

ПРОЧНОСТЬ, РЕСУРС, ЖИВУЧЕСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКИХ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И ОБЪЕКТОВ: ОБОСНОВАНИЕ И НОРМИРОВАНИЕ

ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН МАХУТОВ Н.А.
ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ РАН ПО ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ,
ПРЕДСЕДАТЕЛЬ МЭС ПО БЕЗОПАСНОСТИ МПТ И ОБЪЕКТОВ



Аннотация.

Рассматриваются силовые, деформационные, детерминированные и вероятностные методы оценки напряженно-деформированных и предельных состояний в опасных зонах морских подводных трубопроводов и объектов. Приведены определяющие взаимосвязанные выражения для обоснования, определения, назначения и нормирования системы запасов прочности, ресурса, живучести, безопасности и защищенности от отказов, аварий и катастроф для трубопроводов и объектов, отнесенных к I, II классам опасности и к категории критически важных для безопасности.

Ключевые слова: морские подводные трубопроводы и объекты, прочность, ресурс, живучесть, безопасность, защищенность, риск, напряжение, деформация.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМ

Современная наука, техника и технологии позволили человеку и человечеству на протяжении веков и тысячелетий освоить трехмерные x-y-z пространства жизнеобеспечения и жизнедеятельности. Вначале это были локальные точки x, y обитания, потом освоение плоских жизненных двумерных пространств x-y на поверхности планеты протяженностью до 40.000 км (период великих географических открытий), потом, в XX – XXI вв., освоение оси +z в воздушном (до 40 км) и космическом пространстве (от 10² до 1,5x10⁸ км). И только направление –z до настоящего времени реально освоено до малых глубин. Это относится к глубокому под-земному бурению (до 15 км) и подводному погружению (до 11 км). Современные подводные морские и океанические инфраструктуры расположены на глубинах до 2,5÷5 км. При этом добыча и транспортировка углеводородов сосредоточена пока на глубинах до 2,2 км (магистральный трубопровод «Голубой поток»).

Сложность реализации современных проектов по исследованиям, проектированию, строительству и эксплуатации подводных морских трубопроводов и объектов связана с чрезмерно высокими внешними (до 22 МПа) и внутренними (до 400 МПа) статическим и переменным давлением, малой изученностью и сложностью рельефа дна, наличием коррозионных, сейсмических, ледовых воздействий, волн цунами.

По мере длительного развития морской подводной техники и технологий (особенно с начала XX в.) проходило [1-5] совершенствование научных методов исследований и поэтапное обоснование прочности (с 1940-1950 гг.), долговечности (с 1950-1970 гг.), надежности (с 1980-1990 гг.),

безопасности, живучести (с1990-2000 гг.), безопасности (с 2000-2010 гг.) и защищенности (2020-2030 гг.).

Вместе с тем, несмотря на существенно высокие результаты научных исследований, проектных и технологических разработок в нашей стране и за рубежом на морских подводных и надводных объектах, подводных трубопроводах возникали многочисленные отказы и разрушения, крупные аварии и тяжелые единичные катастрофы с огромными социальными, экономическими и экологическими ущербами. Катастрофы на подводных дизельных и атомных подводных лодках («Трешер» - США, «Комсомолец» - СССР, «Курск» - Россия); на морских платформах («Пайпер Альфа – Великобритания, ВП – США, «Кольская» - Россия) сопровождалась гибелью десятков и сотен людей, крупными пожарами, разрушениями, затоплениями с экстремальными экономическими потерями до 60 млрд долл. Особую актуальность проблемы безопасности и защищенности от аварий и катастроф приобрели после крупных террористических атак на российские подводные морские магистральные трубопроводы СП-1, СП-2 в Балтийском море 26.09.2022 г.

Анализ большой значимости указанных выше проблем для морских подводных трубопроводов и объектов привел к ряду важных государственных и межотраслевых решений:

- принятию Морской доктрины Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 31.07.2022 №512;
- созданию Морской коллегии по Указу Президента Российской Федерации от 13.08.2024 №691 и последующая организация при ней межведомственных комиссий и советов;

АКВАТОРИИ: АЗОВСКОЕ, БАЛТИЙСКОЕ, БАРЕНЦЕВО, КАРСКОЕ, КАСПИЙСКОЕ, ОХОТСКОЕ, ЧЕРНОЕ МОРЕ

НОМЕНКЛАТУРА ОБЪЕКТОВ

№	НАИМЕНОВАНИЕ	КОЛ-ВО	ХАРАКТЕРИСТИКИ	КЛАСС ОПАСНОСТИ
1	Морские магистральные трубопроводы и участки	12	Протяженность – 1200 км. Общая более – 5000 км. Глубина – 2200 м.	I, II
2	Системы крупных морских непромысловых и промысловых трубопроводов	11	Единичная протяженность до 420 км.	I, II
3	Морские стационарные платформы	21	Масса – до 160.000 тонн. Стационарные, плавучие	I, II
4	Морские стационарные платформы	11	Плавучие	II, III
5	Морские наливные комплексы	6	Надводно-подводные	I, II
6	Добычные подводные комплексы	2	Быстро развивающиеся	I, II

РЕСУРСНЫЙ ШЕЛЬФОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

РЕСУРС	РОССИЯ	США	ДАНИЯ	КАНАДА	НОРВЕГИЯ
НЕФТЬ	41%	28%	18%	9%	8%
ГАЗ	70%	14%	8%	4%	4%

Таблица 1 – состояние реализации Морской доктрины, федерального законодательства и стратегий в сфере безопасности морских объектов шельфовых нефтегазовых комплексов

- формированию в 2023 г. и началу деятельности Межведомственного экспертного совета по безопасности морских подводных трубопроводов и объектов (МЭС).

