

Расчетно-экспериментальные подходы к анализу и обеспечению ресурса и срока безопасной эксплуатации промышленных объектов¹



Н.А. Махутов,
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук,
проф., гл. науч. сотрудник,
kei51@mail.ru



М.М. Гаденин,
канд. техн. наук, вед.
науч. сотрудник



А.С. Печёркин,
д-р техн. наук, проф., первый
зам. ген. директора



Б.А. Красных,
канд. техн. наук,
председатель НТС

ИМАШ РАН, Москва, Россия

ЗАО НТЦ ПБ, Москва,
Россия

Ростехнадзор, Москва,
Россия

Ставится и решается основополагающая задача формирования критериальной базы условий достижения допускаемых и предельных состояний промышленных объектов по параметрам прочности, ресурса и живучести.

Ключевые слова: ресурс, срок безопасной эксплуатации, промышленные объекты, прочность, долговечность, разрушение, напряжения, деформации, безопасность, риск, защищенность.

DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-7-15

Постановка проблемы

Актуальность проблемы анализа и обеспечения ресурса и срока безопасной эксплуатации промышленных объектов, повышения уровня их защищенности требует углубленного исследования условий и закономерностей протекания процессов деформирования и разрушения как в штатных, так и в экстремальных предельных условиях их эксплуатации [1–3]. При проведении таких фундаментальных и прикладных исследований ставится и решается основополагающая задача формирования критериальной базы условий достижения допускаемых и предельных состояний по параметрам прочности, ресурса и живучести [1–8].

За основные параметры эксплуатационных воздействий $p_{\text{э}}$ при формировании уравнений состояния и критериев разрушения в рассматриваемых условиях принимаются эквивалентные эксплуатационные напряжения $\sigma_{\text{э}}$, деформации $e_{\text{э}}$, числа циклов $N_{\text{э}}$,

время $\tau_{\text{э}}$, температура $t_{\text{э}}$, внешняя среда $\Phi_{\text{э}}$ (радиация, коррозия и т.п.), коэффициенты интенсивности напряжений $K_{\sigma I}$ и деформаций $K_{\epsilon I}$:

$$p_{\text{э}} = \{\sigma_{\text{э}}, e_{\text{э}}, N_{\text{э}}, \tau_{\text{э}}, t_{\text{э}}, \Phi_{\text{э}}, K_{\sigma I}, K_{\epsilon I}\}. \quad (1)$$

В качестве базовых характеристик механических свойств материала используются пределы текучести $\sigma_{\text{т}}$, прочности $\sigma_{\text{в}}$, выносливости σ_{-1} , длительной прочности $\sigma_{\text{длп}}$, сопротивление отрыву $S_{\text{к}}$, предельная пластичность $\psi_{\text{к}}$, критические коэффициенты интенсивности напряжений K_{lc} и деформаций K_{lec} :

$$R_{\sigma} = F\{\sigma_{\text{т}}, \sigma_{\text{в}}, \sigma_{-1}, \sigma_{\text{длп}}, S_{\text{к}}, \psi_{\text{к}}, K_{\text{lc}}, K_{\text{lec}}\}. \quad (2)$$

Производными параметрами от базовых характеристик механических свойств, конструктивных форм и условий нагружения являются такие характеристики материала, как длительная пластичность $\psi_{\text{к}\tau}$, эффективные коэффициенты концентрации напряжений K_{σ} , чувствительность к абсолютным размерам ϵ_{σ} , асимметрии цикла ψ_{σ} , коэффициенты вариации v_{σ} , скорости роста трещин по числу циклов dl/dN и по времени dN/dt , чувствительность к внеш-

¹ В статье под термином «промышленный объект» понимаются технические устройства, оборудование и материалы, а также высоконагруженные конструкции, применяемые на эксплуатируемых опасных производственных объектах.

ней среде β_c . С учетом этого условие прочности для эксплуатационных условий нагруженности в общем случае может быть записано в виде:

$$p_3 \leq R\sigma\{\psi_{k\tau}, K_\sigma, \varepsilon_\sigma, \psi_\sigma, v_\sigma, dl/dN, dN/d\tau, \beta_c\}. \quad (3)$$

Для обеспечения требуемого ресурса (в поцикловом или во временном исчислении, а также с учетом радиационной или другой внешней агрессивной среды) необходимо выполнение условия:

$$R_{N_{cp}} \leq R_{cN_c} = \{N_3/N_c, \tau_3/\tau_c, \Phi_3/\Phi_c\}, \quad (4)$$

где R_{cN_c} — критическое (предельное) значение ресурса, выражаемое через критические (разрушающие) величины — число циклов N_c , время τ_c или уровень воздействия среды Φ_c .

Параметры надежности $R_{N_{cp}}$ в вероятностной постановке P_{PR} по критериям прочности P и ресурса N или τ определяются на основе выражений (1)–(4) с введением в них вероятностных характеристик прочности, пластичности и нагруженности с учетом коэффициентов их вариации v :

$$P_{PR} = F\{P_3, R_\sigma, R_{N_{cp}}\}. \quad (5)$$

При оценках живучести основное внимание уделяется определению уровня накопленных повреждений d , вычисляемого относительными параметрами $N_3/N_c, \tau_3/\tau_c, \Phi_3/\Phi_c$ или ростом трещин (дефектов) от начальных размеров l_0 до текущих l_3 и критических l_c . Этот рост трещин характеризуется их скоростями $dl/dN, dl/d\tau$, которые в свою очередь зависят от размахов коэффициентов интенсивности напряжений ΔK_I или деформаций ΔK_{Ie} . При достижении предельного состояния выполняются условия разрушения по критериям линейной K_{Ic} или нелинейной K_{Iec} механики разрушения. В этом случае живучесть L_{dl} объектов с учетом уровня повреждения d и роста трещин l может быть оценена по условию

$$L_{dl} = F\{P_3, R_\sigma, R_{N_{cp}}\} = F\{d, dl/d\tau, dl/dN\} \leq F\{N_3/N_c, \tau_3/\tau_c, \Phi_3/\Phi_c, K_{3I}/K_{Ic}, K_{3Ie}/K_{Iec}\}. \quad (6)$$

Если в выражение (6) вводятся статистические характеристики, то параметр живучести L_{dl} приобретает вероятностный характер.

