

## Новый этап развития российских норм по расчету на прочность технологических трубопроводов

В. Я. Магалиф, А. В. Матвеев

*ООО «НТП Трубопровод» разработало проект нового стандарта по расчету на прочность технологических трубопроводов. В стандарте существенно расширены границы применимости по расчетному давлению и температуре, учтены особенности оценки прочности трубопроводов из цветных металлов (титана, меди, алюминия) и полимерных материалов, добавлен раздел по оценке устойчивости подземных и надземных трубопроводов, а также раздел по оценке прочности трубопроводов при сейсмических воздействиях.*

*В статье приведены особенности оценки прочности «криогенных» трубопроводов, трубопроводов из цветных металлов и полимерных материалов. Также рассмотрены проблемы потери продольной устойчивости, которые нашли свое отражение в проекте стандарта.*

**Ключевые слова:** технологические трубопроводы, новые российские нормы, расчет на прочность, продольная устойчивость, высокое давление, сейсмические воздействия, криогенные трубопроводы, трубопроводы из цветных металлов, трубопроводы из полимерных материалов.

Нормативные документы, также как и программы по расчету на прочность трубопроводов постоянно развиваются и совершенствуются (рис. 1).

В 1986 г. ВНИИмонтажспецстроем впервые было издано пособие по расчету на прочность технологических стальных трубопроводов (дополнение к СН 527-80). В 1994 г. вышли «Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов» РТМ 38.001–94 [1], утвержденные Минтопэнерго России и согласованные с Госгортехнадзором РФ. Организацией-разработчиком стандарта являлась ВНИПИнефть. За основу документа были взяты пособия к СН 527-80 и стандарт РТМ 24.038.08–72 [2], разработанный ЦКТИ им. И. И. Ползунова в 1972 г.

Необходимость создания специального нормативного документа по расчету на прочность технологических трубопроводов была обусловлена спецификой технологических трубопроводов, которые характеризуются повышенной опасностью транспортируемых сред (коррозионная активность, взрыво- и пожароопасность, токсичность), широким диапазоном изменения рабочих параметров (температур, давлений), разнообразием возможных механизмов разрушения в результате статических, циклических и динамические воздействий.

В 2002 и 2007 гг. Российской ассоциацией экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности «Ростехэкспертиза» последовательно были выпущены два новых стандарта СТП 09-04-20 [4] и СА 03-003-07 [5]. Стандарты были разработаны в ООО «НТП Трубопровод» и отражали опыт расчета трубо-

проводов на прочность, накопленный за годы применения РТМ 38.001–94 [1], реализованного в программе «СТАРТ». Отдельные положения СА потребовалось привести в соответствие с «Правилами устройства и безопасной эксплуатации

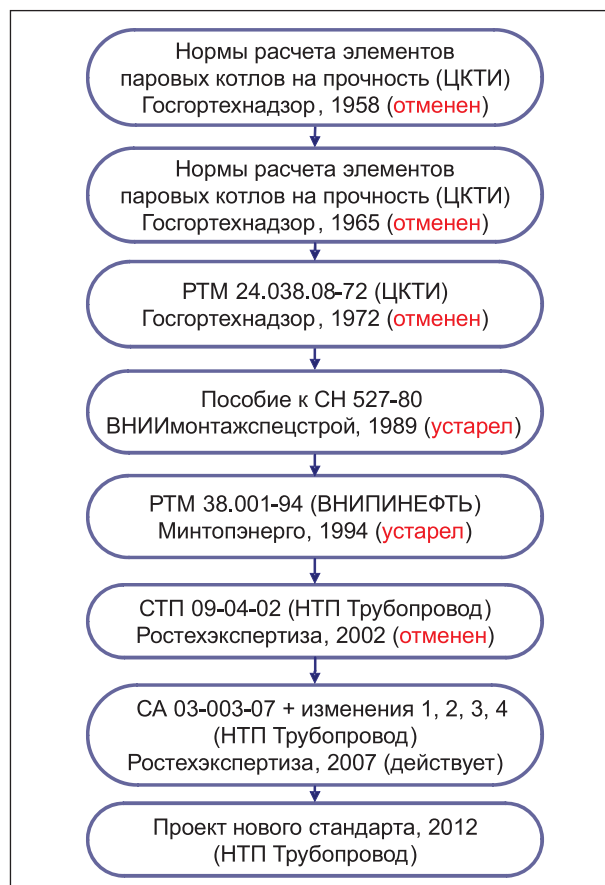


Рис. 1. История развития норм по расчету на прочность технологических трубопроводов

технологических трубопроводов, ПБ 03-585-03» [3], СА 03-005-07 [6] и другими нормативными документами по расчету на прочность, введенными в действие после 1995 года. Была также проведена гармонизация с нормами США ASME B31.3 [7]. Изменены методики расчета отводов и тройников: добавлена методика расчета на изгиб тройников и врезок с накладками, которая отсутствовала в РТМ 38.001-94 [1], устранены замеченные неточности, добавлены требования по расчету вакуумных трубопроводов.

