

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-4-47-59

УДК (UDC) 620.171.3:629.10.061

**КОМПЛЕКСНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ
ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПРОЧНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО
ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ¹**

© **Юрий Викторович Лисин, Николай Андреевич Махутов,
Дмитрий Александрович Неганов, Евгений Павлович Студенов,
Сергей Валериевич Скородумов**

ООО «НИИ Транснефть», Центр стали и сварки, прочностных расчетов ООО «НИИ Транснефть», Москва, Россия;
e-mail: GalchinskayaLV@niitnn.transneft.ru

Статья поступила 24 января 2018 г.

Рассмотрены состояние, проблемы и перспективы развития стандартных, унифицированных и специальных лабораторных, стендовых и натурных испытаний для обоснования комплексных характеристик прочности, долговечности, живучести, хладостойкости, надежности и безопасности несущих элементов трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Эти испытания увязаны со стадиями жизненного цикла трубопроводов и основными и поверочными методами расчетно-экспериментального определения критериальных характеристик трубных сталей, труб и магистральных трубопроводов с учетом отечественного и зарубежного опытов. При стандартных испытаниях на статическое растяжение экспериментально получаемые базовые механические характеристики (пределы текучести и прочности, модули упругости) входят в основные расчеты статической прочности вновь проектируемых и функционирующих трубопроводов. Стандартные испытания на твердость и ударную вязкость используют для контроля качества трубных сталей. Для поверочных оценок статической прочности из результатов стандартных испытаний на растяжение получают дополнительную расчетную информацию по оценкам пластичности и степени упрочнения сталей при упругопластическом деформировании. Унифицированные лабораторные испытания предназначены для уточненного определения прочности трубопроводов с учетом эффектов объемности напряженного состояния, абсолютных размеров сечений трубопроводов, скорости деформирования, анизотропии, хладостойкости, коррозии и наличия сварных соединений. Особое место в лабораторных и стендовых испытаниях занимает оценка трещиностойкости трубных сталей и труб по критериям линейной и нелинейной механики разрушения с учетом технологических и эксплуатационных дефектов. Отмечен опыт проведения указанных испытаний, накопленный в российской системе магистрального транспорта нефти и нефтепродуктов.

Ключевые слова: трубопроводный транспорт; механические испытания; прочность; пластичность; устойчивость; живучесть; долговечность; хладостойкость; трещиностойкость; деформирование; разрушение; трубная сталь, несущие элементы.

**INTEGRAL MECHANICAL TESTS IN THE STRENGTH CALCULATIONS
OF THE MAIN PIPELINE FOR TRANSPORTATION OF OIL AND OIL PRODUCTS**

© **Yuriy V. Lisin, Nikolay A. Makhutov, Dmitriy A. Neganov,
Evgeniy P. Studenov, Sergey V. Skorodumov**

The Pipeline Transport Institute (PTI, LLC), 47a, Sevastopolskiy prospect, Moscow, 117186, Russia;
e-mail: GalchinskayaLV@niitnn.transneft.ru

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-58-48008_ИНД_ОМИ.

Submitted January 24, 2018.

Problematic issues of the current state and prospects of development of the standard, unified and special laboratory, bench and full-scale tests are considered to substantiate complex characteristics of the durability, survivability, cold resistance, reliability and safety of the elements of pipeline transport of oil and oil products are considered. These tests are linked to the stages of the pipeline life and improvement of the basic and verification methods of calculation and experimental determination of the critical characteristics of the pipe steels, pipes and main pipelines with allowance for domestic and foreign experience. In the field of standard tests for static stretching, the experimentally obtained characteristics of the basic mechanical properties (yield strength and strength, elastic moduli) are included in the basic calculations of the static strength of newly designed and functioning pipelines. Standard tests for hardness and toughness are used to control the quality of pipe steels. The results of standard tensile tests are used to provide additional computational information regarding the estimates of ductility and degree of steel hardening upon elastoplastic deformation to get reliable verification estimates of the static strength. Unified laboratory tests are intended to refine determination of the pipeline strength taking into account the effects of 3D character of the stress state, absolute sizes of the pipeline cross section, deformation rate, anisotropy, cold resistance, corrosion and existence of welded connections. Assessment of the crack resistance of the pipe steel and pipes by criteria of linear and nonlinear fracture mechanics with allowance for technological and operational defects takes a special place in laboratory and bench tests. An emphasis is made on the domestic experience gained in the Russian system of testing the main pipelines for transportation of oil and oil products.

Keywords: pipeline transport; mechanical tests; tensile strength; ductility; stability; durability; cold resistance; crack resistance; deformation; fracture; pipe steel; supporting members

Актуальность проблем механических испытаний

В жизнеобеспечении человека, общества, государства и мирового сообщества всегда важное место занимал трубопроводный транспорт (ТТ) жидкостей, газов и многофазных сред, начиная с водопроводов древних времен и заканчивая трубопроводным транспортом высоких и сверхвысоких параметров в энергетике (тепловой, гидравлической, атомной), ракетно-космической технике (жидкостные ракетные двигатели, инфраструктура космодромов). Со второй половины XX в. и до настоящего времени трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов является важнейшей составной частью магистрального трубопроводного транспорта (МТТ) жидких и газообразных углеводородов от места их добычи до конечных потребителей — нефтегазохимических предприятий, промышленных и гражданских комплексов по производству и использованию тепла и электроэнергии.

Современный магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов (МТТ ННП) нашей страны включает в себя следующие основные виды несущих элементов [1–3]:

линейную часть общей протяженностью 78 тыс. км с диаметрами трубопроводов от 159 до 1220 мм и толщиной стенки от 5 до 40 мм;

систему из более чем 850 стальных хранилищ (горизонтальных и вертикальных резервуаров) общей емкостью более 24 млн м³ [3];

систему из более чем 500 насосных перекачивающих станций с рабочими давлениями до 1000 МПа;

систему арматур трубопроводов общим количеством около 38 000 единиц (задвижки, камеры пуска — приема для снарядов внутритрубной очистки и диагностики).

Общий грузооборот нефти и нефтепродуктов в МТТ достигает более 1200 млрд т · км/год.

Для МТТ ННП использовали три группы сталей:

углеродистые нелегированные стали (тип I) с пределом прочности 450 – 500 МПа;

малоуглеродистые низколегированные стали (тип II) с пределом прочности 500 – 600 МПа;

низколегированные термоупрочненные стали (тип III) с пределом прочности 600 – 800 МПа.

Методы расчетов и лабораторных испытаний

Стандартные испытания и основные расчеты на статическую прочность. В течение более 80 лет шло непрерывное совершенствование методов расчетов и механических испытаний конструкционных сталей.

Таблица 1. Группы механических испытаний трубных сталей и труб

№ п/п	По назначению	По уровню нормирования
1	Лабораторные на образцах (ЛО)	Стандартные — по принятым стандартам (СИС)
2	Стендовые на моделях (СМ)	Унифицированные — по руководящим документам (УРД)
3	Натурные на трубах (НТ)	Специальные — по методическим указаниям (СМУ)

Методы механических испытаний по их целевому назначению и уровню нормирования можно разделить на группы (табл. 1).

Полученные в результате испытаний характеристики механических свойств используют в двух основных видах расчетов труб и трубопроводов (табл. 2).

При развитии методов механических испытаний, основных и поверочных расчетов существенное внимание уделяли (табл. 3) анализу предельных состояний, а также связанных с ними групп испытаний (см. табл. 1) и видов расчетов (см. табл. 2).

Ниже основное внимание уделено стандартным испытаниям (СИС) с определением расчетных характеристик механических свойств при проведении детерминированных основных (ОР) и поверочных (ПР) расчетов на статическую прочность. Эти расчеты направлены на недопущение однократного статического разрушения (СР) трубопроводов, являющегося первым предельным состоянием по отечественным и зарубежным нормам прочности. К этому предельному состоянию в последующем были добавлены другие расчетные предельные состояния (см. табл. 3): расчеты на устойчивость (РУ), пластичность (РП), циклическую прочность (РЦП), живучесть (РЖ), хладостойкость (РХ), коррозионную стойкость (РК), надежность (РН), безопасность (РБ).