В 2023-2024 гг. на организационных и технических заседаниях МЭС в Российской академии наук, в Минпромторге, в Аналитическом центре Правительства Российской Федерации, в Ростехнадзоре, а также на выездных совещаниях в Астрахани, С-Петербурге были намечены, обсуждены и приняты основные направления деятельности МЭС по обоснованию и повышению безопасности морских подводных трубопроводов и объектов. Их результаты освещены в публикациях базового журнала «Морская наука и техника» [1].

На настоящей научно-практической конференции «Морская наука и техника. Безопасность морских трубопроводов и объектов» рассматриваются:

- базовые составляющие решения научно-методических проблем безопасности;
- современное состояние и развитие правовой и нормативной основы безопасности;
- современные технологии расчетов и испытаний, диагностики состояний, мониторинга рисков;
- перспективные методы и средства предупреждения и защиты от опасных и чрезвычайных ситуаций для функционирующих, строящихся и проектируемых трубопроводов и объектов.

Ниже в докладе основное внимание уделено последнему направлению.

2. ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ

На протяжении всего периода создания и использования морских подводных трубопроводов и объектов в качестве базового требования было обеспечение их прочности при действии проектных нагрузок, выбранных конструкционных материалах и технологиях. Это требование относится ко всему комплексу анализируемых трубопроводов и объектов [1].

В табл. 1 приведены сводные данные об этих трубопроводах и объектах, подведомственных Ростехнадзору, а также ресурсный потенциал стран, имеющих выход на шельф для добычи углеводородов.

Соответствующие трубопроводы и объекты отнесены к I, II классам опасности. При этом Россия является [1, 2] ведущей страной мира по ресурсному потенциалу, что определяет важность и актуальность всех решаемых проблем и, в первую очередь, проблемы прочности. Ключевой для всех решений является унифицированная структурная схема, объединяющая три компонента обоснования работоспособности (рис. 1).

Для оценки прочности используются [2, 3]:
- максимальные эксплуатационные нагрузки $Q^3(\tau)$ для данного этапа τ жизненного цикла;
- характеристики напряженно-деформированного состояния « $\sigma^3(\tau)$, $\epsilon^3(\tau)$ »;
- силовые и деформационные критерии предельных состояний « $\sigma_k(\tau)$ - $\epsilon_k(\tau)$ ».

В основных расчетах прочности под $Q^3(\tau)$ понимаются наружные $P_n(\tau)$ и внутренние $P_v(\tau)$ давления, изгибающие

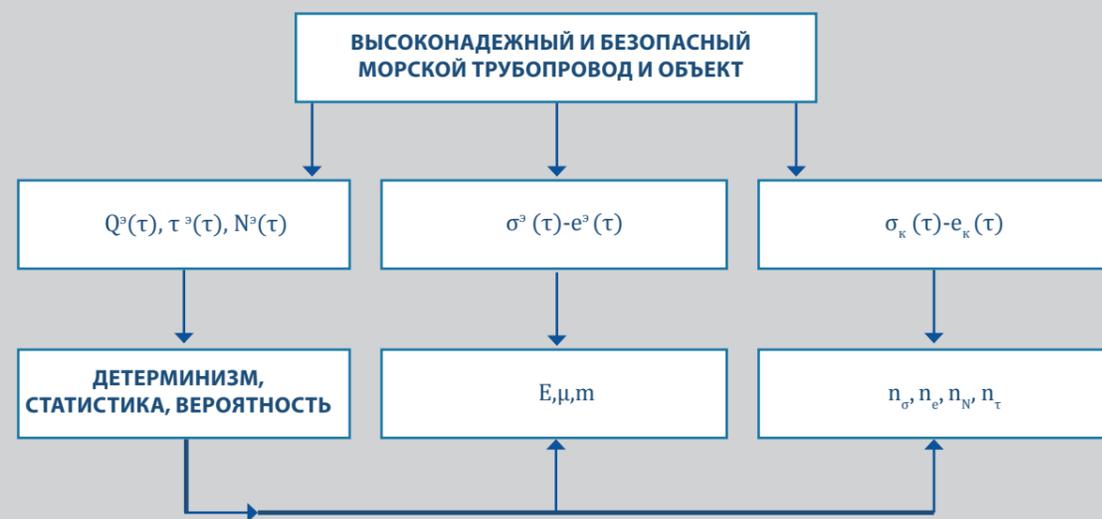


Рис. 1. Комплексный расчетно-экспериментальный анализ работоспособности

$M_n(\tau)$ и крутящие $M_k(\tau)$ моменты, осевые силы $N_o(\tau)$ и поперечные $N_n(\tau)$ силы.

$$Q^3(\tau) = F \{ (P_n(\tau), P_b(\tau)), (M_n(\tau), M_k(\tau), N_o(\tau), N_n(\tau)) \}, \quad (1)$$

При нормативном определении напряженно-деформированных состояний расчеты ведутся [1-3] аналитическими методами сопротивления материалов, теории упругости, теории стержней, пластин и оболочек

$$\sigma^3(\tau) = Q^3(\tau) / \{ F_o, W_o \}, \quad (2)$$

где F_o, W_o - площадь и момент сопротивления (осевой и полярной) опасного сечения.

Для определения $\sigma^3(\tau)$ всё большее применение находят численные методы (в первую очередь, метод конечных элементов - МКЭ).

Прочность считается обеспеченной, если номинальные напряжения по (2) не превышают допускаемые значения $[\sigma]$

$$\sigma^3(\tau) \leq [\sigma] = \sigma_{он} / n_\sigma = \min \{ \sigma_\tau / n_\tau, \sigma_b / n_b \}, \quad (3)$$

где $\sigma_{он}, \sigma_\tau, \sigma_b$ - опасные напряжения, предел текучести и прочности соответственно;

n_σ, n_τ, n_b - запасы по напряжениям.

