапазоном мощности: 800 кВт; 1,25 МВт; 1,6 МВт; 2,5 МВт; 3,2 МВт, которые использовались в качестве приводов водяных насосов. Оценка риска показала, что при росте мощности электрической машины уровень техногенной безопасности не изменяется, что видно из рис. 2.

Такой результат позволил на следующем этапе проанализировать влияние частоты вращения вала на техногенный риск при примерно одинаковой мощности электродвигателей. Рассматривались электродвигатели серии СДН-14 и СДН-15 выпуска начала 90-х гг. со следующим показателями: 375 об/мин 1000 кВт; 500 об/мин, 1250 кВт; 600 об/мин, 800 кВт; 750 об/мин, 1250 кВт; 1000 об/мин, 1000 кВт. Анализ результатов рис. 3 показывает незначительное влияние увеличения оборотов вращающегося вала на техногенный риск. Увеличенный риск при небольших оборотах связан с тем, что конструктивно на них применяются манжетные уплотнения, которые оказались менее надежными, чем лабиринтные. Этот вывод применим только к данному конкретному случаю, т. к. изучались электродвигатели, эксплуатирующиеся около 20...25 лет, и у них за счет износа эффективность манжетного уплотнения понизилась. Техногенный риск при использовании МЖГК практически не зависит от числа оборотов вращающегося вала.

Анализ проведенных расчетов показывает, что все исследуемые электродвигатели попадают в зону терпимого риска, поскольку находятся в эксплуатации

и потому должны удовлетворять предъявляемым к ним требованиям, в том числе и по экологической безопасности. При проектировании нового оборудования либо модернизации действующего необходимо стремиться к максимально возможному снижению техногенного риска, т. к. анализ крупных техногенных катастроф последнего времени обнаруживает тот факт, что именно уплотнительные системы зачастую были первым звеном в цепочке отказов, каскадно перерастающих в аварию. Именно поэтому мероприятия в III категории (см. табл. 4) по снижению риска являются актуальными, что подтверждают внедрения МЖГК взамен традиционных уплотнений.

**ВЫВОДЫ.** 1. Анализ крупных техногенных катастроф последнего десятилетия подтверждает, что в большинстве случаев их причинами были механические неисправности многих видов технологического оборудования (особенно их подшипниковых узлов), когда отказ происходит из-за неудовлетворительной работы уплотнительных систем.

2. Обеспечение высокого уровня герметичности достигается применением МЖГК.

3. Сравнение уровней техногенной безопасности при применении различных уплотнительных систем возможно усовершенствованным методом оценки рисков с учетом системного многоуровневого анализа на основе метода Файн-Кинни для трехуровневой иерархической системы «МЖГК – технологическое оборудование – техногенная безопасность».

4. Анализ оценки рисков для синхронных электродвигателей серии СДН производства АО «ЗКЭМ» (Новая Каховка) при различных условиях эксплуатации, мощности и оборотах вращающегося вала показал снижение техногенного риска при внедрении МЖГК в диапазоне 1,5...4 раза.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Белов, П. Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование : учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры [Текст] / П. Г. Белов. — М. : Издательство Юрайт, 2014. — 728 с.
- [2] Белов, С. А. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС [Текст] / С. А. Белов, В. В. Литвак, С. С. Солод. — Томск : Изд-во НТЛ, 2008. — 218 с.
- [3] Вамболь, С. А. Система экологической безопасности с многофазными дисперсными структурами [Электронное издание] / С. А. Вамболь, А. В. Метелев // Технологии техносферной безопасности, 2013. — № 5 (49). — С. 1–7. — Режим доступа : <http://ipb.mos.ru/tfb>.
- [4] Калькис, В. Основные направления оценки рисков рабочей среды [Текст] / В. Калькис, И. Кристиныч, Ж. Роя. — Рига : SIA «Jelgavas tipografija», 2005. — 74 с.
- [5] Коваль, А. Н. Основные направления повышения техногенной безопасности и энергетической эффективности стационарных установок на предприятиях угольной отрасли [Текст] / А. Н. Коваль, В. И. Мелковский, Н. А. Чехлатый // Вестник МАНЭБ. — № 2. — Феодосия, 2013. — С. 23–28.
- [6] Лихолетов, В. В. Системный анализ и проектирование систем управления [Текст] : учебное пособие / В. В. Лихолетов // Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2004. — 160 с.
- [7] Особенности проектирования магнитоэластичных герметизаторов шахтного оборудования [Текст] / А. С. Хабазня, А. В. Радионов, А. Н. Виноградов, А. В. Казакуца // Уголь Украины, 2010. — Вып. 2 (648). — С. 29–33.
- [8] Павлицев, В. Т. Підшипники кочення : основні параметри, конструкції опор, змашування, ущільнення та розрахунки ресурсу [Текст] / В. Т. Павлицев. — Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2001. — 136 с.