В настоящее время большинство организаций руководствуются СА 03-003-07, но некоторые продолжают пользоваться устаревшим РТМ 38.001-94, считая его статус более «высоким», хотя это не так — оба документа согласно действующему законодательству не являются обязательными и носят рекомендательный характер.

Несмотря на юридическую путаницу, на сегодняшний день документ СА 03-003-07 [5] является наиболее современным, и для расчета технологических трубопроводов на прочность мы рекомендуем использовать именно его.

Для технологических трубопроводов характерно многообразие конструктивного исполнения и условий эксплуатации:

- изготовление как из стали, так и из цветных металлов и их сплавов, а также из полимерных материалов;
- работа при рабочих температурах от очень низких ( $-269^{\circ}\text{C}$ ) до очень высоких ( $700^{\circ}\text{C}$ ); как при внутреннем избыточном давлении, так и при наружном (вакуумные трубопроводы);
- способность испытывать различные воздействия в зависимости от места расположения: внутри сосудов, аппаратов и печей, в закрытых помещениях, на наружных установках и эстакадах, под землей в закрытых каналах и непосредственно в грунте (так называемая бесканальная прокладка).

Выпущенные ранее нормативные документы РТМ 38.001-94 [1] и СА 03-003-07 [5], к сожалению, не охватывали всего этого многообразия. Они распространялись только на стальные трубопроводы, с рабочими температурами  $-70\dots+700^{\circ}\text{C}$  и давлением  $-0,1\dots+10$  МПа, прокладываемые на опорах (так называемые «воздушные»). Естественно, такая ситуация вызывала неудовлетворенность многих специалистов.

К настоящему времени в ООО «НТП Трубопровод» разработан проект нового стандарта по расчету на прочность технологических трубопроводов, который существенно расширяет область

применения. По сравнению с СА 03-003-07 [5] в новом стандарте введены следующие изменения:

- расширены границы избыточного внутреннего давления (трубопроводы с давлением свыше 10 МПа);
- добавлен раздел по расчету прочности криогенных трубопроводов с рабочей температурой от  $-269^{\circ}\text{C}$ ;
- учтены особенности оценки прочности трубопроводов из цветных металлов (титана, меди, алюминия) и полимерных материалов;
- добавлен раздел по оценке устойчивости как подземных, так и надземных трубопроводов;
- приведена методика определения отбраковочных толщин;
- содержатся требования по расчету трубопроводов, заземленных в грунте (так называемая бесканальная прокладка);
- приведена методика расчета переходов, косых врезок и косых тройников (в которых ответвление не перпендикулярно магистральной части);
- включен раздел по оценке прочности трубопроводов при сейсмических воздействиях;
- усовершенствована методика расчета вакуумных трубопроводов;
- содержится много уточнений, отражающих опыт, накопленный в НТП «Трубопровод» за время эксплуатации СА 03-003-07 [5].

На некоторых наиболее важных моментах остановимся отдельно.

### Расчеты на прочность трубопроводов высокого давления

Область применения стандартов СА 03-003-07 [5] (п. 1.1.1) ограничена давлением 10 МПа. Для расширения области применения авторами были изучены отдельные положения стандарта РД 10-249-98 [8], который распространяется на паропроводы с давлением свыше 10 МПа. Многолетний опыт эксплуатации паропроводов, работающих при давлениях до 38 МПа, спроектированных согласно этому стандарту, подтвердил его высокую надежность. Потребовалось внести изменения, касающиеся специфики технологических трубопроводов.

В новом стандарте не существует формального ограничения по расчетному давлению, но ограничено соотношение толщины стенки к наружному диаметру  $(s - c)/D_a \leq 0,25$ . В случае, когда данное соотношение не выполняется, распределение кольцевых и радиальных напряжений по толщине стенки приобретает нелинейный

характер, и используемые в документе формулы не могут быть использованы. Для определения толщины стенки в этих случаях следует пользоваться нормативными документами, учитывающими данную особенность [9]. К сожалению в [9] отсутствуют методы расчета отводов, тройников и переходов на изгиб при высоких давлениях. На сегодняшний день это поле для дальнейшего нормотворчества.

