

УДК 614.8

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПРОТЯЖЕННЫХ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

**ENSURING SAFETY OF OPERATION FOR EXTENDED
HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES**

И.Р. Сунгатуллин, В.А. Гафарова, И.Р. Кузеев

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация**

Iskander R. Sungatullin, Victoria A. Gafarova, Iskander R. Kuzeev

**Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation**

e-mail: gafarova.vika@bk.ru

Аннотация. Расчет рисков зависит от наличия априорной информации, которой обычно бывает недостаточно. Особенно это касается реализации высших категорий чрезвычайных ситуаций: национальных, глобальных и планетарных катастроф. Поскольку эти виды чрезвычайных ситуаций редко повторяются, то для настоящего статистического анализа не хватает данных. Попытки унифицировать методы расчета стирают некоторые детали, огрубляя качество результатов. Чем выше категория опасности, тем на меньшее количество данных опираются расчеты. Еще одна особенность расчета рисков заключается в том, что чем дальше по времени от современных методов расчета произошло событие, тем меньше шансов использовать качественную априорную информацию. Каждая чрезвычайная ситуация имеет в основе иницирующие и поражающие источники: неконтролируемые выбросы энергии, неконтролируемые выбросы опасных веществ, нарушение информационных потоков. При расчете рисков

используют понятие «интегральные риски», которое учитывает названные выше источники опасности.

Предлагается система оценки опасности объекта по трем критериям: прочность, долговечность и живучесть, которая сводится к определению числа от суммирования уровней каждого из трех рассматриваемых показателей. Вектор, соединяющий нулевую точку на объемной диаграмме с результатом расчета обобщенного критерия, показывает уровень состояния объекта на данный момент времени. Такой подход позволяет индивидуализировать риски для каждого конкретного объекта повышенной опасности и выстраивать иерархию рисков по алгоритму от общего к частному.

Многофакторные объемные диаграммы позволяют использовать различные критерии, которые наиболее характерны для конкретных объектов, и показывают их взаимосвязь. Каждый из используемых критериев может иметь значение меньше критического, а их совокупное действие выводит объект в критическую зону неприемлемых индивидуальных рисков. Возможно учитывать, наряду с показателями прочности, долговечности и живучести, показатели, специфичные для процессов ползучести, коррозии, а также показатели диагностического обследования объектов. Предлагаемый метод совместим с цифровыми двойниками оборудования и позволяет конкретизировать действия по снижению эксплуатационных рисков.

Abstract. The calculation of risks depends on the availability of a priori information, which is usually insufficient. This is especially true for the implementation of the highest categories of emergency situations: national, global and planetary disasters. Since these types of emergencies are seldom repeated, there is a lack of data for a true statistical analysis. Attempts to unify calculation methods obliterate some details, making the quality of the results coarse. The higher the hazard category, the less data the calculations are based on. Another feature of risk calculation is that the farther in time an event occurs from modern

calculation methods, the less chances of using high-quality a priori information. Each emergency is based on initiating and damaging sources: uncontrolled emissions of energy, uncontrolled emissions of hazardous substances, disruption of information flows. When calculating risks, the concept of «integral risks» is used, which takes into account the above-mentioned sources of danger.

A system for assessing the hazard of an object according to three criteria is proposed: strength, durability and survivability, which is reduced to determining the number from the summation of the levels of each of the three considered indicators. The vector connecting the zero point on the 3D diagram with the result of calculating the generalized criterion shows the level of the state of the object at a given moment in time. This approach makes it possible to individualize risks for each specific object of increased danger and build a hierarchy of risks according to the algorithm from general to specific.

Multivariate 3D charts allow you to use various criteria that are most typical for specific objects, and show their relationship. Each of the criteria used may have a value less than critical, and their cumulative effect brings the object into the critical zone of unacceptable individual risks. It is possible to take into account, along with indicators of strength, durability and survivability, indicators specific to the processes of creep, corrosion, as well as indicators of the diagnostic examination of objects. The proposed method is compatible with digital twins of equipment and allows to specify actions to reduce operational risks.