В соответствующие временные этапы (1 – 6) происходило совершенствование методов расчетов несущих элементов ТТ, МТТ и МТТ ННП

[1 – 3]: более устойчивыми были основные аналитические расчеты прочности, в соответствии с которыми номинальные аналитические (по формулам сопротивления материалов и теории оболочек) кольцевые эксплуатационные напряжения σ_n^a не должны были превышать допустимых $[\sigma]$, устанавливаемых по опасным напряжениям $\sigma_{оп}$ из результатов стандартных испытаний лабораторных образцов из конструкционных материалов и запасам прочности n_σ :

$$\sigma_n^a = F_n [p, D, \delta] \leq \frac{\sigma_{оп}}{n_\sigma} = [\sigma], \quad (1)$$

где p — давление (внутреннее или наружное); F_n — функционал рабочих параметров; D, δ — диаметр и толщина стенки трубы.

До середины XX века за опасные ($\sigma_{оп}$) принимали напряжения на пределе прочности материала трубы σ_b , позволявшие исключить ее статическое разрушение. Запас n_σ по пределу прочности составлял тогда 2,6 – 3,2. Расчеты на прочность дополняли расчетами на потерю продольной устойчивости (по формуле Эйлера) под действием продольной силы N_n :

$$\sigma_y^a = \{F_y N_n, E, l, J_{\min}\} \leq \frac{\sigma_k}{n_y} = [\sigma]_y, \quad (2)$$

где E — модуль продольной упругости, определяемый при стандартных испытаниях лабораторных образцов; l — приведенная длина, зависящая от формы заземления трубы в грунте или между опорами; $J_{\min}$ — минимальный момент инерции сечения трубы; σ_k — критические на-

Таблица 2. Вид и цели расчетов

№ п/п	Вид расчета	Цель расчета
1	Основной (ОР)	Выбор основных размеров труб и трубных сталей по установленным расчетным схемам и расчетным случаям
2	Поверочный (ПР)	Проверка обоснованности выбора с учетом конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов

Таблица 3. Этапы развития методов расчетов, испытаний и расчетных предельных состояний

Этапы	Годы	Методы расчетов	Расчетные предельные состояния	Методы испытаний
1	1940 – 1950	Основные (аналитические) ОР	СР	(СИС, ЛО)
2	1950 – 1970	Основные (аналитические) ОР	СР, РУ	(СИС, ЛО)
3	1970 – 1990	Основные (аналитические) ОР Поверочные (аналитические) ПР	СР, РУ, РП	(СИС, ЛО), (СМ, УРД)
4	1990 – 2010	Основные (аналитические) ОР Поверочные (аналитические, числовые) ПР	СР, РУ, РП, РЦП, КР	(СИС, ЛО), (СМ, УРД)
5	2010 – 2020	Основные (аналитические) ОР Поверочные (аналитические, числовые) ПР	СР, РУ, РП, РЦП, РЖ, РН	(СИС, ЛО), (СМ, УРД), (НТ, СМУ)
6	2020 – 2030	Основные (аналитические, числовые) ОР Поверочные (аналитические, числовые) ПР	СР, РУ, РП, РЦП, РЖ, РН, РБ	(СИС, ЛО), (СМ, УРД), (НТ, СМУ)

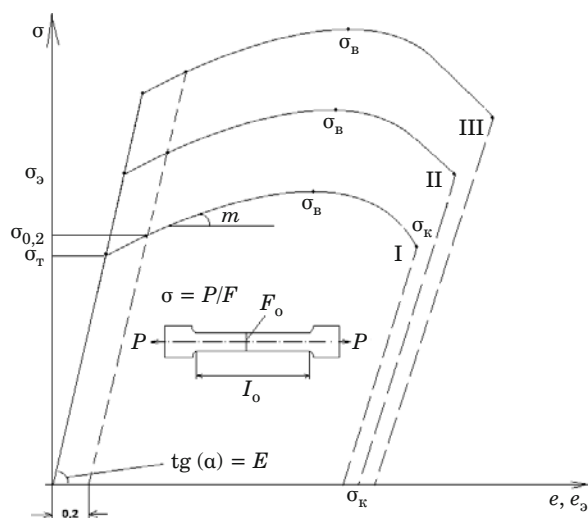


Рис. 1. Типы диаграмм статического растяжения стандартных образцов с рабочей длиной l_0 и сечением F_0

пряжения при потере устойчивости; n_y — запас на устойчивость.

По мере совершенствования трубных сталей типов I – III (повышение степени легирования, введение термообработок) происходило непрерывное повышение стандартных характеристик механических свойств: пределов прочности σ_B ; пределов текучести σ_T (физический предел текучести) и $\sigma_{0,2}$ (условный предел текучести). Для этого в координатах условных напряжений $\sigma = P/F_0$ и условных деформаций $e = \Delta l/l_0$ строили диаграммы растяжения (рис. 1). При этом соотношение σ_T/σ_B , как правило, повышалось (от 0,45 до 0,9), а упрочнение стали в упругопластической области снижалось. Для исключения образования недопустимых пластических деформаций в трубах в качестве опасного напряжения $\sigma_{оп}$ в выражение (1) вводили предел текучести σ_T (или $\sigma_{0,2}$). Тогда обобщенное условие недопустимости статического разрушения или возникновения пластических деформаций принимало форму

$$\sigma_n^a \leq [\sigma] = \min \left\{ \frac{\sigma_B}{n_B}, \frac{\sigma_T}{n_T} \right\}, \quad (3)$$

где n_B , n_T — запасы по пределам прочности и текучести соответственно.

При этом для сталей типа I расчет проводили преимущественно с запасом n_T , а для сталей типа III — с запасом n_B . До настоящего времени эти запасы постепенно снижались, оказываясь в пределах $n_T = 1,2 - 1,5$ и $n_B = 1,8 - 2,5$.

Основные расчеты по выражениям (1) – (3) позволили:

обоснованно назначать размеры труб D , δ , l при заданных p , N_{Π} (основная прямая задача);

выбирать материал (σ_T , σ_B) при заданных p , D , δ , l (основная прямая задача);

проверять прочность при заданных p , δ , D , l , σ_T , σ_B (обратная поверочная задача).

В этих расчетах базовыми характеристиками механических свойств, определяемых стандартными испытаниями (СИС) лабораторных образцов (ЛО), были и остаются (см. рис. 1) E , σ_T , σ_B [1 – 10]. Вместе с тем реальные условия функционирования, повреждений и разрушений МТТ и МТТ ННП в явном виде не были отражены в расчетах по выражениям (1) – (3). В связи с этим в 40 – 50-х годах XX в. И. А. Одингом [4] и Н. С. Стрелецким [5] предложены два направления совершенствования методов расчетов:

определение и назначение запасов n_σ в (1) через введение системы поправочных коэффициентов $n_1 \dots n_n$ к исходному запасу n_{00} :

$$n_\sigma = n_{00}(n_1, n_2, \dots, n_n); \quad (4)$$

переход к расчету по предельным состояниям с учетом основных конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов

$$n_\sigma = k_n k_1 / m, \quad (5)$$

где m , k_n и k_1 — коэффициенты, учитывающие условия работы, надежность по назначению и материалу соответственно.

Выражения (4), (5) базировались [1 – 3, 6 – 10] на тех же стандартных характеристиках механических свойств, что и (1) – (3).

