

Перспективы исследований в области анализа риска для совершенствования государственного регулирования и повышения безопасности объектов нефтегазохимического комплекса

С.Г. Радионова, зам. руководителя, **С.А. Жулина**, начальник Управления (Ростехнадзор, Москва, Россия), **Н.А. Махутов**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник, **М.М. Гаденин**, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник (ИМАШ РАН, Москва, Россия), **Ю.В. Лисин**, д-р техн. наук, ген. директор, **Д.А. Неганов**, канд. техн. наук, директор центра (ООО «НИИ Транснефть», Москва, Россия), **В.А. Надеин**, ген. директор (ООО «НГБ-Энергодиагностика», Москва, Россия), **А.С. Печёркин**, д-р техн. наук, проф., первый зам. ген. директора (ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия)

Структурно рассмотрены критериальная, правовая и нормативно-техническая базы обеспечения и повышения промышленной безопасности объектов нефтегазохимического комплекса. Приведены определяющие выражения и их параметры для количественной оценки уровня промышленной безопасности по критериям рисков. Отмечена роль согласованных научных исследований в совершенствовании государственного регулирования промышленной безопасности объектов нефтегазохимического комплекса. Перспективы повышения промышленной безопасности увязаны с задачами проектирования, изготовления оборудования, строительства и эксплуатации объектов нефтегазохимического комплекса с учетом критериев допустимого риска.

Ключевые слова: безопасность, нефтегазохимический комплекс, государственное регулирование, надзор, прочность, ресурс, живучесть, надежность.

DOI: 10.24000/0409-2961-2017-9-5-13

Введение

Нефтегазохимический комплекс (НГХК) — один из системо- и фондообразующих в Российской Федерации (РФ). Он включает десятки тысяч объектов нефтегазодобычи, более 200 тыс. км промысловых и магистральных трубопроводов транспорта жидких и газообразных углеводородов, тысячи крупных хранилищ нефти и газа, сотни крупнейших предприятий по переработке нефти и газа для получения топлива и химической продукции гражданского и оборонного назначения. В НГХК страны занято более 2 млн чел., а общий объем его доходов в бюджете РФ оценивается в 6,5–7,4 трлн руб., что составляет 43–50 % общегосударственного бюджета.

Эти данные указывают на исключительную важность проблем комплексной безопасности НГХК, составляющих значительную часть проблем национальной безопасности России. Их научный анализ, решение фундаментальных, прикладных, практических и экономически значимых задач в сфере безопасности становятся все более актуальными по мере расширения в РФ объемов и географии деятельности НГХК.

Во второй половине XX — начале XXI в. аварийность, травматизм на объектах НГХК, экологические и экономические ущербы стали предметом активного интереса и взаимодействия органов государственной власти, академической и отраслевой науки, конструкторских, проектных, строитель-

ных и эксплуатирующих организаций. Ведущая роль в этом взаимодействии в настоящее время и в ближайшей перспективе будет принадлежать Совету Безопасности РФ, Ростехнадзору, Российской академии наук (РАН), научным центрам, финансируемым крупнейшими отраслевыми компаниями (ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпром», ПАО «Транснефть» и др.) и ведущим вузам страны.

В перспективных разработках проблем безопасности НГХК приоритетное значение получит научно обоснованное сочетание фундаментальных и прикладных исследований и методов государственного регулирования для повышения безопасности с учетом анализа формирующегося спектра угроз и оценки рисков в условиях диверсификации отечественной экономики.

Фундаментальные исследования проблем безопасности

Конституция РФ [1], Стратегия национальной безопасности [2], федеральное законодательство в сфере промышленной политики [3], стратегического планирования [4] и промышленной безопасности [5] — современная правовая база для постановки на новом уровне двух стратегических приоритетов России (рис. 1) в качестве главной цели развития $C_R(\tau)$ в ближайшей и отдаленной временной перспективе τ : повышения уровня социально-экономического развития $P_{1R}(\tau)$ и обеспечения национальной безопасности $P_{2R}(\tau)$. При этом

$$C(\tau) = F_c\{P_{1R}(\tau), P_{2R}(\tau)\}, \quad (1)$$

где F_c — целевой функционал приоритетов, связывающий показатели стратегических приоритетов.



▲ Рис. 1. Правовая и организационная структура управления развитием страны и обеспечения национальной безопасности

▲ Fig. 1. Legal and organizational structure of the country development management and the national security assurance

В качестве одного из определяющих критериев развития страны по (1) с учетом [2–5] на основе разработок Совета Безопасности РФ [6] и докладов РАН Правительству РФ, обобщенных на первом и втором форумах-диалогах «Промышленная безопасность — ответственность государства, бизнеса и общества» [7, 8], все шире применяют временную шкалу динамики рисков $R(\tau)$, определяемых как функционал вероятностей или частот $P(\tau)$ возникновения неблагоприятных и опасных явлений, процессов и событий и сопутствующих им ущербов $U(\tau)$:

$$R(\tau) = F_R\{P(\tau), U(\tau)\}, \quad (2)$$

где F_R — функционал рисков.

В первом приближении для заданного i -го события и объекта можно принять

$$R_i(\tau_i) = P_i(\tau_i)U_i(\tau_i), \quad (3)$$

а для ряда событий n

$$R_n(\tau_i) = \sum_{i=1}^n [P_i(\tau_i)U_i(\tau_i)]. \quad (4)$$

В более общем случае необходимо переходить от суммирования рисков к их интегрированию по трехмерному пространству (x, y, z) и времени τ при заданных или научно обоснованных видах функций $P(\tau)$ и $U(\tau)$:

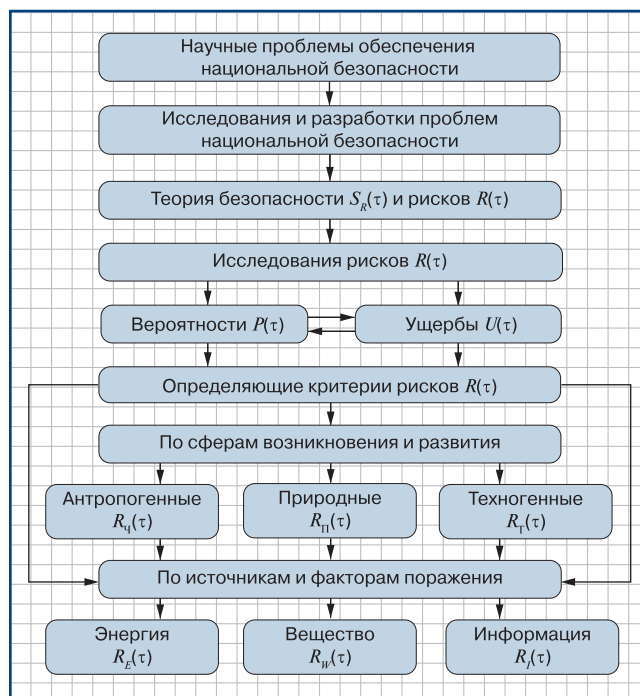
$$R_i(x_i, y_i, z_i, \tau_i) = \int_{\tau, x, y, z} (\int P_i dU_i) d\tau;$$

$$R_i\{(x_i, y_i, z_i) \tau_i\} = \int \left(\int \int \int P_i dU_i \right) d\tau. \quad (5)$$

Теорией катастроф, обобщенной в сборнике «Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты» (т. 1–51, 1998–2017 гг.) и работах [9,10], а также практикой создания и функционирования промышленных объектов, отраженной в [7, 8] и докладах РАН Правительству РФ, показано, что достижение нулевых рисков $R(\tau)$ по выражениям (2–5) невозможно, т.е. для любого создаваемого и функционирующего промышленного объекта $R(\tau) \neq 0$ на всем жизненном цикле.

В соответствии с этим в последние десятилетия в РФ и за рубежом решают фундаментальную междисциплинарную и прикладную отраслевую проблему (рис. 2) обеспечения допустимого риска $[R(\tau)]$. Тогда в качестве стратегической цели $C_R(\tau)$ по выражению (1) можно говорить об обеспечении безопасности $S_R(\tau)$ с учетом $R(\tau)$ и $[R(\tau)]$:

$$S_R(\tau) = 1 - R(\tau)/[R(\tau)]. \quad (6)$$



▲ Рис. 2. Структура научных исследований и разработок проблем национальной и промышленной безопасности
▲ Fig. 2. Structure of research and development of the national and industrial safety problems

Безопасность в данный момент времени может считаться обеспеченной, если

$$R(\tau) \leq [R(\tau)];$$

$$S_R(\tau) \geq 0. \quad (7)$$

При этом важно, что $R(\tau)$ и $[R(\tau)]$ должны входить в (1) для стратегических приоритетов $P_{1R}(\tau)$ и $P_{2R}(\tau)$.

Выражения (1)–(7) можно отнести к анализу развития и обеспечения безопасности конкретного человека, объекта, отрасли, региона, страны и всей социально-природно-техногенной (СПТ) системы с включением в риск-ориентированный анализ взаимосвязанных человеческого, природного и техногенного (соответственно $R_{\text{ч}}$, $R_{\text{п}}$ и $R_{\text{т}}$) факторов безопасности:

$$R(\tau) = F_R\{R_{\text{ч}}(\tau), R_{\text{п}}(\tau), R_{\text{т}}(\tau)\}. \quad (8)$$

Функционал F_R в выражении (8), как и выражениях (2)–(5), можно представить в виде произведения, сумм и интегралов.

Выражения (1)–(8) — единая исходная база для исследования фундаментальных закономерностей академическими институтами и прикладного анализа отраслевой наукой комплексной безопасности как отдельных компонентов, так и всей СПТ системы в целом.

Прикладные научные разработки в области обеспечения безопасности

В соответствии с выражениями (2)–(5), (7), (8) основная задача исследований рисков $R(\tau)$ и $[R(\tau)]$ сводится к количественному определению взаимосвязанных параметров $P(\tau)$ и $U(\tau)$ с использованием теории катастроф (механики, физики, химии, математики, биологии, социологии, геологии катастроф). На этой основе по выражению (6) дают количественную оценку состояния промышленной безопасности.

В соответствии с выражениями (1)–(8) в докладах РАН Правительству РФ, материалах форумов-диалогов «Промышленная безопасность — ответственность государства, бизнеса и общества» и особенно в многотомной серии «Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты» была предложена и обоснована структура комплексного анализа взаимодействия науки, государственного регулирования, экономики и надзора за промышленной безопасностью (см. рис. 1) в области создания базы знаний и нормативно-правовых основ управления, регулирования. Такое взаимодействие должно базироваться на фундаментальных междисциплинарных исследованиях РАН и прикладных разработках ведущих научных центров страны по установлению общих закономерностей развития человека, общества, государства, природы и техносферы в рамках СПТ системы для их жизнедеятельности и жизнеобеспечения. Наука призвана рассматривать закономерности формирования и реализации рисков $R(\tau)$ и $[R(\tau)]$ в СПТ системе по выражениям (2)–(8) с учетом стратегических приоритетов развития по (1). При этом необходимо учитывать трехкомпонентную структуру опасностей и рисков $R(\tau)$, связанную с неконтролируемыми и неуправляемыми выбросами:

энергии $E(\tau)$ — кинетической, электромагнитной, тепловой, акустической, аэрогидродинамической, механической;

веществ $W(\tau)$ — химически, радиационно и биологически опасных;

информационных потоков $I(\tau)$ в контролируемых, управляемых, регулирующих и защищающих системах безопасности.