Для первых морских подводных трубопроводов использовался только запас по пределу прочности ($n_\sigma = n_b = 3,0 \div 3,5$) для предупреждения разрушений. В последующие годы в связи с применением более высокопрочных материалов стали назначаться запасы по n_τ, n_b ($n_\tau < n_b$) при их величинах $1,2 \leq n_\tau \leq 1,5; 2,0 \leq n_b \leq 2,5$.

Для глубоководных морских трубопроводов, сосудов и объектов наряду с условием прочности по (3) с учетом перепада давлений p_n, p_b проводились расчеты на общую и локальную потерю устойчивости под действием только внешнего давления p_b .

В уточненных поверочных расчетах прочности наряду с

оценкой номинальных напряжений $\sigma^3(\tau) = \sigma_n(\tau)$ проводятся расчеты прочности по максимальным местным напряжениям $\sigma_{max}(\tau)$ с введением в расчет коэффициентов концентрации напряжений α_σ , остаточных σ_σ , температурных σ_τ , сейсмических σ_s , волновых σ_b и от цунами σ_τ напряжений

$$\sigma_{max}(\tau) = F \{ \sigma_\tau, \alpha_\sigma, (\sigma_\sigma, \sigma_\tau, \sigma_s, \sigma_b) \} \quad (4)$$

При этом допускаемые напряжения могут быть увеличены, а запасы прочности (с учетом величин σ_σ , температурных σ_τ , сейсмических σ_s , волновых σ_b и от цунами σ_τ напряжений) снижены на 20÷25%.

При повышенных уровнях концентрации $\alpha_\sigma (\alpha_\sigma \geq 1,5)$ и величинах напряжений $\sigma_\sigma, \sigma_\tau, \sigma_s, \sigma_\tau$ и принятых запасах n_σ в (3) в наиболее нагруженных локальных зонах наряду с упругими ее возможно образование пластических деформаций e_p , когда их суммарные величины превосходят деформации предела текучести e_τ

$$e = e_e + e_p > e_\tau = \sigma_\tau / E, \quad (5)$$

где E - модуль продольной упругости (см. рис. 1).

Сопротивление конструкционных сталей пластическим деформациям e_p существенно ниже, чем упругим e_e . Это описывается степенным уравнением диаграммы деформирования в истинных напряжениях.

$$\sigma = \sigma_\tau (e / e_\tau)^m, \quad (6)$$

где m - показатель упрочнения.

Для области упругих деформаций $0 \leq e \leq e_\tau$

$$m = 1; \sigma_\tau / e_\tau = E \text{ и } \sigma = eE \quad (7)$$

В области пластических деформаций до достижения предельных разрушающих деформаций e_k в шейке образца ($e_\tau < e < e_k$), $0 \leq m \leq 0,25; 0,3 \leq e_k \leq 1,0$ по (6).

$$\sigma = \sigma_\tau (e / e_\tau)^m = S_k, \quad (8)$$

где S_k - сопротивление разрыву в шейке.

В соответствии с (3) - (8) для проектных эксплуатационных нагрузок $Q^3(\tau)$ и широко применяемых конструкционных сталей при $m \approx 0,08 \div 0,18$ изменение локальных напряжений σ / σ_τ составляет 0,25, при изменении деформаций $e / e_\tau \approx 5,0$. Это означает появление неопределенностей при расчетах прочности в напряжениях по силовому критерию σ в выражении (3) и требует перехода к расчетам по деформационному критерию

$$e^3_{max}(\tau) = F \{ Q^3(\tau), \sigma_\tau, \alpha_\sigma, m \} \leq [e] = e_{он} / n_e \quad (9)$$

где $[e], e_{он}$ - допускаемая и опасная деформация соответственно;

n_e - запас по деформациям.

Роль концентрации при этом существенно меняется за счет перераспределения напряжений и деформаций - коэффициент концентрации деформаций K_e растет, а коэффициент концентрации напряжений падает ($K_e < \alpha_\sigma$).

С учетом (3), (9) запасы n_σ и n_e связаны степенной зависимостью

$$1,5 < n_e \leq n_\sigma^{1/m} \leq 10 \quad (10)$$

3.ОБОСНОВАНИЕ РЕСУРСА

Рассмотренные в п. 2 эксплуатационные проектные нагрузки $Q^3(\tau)$ по (1) создают номинальные $\sigma^3(\tau)$ по (2), (3) и максимальные $\sigma^3_{max}(\tau)$ напряжения и деформации $e^3(\tau)$, $e^3_{max}(\tau)$ по (4)-(9) в предположении их однократного ($N^3=1$) воздействия [1-3]. В реальной эксплуатации морских подводных трубопроводов и объектов время нагружения τ и число циклов нагружения N^3 варьируется в весьма широких пределах:

- от долей секунд до десятков лет по шкале τ ;
- от 10^0 до 10^{12} по шкале $N^3(\tau)$.

Увеличение τ и $N^3(\tau)$ сопровождается целым спектром повреждающих и поражающих факторов, что ведет к снижению критических, предельных нагрузок $Q^3_k(\tau)$, напряжений $\sigma^3_k(\tau)$ и деформаций $e_k(\tau)$ за счет процессов старения и деградации (рис. 3).