При решении обратных поверочных задач с определением допустимого расчетного давления необходимо определение фактических механических свойств на заданной стадии эксплуатации. В этом случае широко используются корреляционные связи между стандартными характеристиками прочности (σ_B , σ_T) и стандартными характеристиками твердости по Бринеллю (HB) и Роквеллу (HR):

$$\{\sigma_B, \sigma_T\} = F_n \{HB, HR\}. \quad (6)$$

В зарубежных нормах (США [6], ЕС [7] и др.) основные расчеты прочности выполняются по (1) – (3) по характеристикам σ_B и σ_T с переменными допусками на пластическую деформацию (0,2; 0,5; 1,0 %), а также с уточнением и категорированием номинальных расчетных напряжений σ_n^a .

Унифицированные испытания и уточненные поверочные расчеты на статическую прочность. Одним из важнейших факторов, влияющих на статическую прочность МТТ ННП, является многоосность нагружения трубопроводов (рис. 2). В общем случае в уточненных расчетах по номинальным напряжениям σ_n^a и σ_y^a в выражениях (1) – (3) в опасном сечении X и в наиболее нагруженной точке A трубы действуют: давление $p(x)$; продольные силы $N_{\Pi}(x)$; изгибающие

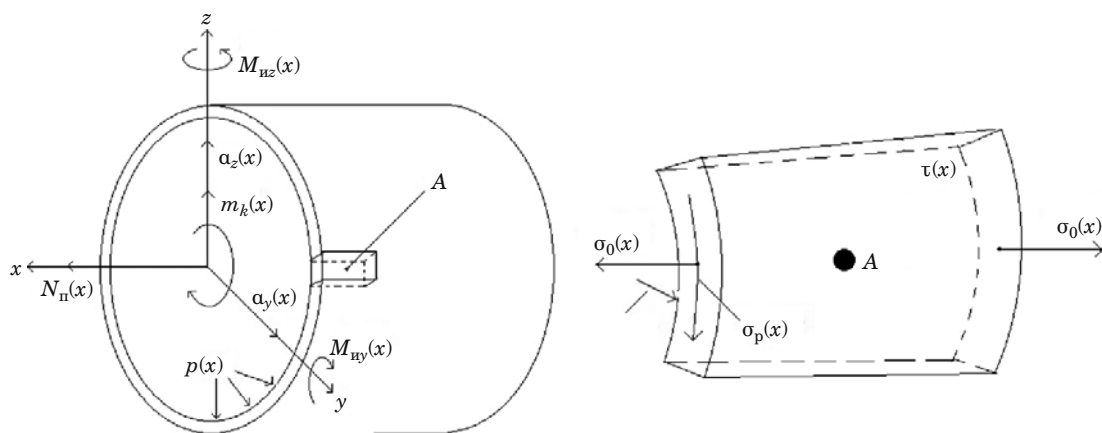


Рис. 2. Схема нагружения трубопровода

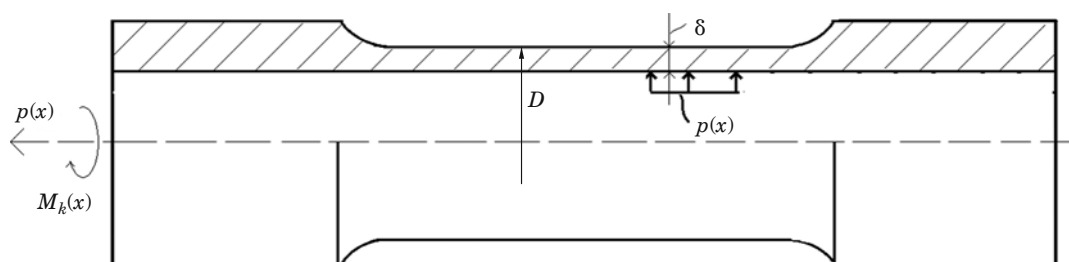


Рис. 3. Схема унифицированных статических испытаний трубчатых образцов при комбинированном нагружении

моменты $M_{ny}(x)$, $M_{nz}(x)$; крутящий момент $M_k(x)$; перерезывающие силы $Q_y(x)$, $Q_z(x)$. В точке A они создают следующие компоненты напряжений: кольцевые $\sigma_k(x)$; осевые продольные $\sigma_0(x)$; радиальные $\sigma_r(x)$; касательные $\tau(x)$.

На основе аналитических и численных методов теорий упругости, пластичности и прочности (I – IV теории) по этим напряжениям могут быть вычислены три компоненты главных напряжений — $\sigma_1(x)$, $\sigma_2(x)$, $\sigma_3(x)$, а по ним — эквивалентные напряжения $\sigma_3(x)$, вводимые в выражения (1) – (3):

$$\sigma_3(x) = F_3\{\sigma_1(x), \sigma_2(x), \sigma_3(x)\} = \sigma_n^3. \quad (7)$$

Для обоснования применимости (7) в уточненных расчетах статической прочности проводят унифицированные лабораторные испытания тонкостенных трубчатых образцов (диаметрами $D = 30 - 50$ мм и толщиной стенки $\delta = 0,5 - 2$ мм) при их нагружении различными сочетаниями давлений $p(x)$, осевых сил $P(x) = N_n(x)$ и моментов $M_k(x)$ (рис. 3). По результатам испытаний строят диаграммы деформирования в эквивалентных напряжениях σ_3 и деформациях e_3 :

$$\{\sigma_3, e_3\} = F_3\{\sigma_T, E, M, \mu, m, (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)\}, \quad (8)$$

где μ — коэффициент Пуассона; m — показатель упрочнения в упругопластической области.

При степенной аппроксимации диаграмма деформирования по рис. 1 в координатах $\sigma - e$ или $\sigma_3 - e_3$ записывается в форме

$$\{\sigma, \sigma_3\} = \sigma_T\{e/e_T, e_3/e_T\}^m. \quad (9)$$

Величина m для трубных сталей снижается от 0,2 до 0,06 при увеличении σ_T от 200 до 750 МПа.

Выражение (9) справедливо для σ и σ_3 в пределах от σ_T до σ_B , что позволяет увязать отечественные и зарубежные нормы основных расчетов на статическую прочность. Оно справедливо для диаграммы деформирования в истинных напряжениях σ_n и деформациях e_n :

$$\sigma_n = P/F_n; e_n = dl/l_n, \quad (10)$$

где F_n и l_n — истинная (текущая) площадь сечения и истинная длина растягиваемого образца согласно рис. 1.

При достижении предела прочности σ_B в образце образуется шейка. При разрушении образца условное напряжение и условная деформация в конечной точке составят

$$\sigma_K = P_K/F_0; \delta_K = \Delta l_K/l_0. \quad (11)$$

Истинное сопротивление разрушению в шейке

$$S_K = P_K/F_K. \quad (12)$$

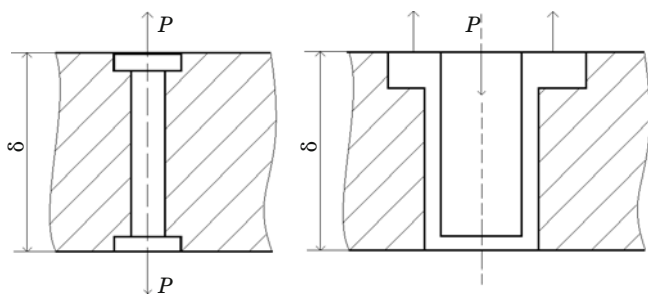


Рис. 4. Схема унифицированных испытаний для оценки свойств усилием P в направлении толщины δ стенки: a — цилиндрический образец; b — образец в форме «стаканчика»

Интегрируя выражения (10), получим истинную деформацию при разрушении в шейке:

$$e_k = \int_0^{e_k} \frac{dl}{l_k} = \ln \frac{1}{1 - \psi_k}, \quad (13)$$

где ψ_k — относительное сужение в шейке.

Характеристики S_k , ψ_k , e_k следует рассматривать как унифицированные по стандартным испытаниям лабораторных образцов при растяжении.