В исследованиях опасных процессов в СПТ системе изучают сочетание взаимовлияющих рисков промышленной безопасности $S_R(\tau)$ по (6):

$$R(\tau) = F_R\{R_E(\tau), R_W(\tau), R_I(\tau)\}. \quad (9)$$

С прикладных точек зрения по выражениям (2)–(9) исследуют и научно обосновывают:

математические модели анализируемой СПТ системы, ее компонентов, сценариев возникновения и развития опасных и чрезвычайных ситуаций в этой системе;

критерии и механизмы переходов объектов, компонентов и СПТ системы в целом из штатных (нормальных) состояний в поврежденные, аварийные и катастрофические;

кинетические определяющие уравнения состояний в пространственной (x, y, z) и временной (τ) постановке;

параметры предельных (критических) состояний и соответствующих им рисков $R_k(\tau)$ на базе математических теорий катастроф, бифуркации, синергетики (в соответствии с многотомником «Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты», а также [10, 11]).

В конечном виде условие достижения критических состояний записывают в следующем виде:

$$R(\tau) = F_R\{[R_{\text{ч}}(\tau), R_{\text{п}}(\tau), R_{\text{т}}(\tau)],$$

$$[R_E(\tau), R_W(\tau), R_I(\tau)]\} = R_k(\tau) \text{ при } \tau = \tau_k. \quad (10)$$

Из теории катастроф и рисков следует, что достижение предельных состояний по (10) в СПТ системе возможно при различных, в том числе некритических трехкомпонентных составляющих рисков $R_{\text{ч}}(\tau)$, $R_{\text{п}}(\tau)$, $R_{\text{т}}(\tau)$ по (8) и $(R_E(\tau), R_W(\tau), R_I(\tau))$ по (9).

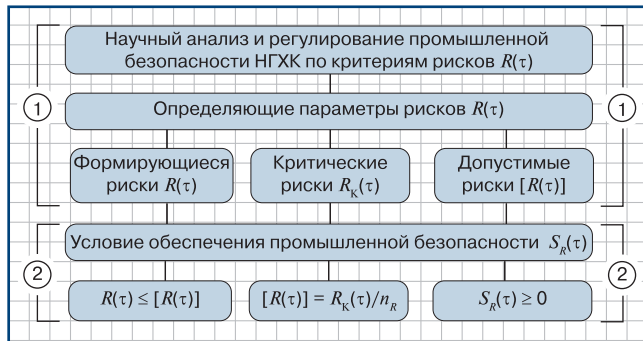
Сочетание междисциплинарных фундаментальных и поисковых исследований РАН по проблемам безопасности с прикладными межотраслевыми и отраслевыми разработками ведущих научных центров на протяжении трех последних десятилетий координирует рабочая группа при президенте РАН по анализу риска и проблем безопасности (РГ РАН «Риск и безопасность»), отражая результаты исследований РАН в ежегодных докладах Правительству РФ, а также в государственных отчетах МЧС России и Ростехнадзора.

В целом фундаментальные исследования и прикладные разработки носят междисциплинарный,

межотраслевой, отраслевой и объектовой характер и направлены на решение двух ключевых задач для СПТ системы, отвечающих стратегическим приоритетам $P_{1R}(\tau)$ и $P_{2R}(\tau)$ по (1) с учетом рисков $R(\tau)$ по (2)–(10).

На рис. 3 показана общая структура исследований и разработок, включающая:

анализ и предупреждение опасных, аварийных и катастрофических ситуаций при $\tau < \tau_k$ и $R(\tau) < R_k(\tau)$ для обеспечения социально-экономического развития, национальной безопасности и технологической независимости на стадиях технико-экономического обоснования, нормирования рисков и безопасности при проектировании, изготовлении и эксплуатации (см. рис. 3, сектор 1);



▲ Рис. 3. Структурная схема анализа динамики рисков $R(\tau)$ и уровня безопасности $S_R(\tau)$

▲ Fig. 3. Structural diagram of the analysis of the risk dynamics $R(\tau)$ and the safety level $S_R(\tau)$

снижение рисков $R(\tau)$ и последствий $U(\tau)$ чрезвычайных (аварийных и катастрофических) ситуаций, когда не удалось предупредить и предотвратить аварии и катастрофы с повышенными социально-экономическими и техногенными рисками по (10)

при $R(\tau) = R_k(\tau)$ и $\tau = \tau_k$ на стадиях инициирования, развития и образования последствий аварий и катастроф (см. рис. 3, сектор 2).

В фундаментальных исследованиях и поисковых научных разработках РАН (см. рис. 3) важную роль играют достижения и взаимоувязанные результаты по указанным выше естественным, техническим и общественным научным направлениям. Соответствующие аналитические и численные решения, а также определяющие уравнения и их параметры находят свое отражение в определении главных компонентов всей системы выражений (1)–(10).

Общая характеристика подходов, сложившихся к настоящему времени в поэтапных (I–VIII) исследованиях, обоснованиях всего комплекса требований, критериев и параметров, представлена на рис. 4 [11–15]. Базовыми при этом стали прочность, жесткость, устойчивость, ресурс, надежность, живучесть, безопасность, риск и защищенность объектов техносферы, включая НГХК, от аварий и катастроф. Развитие методов анализа — традиционно восходящее (от I к VIII).

В соответствии с новыми требованиями стратегии национальной безопасности [2] и федеральным законодательством [3–5, 16, 17] на первые места выдвигаются показатели защищенности (VIII), рисков (VII) и безопасности (VI) с их увязкой с показателями живучести (V), надежности (IV), ресурса (III), жесткости и устойчивости (II) и прочности (I). Реализация [5] сосредоточена преимущественно на этапах VI, VII. Каждому из этапов I–VIII по рис. 4 соответствуют свои критерии, разрабатываемые совместно научными организациями РАН и ведущими научными центрами, работающими в НГХК.