### Криогенные трубопроводы

СА 03-003-07 [5] распространяется на трубопроводы с рабочими температурами не ниже  $-70^{\circ}\text{C}$  (п. 1.1.1). Для расширения области применения использованы отдельные положения стандарта [10] и справочника [11]. Как известно, механические свойства металлов и сплавов существенно меняются с понижением температуры: повышаются прочностные характеристики (предел прочности, предел текучести, предел усталости) и снижаются показатели пластичности (относительное удлинение и укорочение при растяжении и сжатии, ударная вязкость). Некоторые металлы при понижении температуры переходят к хрупкому разрушению без заметной пластической деформации.

В новом стандарте для криогенных трубопроводов введены следующие изменения:

- учитывается низкотемпературное упрочнение металла труб, деталей трубопровода и сварных швов;
- исключена методика расчета предельного давления для отводов, допускавшая ограниченное развитие упругопластических деформаций и заменена на альтернативную, без соответствующих допущений (металл отчасти теряет свои пластические свойства);
- при расчете эквивалентных напряжений наряду с четвертой теорией прочности (наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения), которая применяется в основном для пластичных материалов, используется первая теория прочности (максимального главного напряжения), которая, как известно, лучше себя зарекомендовала для хрупких материалов;
- изменены критерии прочности для тройников и отводов: добавлены ограничения напряжений от всех воздействий в рабочем состоянии, отсутствовавшие для трубопроводов, работающих при средних и высоких температурах;
- в методику расчета на циклической прочности добавлен учет низкотемпературного упрочнения.

### Трубопроводы из цветных металлов и полимерных материалов

СА 03-003-07 [5] распространяются только на трубопроводы из стали. Однако в технологических трубопроводах химической, фармацевтической, пищевой и других отраслей промышленности применяются также трубы из цветных металлов и полимерных материалов, которые обладают преимуществами по сравнению со стальными трубами: повышенной коррозионной стойкостью, меньшей массой и т. д.

Трубопроводы из полимерных материалов характеризуются нелинейной зависимостью напряжений от деформаций (не соблюдается закон Гука), а также значительной ползучестью под действием постоянной нагрузки и температуры. Поэтому подходы к расчету на прочность трубопроводов из таких материалов значительно отличаются от расчета трубопроводов из стали.

Трубопроводы из цветных металлов характеризуются более низкими допускаемыми напряжениями, имеют другие физико-механические характеристики (модуль упругости, коэффициент линейного расширения, коэффициенты усреднения и релаксации напряжений), а также параметрами циклической прочности.

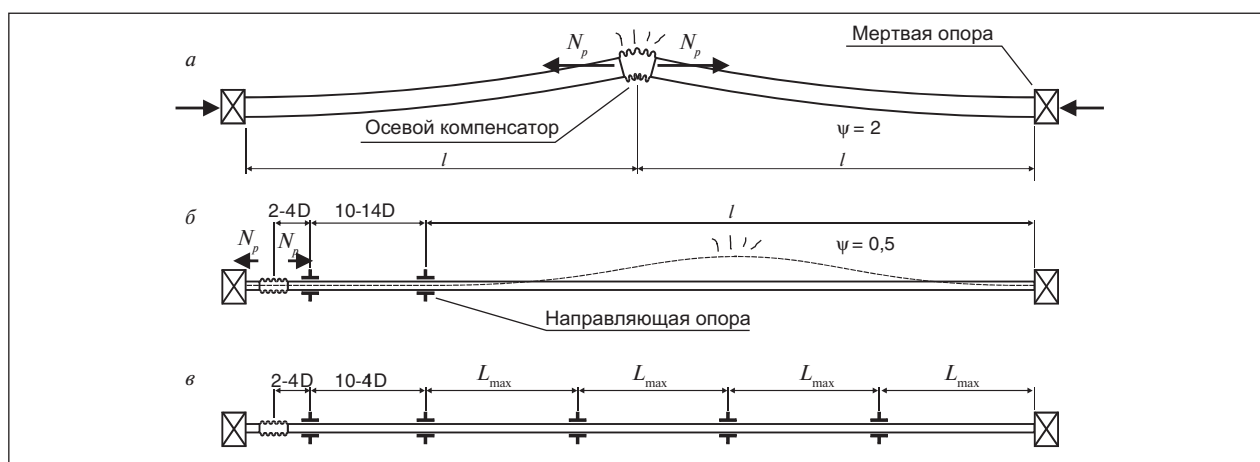
В новом стандарте содержатся требования к расчету на прочность трубопроводов из алюминия, меди, титана и их сплавов, а также трубопроводов из полимерных материалов.