Полагая, что выражение (9) описывает диаграмму деформирования по напряжениям от σ_T до S_k и по деформациям от e_T до e_k , можно определить показатель упрочнения m и σ_T по стандартным характеристикам механических свойств:

$$m \approx \frac{\lg(S_k/\sigma_T)}{\lg\left(\frac{1}{e_T} \ln \frac{1}{1 - \psi_k}\right)},$$

$$\sigma_T = \left[\frac{\sigma_{0,2}}{(E \cdot 0,2 \cdot 10^{-2} + \sigma_{0,2})^m} \right]^{1/(1-m)}. \quad (14)$$

Дифференцируя уравнения кривой статического растяжения $d\sigma/de$ в условных напряжениях σ и деформациях e и полагая $d\sigma/de = 0$ при напряжениях $\sigma = \sigma_B$, можно получить

$$m \approx e_B = \ln \frac{1}{1 - \psi_B}, \quad (15)$$

где e_B — истинная равномерная деформация на стадии образования шейки; ψ_B — относительное равномерное сужение.

Унифицированные испытания для поверочной оценки влияния анизотропии механических свойств. Современные технологии изготовления труб для МТТ ННП из листового металла, полученного прокаткой с последующим его формо-

нием, создают определенный уровень анизотропии (см. рис. 2, 3):

вдоль прокатки — в направлении осевых напряжений $\sigma_0(x)$;

поперек прокатки — в направлении кольцевых напряжений $\sigma_k(x)$;

в радиальном направлении (по толщине δ) — в направлении напряжений $\sigma_p(x)$.

Для оценки анизотропии в направлениях $\sigma_0(x)$, $\sigma_k(x)$ проводят статические испытания стандартных образцов согласно рис. 1. Этих испытаний оказывается достаточно с учетом того, что в большинстве случаев $\sigma_k(x) \ll \{\sigma_0(x), \sigma_k(x)\}$.

Для оценки характеристик прочности в направлении толщины δ с учетом ее размеров проводят два вида испытаний:

на малых лабораторных образцах стандартных форм при $\delta > 20$ мм (рис. 4, а);

на специальных образцах в форме «стаканчика» при $8 \leq \delta \leq 20$ мм (рис. 4, б).

Для линейной части МТТ ННП, испытывающих действие преимущественно внутреннего давления $p(x) = P$, главные и эквивалентные (по энергетической теории прочности) напряжения для изотропного материала составляют:

$$\sigma_1 = \sigma_k = \frac{pD}{2\delta}, \quad \sigma_2 = \sigma_0 = \frac{pD}{4\delta}, \quad \sigma_3 = -p,$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_1 \sqrt{(1 - \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_3)^2 + (\bar{\sigma}_3 - 1)^2}, \quad (16)$$

где $\bar{\sigma}_2 = \sigma_2/\sigma_1$; $\bar{\sigma}_3 = \sigma_3/\sigma_1$.

Для анизотропного материала трубы

$$\bar{\sigma}_{2a} = \bar{\sigma}_2 \frac{\sigma_{T1}}{\sigma_{T2}}, \quad \bar{\sigma}_{3a} = \bar{\sigma}_3 \frac{\sigma_{T1}}{\sigma_{T3}}, \quad (17)$$

где σ_{T1} , σ_{T2} , σ_{T3} — пределы текучести материала в кольцевом, продольном и поперечном направлениях.

Если трубная сталь обладает выраженной анизотропией ($\sigma_{T1}/\sigma_{T2} \leq 1,1$ и $\sigma_{T1}/\sigma_{T3} \leq 4$), то эквивалентные напряжения σ_3 будут на 8–10 % выше, чем для изотропной стали.

Унифицированные испытания для поверочных расчетов статической прочности с учетом абсолютных размеров. В основных расчетах на статическую прочность по выражениям (1)–(3) используют механические свойства сталей, взятые из соответствующих технических условий и определяемые по стандартным испытаниям образцов (см. рис. 1) сечением $F_0 = 10 - 80$ мм² на растяжение без учета масштабного фактора.

В то же время реальные трубопроводы в опасных сечениях имеют площадь $F = 12 \cdot 10^3 - 56 \cdot 10^3$ мм², толщину стенки $\delta = 7 - 30$ мм и дли-

ны труб $l = 6 \cdot 10^3 - 12 \cdot 10^3$ мм. Увеличение абсолютных размеров в силу проявления технологических факторов изготовления листов и труб приводит к снижению механических свойств σ_T , σ_B [9, 11]:

$$\{\sigma_T, \sigma_B\} = F_0 \left\{ \frac{F_0}{F}, \frac{\delta_0}{\delta}, \frac{l_0}{l}, \frac{d_0}{d} \right\}^{m_0}, \quad (18)$$

где F_0 , δ_0 , l_0 , d_0 — размеры рабочей части образца (площадь, толщина, длина, диаметр); F , δ , l , d — размеры трубы; m_0 — показатель степени, зависящий от химического состава трубной стали ($0,01 \leq m_0 \leq 0,04$).

Для определения m_0 в выражении (18) проводят лабораторные испытания на растяжение (согласно схеме на рис. 1) стандартных цилиндрических образцов диаметром $d_0 = 2 - 10$ мм, плоских образцов сечением от 6 до 100 мм², а также модельных плоских образцов натуральных толщин $\delta = 7 - 30$ мм с шириной до 10 δ .

Унифицированные испытания для поверочных расчетов при скоростном нагружении. При ускоренном нагружении МТТ ННП, возникающем в случае гидравлических ударов, землетрясений, геологических сдвигов, оползней, базовые характеристики механических свойств — пределы текучести σ_T , пределы прочности σ_B в выражениях (3), (9), (17), (18) возрастают, а показатель упрочнения m в выражении (9) снижается. Исследования [9, 10] показывают, что характеристики σ_T , σ_B с увеличением скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ возрастают по степенному закону

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}, \quad \{\sigma_{T\dot{\epsilon}}, \sigma_{B\dot{\epsilon}}\} = F_{\dot{\epsilon}} \left\{ (\sigma_{T0}, \sigma_{B0}) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{\alpha_{eT}, \alpha_{eB}} \right\}, \quad (19)$$

где t — время; σ_{T0} , σ_{B0} — пределы текучести и прочности при стандартной скорости деформирования $\dot{\epsilon}_0$ ($1 \cdot 10^{-3} \leq \dot{\epsilon}_0 \leq 5 \cdot 10^{-3}$ 1/с) лабораторных образцов по схеме рис. 1; $\sigma_{T\dot{\epsilon}}$, $\sigma_{B\dot{\epsilon}}$ — пределы текучести и прочности при заданной скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ ($\dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_0$); α_{eT} , α_{eB} — характеристики материала, зависящие в основном от предела текучести (с повышением σ_{T0} от 250 до 800 МПа величина α_{eT} снижается от 0,08 до 0,02). С увеличением скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ предел текучести растет быстрее, чем предел прочности.

Характеристику m_e определяют при унифицированных испытаниях на растяжение образцов, близких к стандартным (см. рис. 1), с повышением скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ до 100 – 101 1/с на электромеханических, электрогидравлических, ударных установках с регистрацией диаграмм деформирования.

Указанные выше условия нагружения трубопроводов приводят также к увеличению эксплуатационных воздействий (p , $N_{\text{п}}$, $M_{\text{и}}$, $M_{\text{к}}$, Q) согласно схеме на рис. 2. Для таких условий допускается снижение (на 5 – 10 %) запасов статической прочности n_{σ} , n_T , n_B в выражениях (1) и (3).

Унифицированные температурные испытания для поверочных расчетов низкотемпературной прочности. МТТ ННП функционируют при различных эксплуатационных температурах, создающих в несущих элементах температурные нагрузки (см. рис. 2) и напряжения σ_n^3 в выражениях (1) – (3) от разности температур транспортируемых жидкостей, стенок трубопроводов и окружающей среды. Изменение температуры стенок трубы приводит к изменению стандартных характеристик механических свойств трубных сталей — σ_T , σ_B , m , входящих в расчетные выражения (2), (3), (9). Поскольку в поверочных расчетах прочности вводятся запасы по критическим температурам хрупкости на уровне $[\Delta t] = 30$ °С [8 – 10], то для проверки прочности минимальная и максимальная расчетные температуры, для которых должны определяться механические свойства, составляют:

$$t_{\min} = t_{\min}^3 - [\Delta t], \quad t_{\max} = t_{\max}^3 + [\Delta t], \quad (20)$$

где $t_{\min}^3$ — минимальная температура окружающей среды.