2020	VIII	Защищенность	Обеспечение защищенности	Новое направление Традиционное направление Направления развития	$Z(\tau), [R(\tau)]$
2010	VII	Риск	Приемлемые риски отказов, аварий и катастроф		$R_i(\tau), P_i(\tau), U_i(\tau)$
1990	VI	Безопасность	Управление безопасностью		$S(\tau)$
1980	V	Живучесть	Трещиностойкость		l_k, n_p, K_{Ic}
1970	IV	Надежность	Отказоустойчивость		P_i
1960	III	Ресурс	Долговечность		$N_k, \tau_k, N_\sigma, \tau_\sigma$
1940	II	Жесткость, устойчивость	Сохранение размеров и формы		σ
1920	I	Прочность	Неразрушаемость		$\sigma_k, \sigma_\sigma, n_\sigma$
Годы	Этапы развития	Базовые требования Зона обеспеченности	Критерии работоспособности Практический результат	Направления развития	Критерии

▲ Рис. 4. Общая структура обеспечения работоспособности объектов техносферы

▲ Fig. 4. General structure of the technosphere objects operability assurance

**Анализ промышленных аварий
и нормативная оценка промышленной
безопасности**

На протяжении последнего полувека в сфере фундаментальных и прикладных исследований и научного обеспечения комплексной безопасности отечественная фундаментальная — Академия наук (АН) СССР и РАН — и отраслевая наука внесли свой вклад в становление и развитие научно-методической многокритериальной базы, которая лежит в основе нормативного правового регулирования безопасности, включая промышленную безопасность НГХК. Последнее касается проблем исследований сырьевых ресурсов углеводородов, схем развития нефтегазодобычи, совершенствования физико-химических основ современных технологий для штатных и аварийных ситуаций. В течение многих десятилетий по решениям директивных органов ведущие специалисты АН СССР и отраслевых научных центров совместно со специалистами Госгортехнадзора СССР, Госгортехнадзора России и Ростехнадзора принимали участие в анализе крупнейших аварий на объектах НГХК (взрыв гептила в Ярославле в 1988 г., взрывы на продуктопроводе под Уфой в 1989 г., на аммиакохранилище в Ионаве в 1989 г., авария на плавучей буровой платформе «Кольская» в Охотском море в 2011 г., авария в Буденновске в 2014 г., аварии и взрывы на рязанском заводе «Ставролен», на Ачинском НПЗ в 2014 г., на Московском НПЗ в 2016 г., взрыв в Нижнекамске в 2016 г.).

Крупнейшие аварии на объектах НГХК происходили и в других странах, сопровождаясь гибелью тысяч и увечьем сотен тысяч человек: Севезо, Италия (1976 г.), Фликсборо, Англия (1974 г.), Сучжоу, Китай (1978 г.), Бхопал, Индия (1984 г.), авария на морской платформе ВР в Мексиканском заливе (США, 2010 г.), выброс 300 т жидкого хлора в Мексике (1991 г.), взрывы на заводах и хранилищах сжиженного природного газа в Алжире (2004 г.), США (1992 г.) и Мексике (2013 г.).

Для дальнейших научных и прикладных разработок проблем промышленной безопасности НГХК важным представляется обобщение опыта проведения необходимых специальных научных исследований по математическому и физическому моделированию, количественному описанию сценариев развития аварий и катастроф. Анализ указанных и других промышленных аварий на отечественных объектах НГХК становился не только предметом расследований, но и импульсом к постановке новых научных и прикладных задач по совершенствованию методов государственного регулирования в наиболее актуальных направлениях (см. рис. 4). Многочисленные повреждения и разрушения в 80-е годы XX в. автоклавов для НГХК потребовали обоснованного введения новых методов определения прочности и циклического ресурса автоклавов и крышек с байонетным затвором, заменившим резьбовое крепление крышки к кор-

пусу автоклава, в нормы проектирования, расчетов, оперативной диагностики и надзора. Эти расчетные обоснования выполнялись Институтом машиноведения АН СССР, Институтом электросварки АН УССР и Конструкторским бюро Ижорского завода. Базовым критерием расчета стал критический срок эксплуатации $\tau_{\text{э.к}}$ [11–13]:

$$\tau_{\text{э.к}} = F_{\tau}\{P_{\text{э}}, N_{\text{э}}, D, \delta, \alpha_{\sigma}\}, \quad (11)$$

где $P_{\text{э}}$ — внутреннее давление при эксплуатации; $N_{\text{э}}$ — число циклов эксплуатационного нагружения; D — диаметр автоклава; δ — толщина стенки автоклава; α_{σ} — теоретический коэффициент концентрации в зоне резьбы и байонетного затвора.

В расчет по (11) дополнительно к традиционным запасам прочности n_{σ} вводили запасы по долговечности n_{τ} и числу циклов n_N :

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_K}{\sigma_{\text{э}}}; n_{\tau} = \frac{\tau_K}{\tau_{\text{э}}}; n_N = \frac{N_K}{N_{\text{э}}}, \quad (12)$$

где σ_K , τ_K и N_K — критические показатели соответственно по напряжению, времени и числу циклов до разрушения, устанавливаемые расчетом или испытаниями образцов и моделей. При этом $1,5 \leq n_{\sigma} \leq 2,5$ и $n_{\sigma} \leq n_{\tau} < n_N$.

Крупные промышленные аварии под Уфой и Ионавой, а также многочисленные повреждения и хрупкие разрушения трубопроводов, сосудов, резервуаров в районах Сибири и Севера к концу XX в. вынесли на повестку дня вопрос о регулировании хладостойкости объектов НГХК, изготавливаемых тогда из массовых углеводородистых и низколегированных хладноломких сталей. Обоснование прочности и хладостойкости предложили выполнять по двум запасам: напряжению n_{σ} в (12) и критическим температурам хрупкости $[\Delta t_K]$ [9–15]. Тогда минимальная температура эксплуатации должна быть выше расчетной:

$$t_{\text{э.мин}} \geq t_K + [\Delta t_K], \quad (13)$$

где t_K — первая или вторая критическая температура хрупкости, соответствующая переходу несущего элемента объекта из вязкого соответственно в квазихрупкое и хрупкое состояния, устанавливаемые расчетом или испытаниями. Запасы $[\Delta t_K]$ по критическим температурам предполагали принять на уровне 20–30 °С [12–15].