### Продольная устойчивость трубопроводов

В новом стандарте содержится требования по обеспечению продольной устойчивости трубопроводов от силовых (несамоуравновешенных) воздействий, таких как: вес трубопровода, продукта и изоляции, распорные усилия от давления.

На рис. 2, а показана схема трубопровода, в котором потеря устойчивости вызвана действием распорных усилий от внутреннего давления в осевом неразгруженном компенсаторе. Процесс потери устойчивости в этом случае ничем не ограничен, происходит мгновенно и, как правило, приводит к разрушению компенсатора.

Для предотвращения перекоса осевого компенсатора необходимо устанавливать две направляющих опоры с каждой стороны такого компенсатора, либо мертвой опоры. Но этого недостаточно для обеспечения устойчивости трубопровода - выпучивание может произойти на длинном прямом участке, в случае, если продольное усилие превышает критическое (рис. 2, б). Для предотвращения такой ситуации



**Рис. 2. Формы потери устойчивости трубопровода от силовых воздействий (распорных усилий в сильфоном компенсаторе)**

необходимо расставлять в трубопроводе опоры с шагом, который определяется расчетом (рис. 2, в).

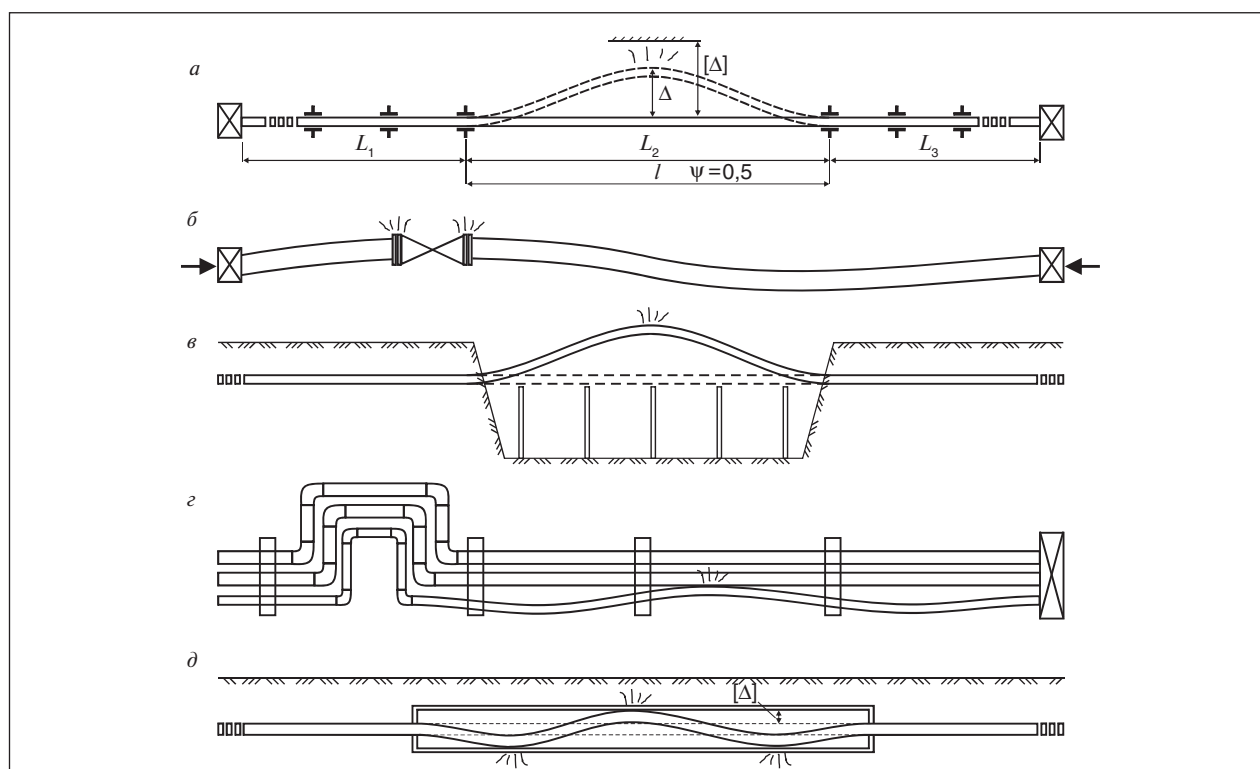
Проверка продольной устойчивости трубопровода от деформационных (самоуравновешенных) воздействий, таких как температурные удлинения, смещение опор и монтажная растяжка, имеет некоторую специфику.