Для трубопроводов в Арктической зоне $t_{\min}^3$ может быть на уровне минус 60 °С, тогда $t_{\min}$ по формуле (20) составит минус 90 °С.

При температуре $t_{\max}^3$ на уровне +50 °С максимальная температура испытаний $t_{\max} = +80$ °С.

Путем унифицированных испытаний на статическое растяжение лабораторных образцов в соответствии с рис. 1 в термо-криокамерах с температурами t от минус 90 до +80 °С получают диаграммы деформирования и устанавливают температурные зависимости экспоненциального типа [8]

$$\sigma_{Tt}, \sigma_{Bt} = F_t \left\{ (\sigma_{T0}, \sigma_{B0}), \exp(\beta_T, \beta_B) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}, \quad (21)$$

где σ_{Tt} , σ_{T0} , σ_{Bt} , σ_{B0} — пределы текучести и прочности при заданной температуре t и комнатной температуре t_0 ; β_B , β_T — экспериментально определяемые характеристики трубной стали; T , T_0 — соответствующие температуры в К ($T = t + 273$).

Параметр β_T снижается от 130 до 45 при повышении σ_{T0} от 250 МПа до 800 МПа. При этом $\beta_B < \beta_T$, что указывает на снижение показателя упрочнения m в выражениях (9), (14) и (15).

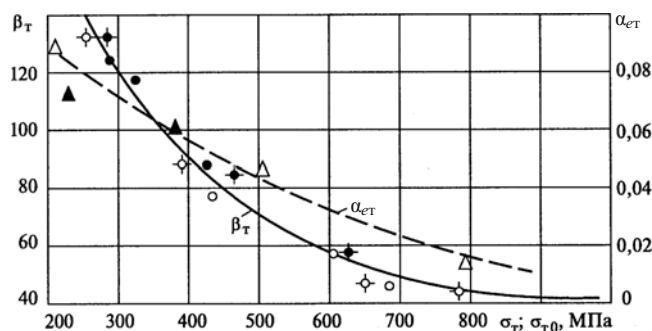


Рис. 5. Зависимость параметров β_T и $\alpha_{\epsilon T}$ от предела текучести

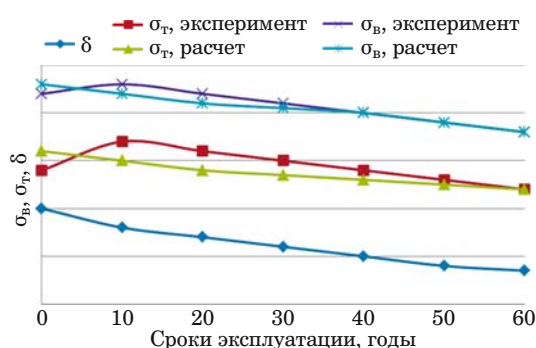


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные кривые длительной прочности и пластичности

В поверочных расчетах статической температурной прочности определяют запасы прочности n_T , n_B при изменении температур от минус 90 до +80 °С, которые не должны быть ниже этих запасов при основном расчете статической прочности.

Если отмеченные выше унифицированные испытания для поверочных расчетов не проводить, то в первом приближении можно использовать обобщенные зависимости для параметров $\alpha_{\epsilon T}$ и β_T на рис. 5 [9].

Унифицированные лабораторные испытания для учета временных и температурно-временных факторов в расчетах прочности. МТТ ННП является объектом длительного функционирования во времени t . Временной фактор в основные расчеты прочности в явном виде не входит. Время эксплуатации t^3 трубопроводов достигает 30–70 лет при назначенном сроке службы 30 лет. В нашей стране и за рубежом многочисленные эксперименты на лабораторных образцах, вырезанных из длительно работающих труб, показали, что базовые механические характеристики оказываются не ниже свойств трубных сталей по ТУ. Поэтому сделан вывод о незначительном влиянии процессов старения и деградации сталей на базовые механические свойства. Это в значительной степени связывается с вырез-

кой образцов из центральной части по толщине стенки с удалением наиболее поврежденных поверхностных слоев, а также с ограниченностью прямых данных о свойствах конкретных труб в исходном и поврежденном (длительной эксплуатацией) состояниях. Вместе с тем даже при указанных выше температурах эксплуатации (t^3) трубопроводов структурные, диффузионные, коррозионные процессы, особенно в поверхностных слоях, могут проходить (рис. 6) с изменениями базовых механических свойств σ_T , σ_B , Ψ_K [3, 9, 10, 12, 13].

В первом приближении в поверочных расчетах на статическую прочность можно использовать степенные зависимости

$$\{\sigma_{Tt}, \sigma_{Bt}, \Psi_{Kt}\} = F_t \{(\sigma_{T0}, \sigma_{B0}, \Psi_{K0})(\tau_0/\tau)^{m_t}\},$$

где σ_{Tt} , σ_{Bt} , Ψ_{Kt} , σ_{T0} , σ_{B0} , Ψ_{K0} — пределы текучести, прочности и относительное сужение для заданного времени τ и времени τ_0 ($\tau_0 = 0,02 - 0,12$ ч) стандартного испытания на растяжение соответственно; m_t — характеристика трубной стали.

Величины m_t определяют при унифицированных испытаниях на длительную ($\tau \gg \tau_0$) прочность (m_{Tt} , m_{Bt}) и пластичность (m_{Ψ}).

Параметр m_{Tt} зависит от температуры T (К):

$$m_{Tt} = m_{T0} \exp(\beta_{\sigma T} T). \quad (22)$$

Для трубных сталей при $T = 273$ К ($t = 20$ °С) величина $m_{Tt} \approx 0,007$, а $m_{Bt} \approx 6 \cdot 10^{-3}$. Между параметрами m_{Tt} , m_{Bt} и m_{T0} есть зависимости, близкие к линейным.

Унифицированные лабораторные коррозионные испытания для основных и поверочных расчетов. В традиционных основных расчетах МТТ ННП на статическую прочность по выражениям (1) – (3) равномерные коррозионные повреждения учитывали введением поправки $\Delta\delta$ к расчетной толщине стенки:

$$\delta_K = \delta - \Delta\delta_K. \quad (23)$$

Для 30-летнего назначенного срока службы труб величину $\Delta\delta_K$ на этапах 1–3 (см. табл. 3) принимали на уровне 1–3 мм. В дальнейшем стали проводить унифицированные испытания специализированных ненагруженных образцов на коррозионную потерю металла и уменьшение толщины стенки $\Delta\delta_K$ с временными выдержками в камерах с заданной коррозионной средой и оценивалась скорость коррозии $d\delta_K/dt$ [2, 3, 8, 10]. Вместе с тем из опытов известно, что процессы коррозии ускоряются, если металл труб находится в напряженном состоянии. Тогда скорость коррозионного повреждения оказывается сложной

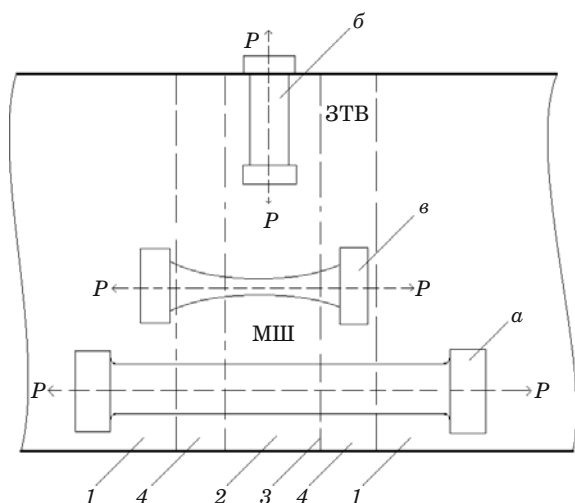


Рис. 7. Схемы вырезки образцов из сварных соединений: 1 — основной металл; 2 — металл шва; 3 — металл зоны сплавления; 4 — металл зоны термического влияния

функцией времени τ , напряжений σ и исходных механических свойств (σ_t , σ_b , Ψ_K):

$$d\delta_K/d\tau = F_K\{\sigma_t, \sigma_b, \Psi_K\}\tau, \sigma. \quad (24)$$

Систематические длительные испытания трубных сталей в нейтральных и коррозионных средах для установления количественных показателей по формулам (21) и (24) пока не проводили, что ограничивает возможности проведения поверочных расчетов на прочность.