В конце XX — начале XXI в. бурное развитие механики разрушения, методов и средств дефектоскопического контроля и технической диагностики поставило в число новых основных задач обеспечения безопасности оценку живучести несущих конструкций с исходными технологическими и эксплуатационными дефектами. При этом наиболее опасными считали трещиноподобные дефекты со своей протяженностью и глубиной l [11–15]. По аналогии с (11)

критические размеры дефектов l_k на стадии эксплуатации (τ_3, N_3) определяют по выражению

$$l_{\text{э.к}} = F_l \{l_0, \sigma_3, N_3, \tau_3\}, \quad (14)$$

где l_0 — исходный технологический дефект при $\tau_3 = 0$.

Функционал F_l в соответствии с уравнениями линейной и нелинейной механики разрушения определяли через коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины

$$K_{\text{э.л}} = \sigma_3 \sqrt{\pi l_0} f_k, \quad (15)$$

где f_k — безразмерная функция, определяющая влияние формы и расположения дефекта по толщине σ , диаметру D и длине несущего элемента; $f_k \geq 1$.

При возникновении пластических деформаций в рамках нелинейной механики разрушения вместо $K_{\text{э.л}}$ в расчет вводят коэффициенты интенсивности деформаций

$$K_{\text{э.ле}} = F_k \{K_{\text{э.л}}, \sigma_3, m\}, \quad (16)$$

где m — показатель упрочнения конструкционного материала в неупругой области.

Кинетика развития дефектов в процессе изготовления оборудования, строительства или эксплуатации объектов НГХК по уравнениям механики разрушения определяется начальным размером дефекта l_0 и скоростью его роста по времени $dl/d\tau$ или по числу циклов dl/dN :

$$l_3 = l_0 F_l \left\{ \frac{dl}{d\tau}, \frac{dl}{dN} \right\}. \quad (17)$$

Скорости роста трещин $dl/d\tau$ и dl/dN зависят от $K_{\text{э.л}}$ и $K_{\text{э.ле}}$, механических свойств материала и агрессивности окружающей природной среды и рабочих процессов в объектах [11–15].

В систему запасов n по (12) добавили запасы по коэффициентам интенсивности напряжений n_k и размерам дефектов:

$$n_k = \frac{K_{\text{лс}}}{K_{\text{э.л}}} = \frac{K_{\text{лс}}}{K_{\text{э.ле}}};$$

$$n_l = \frac{l_k}{l_3}, \quad (18)$$

где $K_{\text{лс}}$, $K_{\text{лс}}$ — критические коэффициенты интенсивности напряжений и деформаций, определяемые экспериментально на образцах или натуральных конструкциях с трещинами; l_k — критический размер дефекта, определяемый расчетом по $K_{\text{лс}}$ и $K_{\text{лс}}$ или экспериментально. Запасы n_k по величинам сопоставлены с запасами n_σ в (12).

В соответствии со стратегией национальной безопасности [2], системой действующих законов о

безопасности, стратегическом планировании, промышленной политике и промышленной безопасности [3–5, 16, 17] основное требование к обеспечению безопасности $S(\tau)$ формируется без прямого указания на методы и критерии рисков $R(\tau)$. В то же время действующая нормативная база Ростехнадзора, которая включает федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности и руководства по безопасности [18, 19] (основной из них в части анализа риска — Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»), под риском $R(\tau)$ в выражениях (2)–(5) понимают один из следующих параметров:

вероятность $P(\tau)$ возникновения опасных ситуаций (аварийных и чрезвычайных), для оценок которой, как правило, используют методы «дереьев событий» и «дереьев отказов», основанные на анализе имеющейся статистической информации о сценариях развития опасных ситуаций;

величину возможного ущерба $U(\tau)$ от аварии, выражаемую в числе погибших, экологическом ущербе, потере имущества, для оценки которой используют методы моделирования распространения поражающих факторов при аварии и прогнозирования их последствий;

произведение величин вероятности и ожидаемого ущерба $P(\tau)U(\tau)$.

Регулирование промышленной безопасности по критериям рисков

Выражения (1)–(18) составляют развивающуюся (1920–2020 гг.) и перспективную (2020–2030 гг.) научную и научно-методическую базу исследований в целях совершенствования государственного регулирования промышленной безопасности объектов НГХК страны с использованием как традиционных, так и новых подходов, методов и критериев (см. рис. 4).

В течение 100 лет НГХК страны, как и другие отрасли промышленности, развивался по этапам (I–VIII), на которых ведущие академические (АН СССР, РАН) и отраслевые институты и научные центры формировали базовые требования и зоны обеспеченности по прочности, жесткости, устойчивости, ресурсу, надежности, живучести, безопасности, рискам и защищенности промышленных объектов от аварий и катастроф. На этой основе в межотраслевой постановке разрабатывали критерии работоспособности и получали практические результаты по достижению неразрушаемости, сохранению размеров и формы несущих элементов, долговечности, отказоустойчивости, трещиностойкости, управляемой безопасности, приемлемых рисков и обеспечению защищенности [9–15].

Практические приложения этих разработок к НГХК широко обсуждались и формировались в Научно-технических советах Ростехнадзора, Роснефти, Газпрома, Транснефти с участием ведущих ученых и специалистов.

Базовыми принципами регулирования промышленной безопасности в принятых методиках были и остаются (см. рис. 4):

выполнение традиционных детерминированных требований проектной документации об основных конструкторских, технологических и эксплуатационных решениях по прочности (этап I) и ресурсу (этап III) по выражению (12) с соблюдением размеров, форм, конструкционных материалов, технологий и уровня дефектности, закрепленных в государственных стандартах (ГОСТ), технических заданиях (ТЗ), технико-экономических обоснованиях (ТЭО) и руководящих документах (РД);

выполнение новых требований, основанных на статистических и вероятностных методах, при обосновании промышленной безопасности (этап VI) по критериям риска $R(\tau)$, эквивалентных τ_i , p_{Σ} , N_{Σ} , τ_{Σ} , t_{Σ} и l_{Σ} в выражениях (2)–(5) (этап VII), закрепленных в федеральных законах (ФЗ), федеральных нормах и правилах (ФНиП), руководствах по безопасности (РБ).