Ключевые слова: промышленная безопасность; опасные производственные объекты; прочность; долговечность; живучесть; интегральные риски

Keywords: industrial safety; hazardous production facilities; strength; durability; survivability; integrated risks

По мере развития технических систем разрыв между степенью их опасности и возможностью предотвращать эту опасность будет возрастать. В конце 80-х гг. прошлого столетия был сделан такой вывод после тщательного рассмотрения крупнейших катастроф Государственной комиссией по чрезвычайным ситуациям СССР. Продолжающиеся после этого анализа катастрофы подтвердили сложность решения фундаментальных проблем безопасности, впрочем, как и прикладных [1].

Изучение последствий катастроф позволяет сделать вывод о том, что нештатные ситуации развивались как на фоне превышения заданных нагрузок, так и в их пределах. Этот факт, прежде всего, указывает на несовершенство методов обеспечения безопасности. Пришло понимание того, что обеспечение прочности конструкций с использованием нормативных значений запасов не исключает вероятности катастрофических отказов.

Такое положение ставит новые задачи в области обеспечения безопасности. При проектировании необходимо использовать нелинейную механику разрушения, поскольку высока вероятность возникновения локальных пластических деформаций. Опасность заключается в том, что в процессе реализации жизненного цикла объектов могут формироваться новые предельные состояния. Учет этого явления позволяет на базе аппарата механики катастроф анализировать различные сценарии, которые могут реализовываться в процессе эксплуатации опасных производственных объектов (ОПО). Развитие теории техногенных рисков позволяет при рассмотрении критериев опасности использовать не только детерминированную, но и вероятностную трактовку событий. На основании указанного подхода разрабатывается теория защиты и диагностики состояния ОПО, и вводятся основы принципа их проектирования.

Фундаментальные исследования и обобщения в области промышленной безопасности [2–6] позволили установить четыре основных направления, на которых базируется обеспечение и повышение безопасности ОПО. Прежде

всего, необходимо обосновать прочность, ресурс, живучесть и надежность на стадии проектирования. На всех стадиях жизненного цикла объекта должна быть обеспечена качественная диагностика состояния. Оценка рисков возникновения техногенных катастроф на основе создания BIG DATA и анализа данных. Переход к постоянному мониторингу состояния объектов и среды. Вот это и есть кватернер безопасности, который должен участвовать в регламентировании трех возможных состояний объекта: штатное рабочее, аварийное и катастрофическое состояния.

При создании кватернера безопасности необходимо учитывать, что время реализации различных стадий жизненного цикла может различаться на порядки величин. Накопление повреждений может происходить в течение длительного промежутка времени, при этом начальные условия не являются однозначными и прозрачными. Здесь мы сталкиваемся с технически сложной проблемой, связанной с большой протяженностью площади контроля, которая может быть ограниченно доступна, даже при полной доступности и наличии сканирующих контролируемые параметры устройств. Диагностика должна переходить в мониторинг и требует нового поколения приборов с возможностью удаленного контроля. Стратегически важно разрабатывать системы получения информации с ОПО, которые будут в состоянии улавливать предвестников тяжелых аварий и катастрофических разрушений.

В 2014 г. был принят федеральный закон [7], который ориентирует исследователей на разработку научно-методического обоснования неприемлемых и приемлемых рисков и количественное их определение. Расчет рисков зависит от наличия априорной информации, которой обычно бывает недостаточно. Особенно это касается реализации высших категорий чрезвычайных ситуаций: национальных, глобальных и планетарных катастроф. Поскольку эти виды чрезвычайных ситуаций редко повторяются, то для настоящего статистического анализа не хватает данных. Необходимо также учитывать, что каждая опасная ситуация, от