Современные теории длительной и циклической прочности и многочисленные экспериментальные исследования являются основой для построения и использования степенных уравнений долговечности по параметрам времени $\tau = \tau_k$ и числа циклов $N = N_k$. Фундаментальные унифицированные

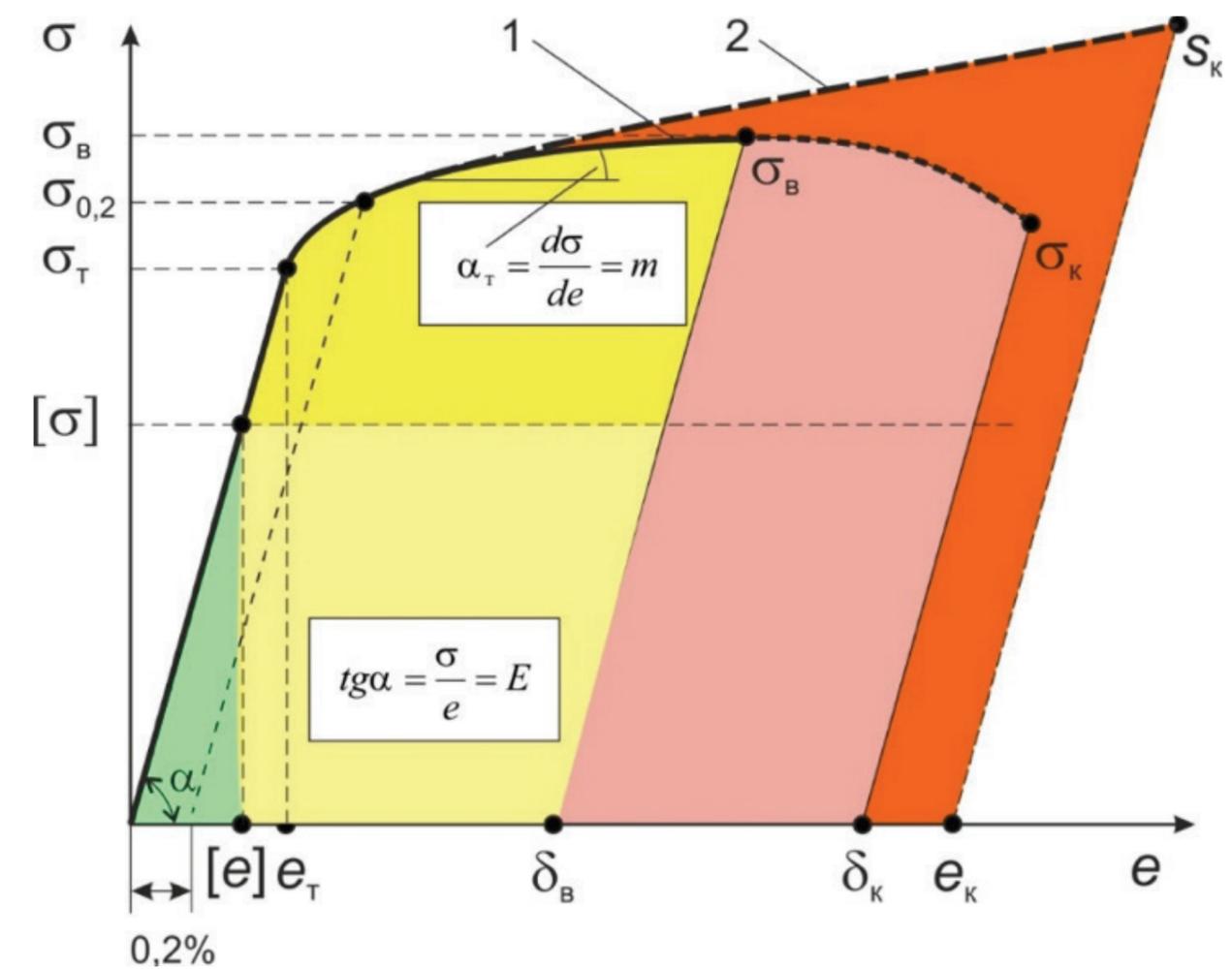


Рис. 2. Диаграмма деформирования при однократном статическом нагружении: 1 - стандартная диаграмма в условных напряжениях и деформациях; 2 - диаграмма деформирования в истинных координатах