Введение в детерминированный нормативный расчет прочности, долговечности и трещиностойкости оборудования НГХК по выражениям (11)–(15) вероятностных характеристик эксплуатационной нагруженности σ_{Σ} , p_{Σ} , N_{Σ} , τ_{Σ} , t_{Σ} , l_{Σ} и критериальных механических свойств σ_K , критических температур t_K и критических дефектов l_K , зависящих от τ_{Σ} , позволяет расчетом определить вероятности $P_i(\tau_i)$ достижения заданного типа предельного состояния (образования недопустимых деформаций, трещин, потери устойчивости или разрушения):

$$P_i(\tau_i) = F_p\{\sigma_{\Sigma}, p_{\Sigma}, N_{\Sigma}, \tau_{\Sigma}, t_{\Sigma}, l_{\Sigma}, (\sigma_K, t_K, l_K)\}. \quad (19)$$

Каждый из анализируемых видов предельных состояний и моментов времени сопряжен с соответствующими затратами и ущербами $U_i(\tau_i)$, оцениваемыми в натуральной (человеческой, вещественной, объектовой и финансовой) форме:

$$U_i(\tau_i) = F_u\{P_i(\tau_i)\}. \quad (20)$$

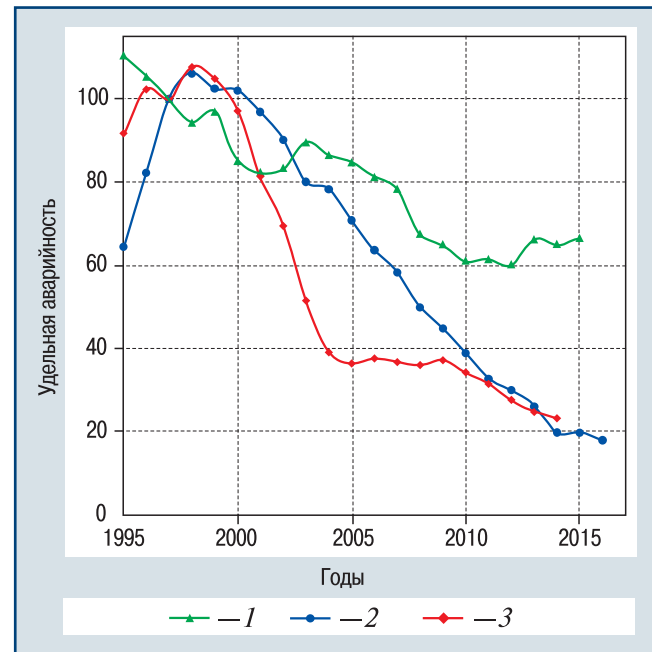
Выражения (19) и (20) принципиально важны для комбинированного (детерминированного, статистического и вероятностного) количественного анализа рисков $R_i(\tau_i)$ с использованием выражений (2)–(15).

Такой подход по своему существу не противоречит принятым Ростехнадзором нормативам в области промышленной безопасности [18, 19]. Расчет рисков $R_i(\tau_i)$ по системе выражений (2)–(5), (19), (20) позволяет регулировать промышленную безопасность с более полным набором факторов, определяющих опасность поэтапного перехода по τ_i ответственных элементов, компонентов, узлов, агрегатов, блоков и объектов НГХК.

Академическая (доклады РАН Правительству РФ, работы [12, 13, 15]) и отраслевая [18–23] наука в настоящее время в состоянии предложить и развить

основанную на риск-ориентированном подходе методологию исследований для совершенствования регулирования промышленной безопасности НГХК страны (см. рис. 4), использующую весь огромный отечественный и зарубежный опыт, накопленный в других отраслях промышленности (атомной, энергетической, транспортной).

Выполненный в последние два-три десятилетия большой комплекс научных и прикладных исследований, правовых и нормативно-технических разработок, организационных, образовательных, надзорных мероприятий [23] позволил к началу XXI в. существенно снизить удельную аварийность (рис. 5).



▲ Рис. 5. Удельная аварийность в нефтегазовом комплексе и химической промышленности:
 1 — нефтегазодобывающая промышленность; 2 — магистральный трубопроводный транспорт; 3 — химическая, нефтехимическая и нефтеперерабатывающая промышленность
▲ Fig. 5. Specific accident in the oil and gas complex and chemical industry:
 1 — oil and gas production industry; 2 — trunk pipeline transport; 3 — chemical, petrochemical, and oil refining industry

Заклучение

После распада СССР в 1991 г. в связи со снижением производственной дисциплины, старением и деградацией оборудования, ослаблением роли науки, стандартизации, надзора произошел значительный рост аварийности даже в условиях уменьшения объемов производства. Ряд неблагоприятных факторов (снижение уровня инженерно-технического образования и экспертного профессионализма, рост выработки назначенных сроков эксплуатации, уменьшение объемов отечественного производства диагностического оборудования), сохраняющих высокие риски промышленной безопасности, актуален и в настоящее время.

Для повышения уровня промышленной безопасности в целом, особенно в НГХК, для достижения стратегических приоритетов по выражению (1) в число первоочередных мероприятий следует внести:

разработку унифицированной научно-методической базы по анализу, регулированию, управлению и снижению рисков $R(\tau)$ по выражениям (2)–(5), (7)–(10) на основе проведения новых фундаментальных исследований РАН и прикладных разработок ведущих научных центров;

создание в Ростехнадзоре с участием РАН новой нормативной базы для обоснования многопараметрических показателей рисков $R(\tau)$ и безопасности $S(\tau)$ по выражениям (6), (7), (9), (10) с двумя группами рисков: рисков потерь жизней и экономических рисков;

введение в формирующийся риск-ориентированный подход комплексного анализа кинетики и динамики во времени τ опасных внешних и внутренних воздействий, а также человеческого, природного и техногенного факторов в соответствии с выражениями (8)–(10);

поэтапный переход от анализа рисков $R(\tau)$ на основе статистических методов деревьев событий и деревьев отказов к научно обоснованному построению сценариев возникновения и развития аварийных и катастрофических состояний по выражениям (11)–(20).