локальной до глобальной, имеет свои специфические, неповторяющиеся особенности. Попытки унифицировать методы расчета стирают некоторые детали, огрубляя качество результатов. Чем выше категория опасности, тем на меньшее количество данных опираются расчеты. Еще одна особенность расчета рисков заключается в том, что чем дальше по времени от современных методов расчета произошло событие, тем меньше шансов использовать качественную априорную информацию. Отсутствие некоторого количества знаний на момент реализации аварии приводит к тому, что некоторые факты просто не замечаются и не могут быть использованы в современных ситуациях. В 60-х гг. прошлого столетия в нефтеперерабатывающей промышленности среди специалистов, отвечающих за безопасность, существовало мнение об априорном отсутствии трещин и трещиноподобных дефектов в новом оборудовании. Совершенствование приборов неразрушающего контроля развеяло этот миф. Но при изучении причин аварии в указанные годы не принималась во внимание возможность раскрытия изначально существующей трещины, размеры которой со временем увеличиваются выше критических значений.

При классификации опасных ситуаций выделены 7 видов, которые разделяются по объему ущерба в денежном выражении, причем ущерб от локальных ситуаций на 5 порядков ниже, чем от глобальных чрезвычайных ситуаций.

Столь сложное поведение реальных систем осложняет обеспечение заданных значений эксплуатационных рисков на различных стадиях жизненного цикла опасных производственных объектов стандартными методами. Авторы [8–12] развивают направление, связанное с понятием индивидуальных техногенных рисков, включающим понятия взрыво-, пожароопасности, токсичности среды, а также один из параметров надежности. Такой подход позволяет ранжировать объекты по степени их потенциальной опасности и формировать индивидуальный подход к

обеспечению их контроля в процессе эксплуатации. Однако предлагаемые для анализа опасности факторы не отражают текущее состояние объекта.

Каждая чрезвычайная ситуация имеет в основе инициирующие и поражающие источники [1]: неконтролируемые выбросы энергии, неконтролируемые выбросы опасных веществ, нарушение информационных потоков. При расчете рисков используют понятие «интегральные риски», которое учитывает названные выше источники опасности. Эти риски рассчитываются как:

$$R_{\text{и}}(\tau) = \sum_{i=1}^3 [R_{\text{Еi}}(\tau) + R_{\text{Wi}}(\tau) + R_{\text{Иi}}(\tau)], \quad (1)$$

где $R_{\text{и}}(\tau)$ – интегральные риски;

$R_{\text{Еi}}(\tau)$ – риски от неконтролируемых выбросов энергии;

$R_{\text{Wi}}(\tau)$ – риски от неконтролируемого выброса вещества;

$R_{\text{Иi}}(\tau)$ – риски от нарушения информационных потоков.

С другой стороны, чрезвычайные ситуации создаются тремя основными факторами: техногенным, антропогенным и природным. В связи с этим интегральные риски можно рассчитывать как сумму рисков от каждого фактора:

$$R_{\text{и}}(\tau) = \sum_{i=1}^3 [R_{\text{Ti}}(\tau) + R_{\text{Чи}}(\tau) + R_{\text{Пи}}(\tau)], \quad (2)$$

где $R_{\text{Ti}}(\tau)$ – техногенные риски;

$R_{\text{Чи}}(\tau)$ – антропогенные риски;

$R_{\text{Пи}}(\tau)$ – природные риски.

Многоплановая задача обеспечения приемлемых рисков на различных стадиях жизненного циклов может решаться комплексно с применением уравнения плоскости в отрезках на базе рисунка 1.

$$R_{\text{Ti}}(\tau) / [R_{\text{Ti}}(\tau)]_{\text{крит}} + R_{\text{Чи}}(\tau) / [R_{\text{Чи}}(\tau)]_{\text{крит}} + R_{\text{Пи}}(\tau) / [R_{\text{Пи}}(\tau)]_{\text{крит}} = 1 \quad (3)$$