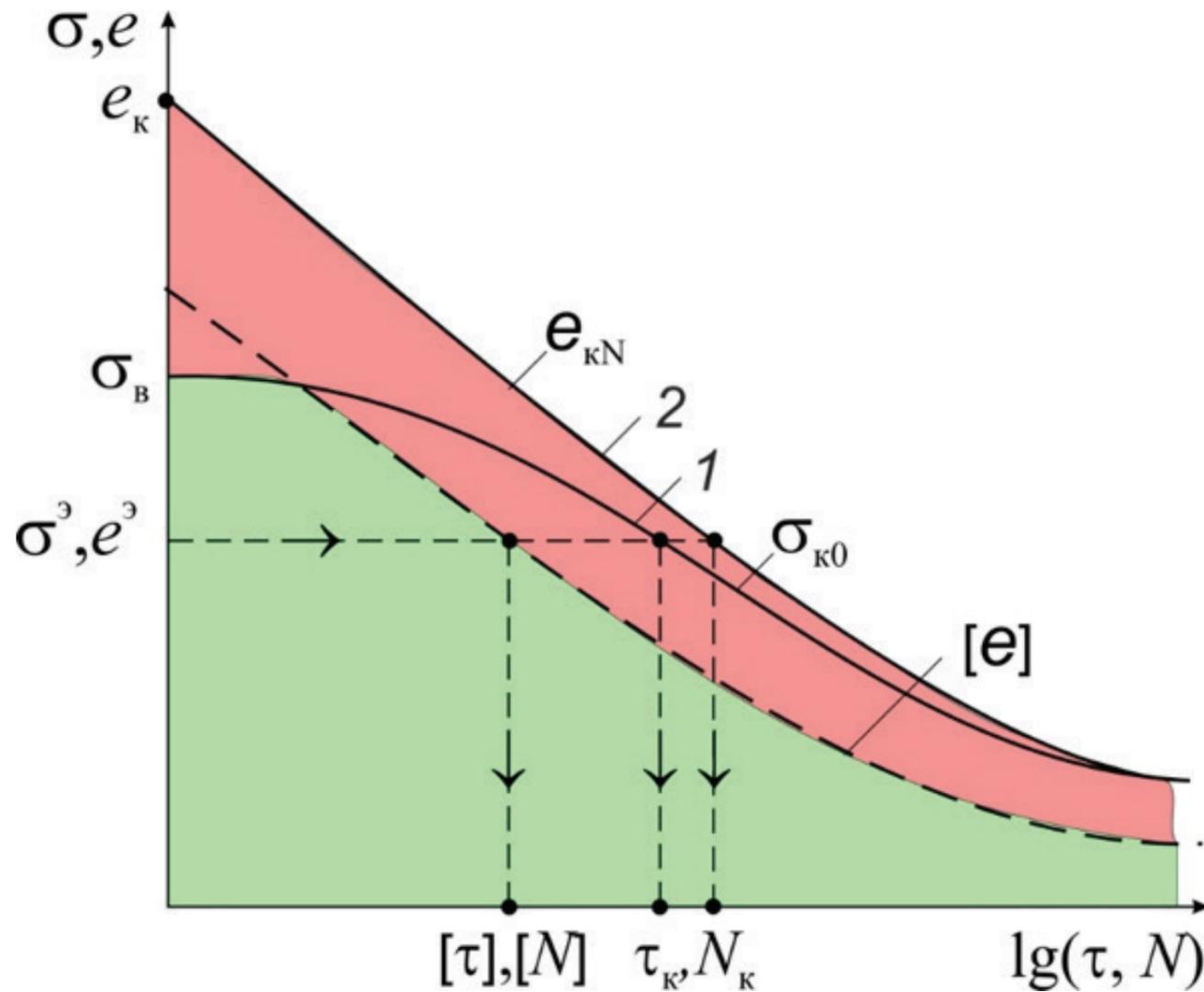


Рис. 3. Кривые циклической и длительной прочности в условных напряжениях (1) и истинных деформациях (2)

расчетные зависимости для штатных ситуаций связывают их с локальными деформациями e_{max} по (5), (6), (9)

$$e_{max} = \{m^{te}, m^{Ne}, m^{tr}, m^{Np}\} = C_e, e_{pmax} = \{m^{tr}, m^{Np}\} = C_p, \quad (11)$$

где $m^{te}, m^{Ne}, m^{tr}, m^{Np}$ - показатели степени для кривых долговечности по параметрам упругих e_e и пластических e_p деформаций соответственно ($m_e < m_p$);

C_e, C_p - характеристики материала, связанные с прочностью (S_k) и пластичностью (e_k) соответственно.

Для сталей параметры S_k, e_k определяются экспериментально или расчетом по стандартным свойствам

$$S_k \cong \sigma_b / (1 + 1,4\psi_k); e_k = \ln 1 / (1 - \psi_k) \quad (12)$$

где ψ_k - относительное сужение в шейке при однократном напряжении.

Величины m_{te}, m_{Np} с повышением статической прочности ($200 \leq \sigma_b \leq 600, 420 \leq \sigma_b \leq 800$ МПа) увеличиваются от 0,8 до 0,12 и от 0,5 до 0,6 соответственно.

Величина m_{te} равна $0,015 \pm 0,020$, а $m_{Np} - 0,03 \pm 0,04$.

Для кривых циклической прочности деформации e_{max} и e_{pmax} оцениваются в размахах или амплитудах, а для кривых

длительной статической прочности - в максимальных значениях этих деформаций.

В расчетно-экспериментальных оценках ресурса, долговечности и сроков службы одновременно используются две группы запасов:

- по времени τ и числу циклов N

$$n_\tau = \tau / \tau^3; n_N = N / N^3; \quad (13)$$

- по напряжениям σ и деформациям

$$n_{\sigma\tau} = \sigma_b(\tau) / \sigma^3; n_{te} = e_k(\tau) / e^3 \quad (14)$$

Для них выполняются неравенства

$$\{n_\tau, n_N\} \geq \{n_{te}, n_{eN}\} \geq \{n_{\sigma\tau}, n_{\sigma N}\} \quad (15)$$

Используя опыт обоснования ресурса объектов, оборудования и трубопроводов атомной энергетики, для морских подводных трубопроводов можно принять $\{n_\tau, n_N\}$ на уровне не ниже 2, а $\{n_\tau, n_N\}$ - не ниже 10. Совместное выполнение условий по уровням запасов $n_\sigma, n_e, n_\tau, n_N, n_{\sigma\tau}, n_{e\tau}, n_{\sigma N}, n_{eN}$ позволяет количественно оценить прочность и ресурс морских подводных трубопроводов и объектов. По расчетным пара-

метрам ресурса τ, N и назначенным запасам n_τ, n_N оцениваются допускаемые ресурсы

$$[\tau] = \tau_k / n_\tau; [N] = N_k / n_N, \quad (16)$$

а по ним допускаемый срок службы

$$[\tau_{cc}] = K_\tau^3 [\tau]; [N_{cc}] = K_N^3 [N], \quad (17)$$

где K_τ, K_N - коэффициенты экономически и технологически обоснованного использования ресурса.

По опыту реальной штатной эксплуатации $\{K_\tau^3, K_N^3\} = 1,05 \div 1,25$.

4. ОБОСНОВАНИЕ ЖИВУЧЕСТИ

Рассмотренные выше вопросы проектного обоснования прочности и ресурса базируются на предположении, что на стадиях изготовления, строительства, испытаний и пусков в эксплуатацию морские подводные трубопроводы и объекты проходили необходимые контроль и диагностику и в их несущих элементах отсутствовали дефекты и повреждения за пределами установленных норм [1-3].