Унифицированные лабораторные испытания сварных соединений труб. В системах МТТ ННП широко применяют заводские, строительно-монтажные, ремонтно-восстановительные сварные соединения — преимущественно продольные и кольцевые [2, 3, 8 – 12]. При этом конструкторские и технологические решения направлены на получение и обеспечение равнопрочности металла сварных соединений и основного металла труб. Вместе с тем по мере расширения применения трубных низколегированных сталей повышенной прочности это требование равнопрочности не удается соблюдать. Тогда проводят унифицированные испытания лабораторных стандартных (см. рис. 1) и нестандартных цилиндрических или плоских образцов (рис. 7) для определения базовых расчетных характеристик механических свойств (E , μ , σ_t , σ_b , Ψ_K , δ_K).

На образцах *а* (см. рис. 7) устанавливается зона с минимальными свойствами, на образцах *б* определяют продольные свойства металла вдоль шва, на корсетных образцах *в* могут определяться локальные свойства зоны термического влияния, зоны сплавления и металла шва (при

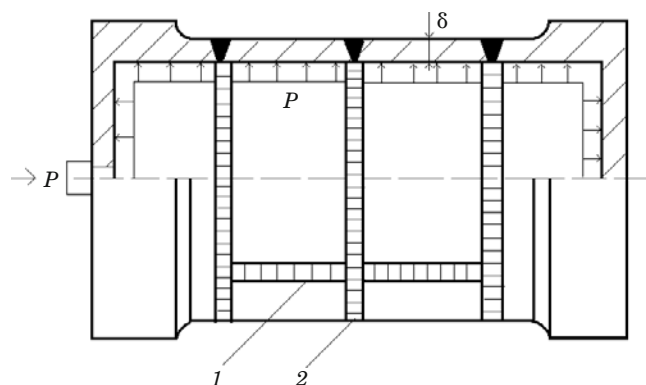


Рис. 8. Схема испытаний модельных образцов труб с продольными (1) и поперечными (2) сварными швами

расположении минимального сечения в соответствующей зоне).

По результатам испытаний в основные и поверочные расчеты статической прочности на основе выражений (1) – (3) вводится поправка φ_c к допускаемым напряжениям

$$[\sigma]_c = \varphi_c[\sigma], \quad (25)$$

где $[\sigma]_c$ и $[\sigma]$ — допускаемые напряжения для сварного соединения и основного металла; величина φ_c устанавливается по минимуму отношений пределов текучести σ_{tc} и прочности σ_{bc} наиболее слабой зоны сварного шва к пределам текучести σ_t и прочности σ_b основного материала:

$$\varphi_c = \min\{\sigma_{tc}/\sigma_t, \sigma_{bc}/\sigma_b\}. \quad (26)$$

Для малоуглеродистых и низколегированных трубных сталей в расчет по (3) и (26) вводят величину $0,8 \leq \varphi_c \leq 1$.

Модельные лабораторные и стендовые испытания для поверочных расчетов

Для обоснования прочности несущих элементов МТТ ННП наряду с рассмотренными в предыдущем разделе лабораторными испытаниями стандартных и унифицированных образцов проводят лабораторные и стендовые испытания моделей труб и модельных образцов в целях выявления опасных расчетных схем и расчетных случаев.

Испытания моделей труб со сварными швами. В дополнение к испытаниям трубчатых образцов из основного материала (см. рис. 3 и 7) в лабораторных условиях на стендах проводят испытания (рис. 8) внутренним давлением p специальных трубчатых образцов с натуральными толщинами δ , имеющих продольные (1) и поперечные (2) сварные швы.

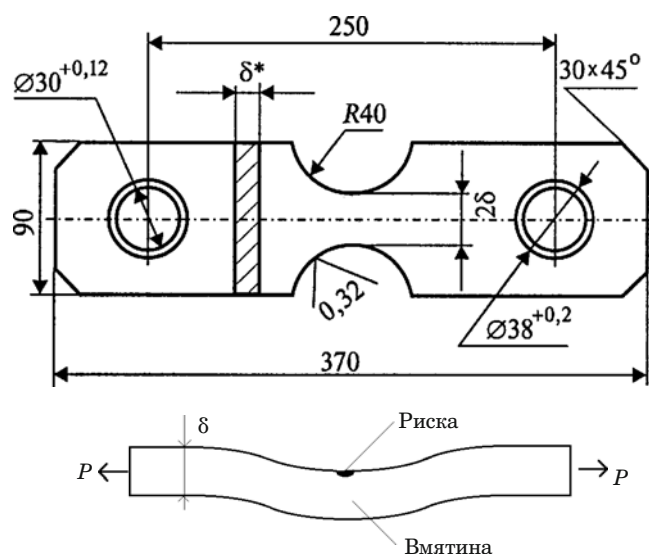


Рис. 9. Образец для испытаний на прочность

Тензометрические измерения деформаций в зонах швов и основного металла позволяют установить расчетные характеристики σ_T , σ_B , σ_{TC} , σ_{BC} , φ_c в выражениях (25) и (26).

На моделях (см. рис. 8) проводят оценку влияния на прочность потенциальной энергии упругих деформаций E_y , накапливаемых в стенках модели и в рабочем теле. Для этого модель заполняют воздухом и жидкостью, обладающими различными коэффициентами сжимаемости (объемной упругости). Вариации отношений объемов жидкости $V_{ж}$ и воздуха $V_{в}$ в пределах от 1 до 0 могут снизить разрушающее давление на 5 – 10 %. Поэтому в уточненных поверочных расчетах статической прочности для ряда расчетных случаев по аналогии с (25) следует вводить коэффициент снижения φ_E допускаемого напряжения:

$$[\sigma]_E = \varphi_E [\sigma]. \quad (27)$$

При отсутствии прямых экспериментальных данных можно принять $0,9 \leq \varphi_E \leq 1$.

Испытания модельных образцов с нанесенными повреждениями и дефектами. В процессе строительных и ремонтно-восстановительных работ на МТТ ННП создаются опасные повреждения — риски, вмятины, гофры. Для их оценки проводят специальные испытания образцов, вырезанных из поврежденных труб, а также образцов с искусственно нанесенными аналогичными повреждениями.

На рис. 9 показан растягиваемый образец, в средней части которого на специальной установке ножом наносили риски и вмятины [10]. Увеличение глубины рисков до 1,5 – 2 мм и вмятин до 7,5 мм, а также понижение температуры испытаний до минус 60 °С приводили к сниже-

нию разрушающих напряжений до $0,25\sigma_B$, что указывало на неприемлемое падение запасов прочности n_o в выражениях (1) и (3): $n_o < 1$. Это связывали с существенным истощением локальной пластичности, ростом расчетных напряжений из-за локального изгиба, уменьшения толщины сечения δ_d в поврежденной зоне и возникновения внецентренного растяжения.

По аналогии с выражениями (25) и (27) для оценки статической прочности труб с дефектами можно записать

$$[\sigma]_d = \varphi_d [\sigma], \quad (28)$$

где φ_d — коэффициент снижения допускаемых напряжений ($0,25 \leq \varphi_d \leq 1$).