При этом в традиционном анализе работоспособности промышленных объектов используются следующие определяющие параметры: R_σ — прочность, определяемая сопротивлением разрушению несущих элементов при штатных и аварийных воздействиях; R_λ — устойчивость, определяемая сопротивлением потери начальной формы λ несущих элементов при действии штатных или аварийных нагрузок; R_δ — жесткость, определяемая сопротивлением несущих элементов достижению недопустимых деформаций

δ при действии штатных или аварийных нагрузок; R_{N_c} — ресурс (долговечность), определяемый временем τ или числом циклов N до разрушения или потери устойчивости; P_{QR} — надежность, определяемая способностью объекта выполнять заданные функции в штатном или поврежденном состоянии при заданных нагрузках Q или ресурсе R_{N_c} ; L_{dl} — живучесть, определяемая способностью объекта выполнять свои функции в ограниченном объеме при недопустимых нормах повреждения d или размерах дефектов l ; S — безопасность, определяемая способностью объекта не переходить в катастрофическое состояние с нанесением значительных ущербов человеку, техносфере и природной среде; R — риск, определяемый вероятностью возникновения на объекте неблагоприятных ситуаций и возможными ущербами от этих ситуаций в штатных и нештатных условиях; Z_k — защищенность, определяемая способностью объекта противостоять возникновению и развитию неблагоприятных ситуаций в штатных и нештатных условиях.

Указанные параметры работоспособности в общем случае являются функциями времени τ . Базовое выражение, характеризующее защищенность промышленных объектов от аварий и катастроф с учетом данных об их прочности, ресурсе, живучести, безопасности и рисках может быть представлено в виде функционала

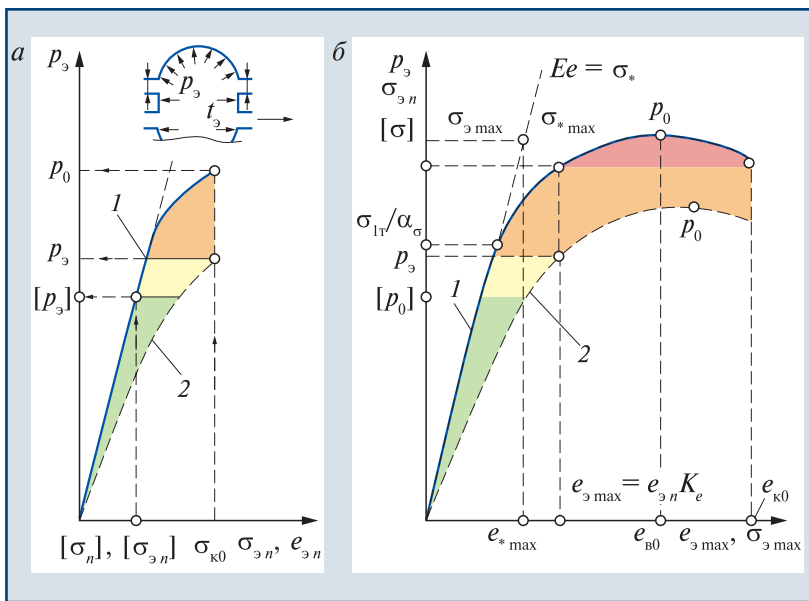
$$Z_k(\tau) = F_z\{R(\tau), S(\tau), L_{dl}(\tau), P_{QR}(\tau), R_{N_c}(\tau), R_\delta(\tau), R_\lambda(\tau), R_\sigma(\tau)\}. \quad (7)$$

Основным направлением анализа и обеспечения защищенности промышленных объектов от неблагоприятных ситуаций с учетом выражения (7) является реализация основных требований к их работоспособности в штатных, аварийных и катастрофических режимах на основе фундаментальных закономерностей механики разрушения и механики катастроф [1–3, 8–12], а также данных оперативной диагностики и мониторинга их текущего состояния.

Методы анализа и обеспечения прочности и ресурса

Зависимость между эксплуатационными нагрузками Q , определяющими из которых являются, как правило, механические (давление p_3), и напряжениями σ (деформациями e) применительно к сосуду давления иллюстрируется на рис. 1, причем на рис. 1, а приведена зависимость номинальных напряжений σ_{3n} и деформаций e_{3n} для зон вне концентрации (кривая 1) и для зон с концентрацией (кривая 2).

Предельно опасное состояние (хрупкое и квази-хрупкое разрушение) достигается при экстремальной исходной нагрузке Q_0 и номинальной критической деформации e_{k0} (или напряжении σ_{k0}). Деформация e_{k0} определяется поперечным сужением ψ_k , а величина ψ_k принимается как минимальная гарантиру-



▲ Рис. 1. Зависимость между условиями нагружения и напряжениями (деформациями) применительно к сосуду давления

▲ Fig. 1. Relationship between loading conditions and stresses (deformations) relating to the pressure vessel

емая, регламентируемая техническими условиями (стандартом) для материалов в исходном состоянии.

В процессе проектирования промышленных объектов для нормальных эксплуатационных штатных условий обычно вводятся коэффициенты запаса n и устанавливаются допустимые нагрузки $[Q_0]$, номинальные напряжения $[\sigma_n]$ или деформации $[e_n]$, которые принимаются

$$\{[Q_0], [\sigma_n], [e_n]\} = \{Q_0/n_Q, \sigma_{k0}/n_\sigma, e_{k0}/n_e\}. \quad (8)$$

При переходе от номинальных напряжений к местным напряжениям $s_{\sigma, \max}$ и деформациям $e_{\sigma, \max}$ в зонах концентрации или вне зон концентрации для пластичных конструкционных металлов и с учетом совместного действия механических и температурных напряжений местные напряжения и деформации становятся больше, чем номинальные:

$$\{s_{\sigma, \max}, e_{\sigma, \max}\} \geq \{\sigma_n, e_n\}. \quad (9)$$

При штатных условиях эксплуатации и для гипотетических аварийных ситуаций может иметь место возникновение номинальных и местных пластических деформаций:

$$\{s_{\sigma, \max}, e_{\sigma, \max}\} = \{K_\sigma \sigma_n, K_e e_n\} = f_p(Q_0), \quad (10)$$

где K_σ и K_e — коэффициенты соответственно концентрации напряжений и деформаций в упругопластической области.