На рис. 3, а показана схема выпучивания трубопровода, вызванного температурными

расширениями. В этом случае потеря устойчивости трубопровода не приводит к разрушению, выпучивание происходит постепенно, по мере возрастания температуры и прекращается после завершения нагрева.

Выполнение условий устойчивости от деформационных воздействий необходимо по следующим соображениям:

- конструктивным: при выпучивании вероятно разуплотнение фланцевых соединений



**Рис. 3. Потеря устойчивости трубопровода от деформационных воздействий (температурных расширений)**

(рис. 3, б), трубопровод может подняться над промежуточными опорами (рис. 3, в), вследствие чего могут возникнуть сильные вибрации трубопровода от присоединенного оборудования или вибрации в ветровом потоке;

- технологическим: связанными с возможными нарушениями гидравлического режима;
- эстетическим: внешний вид потерявшего устойчивость трубопровода показан на рис. 3, г.

Вместо условия обеспечения устойчивости трубопровода от деформационных воздействий в отдельных случаях может быть использовано условие ограничения максимальных прогибов, которые не должны

- превышать величину зазора  $[D]$  между трубой и близлежащими конструкциями: стеной канала, соседними трубами, строительными конструкциями и т. д. (рис. 3, д);
- противоречить эстетическим требованиям (рис. 3, а).

### Литература

1. РТМ 38.001–94 Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов.
2. РТМ 24.038.08–72 Расчет трубопроводов энергетических установок на прочность.
3. ПБ 03-585–03 Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов.
4. СТП 09-04-20 Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов.
5. СА 03-003–07 Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов.
6. СА 03-005–07 Технологические трубопроводы нефтеперерабатывающей, нефтехимической и химической промышленности. Требования к устройству и эксплуатации.
7. ASME B31.3 ASME code for pressure piping, B31. Chemical plant and petroleum refinery piping.
8. РД 10-249-98 Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды.
9. РД РТМ 26-01-44–78 Детали трубопроводов на давление свыше 10 до 100 МПа.
10. ОСТ 26-04-2585–86 Техника криогенная и криогенно-вакуумная. Сосуды и камеры. Нормы и методы расчета на прочность, устойчивость и долговечность сварных конструкций.
11. Малков М. П. Справочник по физико-техническим основам криогеники. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

V. Y. Magalif, A. V. Matveev

### A New Stage of Russian Codes for Process Piping Stress Analysis

*NTP Truboprovod has developed a new draft code for process piping stress analysis. The code significantly extended the range of applicability. The limits of design pressure and temperature values are expanded. Pipelines made of nonferrous metals (titanium, copper, aluminum) and plastics are taken into account. The sections on evaluation the stability of buried and aboveground pipelines and buried pipeline stress analysis, as well as seismic analysis are added. The paper presents the features of cryogenic piping strength analysis, nonferrous metals and plastics piping. Also, the longitudinal stability problems are discussed.*

**Key words:** piping, new Russian code, stress analysis, longitudinal stability, high pressure, seismic loads, cryogenic piping, nonferrous metals piping, plastics piping.

## Инженерное программное обеспечение



СТАРТ, Ресурс	Расчеты на прочность трубопроводов, определение остаточного ресурса
ПАССАТ, Штуцер-МКЭ	Расчеты на прочность сосудов, аппаратов, узлов врезки
Гидросистема	Гидравлический и тепловой расчет и выбор диаметров трубопроводов
Предклапан	Расчет и выбор предохранительных клапанов
Изоляция	Расчет и проектирование тепловой изоляции
Старс, Simulis	Расчет теплофизических свойств и фазовых равновесий продукта
СУБД-ПРОЕКТ	Управление материалами и формирование проектных документов

ООО «НТП Трубопровод»  
Москва, ул. Плеханова, 7  
тел. +7 (495) 225-9435  
e-mail: info@truboprovod.ru  
http://www.truboprovod.ru