Стендовые и натурные испытания труб на прочность

В соответствии с отечественными и зарубежными нормами прочности на заводах-изготовителях труб проводят [2, 3, 8, 10] унифицированные стендовые гидроиспытания при давлении p_r , превышающем расчетное рабочее p_p :

$$p_r = k_r p_p, \quad (29)$$

где k_r — коэффициент повышения давления при гидроиспытаниях ($1,1 \leq k_r \leq 1,5$).

При этом для гидроиспытаний вводят ограничение на кольцевые напряжения $\sigma_k(x)$ согласно рис. 2:

$$\sigma_k(x) \leq k_o \sigma_T, \quad (30)$$

где k_o — коэффициент повышения напряжений при гидроиспытаниях ($0,8 \leq k_o \leq 0,9$).

По мере совершенствования технологий производства труб для МТТ ННП выборочные заводские испытания труб стали заменять сплошными.

В ряде случаев рекомендуется проводить ограниченные выборочные испытания труб до разрушения с определением критических (разрушающих) давлений p_k и напряжений σ_k . Эти же испытания с тензометрией позволяют проверить справедливость выражений (16), (18), (21). Такие испытания проводили по целому ряду отечественных и зарубежных программ [8, 10, 13, 14] при нагружении труб внутренним давлением и изгибающими моментами (по схеме на рис. 2).

Стендовые испытания с нагружением труб внутренним давлением до разрушения при пониженных климатических температурах осуществляли в Институте физико-технических проблем Севера (ИФТПС СО РАН) [15] при нагружении моделей и натурных труб незамерзающими жид-

костями, а также замерзающей водой, создающей давление при замерзании.

В последние десятилетия XX в. и начале XXI в. особое внимание стали уделять заключительным этапам (4, 5 в табл. 4) расчетов и испытаний на прочность. В нашей стране и за рубежом по мере развития методов аналитических и численных оценок напряженно-деформированных и предельных состояний трубопроводов в исходном состоянии и после длительной эксплуатации интенсивное развитие получили два вида наиболее сложных и дорогих, но и наиболее информативных испытаний натурных труб [2 – 10]:

стендовые испытания (в ведущих научно-исследовательских центрах) труб заводского изготовления и фрагментов труб, вырезанных из эксплуатируемых трубопроводов на заданной стадии их жизненного цикла или на заданной стадии развития дефектов (длительных, статических, циклических, коррозионных, эрозийных, строительно-монтажных, ремонтных и др.);

полевые гидро- пневмоиспытания участков трубопроводов и арматуры на трассах при пуске трубопроводов в эксплуатацию или после проведения капитальных ремонтов.

В программы этих испытаний включены прямые или косвенные механические испытания по определению расчетных характеристик механических свойств (σ_t , σ_b , δ_k , ψ_k). Прямые испытания предусматривают вырезку металла труб для образцов (см. рис. 1, 4, 7). При косвенной оценке механических свойств по выражению (6) проводят измерение твердости HB , HR в заданных зонах.

Эти испытания с использованием системы выражений (1) – (30) дают возможность в количественной форме оценить:

запасы статической прочности n_o , n_t , n_b в выражениях (1) – (3);

коэффициенты k_n , k_1 , m в выражении (5) для запасов прочности;

остаточную прочность σ_n^3 на основе (3) по фактическим размерам D , δ и фактическим механическим свойствам при $n_t = n_b = 1$.

По этим же данным назначают периодичность и давления гидроиспытаний трубопроводов на заданной стадии эксплуатации.

Реализация комплексных механических испытаний для обеспечения прочности МТТ ННП

Стандартные испытания трубных сталей для основных расчетов прочности. На протяжении около трех десятилетий «Транснефть», ВНИИСТ, ООО «НИИ Транснефть», АО «Транснефть-Диаскан» совместно с академическими ин-

ститутами (ИМЕТ РАН, ИМАШ РАН), научными лабораториями производителей труб и трубных сталей (Челябинский ТПЗ, Выксунский МЗ, Волжский ТЗ, Ижорский ТЗ) провели анализ около 20 000 лабораторных стандартных испытаний по определению базовых механических свойств сталей для МТТ ННП ПАО. По результатам этих испытаний были установлены (см. табл. 1 – 3) основные направления совершенствования химического состава, технологий получения листовых трубных сталей и изготовления труб с определением и нормированием расчетных характеристик статической прочности (σ_t , σ_b) и пластичности (δ_k , ψ_k) при непрерывном повышении рабочего давления p в МТТ ННП от 200 до 1200 МПа, диаметров труб D от 200 до 1000 мм, толщин стенок δ от 7 до 30 мм. Кроме того, были сформированы принципы идентификации сталей длительно (более 40 – 50 лет) эксплуатируемых труб, а также намечены пути повышения прочности трубопроводов в перспективе до 2020 – 2030 гг.

Стандартные и унифицированные испытания лабораторных образцов для поверочных расчетов. Указанные выше организации выполняли систематические исследования эффектов старения, деградации, коррозионной стойкости, сварки, термообработки трубных сталей в исходном состоянии и после длительной эксплуатации. Обобщенные результаты испытаний и расчетной оценки для трубной стали 17Г1С показаны на рис. 10.

Стендовые испытания натурных образцов труб. На стендах ПАО «Транснефть» (рис. 11) были реализованы сложные схемы нагружения внутренним давлением и изгибающими моментами (см. схему на рис. 2) реальных труб и трубных сталей в исходном состоянии и после длительной эксплуатации [8, 11, 13 – 15]. Испытывали трубы длиной $l = 5300$ м, диаметром $D = 1220$ мм и толщиной стенки $\delta = 40$ мм с естественными и искусственными дефектами различных форм и размеров.

В общей сложности было испытано около 1000 образцов трубных секций из 36 марок отечественных и зарубежных сталей. Эти испытания позволили обоснованно — на базе расчетов по фактическим данным — оценивать запасы прочности труб n_o , n_t , n_b и возможности продолжения эксплуатации трубопроводов, проведения ремонтных работ или снятия с эксплуатации [16].

В ближайшей (до 2020 г.) и отдаленной (до 2030 г.) перспективах будет создан уникальный испытательный комплекс ООО «НИИ Транснефть» для проведения исследовательских расчетно-экспериментальных работ с учетом таблиц

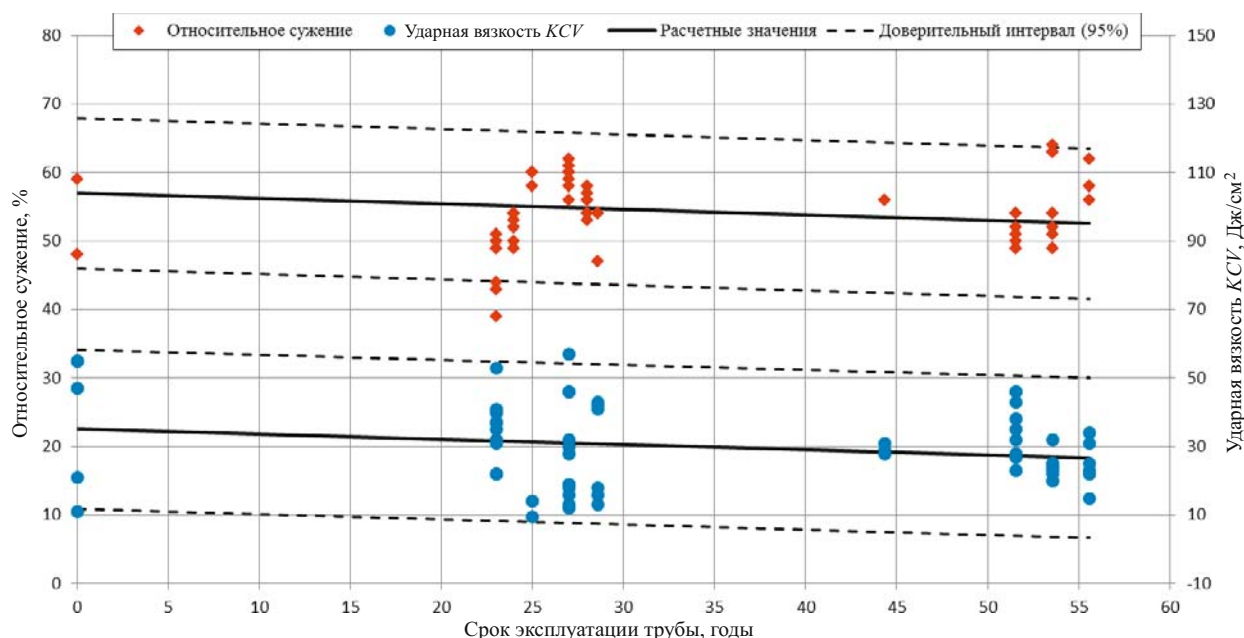


Рис. 10. Зависимости относительного сужения и ударной вязкости от срока эксплуатации (сталь 17Г1С)