- [9] **Радионо́в, А. В.** Анализ опыта работы магнитожидкостных герметизаторов на СГПП «Объединение «Азот» [Текст] / А. В. Радионо́в, Н. В. Уваров // Химическая техника, 2003. — № 9. — С. 26–28.
- [10] **Радионо́в, А. В.** Магнитожидкостные герметизирующие комплексы [Текст] / А. В. Радионо́в, С. С. Рыжков // Збірник наукових праць НУК, 2013. — Вып. № 4. — С. 44–50.
- [11] **Радионо́в, А. В.** Опыт эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов в промышленной энергетике [Текст] / А. В. Радионо́в // Гірнична електромеханіка та автоматика. — Дніпропетровськ, 2011. — Вып. 87. — С. 134–138.
- [12] **Радионо́в, А. В.** Комбинированные магнитожидкостные герметизаторы — эффективная альтернатива бесконтактным уплотнениям подшипниковых узлов с жидкой смазкой [Текст] / А. В. Радионо́в, А. Н. Виноградов // Збагачення корисних копалин : наук.-техн. зб., 2009. — Вып. 35 (76). — С. 148–155.
- [13] Технічне обслуговування та ремонт шахтних стовбурів [Текст] — 4-е вид., перероб. і доп. / І. Г. Манец, Б. А. Грядущий, В. В. Левіт та ін. ; за заг. ред. С. О. Сторчака. — Донецьк : Юго-Восток, 2010. — Т. 1. — 409 с.
- [14] **Толмачев, В. В.** Модель для определения значимости риска эксплуатации бесшовных баллонов [Электронное издание] / В. В. Толмачев, И. Н. Федорова. — Режим доступа : <http://asms.ru/kompet/2012/novbec/tolmachev42.pdf>.
- [15] **Топоров, А. А.** Новый подход к анализу техногенно опасных ситуаций на технологических производствах [Текст] / А. А. Топоров // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Хімія і хімічна технологія». — Донецьк : ДонНТУ, 2005. — Вып. 95. — С. 126–130.
- [16] **Черменский, О. Н.** Подшипники качения [Текст] : справочник-каталог / О. Н. Черменский, Н. Н. Федотов. — М. : Машиностроение, 2003. — 576 с.
- [17] **Шмандий, В. М.** Оценка техногенной опасности, формируемой промышленными предприятиями [Текст] / В. М. Шмандий, А. Л. Старовойда // Вісник КДПУ : Наукові праці КДПУ. — Кременчук : КДПУ, 2002. — Вып. 2 (13). — Розд. 2. — С. 77–80.
- [18] **Marhavidas, P. K.** Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009 [Text] / P. K. Marhavidas, D. Koulouriotis, V. Gemeni // Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011. — № 24. — P. 477–523.

---

© А. В. Радіонов

Надійшла до редколегії 13.07.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. *А. П. Шевцов*