Предельные максимальные нагрузки Q_0 достигаются при большой пластической деформации $e_{\sigma 0}$. Окончательное разрушение происходит с реальной

местной деформацией e_{k0} , превышающей, как правило, деформацию, указанную в стандартах. Таким образом, при обосновании исходной прочности, ресурса, живучести и безопасности конструкций в штатных эксплуатационных условиях для гипотетических аварийных ситуаций необходимо иметь возможность анализировать выражение (10) при $[Q_0] \leq Q_0 \leq Q_0$ с использованием вычислительных методов (например, метода конечных элементов), аналитических методов или экспериментальных методов (например, методов фотоупругости, тензометрии, голографии). Для аналитических методов возможно принять

$$\{K_\sigma, K_e\} = F\{\alpha_\sigma, \sigma_n, m\}, \quad (11)$$

где α_σ — теоретический коэффициент концентрации напряжений; m — параметр упрочнения для кривой деформирования.

При переходе от штатных ситуаций к аварийным с учетом комплексного влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов упомянутые выше коэффициенты запасов n_Q и n_σ будут уменьшаться в пределе до 1. При этом запасы $n_e \geq \{n_Q, n_\sigma\}$.

В тех случаях, когда при штатных и аварийных ситуациях имеют место циклические нагрузки, анализ долговечности и безопасности выполняется с использованием сложных нелинейных зависимостей как при определении напряженно-деформированных состояний, так и числа циклов до образования трещин N_0 (рис. 2).

Процедура нормативного и уточненного расчета прочности и ресурса в этом случае состоит из определения номинальных напряжений σ_n и деформаций e_n . По их величинам и теоретическим коэффициентам концентрации α_σ определяются коэффициенты концентрации K_σ и K_e . По кривым статического деформирования « σ – e » (см. рис. 1) и кривым циклического деформирования « S – ε » (см. рис. 2) определяются размах (e_{\max}) и амплитуда ($e_a = e_{\max}/2$) деформаций. Далее для начального времени деформирования τ_0 на основе уравнений кривых усталости строится зависимость долговечности от величины амплитуды действующей деформации.

Если принять во внимание реальное время эксплуатации τ_3 при температуре t и изменение в этих условиях критической деформации e_k , то с использованием соответствующих зависимостей [2] можно построить уточненную кривую « e_a – N_0 ». По этой кривой с введением запасов по деформации n_e и числу циклов n_N строится расчетная кривая « $[e_a]$ – $[N_0]$ ». Обычно запасы по числу циклов $n_N = N_0/N_3$ для штат-

ных ситуаций принимаются в диапазоне 10–20. С переходом к аварийным ситуациям (отклонение от нормальных условий, проектные, запроектные и гипотетические ситуации) эти запасы уменьшаются до 1–3. Тогда по сериям кривых « $[e_a] - [N_0]$ » для каждой аварийной ситуации на стадии проектирования можно установить допускаемые накопленные повреждения в зонах концентрации.

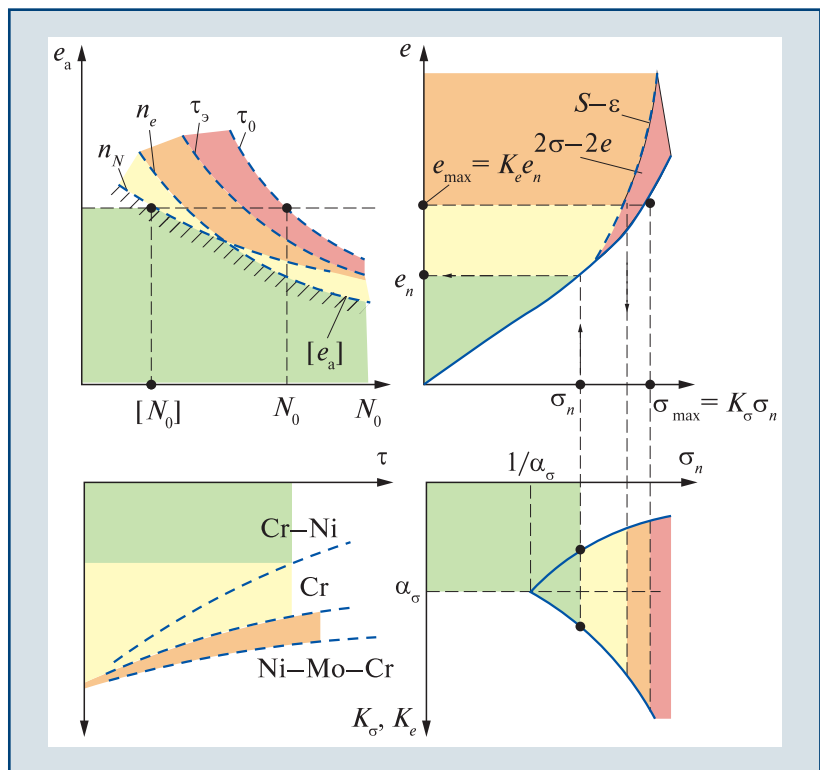
Для анализа ресурса с учетом стадии распространения зародившейся на этапе основной стадии нагружения трещины используются подходы механики разрушения, которые с учетом наличия, как правило, в вершине трещин локальных упругопластических деформаций трансформировались в соответствующие нелинейные деформационные критерии [2, 8], учитывающие наличие в эксплуатации температурных воздействий с выделением областей хрупких, квазихрупких и вязких разрушений.