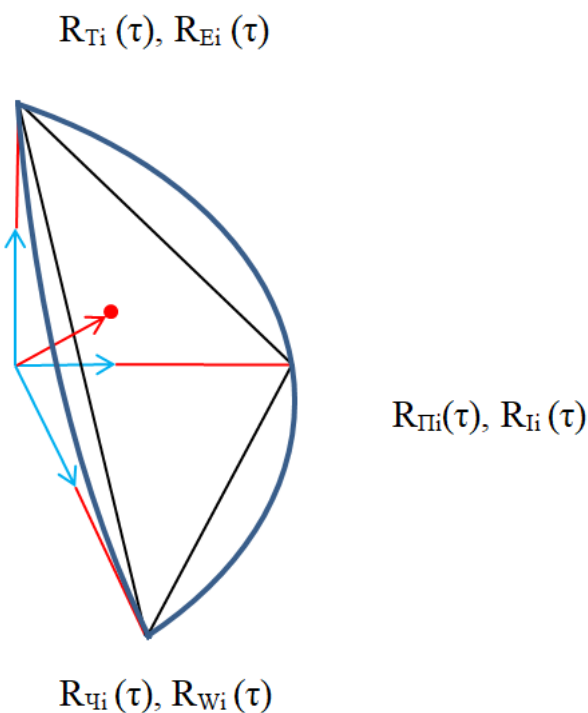


Рисунок 1. Предельные поверхности критических и приемлемых рисков на стадии проектирования, создания и функционирования объектов

Такой подход к обеспечению приемлемых уровней риска при многофакторном проявлении рисков может быть эффективным в случае, когда трехмерная пространственная взаимозависимость рисков различной природы описывается выпуклой поверхностью. Например, данный подход успешно используется при выработке критерия потери устойчивости формы оболочковых конструкций при сложном нагружении: наружное давление, осевое сжатие, изгиб. Когда все три рассматриваемых фактора усиливают друг друга, выпуклость поверхности взаимодействия можно заменить плоскостью. Многофакторные объемные диаграммы позволяют использовать различные критерии, которые наиболее характерны для конкретных объектов, и учитывать, наряду с показателями прочности, долговечности и живучести, показатели, специфичные для процессов ползучести, коррозии, а также показатели диагностического обследования объектов. Предлагаемый метод хорошо совмещается с цифровыми двойниками оборудования и позволяет конкретизировать действия по снижению эксплуатационных рисков.

Выводы

Представленные исследования указывают на необходимость ступенчатой оценки рисков при эксплуатации опасных производственных объектов. Такой подход позволяет оценить риски эксплуатации конкретных объектов по критериям прочности, долговечности и живучести, при этом разработанные диаграммы можно эффективно применять для любых видов оборудования, а критические состояния можно варьировать в зависимости от преобладающих факторов, например, учитывать явления ползучести, коррозии и другие особенности эксплуатации оборудования.

Список используемых источников

1. Матвиенко Ю.Г., Романов А.Н. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения. М.: Ленанд, 2018. 720 с.
2. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Часть 2: Критерии прочности и ресурса. Новосибирск: Наука, 2005. 610 с.
3. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008. 528 с.
4. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука, 2017. 724 с.
5. Махутов Н.А. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность средств хранения и транспорта энергоресурсов. М.: Знание, 2019. 928 с.
6. Федеральный закон от 28.06.2014 № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации». М.: Собрание законодательства РФ, 2015. 98 с.

7. Вахапова Г.М. Оценка потенциальной опасности объектов технологических установок по интегральному параметру при прогнозировании аварийных ситуаций: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. 118 с.

8. Давыдова Е.В. Оценка потенциальной опасности оборудования установок нефтеперерабатывающих предприятий // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2007. № 2. С. 14. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Davydova/Davydova_1.pdf (дата обращения: 18.01.2021).

9. Давыдова Е.В. Совершенствование метода расчета параметров потенциальной опасности оборудования установок нефтеперерабатывающих предприятий: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2008. 100 с.

10. Буркина Е.Н. Совершенствование системы управления безопасностью опасных производственных объектов на основе применения показателей абсолютной опасности: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. 133 с.

11. Кузеев И.Р., Чиркова А.Г., Тляшева Р.Р., Буркина Е.Н. Создание метода управления промышленной безопасностью опасных производственных объектов нефтегазовой отрасли // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 4 (100). С. 10-14.