Рис. 11. Стеновые испытания труб

1 – 3, расчетных схем по рисункам 1 – 11 и выражений (1) – (30).

Можно заключить, что в расчетно-экспериментальном обосновании прочности несущих элементов МТТ ННП перспективным является

использование основных и поверочных расчетов прочности.

В основных расчетах по простым аналитическим методам теории тонкостенных оболочек обосновывают выбор главных размеров трубопроводов — диаметров D и толщины стенки δ при заданном рабочем давлении p , обеспечивающем требуемую производительность. В этих расчетах традиционно используют стандартные характеристики механических свойств — модули упругости E , пределы текучести σ_T и прочности σ_B .

В поверочных расчетах статической прочности учитывают целый ряд конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов — объемность напряженного состояния, анизотропию свойств, абсолютные размеры сечений, скорость нагружения, температуру и время эксплуатации, коррозию и наличие сварных швов.

Рабочие характеристики прочности σ_T , σ_B , пластичности ψ_K определяют стандартными и унифицированными испытаниями.

Наиболее информативную оценку прочности и достоверное подтверждение запасов прочности получают на базе модельных стендовых и натурных испытаний трубопроводов после их изготовления и на заданной стадии эксплуатации.

В системе ПАО «Транснефть», ООО «НИИ Транснефть», АО «Транснефть-Диаскан», взаимодействующей с академическими и отраслевыми институтами и вузами, совершенствуется действующая и формируется новая научно-методическая база комплексного обеспечения и повышения прочности, ресурса, хладостойкости, кор-

розионной стойкости, надежности, живучести и безопасности МТТ ННП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Энергетическая безопасность (Нефтяной комплекс России). — М.: МГОФ «Знание», 2000. — 432 с.
2. Безопасность России. Безопасность трубопроводного транспорта. — М.: МГОФ «Знание», 2002. — 752 с.
3. Мазур И. И., Иванцов О. М. Безопасность трубопроводных систем. — М.: ИПЦ «ЕЛИМА», 2004. — 1104 с.
4. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. — М.: Машгиз, 1962. — 260 с.
5. Стрелецкий Н. С., Гениев А. Н., Беленя Е. И. и др. Металлические конструкции. — М.: Стройиздат, 1961. — 776 с.
6. API 579/ASME FFS-1 Приспособленность к эксплуатации. Fitness For Service (Американское сообщество инженеров-механиков, ASME, 2007).
7. DNV RP-F101 Корродированные трубопроводы. Практические рекомендации Recommended Practice. Corroded Pipelines (Det Norske Veritas, 2001).
8. Радионов С. Г., Лисин Ю. В., Махутов Н. А. и др. Научно-технические, социально-экономические и правовые аспекты надежности транспорта нефти и нефтепродуктов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 6. С. 20 – 31.
9. Махутов Н. А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
10. Махутов Н. А., Пермяков В. Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. — Новосибирск: Наука, 2005. — 516 с.
11. Лисин Ю. В., Неганов Д. А., Махутов Н. А., Зорин Н. Е. Учет масштабного эффекта при обосновании прочности магистральных трубопроводов // Нефтяное хозяйство. 2017. № 6. С. 112 – 116.
12. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и технологическая безопасность. В 2-х частях. — Новосибирск: Наука, 2005. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. — 494 с.; Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. — 610 с.
13. Неганов Д. А., Студенов Е. П., Скородумов С. В., Соловьев В. А. Исследование конструкций гидравлических стендов для испытаний трубной продукции // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. № 2. С. 31 – 41.
14. Лисин Ю. В. Исследование физико-химических свойств стали длительно эксплуатируемых трубопроводов: оценка ресурса безопасной работы // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2015. № 7. С. 18 – 28.
15. Ларионов В. П. Сварка и проблемы хрупкого разрушения. — Новосибирск: ИФТПС СО РАН, 1998. — 596 с.
16. РД-23.040.00-КТН-011–16. «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами».

REFERENCES

1. Russia's Security. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Energy security (Oil complex of Russia). — Moscow: MGF "Znanie", 2000. — 432 p. [in Russian].
2. Russia's Security. The safety of pipeline transport. — Moscow: MGF "Znanie", 2002. — 752 p. [in Russian].
3. Mazur I. I., Ivantsov O. M. The safety of pipeline systems. — M: IC "ELIM", 2004. — 1104 p. [in Russian].
4. Oding I. A. Permissible stresses in engineering and cyclic strength of metals. — Moscow: Mashgiz, 1962. — 260 p. [in Russian].
5. Streletskiy N. S., Geniev A. N., Belenya E. I., et al. Metal structures. — Moscow: Stroyizdat, — 776 p. [in Russian] (1961).
6. API 579/ASME FFS-1 Fitness For Service (the American society of mechanical engineers, ASME, 2007).
7. DNV RP-F101 Corroded pipelines. Practical guidance. Recommended Practice (Det Norske Veritas, 2001).
8. Radionov S. G., Lisin Yu. V., Makhutov N. A., et al. Scientific, technical, socio-economic and legal aspects of reliability of transport of oil and oil products // Science and technology of pipeline transportation of oil and oil products. 2016. Vol. 6. P. 20 – 31 [in Russian].
9. Makhutov N. A. Strength and safety: fundamental and applied research. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].
10. Makhutov N. A., Permyakov V. N. The resource of safe operation of vessels and pipelines. — Novosibirsk: Nauka, 2005. — 516 p. [in Russian].
11. Lisin Yu. V., Neganov D. A., Makhutov N. A., Zorin N. E. The scale effect in the strength analysis of pipelines // Neft. Khoz. 2017. N 6. P. 112 – 116. [in Russian].
12. Makhutov N. A. Structural strength, resource and technogenic safety. In two parts. — Novosibirsk: Nauka, 2005. Part 1. The Criteria of strength and resource, — 494 p.; Part 2: The Rationale for resource and security. — 610 p. [in Russian].
13. Neganov D. A., Studenov E. P., Skorodumov S. V., Soloviev V. A. The Study of structures hydraulic stands for testing of pipe products // Nauka Tekhnol. Truboprov. Transp. Nefti Nefteprod. 2017. N 2. P. 31 – 41 [in Russian].
14. Lisin Yu. V. Investigation of physicochemical properties of steel for long-operated pipelines: assessment of the resource of safe operation // Nauka Tekhnol. Truboprov. Transp. Nefti Nefteprod. 2015. Vol. 7. P. 18 – 28 [in Russian].
15. Larionov V. P. Welding and problem of brittle fracture. — Novosibirsk: EFTPS SO RAN, 1998. — 596 p. [in Russian].
16. RD-23.040.00-KTN-011–16. "Trunk pipeline transport of oil and oil products. Determination of the strength and durability of pipes and welded joints with defects" [in Russian].