В случаях, когда конструкции рассчитываются по двум стадиям циклического разрушения (до стадии образования трещины и на стадии ее развития), то общая долговечность N_c (число циклов до полного разрушения) определяется как сумма долговечности на стадии до образования разрушения (трещины) N_0 и долговечности на стадии развития трещины (стадии живучести) N_p :

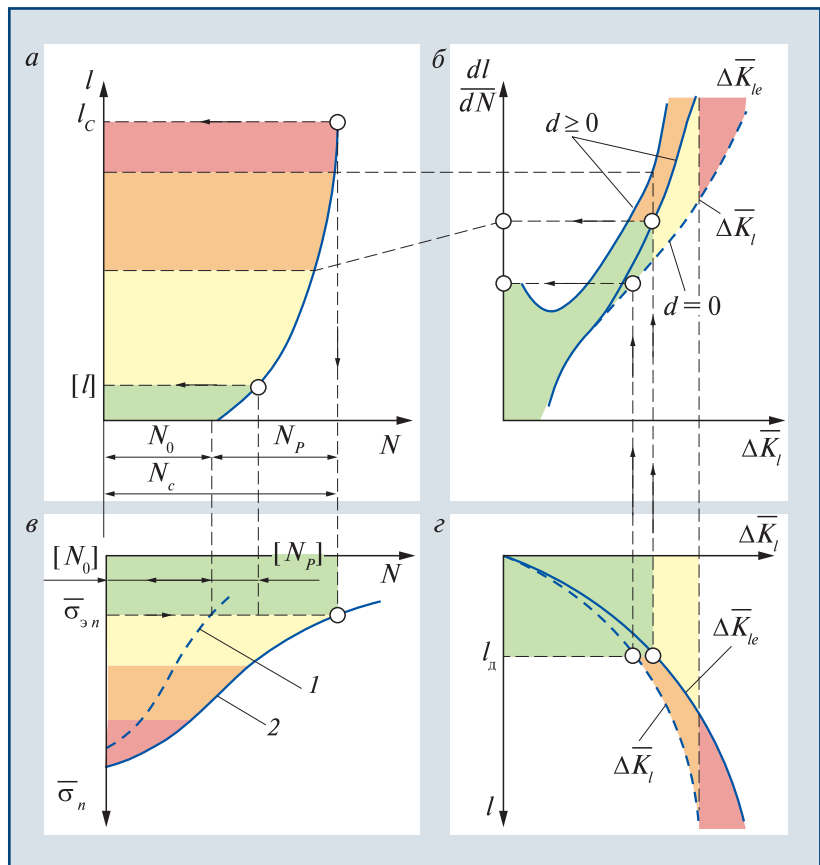
$$N_c = N_0 + N_p. \quad (12)$$

В этом случае для расчета исходными являются названные выше характеристики условий эксплуатации, исходные размеры дефектов l_d или размеры дефектов на стадии образования трещин, а также параметры уравнений для определения скорости распространения трещин dl/dN . По величине размаха номинальных напряжений $\Delta \bar{\sigma}_n = \bar{\sigma}_{n \max} - \bar{\sigma}_{n \min}$ для различных размеров дефектов l устанавливается размах коэффициента интенсивности напряжений $\Delta \bar{K}_l$ (рис. 3, з).

При известной величине показателя упрочнения материала t рассчитывается значение размаха коэффициента интенсивности деформации $\Delta \bar{K}_{le}$ (для заданного размера дефекта ($\Delta \bar{K}_{le} > \Delta \bar{K}_l$)). Полученные значения



▲ Рис. 2. Диаграмма анализа прочности, ресурса и безопасности
▲ Fig. 2. Diagram of analysis of strength, service life and safety



▲ Рис. 3. Схема оценки прочности и долговечности на различных стадиях жизненного цикла
▲ Fig. 3. The scheme for strength and life duration assessment at various stages of the life cycle

$\Delta \bar{K}_I$ и $\Delta \bar{K}_{Ie}$ используются для определения (рис. 3, б) искомых скоростей развития трещин dl/dN .

Интегрирование (аналитическое или численное) соответствующего уравнения для скорости роста трещины позволяет построить зависимость длины трещины l от числа циклов нагружения N (рис. 3, а). Окончательное разрушение происходит при длине трещины l_c , соответствующей моменту достижения критического значения коэффициента интенсивности деформаций. При этом определяется число циклов на стадии развития трещины N_p . При известном числе циклов до образования трещины N_0 по уравнению (12) определяется общая долговечность.

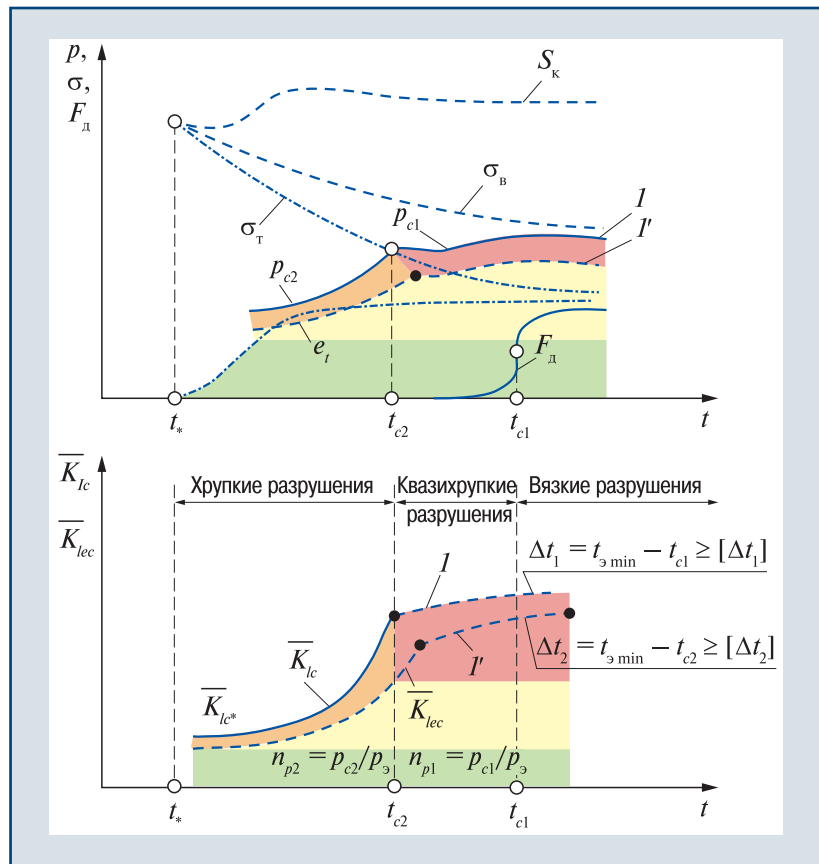
Аналогичные расчеты для усилий Q или номинальных напряжений $\bar{\sigma}_n$ позволяют построить (рис. 3, в) диаграмму циклического разрушения « $\bar{\sigma}_n - N$ » (здесь кривая 1 — для стадии образования; кривая 2 — для стадии окончательного разрушения). Интервал между кривыми 1 и 2 определяет живучесть элемента конструкции на стадии развития трещины. По числам циклов N_0 и N_p для заданного номинального напряжения $\bar{\sigma}_n$ и запасам n_{N0} и n_{Np} устанавливаются допустимые числа циклов $[N_0]$ и $[N_p]$. По числу циклов N_p и кривой « $l - N$ » в соответствии с рис. 3, а определяется допустимый размер дефекта [1].