Наиболее перспективным до 2020–2025 гг. следует считать создание научных основ количественного анализа ключевых параметров $R(\tau)$, $S(\tau)$, $[R(\tau)]$ промышленной безопасности для функционирующих, строящихся и проектируемых объектов НГХК, обладающих наиболее высокими уровнями потенциальной опасности и входящих в состав стратегически важной энергетической, транспортной, сырьевой инфраструктуры страны национального и международного масштаба.

Особо актуальны при этом согласованные действия в области научных исследований всего спектра стратегических рисков Научного совета при Совете Безопасности РФ, РАН, научных структур федеральных ведомств, Научно-технического совета Ростехнадзора.

Список литературы

1. Конституция Российской Федерации. URL: <http://www.constitution.ru/> (дата обращения: 10.07.2017).
2. О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г. № 683. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_191669/ (дата обращения: 10.07.2017).
3. О промышленной политике в Российской Федерации: федер. закон от 31 декабря 2014 г. № 488-ФЗ. URL: <http://base.garant.ru/70833138/> (дата обращения: 10.07.2017).
4. О стратегическом планировании в Российской Федерации (с изменениями и дополнениями): федер. закон от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ. URL: <http://base.garant.ru/70684666/> (дата обращения: 10.07.2017).

5. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федер. закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017. — 52 с.

6. Совет Безопасности Российской Федерации: 20 лет. — М.: ФГУП Изд-во «Известия», 2012. — 215 с.

7. Резолюция Форума-диалога «Промышленная безопасность — ответственность государства, бизнеса и общества»// Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 12. — С. 32–38.

8. Резолюция II Форума-диалога «Промышленная безопасность — ответственность государства, бизнеса и общества»// Безопасность труда в промышленности. — 2016. — № 7. — С. 9–14.

9. Арнольд В.И. Теория катастроф. — М.: Наука, 1990. — 128 с.

10. Стратегические риски России: оценка и прогноз/ под ред. Ю.Л. Воробьева. — М.: МЧС России, 2005. — 392 с.

11. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.

12. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2 ч. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. — Новосибирск: Наука, 2005. — 493 с.

13. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2 ч. Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. — Новосибирск: Наука, 2005. — 610 с.

14. ПН АЭ Г-7-002—86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.

15. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.

16. О безопасности: федер. закон от 28 декабря 2010 г. № 390-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_108546/ (дата обращения: 10.07.2017).

17. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: федер. закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/ (дата обращения: 10.07.2017).

18. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности: нормы и правила в обл. пром. безопасности. — 2-е изд., испр. и доп. — Сер. 08. — Вып. 19. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017. — 316 с.

19. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: рук. по безопасности: приказ Ростехнадзора от 11 апреля 2016 г. № 144. — Сер. 27. — Вып. 16. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017. — 56 с.

20. Иванцов О.М., Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем. — М.: ИЦ-ЕЛИМА, 2004. — 1104 с.

21. Научно-технические, социально-экономические и правовые аспекты надежности транспорта нефти и нефтепродуктов/ С.Г. Радионова, Ю.В. Лисин, Н.А. Махутов и др.// Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2016. — № 5. — С. 20–31.

22. Лисин Ю.В. Трубы держат давление: как научные исследования повышают безопасность трубопроводного транспорта// Трубопроводный транспорт нефти. — 2015. — № 8. — С. 4–14.

23. 20 лет Федеральному закону № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»/ М.М. Бринчук, А.К. Голиченков, Е.В. Кловач и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 4. — С. 37–45.

kei51@mail.ru

Материал поступил в редакцию 29 августа 2017 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2017, № 9, pp. 5–13.
DOI: 10.24000/0409-2961-2017-9-5-13

Research Prospects in the Field of Risk Analysis for Improvement of Government Regulation and Safety Increase of the Oil and Gas Chemical Complex Objects

Information about the Author

S.G. Radionova, Dep. Chairman

S.A. Zhulina, Department Head

Rostekhnadzor, Moscow, Russia

N.A. Makhutov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., RAS Corresponding Member

M.M. Gadenin, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of

Sciences, Moscow, Russia

Yu.V. Lisin, Dr. Sci. (Eng.), General Dir.

D.A. Neganov, Cand. Sci. (Eng.), Dir. of Center

Pipeline Transport Institute, LLC (Transneft R&D, LLC), Moscow,

Russia

V.A. Nadein, General Dir.

ООО «НГБ-Энергодиагностика», Moscow, Russia

A.S. Pecherkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., First Dep. General Dir.

STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

Abstract

The criterial, legal, and technical standards base of assurance and improvement of safety of the oil and gas chemical complex objects is structurally considered. The defining expressions and their parameters for quantitative assessment of the industrial safety level by risk criteria are given. The actions accordance relevance of the Scientific Council at the Security Council of the Russian Federation, the Russian Academy of Sciences, the scientific departments of federal and regional agencies, and the scientific and technical council and centers of Rostekhnadzor in improvement of state regulation of industrial safety of the oil and gas chemical complex objects is noted. Prospects of the industrial safety increase are linked with the goals of engineering, equipment production, construction and operations of the oil and gas chemical complex objects considering the acceptable risk criteria.

For achievement of strategic priorities in the sphere of improvement of the industrial safety level, especially on the oil and gas chemical complex objects, the following top-priority arrangements are proposed: development of the unified research and methodological base for analysis, regulation, management and reduction of risks; creation of new regulatory base for substantiation of the risk and safety multiparameter indicators; introduction in the developing risk-based approach of complex analysis of the kinetics and dynamics at time of the dangerous external and internal actions, and also the human, natural, and technological factors; staged transition to scientifically based scenario modelling for the emergence and development of the emergency and catastrophic conditions.

Key words: safety, oil and gas chemical complex, expertise, research, substantiation, regulation, supervision, strength, resource, durability, reliability.