В реальной эксплуатации эти требования и условия удовлетворяются не всегда:

- возможны пропуски дефектов, имеющих размеры более допустимых;
- возможно образование и развитие во времени τ и по числу циклов N новых дефектов за пределами допустимых;
- возможно образование дефектов после предварительной длительной эксплуатации с их ускоренным развитием в сильно поврежденных зонах.

В таких ситуациях речь идет о живучести (целостности) трубопроводов и объектов за пределами проектных решений, когда:

- исчерпан расчетный ресурс

$$\tau^3 > \tau; N^3 [N]; d_t + d_n = \tau^3 / [\tau] + N^3 / [N] > 1 \quad (18)$$

- дефектность стала выше приемлемой (допускаемой)

$$I[\tau, N] \geq [I], \quad (19)$$

где d_t, d_n - накопленные в эксплуатации повреждения;

$I[\tau, N]$ - размер наиболее опасного дефекта типа трещины.

Ограничение живучести по времени τ и числу циклов N проводится на основе расчетов по выражениям (16), (17), (18) для стадии образования опасных трещин.

Живучесть на стадии развития трещин оценивается построением диаграмм разрушения, связывающих степень (скорость) роста трещин в зависимости от трех основных факторов:

- увеличение нагрузок $Q^3(\tau)$ и, следовательно, $\sigma^3(\tau), e^3(\tau)$;
- повышение времени эксплуатации $\tau = \tau^3$;
- повышение циклической нагруженности при эксплуатации $N^3(\tau)$.

Эти зависимости описываются базовыми уравнениями линейной и нелинейной механики разрушения с учетом линейных и нелинейных уравнений состояния (5) - (18). Для несущих элементов с трещинами локальные напряжения в вершине трещин в линейной (упругой) постановке с учетом (2), (4) определяются по выражениям

$$\sigma^3_{max} = K^3_\tau / \sqrt{\pi r}; K^3_\tau = \sigma^3 / \sqrt{\pi l}, \quad (20)$$

где r - расстояние от вершины трещины;

K_τ - коэффициент интенсивности напряжений;

l - глубина (протяженность) трещины.

При образовании пластических деформаций e^3_{max} в зоне трещин их развитие проходит более интенсивно, чем в упругом случае. При этом определяющую роль играет коэффициент интенсивности деформаций

$$K_e = F\{K_\tau, (\sigma^3 / \sigma_\tau), m\} \quad (21)$$

По аналогии с (19) коэффициент K_e с ростом σ^3 увеличивается быстрее, чем K_τ по (20).

В общем случае по аналогии с диаграммой деформирования по (6) диаграммы разрушения записываются в форме

$$\{dl/d_\sigma, dl/d_\tau, dl/d_N\} = F\{K_\tau, (\sigma / \sigma_\tau, e / e_\tau), m\} \quad (22)$$

Для большинства конструкционных материалов эти зависимости имеют степенной вид

$$\{dl/d_\sigma, dl/d_\tau, dl/d_N\} = C_k, (K_\tau)^{m_k} \quad (23)$$

где C_k, m_k - параметры трещиностойкости материала, определяемые экспериментально или расчетом.

Величина m_k - увеличивается с ростом нагруженности ($2 \leq m_k \leq 5$), а C_k - зависит от прочности и пластичности материала и способа нагружения конструкции.

Так как характеристики прочности ($\sigma_\tau, \sigma_b, S_k$) зависят от времени τ и числа циклов N нагружения по рис. 3, то и скорости развития трещин оказываются зависящими от них (рис. 4).

Исходное нагружение и последующая эксплуатация возможны при трех вариантах:

- отсутствие обнаруживаемых дефектов ($l=0$);
- образование «0» допустимого дефекта l_0 ;
- развитие дефекта до критического уровня ($l=L_k$).

Для стадии живучести «0-K» по расчетной диаграмме разрушения вводятся запасы

$$n_{k\sigma} = K_{lc} / K_\tau^3; n_{k\sigma} = K_{lc} / K_\tau^3 \cdot l_c / l^3 \quad (24)$$

Здесь в числителе находятся критические значения интенсивности напряжений K_{lc} и деформаций K_{le} , критический размер трещины l_c , а в знаменателе их величины в заданный момент эксплуатации.

Эти запасы устанавливаются с учетом запасов n_σ по (3) и n_e по (9), (10)

$$n_\tau \leq n_{k\sigma} \leq n_b \leq \{n_e, n_l\} \quad (25)$$

Вся система критериев и расчетных выражений (1) - (25) и рис. 1 - 4 относилось к обоснованию прочности, ресурса и живучести для проектных ситуаций, в которых должны исключаться кратковременные, длительные и циклические разрушения на стадиях образования и развития трещин. Указанные выше запасы позволяют принимать конструкторские, технологические и эксплуатационные решения для большого числа морских подводных трубопроводов, что определяет их надежность в штатной эксплуатации.