Разрушение несущих элементов промышленных объектов с трещинами (исходными или возникшими в процессе однократного или циклического нагружения) как в штатных, так и в аварийных ситуациях может быть хрупким, квазихрупким или вязким (рис. 4).

Предельные состояния для вязкого и квазихрупкого разрушений оцениваются по первым и вторым критическим температурам хрупкости, а также по разрушающим напряжениям (или разрушающим нагрузкам) и деформациям в зоне трещины. Первые и вторые критические температуры хрупкости t_{kc1} и t_{kc2} определяются как

$$\begin{aligned} t_{kc1} &= t_{c1} + \Delta t_1; \\ t_{kc2} &= t_{c2} + \Delta t_2, \end{aligned} \quad (13)$$

где t_{c1} , t_{c2} — критические температуры хрупкости образца; Δt_1 , Δt_2 — смещения критических температур под действием конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов (циклических повреждений, повреждений окружающей средой) в штатных и аварийных ситуациях.



▲ Рис. 4. Схема анализа хрупких, квазихрупких и вязких разрушений
▲ Fig. 4. Analysis scheme for brittle, quasi-brittle and ductile fractures

В этом случае запасы по критическим температурам хрупкости составят:

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= t_{э \min} - t_{kc1}; \\ \Delta t_2 &= t_{э \min} - t_{kc2}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $t_{э \min}$ — минимальная температура элемента конструкции при эксплуатации, определяемая на основе анализа изменения температур и напряжений во времени.

Если разность (запас) Δt_1 превышает заданную допустимую, т.е. $\Delta t_1 > [\Delta t_1]$, то при эксплуатации элемент конструкции находится в вязком состоянии. В этом случае (при отсутствии макродефектов типа трещин) предельные нагрузки превышают расчетные, определяемые по пределам текучести и прочности, и сопротивление разрушению оценивают по предельным нагрузкам и деформациям. Вязкие разрушения при низких уровнях номинальных напряжений и при использовании пластичных металлов (на уровне предела текучести и ниже) могут произойти при размерах дефектов, превышающих сотни миллиметров, что, например, для большого числа конструкций соответствует потере плотности. Эксплуатация промышленных объектов с такими дефектами становится затруднительной или невозможной без проведения соответствующих мероприятий

(изменения режимов работы, ремонтные работы, замены поврежденных элементов и т.д.).

Обеспечение температурного запаса $[\Delta t_1]$ по первым критическим температурам оказывается важным для наиболее ответственных изделий (элементы криогенной техники, сосуды для хранения и транспортировки жидких газов и т.д.), испытывающих действие повышенных статических и динамических нагрузок. При импульсном нагружении элементов конструкций, а также при наличии высоких остаточных напряжений в зонах сварки, облегчающих инициирование трещин и приводящих к существенному сокращению интервала критических температур $(t_{c1} - t_{c2})$, при которых происходят квазихрупкие разрушения, температурные запасы необходимо более обоснованно принимать по первым критическим температурам. Вместе с тем в целом ряде случаев оказывается возможным допустить возникновение в элементах конструкций квазихрупких состояний, т.е. перейти к определению запаса Δt_2 по вторым критическим температурам ($\Delta t_2 \geq [\Delta t_1]$). Однако в этом случае необходимо обеспечить запас прочности по нагрузкам.

Предельные нагрузки и напряжения (или деформации) в аварийных ситуациях оценивают по критериям и закономерностям механики разрушения, причем в хрупких состояниях ($t < t_{c2}$) — по критическим значениям коэффициентов интенсивности напряжений \bar{K}_{lc} (линейная механика разрушения), а в квазихрупких ($t_{c2} \leq t \leq t_{c1}$) и вязких ($t > t_{c1}$) состояниях — по критическим значениям коэффициентов интенсивности деформаций \bar{K}_{lec} (нелинейная механика разрушения). Возникновение аварийных ситуаций и накопление повреждений при штатных и аварийных ситуациях приводят к смещению расчетных кривых из положения I в положение I' (см. рис. 4). Запасы по критическим температурам хрупкости в штатных ситуациях должны быть не менее 20–40°, в аварийных — не менее 10–20°. В штатных ситуациях запасы по разрушающим нагрузкам назначают в пределах 1,5–2, в аварийных — в пределах 1,1–1,6.

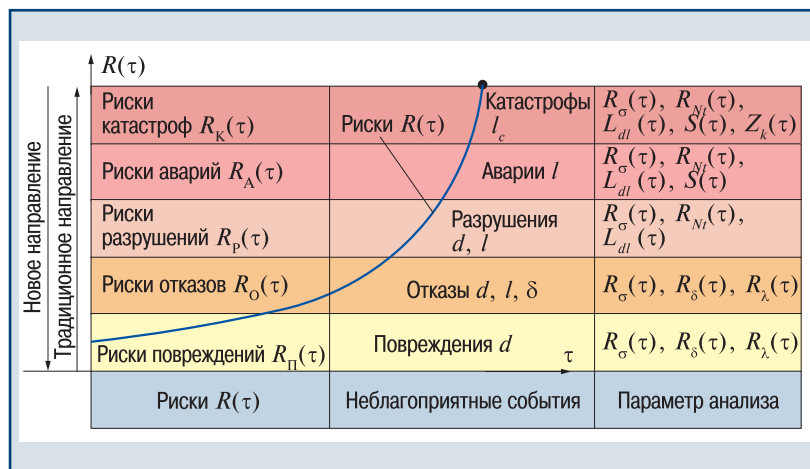
Обеспечение ресурса безопасной эксплуатации