References

1. Matvienko Yu.G., Romanov A.N. *Problemy prochnosti, tekhnogennoi bezopasnosti i konstruktsionnogo materialovedeniya* [Problems of Strength, Technogenic Safety and Structural Materials Science]. Moscow, Lenand Publ., 2018. 720 p. [in Russian].

2. Makhutov N.A. *Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'. Chast' 2: Kriterii prochnosti i resursa* [Structural Strength, Resource and Industrial Safety. Part 2: Strength and Life Criteria]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 610 p. [in Russian].

3. Makhutov N.A. *Prochnost' i bezopasnost'. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya* [Durability and Safety. Basic and Applied Research]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2008. 528 p. [in Russian].

4. Makhutov N.A. *Bezopasnost' i riski: sistemnye issledovaniya i razrabotki* [Safety and Risks: System Research and Development]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2017. 724 p. [in Russian].

5. Makhutov N.A. *Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty. Bezopasnost' sredstv khraneniya i transporta energoresursov* [Security of Russia. Legal, Socio-Economic and Scientific and Technical Aspects. Safety of Means of Storage and Transport of Energy Resources]. Moscow, Znanie Publ., 2019. 928 p. [in Russian].

6. *Federal'nyi zakon ot 28.06.2014 № 172-FZ «O strategicheskoy planirovaniy v Rossiiskoy Federatsii»* [Federal Law of June 28, 2014 No. 172-FZ «On Strategic Planning in the Russian Federation»]. Moscow, Sobranie zakonodatel'stva RF Publ., 2015. 98 p. [in Russian].

7. Vakhapova G.M. *Otsenka potentsial'noi opasnosti ob"ektov tekhnologicheskikh ustanovok po integral'nomu parametru pri prognozirovaniy aviariynykh situatsiy: dis. kand. tekhn. nauk* [Assessment of the Potential Hazard of Objects of Technological Installations by an Integral Parameter When Predicting Emergency Situations: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2002. 118 p. [in Russian].

8. Davydova E.V. *Otsenka potentsial'noi opasnosti oborudovaniya ustanovok neftepererabatyvayushchikh predpriyatii* [Assessment of the Potential Hazard of Equipment for Installations of Oil Refineries]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» – Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2007, No. 2, pp. 14. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Davydova/Davydova_1.pdf (accessed 18.01.2021). [in Russian].

9. Davydova E.V. *Sovershenstvovanie metoda rascheta parametrov potentsial'noi opasnosti oborudovaniya ustanovok neftepererabatyvayushchikh predpriyatii: dis. kand. tekhn. nauk* [Improvement of the Method for Calculating the Parameters of the Potential Hazard of Equipment for Installations of Oil Refineries: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2008. 100 p. [in Russian].

10. Burkina E.N. *Sovershenstvovanie sistemy upravleniya bezopasnost'yu opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov na osnove primeneniya pokazatelei absolyutnoi opasnosti: dis. kand. tekhn. nauk* [Improvement of the Safety Management System for Hazardous Production Facilities Based on the Use of Absolute Hazard Indicators: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2009. 133 p. [in Russian].

11. Kuzeev I.R., Chirkova A.G., Tlyasheva R.R., Burkina E.N. Sozdanie metoda upravleniya promyshlennoi bezopasnost'yu opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov neftegazovoi otrasli [Development of Industrial Safety Management Method for Hazardous Installations in Petroleum Industry]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti – Bezopasnost' Zhiznedeatel'nosti*, 2009, No. 4 (100), pp. 10-14. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Сунгатуллин Искандер Равилевич, соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, председатель совета директоров холдинга «ПЕГАЗ», г. Уфа, Российская Федерация

Iskander R. Sungatullin, Applicant at Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Chairman of the Board of Directors of PEGAZ Holding, Ufa, Russian Federation

e-mail: irsungatullin@gmail.com

Гафарова Виктория Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Victoria A. Gafarova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: gafarova.vika@bk.ru

Кузеев Искандер Рустемович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Iskander R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: kuzeev2002@mail.ru