5. ОБОСНОВАНИЕ РИСКОВ, БЕЗОПАСНОСТИ И ЗАЩИЩЕННОСТИ

Все расчетные характеристики определяющих выраже-

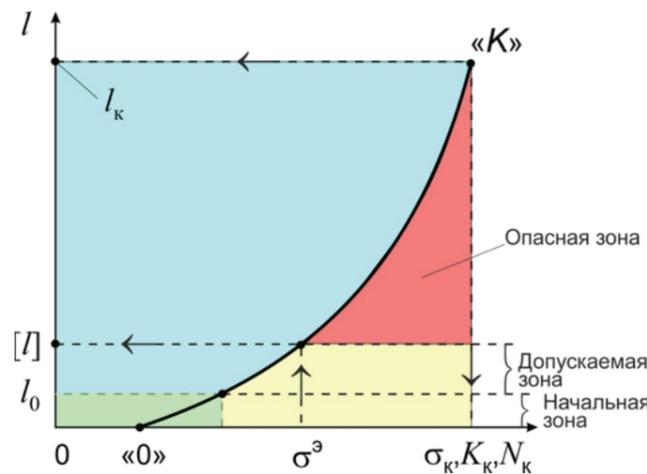


Рис. 4. Диаграмма статического σ , длительного (τ) и циклического (N) разрушения

ний (1) – (25) имеют статистическую, вероятностную природу и трактовку [1-5]. Для каждой из них существуют свои функции плотности вероятности $f(\tau)$ и вероятности $P_p(\tau)$. Экспериментами показано, что при вероятностях возникновения опасных состояний $P_p(\tau) \leq 0,01$ можно пользоваться нормальным законом распределения для параметров напряжений $\sigma^3(\tau), \sigma_r, \sigma_b, S_k$ и логнормальным для $\tau_k, N_k, e^{\sigma_{max}}$. Это позволяет функционально связать базовые запасы прочности n_p , ресурса n_r, n_N и живучести n_k, n_i с вероятностью достижения заданного предельного состояния. Критическая вероятность $P_{pk}(\tau)$, определяемая по условию отсутствия запасов

$$P_{pk}(\tau) = F\{n_{\sigma} \leq 1\}, \quad (26)$$

Выражение (26) характеризует наступление всех стадий повреждения и разрушения, ведущих к аварийной и катастрофической ситуации.

Для расчетного анализа статической прочности количественная связь между запасами n_p , расчетными напряжениями $\sigma^3 = \sigma^3(\tau)$, пределами прочности σ_b и $P_p(\tau)$ вероятностям оценивается по выражениям

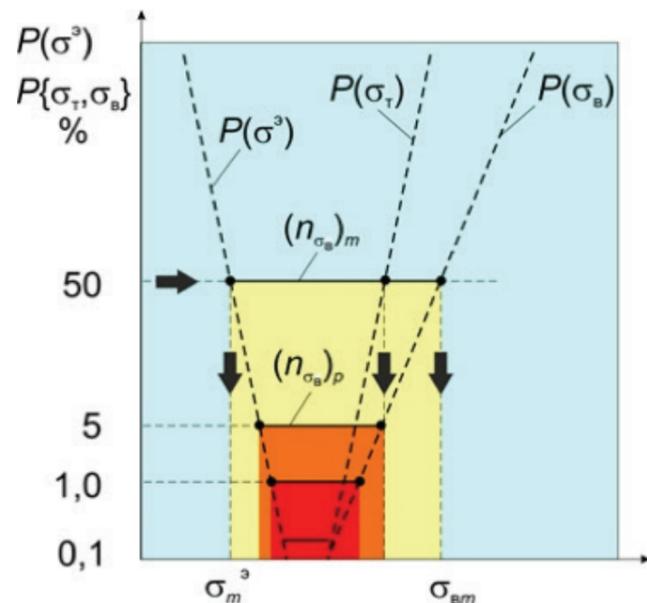
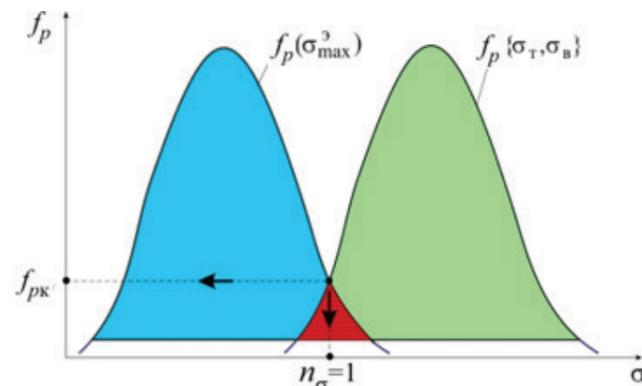
$$\sigma^3(\tau) = \sigma_b (1 - Z_p v_p), \quad Z_p = 1 - n_p / \sqrt{v_{\sigma}^2 n^2 v_{\sigma^3}^2}, \quad (27)$$

где v_p, v_{σ}^3 - коэффициенты вариации пределов прочности и эксплуатационных напряжений;

Z_p - квантиль нормального распределения.

Для морских подводных трубопроводов и объектов величины v_{σ} могут составлять $0,03 \div 0,08$, а величины v_{σ^3} - до $0,05 \div 0,10$. При принятых и указанных выше запасах статической прочности n_p - до $2,0 \div 2,5$ критические вероятности P_{pk} по вычисленным на основе (27) квантилях устанавливаются по табулированным значениям Z_p . В этом случае вероятности P_{pk} статического разрушения находятся на уровне не выше $10^{-8} \div 10^{-10}$, что с практической точки зрения при сроках службы до 50 лет является пренебрежимым ($p_{pk} < 2 \cdot 10^{-8}$ 1/год).

Вместе с тем, учет уменьшения критических разрушающих напряжений вследствие старения, деградации, цикличности, дефектности (см. п.п. 3, 4), а также повышение эксплуатационных воздействий, сопровождающихся увеличением и v_p, v_{σ} может приводить к существенному увеличению P_{pk} до $10^{-2} \div 10^{-3}$ 1/год. Если обоснование статической, циклической и длительной прочности при данном анализируемом



На рис. 5 показана схема оценки изменений опасности состояний трубопроводов и объектов

состоянии морского подводного трубопровода и объекта выполнено по средним значениям σ_r, σ_b и σ^3 при $P_p = 0,5$, то при наличии прямой экспериментальной информации на n_i - измерениях можно определить вероятность $P_i(\tau)$ и уточнить закон распределения

$$P_i(\tau) = 1 - 0,5 / n_i, \quad (28)$$

где i - порядковый номер измерений.

На рис. 5 показана схема оценки изменений опасности состояний трубопроводов и объектов.