Расчеты прочности, ресурса и живучести в штатных и аварийных ситуациях с использованием силовых и деформированных критериев разрушения на основе выражений (8)–(14) являются основанием для проектирования и управления ресурсом безопасной эксплуатации высоконагруженных стратегически и критически важных объектов, опасных производственных объектов и объектов технического регулирования с учетом их конструктивных форм, материалов, технологий изготовления и режимов эксплуатации, а также для

разработки и реализации компенсирующих мероприятий в целях повышения прочности, ресурса, живучести и смягчения или форсирования режимов эксплуатации [1–8, 11].

Применительно к уникальным и очень ответственным критически и стратегически важным объектам техносферы задачи анализа их нагруженности, прочности и ресурса должны решаться с использованием нелинейных закономерностей деформирования, повреждения и разрушения. При этом для условий широкого варьирования воздействий и состояний объектов должны в полном объеме использоваться комплексы данных об исходных характеристиках механических свойств материалов, об условиях и режимах их нагружения по параметрам времени и числа циклов, о напряженно-деформированном состоянии в упругой и упругопластической постановке в наиболее нагруженных зонах и его кинетике в процессе эксплуатации.

Вместе с этим для научно обоснованного анализа ресурса безопасной эксплуатации конструкций и управления этим ресурсом наряду с использованием названных закономерностей линейной и нелинейной механики деформирования и разрушения в современных условиях является насущно необходимым введение при рассмотрении концепции риска возможности возникновения на объектах разрушений, приводящих [2, 9–16] в конечном счете к авариям и катастрофам (рис. 5).



▲ Рис. 5. Структура анализа условий и риска возникновения опасных состояний
▲ Fig. 5. Structure of the analysis of conditions and risk of hazardous states

В этом случае по параметрам прочности, устойчивости, долговечности, дефектности детально анализируются показатели риска повреждения конструкций, возникновения в них отказов, разрушений в результате аварий и катастроф с определением соответствующих показателей безопасности и защищенности рассматриваемой конструкции.

При построении алгоритма анализа и мониторинга рисков $R(\tau)$ и сценариев развития неблагоприят-

ных событий в условиях перехода конструкции от штатных к предельным состояниям, а также базовых параметров анализируемых объектов учитываются следующие положения [2, 8, 10, 13, 14]. Фазы иницирования повреждений, отказов, разрушений, аварий, катастроф и соответствующие им риски $R(\tau)$ могут представлять собой во времени τ как краткосрочный, так и длительный процесс, включающий в себя различные этапы отклонений от заданных режимов эксплуатации, накопление механических повреждений в оборудовании, отказы, а также нарушения контроля за качеством и состоянием оборудования и обслуживающего его персонала. Эти фазы характеризуются соответствующими группами входящих в выражение (7) расчетных характеристик (см. рис. 5): безопасности $S(\tau)$ и рисков $R(\tau)$; ресурса $R_{N_c}(\tau)$, надежности $P_{PR}(\tau)$, живучести $L_{dl}(\tau)$; прочности $R_{\sigma}(\tau)$, жесткости $R_{\delta}(\tau)$, устойчивости $R_{\lambda}(\tau)$. При этом траектории развития неблагоприятных событий, приводящих к отказам, могут иметь различный вид, характеризуемый увеличением во времени τ величин рисков $R(\tau)$.

Первая фаза накопления повреждений D , отказов и частичных разрушений с развитием дефектов (трещин) l заканчивается возникновением на объекте аварийной ситуации, которая может быть связана с начавшимися каскадными разрушениями и необратимыми отклонениями от условий нормальной эксплуатации. Катастрофа на объектах с образованием критических дефектов l_k является заключительной стадией развития неблагоприятных ситуаций и характеризуется самыми высокими, неприемлемыми (критическими) рисками $R(\tau) = R_k(\tau)$.

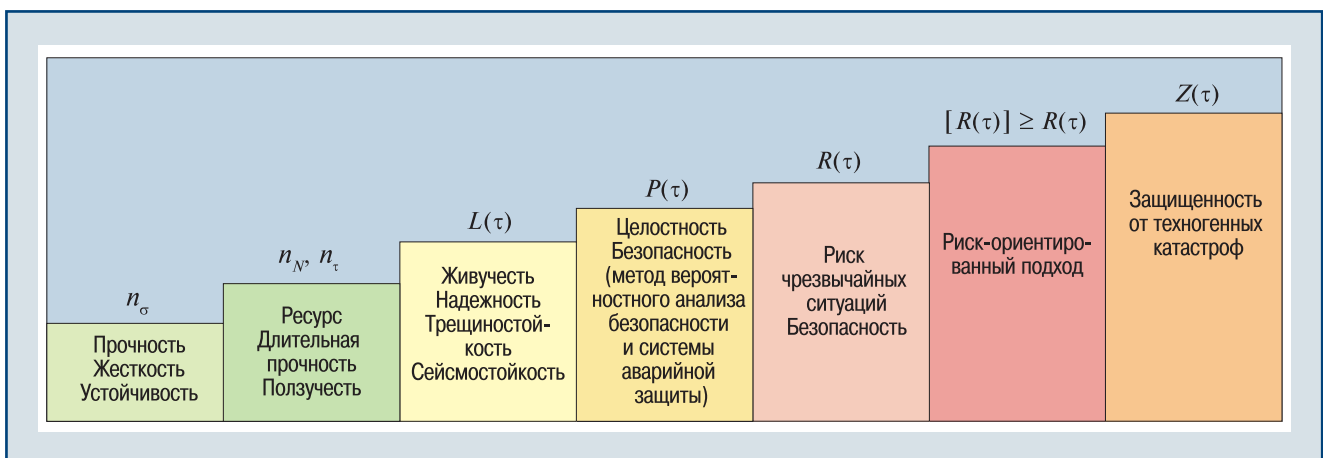
Современные расчеты прочности и ресурса высоконагруженных конструкций представляют собой новое направление в методологии управления ресурсом их безопасной эксплуатации с научно обоснованным использованием деформационных подходов в рамках линейной и нелинейной механики деформирования и разрушения, анализом

условий и рисков возникновения приводящих к авариям и катастрофам разрушений, обоснованием ресурса безопасной эксплуатации конструкций и их защищенности от аварий. На рис. 6 показана последовательность формирования и развития научных подходов к решению прикладных проблем установления и управления ресурсом безопасной эксплуатации конструкций в решении общей задачи.