References

1. *Konstitutsiya Rossiyskoy Federatsii* (The Constitution of the Russian Federation). Available at: <http://www.constitution.ru/> (accessed: July 10, 2017).
2. *O Strategii natsionalnoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii: Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 31 dekabrya 2015 g. № 683* (On the national security strategy of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation № 683 of December 31, 2015). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_191669/ (accessed: July 10, 2017).
3. *O promyshlennoy politike v Rossiyskoy Federatsii: feder. zakon ot 31 dekabrya 2014 g. № 488-FZ* (On industrial policy in the Russian Federation:

Federal Law of December 31, 2014 № 488-FL). Available at: <http://base.garant.ru/70833138/> (accessed: July 10, 2017).

4. *O strategicheskom planirovanii v Rossiyskoy Federatsii: feder. zakon ot 28 iyunya 2014 g. № 172-FZ* (On strategic planning in the Russian Federation: Federal Law of June 28, 2014 № 172-FL). Available at: <http://base.garant.ru/70684666/> (accessed: July 10, 2017).

5. *O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh objektov: feder. zakon ot 21 iyulya 1997 g. № 116-FZ* (On Industrial Safety of Hazardous Production Objects: Federal Law of July 21, 1997 № 116-FL). Moscow: ZAO NTTs PB, 2017. 52 p.

6. *Sovet Bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii: 20 let* (Security Council of the Russian Federation: 20 Years). Moscow: FGUP Izd-vo «Izvestiya», 2012. 215 p.

7. *Rezolyutsiya Foruma-dialoga «Promyshlennaya bezopasnost — otnetsvennost gosudarstva, biznesa i obshchestva»* (Resolution of the Forum-dialogue «Industrial safety — responsibility of the state, business, and society»). *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2015. № 12. pp. 32–38.

8. *Rezolyutsiya II Foruma-dialoga «Promyshlennaya bezopasnost — otnetsvennost gosudarstva, biznesa i obshchestva»* (Resolution of the II Forum-dialogue «Industrial safety — responsibility of the state, business, and society»). *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2016. № 7. pp. 9–14.

9. Arnold V.I. *Teoriya katastrof* (Theory of Catastrophes). Moscow: Nauka, 1990. 128 p.

10. Vorobev Yu.L. *Strategicheskie riski Rossii: otsenka i prognoz* (Strategic Risks of Russia: Assessment and Forecast). Moscow: MChS Rossii, 2005. 392 p.

11. Makhutov N.A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruksiy na prochnost* (Deformation Criteria of Destruction and Strength Analysis of Constructional Elements). Moscow: Mashinostroenie, 1981. 272 p.

12. Makhutov N.A. *Konstruksionnaya prochnost, resurs i tekhnogennaya bezopasnost. V 2 ch. Ch. 1. Kriterii prochnosti i resursa* (Structural Strength, Resource and Technogenic Safety. In 2 parts. Part 1. The Strength and Resource Criteria). Novosibirsk: Nauka, 2005. 493 p.

13. Makhutov N.A. *Konstruksionnaya prochnost, resurs i tekhnogennaya bezopasnost. V 2 ch. Ch. 2. Obosnovanie resursa i bezopasnosti* (Structural Strength, Resource and Technogenic Safety. In 2 parts. Part 2. Substantiation of Resource and Safety). Novosibirsk: Nauka, 2005. 610 p.

14. *PN AE G-7-002—86. Normy rascheta na prochnost oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok* (PN AE G-7-002—86. Norms for the Strength Analysis of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants). Moscow: Energoatomizdat, 1989. 525 p.

15. Makhutov N.A. *Prochnost i bezopasnost. Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya* (Strength and Safety. Fundamental and Applied Research). Novosibirsk: Nauka, 2008. 528 p.

16. *O bezopasnosti: feder. zakon ot 28 dekabrya 2010 g. № 390-FZ* (On security: Federal Law of December 28, 2010 № 390-FL). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_108546/ (accessed: July 10, 2017).

17. *O zashchite naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera: feder. zakon ot 21 dekabrya 1994 g. № 68-FZ* (On the protection of the population and territories from emergency situations of natural and technogenic nature: Federal Law of December 21, 1994 № 68-FL). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/ (accessed: July 10, 2017).

18. *Pravila bezopasnosti v neftyanoy i gazovoy promyshlennosti: feder. normy i pravila v obl. prom. bezopasnosti* (Safety Rules in Oil and Gas Industry: Federal Norms and Rules in the Field of Industrial Safety). 2-e izd., ispr. i dop. Ser. 08. Iss. 19. Moscow: ZAO NTTs PB, 2017. 316 p.

19. *Metodicheskie osnovy po provedeniyu analiza opasnostey i otsenki riska avariyn na opasnykh proizvodstvennykh obektiakh: ruk. po bezopasnosti: prikaz Rostekhnadzora ot 11 aprelya 2016 g. № 144* (Methodical Bases on Conducting Hazards Analysis and Accidents Risk Assessment at Hazardous Production Facilities: Safety Guide: Order of Rostekhnadzor of April 11, 2016 № 144). Ser. 27. Iss. 16. Moscow: ZAO NTTs PB, 2017. 56 p.

20. Ivantsov O.M., Mazur I.I. *Bezopasnost truboprovodnykh system* (Safety of Pipeline Systems). Moscow: ITS-ELIMA, 2004. 1104 p.

21. Radionova S.G., Lisin Yu.V., Makhutov N.A., Revel-Moroz P.A., Neganov D.A., Zorin N.E. Scientific and technical, social and economic, and legal aspects of the reliability of transport of oil and petroleum products. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov = Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2016. № 5. pp. 20–31.

22. Lisin Yu.V. Pipes withstand pressure: how scientific research increases the safety of pipeline transport. *Truboprovodnyy transport nefiti = Oil Pipeline Transport*. 2015. № 8. pp. 4–14.

23. Brinchuk M.M., Golichenkov A.K., Klovach E.V., Krasnykh B.A., Sidorov V.I. 20 Years to the Federal Law № 116-FL «On industrial safety of hazardous production facilities». *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2017. № 4. pp. 37–45.