Аналізу опасности состояний и предупреждению дальнейшего их развития соответствуют определенные научные, технологические и экономические затраты и ущербы $U(\tau)$ на исследование, диагностику, расчеты, построение защиты, ликвидацию последствий. По длительному опыту в различных отраслях техники между параметрами $P_p(\tau)$ и $U(\tau)$ существуют зависимости степенного вида

$$U(\tau) = C_p P_p(\tau)^{m_p} \quad (29)$$

где C_p, m_p - характеристики опасности трубопровода или объекта.

Величина m_p находится в пределах $1,8 \div 2,2$. Для тяжелых

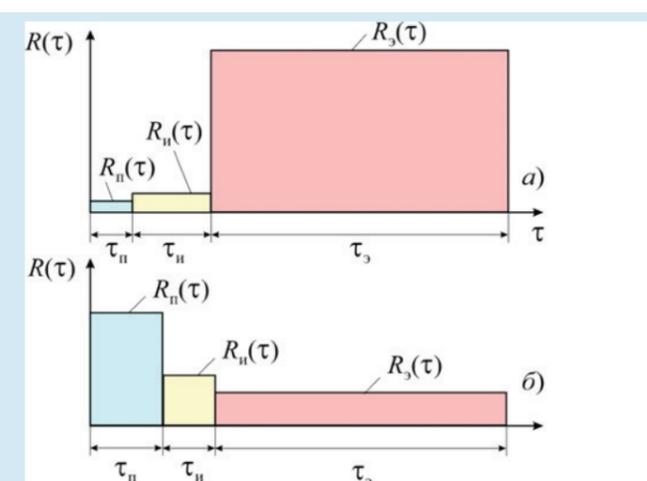


Рис. 6. Сопоставительный анализ эффективности перехода от традиционной (а) на новую риск-ориентированную методологию (б) нормирования, управления рисками для повышения безопасности и защищенности

аварий и катастроф на критически важных морских подводных трубопроводах и объектах $P_p(\tau)$ находится в интервале от $3 \cdot 10^{-3}$ 1/год до 10^{-2} , а $U(\tau)$ - от 1010 до 1011 руб.

По величинам P_{pk} и $U(\tau)$ устанавливаются риски $R_k(\tau)$ разрушений, аварий и катастроф

$$R_k(\tau) = F\{P_p(\tau) U(\tau)\} \approx P_{pk}(\tau) U_k(\tau) \quad (30)$$

Указанным выше вероятностям и ущербам отвечают риски $R_k(\tau)$ в интервале $107 \div 109$ руб./год.

В соответствии с требованиями риск-ориентированного подхода для снижения рисков $R(\tau)$ до приемлемого уровня $[R(\tau)]$ необходимо выполнение условий, аналогичных (3), (9), (13), (14), (16), (17)

$$R(\tau) \leq [R(\tau)] = R_k(\tau) / n_r \quad (31)$$

где n_r - запас по рискам.

В силу малой изученности, сложности и неопределенности в оценках рисков для морских подводных трубопроводов и объектов запасы n_r не могут быть меньше n_p ; для них в качестве исходных целей можно ориентироваться на величины $n_r > 3/5$.

При этом безопасность $S(\tau)$ оценивается по сопоставлению рисков $R(\tau)$, формирующихся на данной стадии жизненного цикла и приемлемых рисков $[R(\tau)]$ по (31)

$$S(\tau) = [R(\tau)] - R(\tau) \quad (32)$$

Если $S(\tau) \geq 0$, то безопасность можно считать обеспеченной и наоборот; она оценивается в экономических показателях (руб./год).

На основе (31), (32) количественно может быть оценена защищенность от разрушений, аварий и катастроф

$$Z(\tau) = 1 - R(\tau) / [R(\tau)] \quad (33)$$

Если $S(\tau) > 0$, то защищенность обеспечена и наоборот.

Для выполнения условий безопасности по (32) и защищенности по (33) необходимо предусматривать комплексы научных, расчетных, экспериментальных, диагностических, надзорных и нормативно-технических мероприятий с расчетными затратами $Z_r(\tau)$ на снижение рисков $R(\tau)$ до приемлемого уровня

$$Z_r(\tau) = 1 / m_z \{R(\tau) - [R(\tau)]\}, \quad (34)$$

где m_z - коэффициент экономической эффективности затрат.

Передовой отечественный и зарубежный опыт показывает, что величину m_z - можно достичь на уровне $5 \div 10$. Тогда ежегодные затраты на поддержание безопасности уникальных, критически значимых морских подводных трубопроводов и объектов могут составлять не менее $10^6 \div 2 \cdot 10^7$ руб.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход на комплексное обоснование, нормирование и обеспечение прочности, ресурса, живучести, безопасности и защищенности морских подводных трубопроводов и объектов с использованием традиционных расчетов прочности и новых риск-ориентированных подходов будет способствовать реализации принципиально новой методологии проектирования, испытаний, строительства и эксплуатации (рис. 6).

В соответствии с действующей нормативной базой при ограниченном внимании к первой (проектирование) и второй (испытание) стадиях жизненного цикла основанные риски формировались на третьей стадии - эксплуатации. Кардинальный пересмотр этой методологии при увеличении затрат на первую и вторую стадии жизненного цикла может существенно сократить не только риски на третьей стадии, но и интегральные риски для всех трех стадий.

Работа выполнена при поддержке РНФ - грант 20-19-00769.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морская наука и техника. Научно-технический журнал. Специальные выпуски. 2022-2024, №№ 1, 5, 6, 7.
2. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. - М.: МГОФ «Знание», 1998-2024, т.1 - 68.
3. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. - Новосибирск: Наука, 2017. - 724 с.
4. Probabilistic modeling in System Engendering. - London: Intech Open, 2018. - 278 p.
5. Исследования и обоснование прочности и безопасности машин / Под ред. Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романова. - М.: МГОФ «Знание», 2023. - 832 с.