Так, в начале этого пути анализировались параметры прочности, жесткости и устойчивости конструкций с назначением соответствующих запасов по действующим напряжениям n_{σ} . На следующем этапе расчеты дополнены анализом ресурса, длительной прочности и ползучести, который сопровождался введением в рассмотрение соответствующих запасов по числу циклов n_N и времени n_t . Исследования живучести $L(\tau)$, трещиностойкости, сейсмостойкости и надежности составили следующий этап в развитии расчетов на прочность и ресурс. Новый подход в данной области позволил ввести в расчеты понятие безопасности, характеризуемой через параметры вероятности разрушения $P(\tau)$ с применением существующего метода вероятностного анализа безопасности и использованием на его основе систем аварийной защиты. На современном этапе в этом направлении решаются задачи обеспечения целостности конструкций с анализом их безопасности по параметру риска $R(\tau)$ возникновения чрезвычайных ситуаций и защищенности $Z(\tau)$ от техногенных аварий и катастроф с учетом всего рассмотренного выше комплекса подходов к определению прочности, ресурса, живучести, увязанных с вероятностными характеристиками указанных процессов.

Заключение

Проблема анализа, определения и управления ресурсом безопасной эксплуатации является фундаментальной научной проблемой и важной прикладной задачей в обосновании промышленной безопасности. В своем развитии подходы к ее реше-



▲ Рис. 6. Последовательность формирования и развития научных подходов к решению прикладных проблем установления и управления ресурсом безопасной эксплуатации конструкций

▲ Fig. 6. Sequence of the formation and development of scientific approaches to solving applied problems of establishing and managing the life of structures safe operation

нию в общей сложности имеют практически столетнюю историю. На различных стадиях этого развития получены соответствующие результаты ее решения, но по мере совершенствования методологий и возникновения новых знаний подходы к ее решению будут получать новые импульсы для развития и давать новые результаты.

Фундаментальные научные исследования проблем определения безопасного ресурса эксплуатации машин и конструкций и управления этим ресурсом в штатных ситуациях, а также установление закономерностей их перехода в предельные состояния с учетом рисков возникновения аварий позволяют сформулировать критерии прочности, ресурса, живучести и безопасности с анализом условий достижения предельных состояний в процессе эксплуатации на разных этапах и режимах жизненного цикла. Перспективные в этом направлении методы для управления сроком безопасной эксплуатации объектов техносферы во все усложняющихся условиях их работы базируются на включении в систему критериев механики деформирования и разрушения критериальных уравнений и параметров, конечной целью использования которых является количественное определение характеристик безопасности, риска и защищенности, позволяющих объективно оценивать проектный и текущий ресурс анализируемой конструкции и прогнозировать возможности его продления по условиям безопасной эксплуатации.

Приведенные выше подходы к комплексному анализу, нормированию и обеспечению ресурса и срока безопасной эксплуатации промышленных объектов базируются на сформулированных в результате проведения фундаментальных научных исследований закономерностях деформирования и разрушения материалов, составляющих основу баз знаний для оценки прочности, ресурса и живучести оборудования и являются фундаментом для проведения комплексных расчетов безопасности и защищенности промышленного оборудования в условиях сложных эксплуатационных воздействий. Для дальнейшего развития методов и систем определения и продления ресурса и сроков безопасной эксплуатации принципиальное значение имеет принятие основ государственной политики в области обеспечения промышленной безопасности. Вытекающие из этого задачи научной поддержки реализации данных основ предполагают постановку новых систематических научных исследований и реализацию соответствующих практических разработок.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-08-00572_а).

Список литературы

1. *Научные проблемы определения ресурса и управления сроком безопасной эксплуатации промышленных объектов/ Н.А. Махутов, М.М. Гаденин, А.С. Печёркин, Б.А. Красных// Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 4. — С. 7–15. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-4-7-15*

2. *Makhutov N.A. Generalized Regularities of Deformation and Destruction Processes// Herald of the Russian Academy of Sciences. — 2017. — Vol. 87. — Iss. 3. — P. 217–228.*

3. *Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов. — М.: МГОФ «Знание», 2015. — 600 с.*

4. *Gadenin M.M. Characteristics of mechanical properties of materials in studies of conditions of attainment of marginal stated// Inorganic Materials. — 2013. — Vol. 49. — Iss. 15. — P. 1352–1356. DOI: 10.1134/S0020168513150053*

5. *Bahr N.J. System safety engineering and risk assessment: a practical approach. — New York: Taylor & Francis, 2015. — 420 p.*

6. *Pluvinage G., Capelle J., Meliani H.M. A review of fracture toughness transferability with constraint and stress gradient// Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. — 2014. — Vol. 37. — P. 1165–1185. DOI: 10.1111/ffe.12232*

7. *Matvienko Yu.G. Safety factors in structural integrity assessment of components with defects// International Journal of Structural Integrity. — 2013. — № 4. — P. 457–476. DOI: 10.1108/ijsi-09-2012-002*

8. *Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. — Новосибирск: Наука, 2017. — 724 с.*

9. *Aliyev A.G., Shahverdiyeva R.O. Perspective Directions of Development of Innovative Structures on the Basis of Modern Technologies// International Journal of Engineering and Manufacturing. — 2018. — Vol. 8. — Iss. 4. — P. 1–12. DOI: 10.5815/ijem.2018.04.01*

10. *Koranne A.J., Kachare J.A., Jadhav S.A. Fatigue crack analysis using acoustic emission// International Research Journal of Engineering and Technology. — 2017. — Vol. 4. — Iss. 1. — P. 1177–1180.*

11. *Sharma D., Kumar B., Chand S. A Trend Analysis of Machine Learning Research with Topic Models and Mann-Kendall Test// International Journal of Intelligent Systems and Applications. — 2019. — Vol. 11. — Iss. 2. — P. 70–82. DOI: 10.5815/ijisa.2019.02.08*

12. *Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Фундаментальные и прикладные проблемы комплексной безопасности. — М.: МГОФ «Знание», 2015. — 992 с.*

13. *Махутов Н.А., Гаденин М.М. Научная поддержка риск-ориентированного обоснования промышленной безопасности// Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 8. — С. 50–55.*

14. *Innovations in minimization of natural and technological risks// First Eurasian Risk 2019 Conference. — Baku, 2019. — 136 p.*

15. *Научное обеспечение основ государственной политики в области промышленной безопасности/ А.Л. Рыбас, Н.А. Махутов, М.М. Гаденин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2018. — № 11. — С. 7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-11-7-14*

16. *Об основах государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу: Указ Президента Рос. Федерации от 6 мая 2018 г. № 198. URL: <http://www.>*

garant.ru/products/ipo/prime/doc/71836636/ (дата обращения: 29.10.2019).

kei51@mail.ru

Материал поступил в редакцию 10 декабря 2019 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 1, pp. 7–15.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-7-15

Calculation and Experimental Approaches to the Analysis and Provision of the Service Life and Safe Operation Life of Industrial Facilities

N.A. Makhutov, RAS Corresponding Member, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Research Associate, kei51@mail.ru

M.M. Gadenin, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher
IMASH RAN, Moscow, Russia

A.S. Pecherkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., First Dep. General Dir.
STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

B.A. Krasnyh, Cand. Sci. (Eng.), Chairman of the Scientific and Technical Council

Rostekhnadzor, Moscow, Russia

Abstract

It is shown that the modern calculations of strength and service life of technical devices, equipment and materials, as well as highly loaded structures represent the hot topic in the methodology of safe operation control of hazardous production facilities. It includes scientifically substantiated use of deformation approaches within the framework of linear and non-linear mechanics of deformation and destruction, analysis of conditions and risks of destruction leading to accidents and disasters, substantiation of the resource and safe operation life for industrial facilities and their accident protection. The problem of analysis and ensuring the operational life and term of safe operation of industrial facilities is discussed in detail. The problem of increasing their level of protection is analyzed based on in-depth study of the conditions and regularities of deformation and destruction processes in both standard and extreme limit conditions of their operation. The fundamental task is set and solved concerning the formation of the criterion base of conditions for reaching of permissible and limit states of industrial facilities by the parameters of strength, service life and survivability. The basis of the considered approaches is the fundamental scientific research of problems of determination of safe operation life of industrial facilities and management of this life, as well as establishment of regularities of their transition to limit states considering the risks of accidents occurrence (with analysis of conditions of reaching of limit states during operation at different stages and modes of the life cycle).

Key words: operational life, safe operation life, industrial facilities, strength, lifetime, destruction, stresses, deformations, safety, risk, security.

References

1. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Pecherkin A.S., Krasnyh B.A. Scientific Problems of Service Life Determination and Management of Industrial Objects Safe Operation Life. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in*

Industry. 2019. № 4. pp. 7–15. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2019-4-7-15

2. Makhutov N.A. Generalized Regularities of Deformation and Destruction Processes. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2017. Vol. 87. Iss. 3. pp. 217–228.

3. The security of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Service life management of high-risk facilities. Moscow: MGOF «Znanie», 2015. 600 p. (In Russ.).

4. Gadenin M.M. Characteristics of mechanical properties of materials in studies of conditions of attainment of marginal stated. *Inorganic Materials*. 2013. Vol. 49. Iss. 15. pp. 1352–1356. DOI: 10.1134/S0020168513150053

5. Bahr N.J. System safety engineering and risk assessment: a practical approach. New York: Taylor & Francis, 2015. 420 p.

6. Pluvinage G., Capelle J., Meliani H.M. A review of fracture toughness transferability with constraint and stress gradient. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2014. Vol. 37. pp. 1165–1185. DOI: 10.1111/ffe.12232

7. Matvienko Yu.G. Safety factors in structural integrity assessment of components with defects. *International Journal of Structural Integrity*. 2013. № 4. pp. 457–476. DOI: 10.1108/ijsi-09-2012-002

8. Makhutov N.A. Safety and risks: system research and development. Novosibirsk: Nauka, 2017. 724 p. (In Russ.).

9. Aliyev A.G., Shahverdiyeva R.O. Perspective Directions of Development of Innovative Structures on the Basis of Modern Technologies. *International Journal of Engineering and Manufacturing*. 2018. Vol. 8. Iss. 4. pp. 1–12. DOI: 10.5815/ijem.2018.04.01

10. Koranne A.J., Kachare J.A., Jadhav S.A. Fatigue crack analysis using acoustic emission. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4. Iss. 1. pp. 1177–1180.

11. Sharma D., Kumar B., Chand S. A Trend Analysis of Machine Learning Research with Topic Models and Mann-Kendall Test. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2019. Vol. 11. Iss. 2. pp. 70–82. DOI: 10.5815/ijisa.2019.02.08

12. The security of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Fundamental and applied problems of the integrated safety and security. Moscow: MGOF «Znanie», 2015. 992 p. (In Russ.).

13. Makhutov N.A., Gadenin M.M. Scientific Support for Risk-Oriented Substantiation of Industrial Safety. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2015. № 8. pp. 50–55. (In Russ.).

14. Innovations in minimization of natural and technological risks. First Eurasian Risk 2019 Conference. Baku, 2019. 136 p.

15. Rybas A.L., Makhutov N.A., Gadenin M.M., Pecherkin A.S., Nadein V.A. Scientific Support of the State Policy Fundamentals in the Field of Industrial Safety. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2018. № 11. pp. 7–14. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2018-11-7-14

16. On the fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the field of industrial safety for the period up to 2025 and further prospect: Decree of the President of the Russian Federation of May 6, 2018 198. № Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71836636/> (accessed: October 29, 2019). (In Russ.).

Received December 10, 2019