

УДК 622.691.4.053

**Ю.А. Маянц, С.В. Карпов, Д.И. Ширяпов**

## Анализ подходов к назначению величины испытательного давления на магистральных газопроводах

Для поддержания надежной и бесперебойной эксплуатации в течение всего жизненного цикла газопровод должен отвечать требованиям нормативных документов, в том числе в части конструктивной прочности.

Этой цели служит система контроля качества продукции на трубных заводах, включающая испытание труб пробным давлением в заводских условиях. В процессе сооружения газопровода стыковые сварные соединения подвергают дефектоскопии неразрушающими методами контроля, а отдельные участки газопроводов повышенной категории – предварительным гидравлическим испытаниям на прочность.

Давления испытания участков трубопровода на прочность в зависимости от этапов испытаний, категорий участков и их характеристик назначают выше проектного рабочего давления в 1,5; 1,25 и 1,1 раза, но не выше давления испытаний труб в заводских условиях (при гидравлических испытаниях).

Ввод в эксплуатацию построенного газопровода осуществляют лишь после его успешного заключительного испытания на прочность статическим внутренним давлением, превышающим рабочее и устанавливаемым действующими нормативными документами. Заключительные испытания на прочность в настоящее время продолжают оставаться единственным достаточно надежным свидетельством возможности ввода газопровода в эксплуатацию.

В работе [1] отмечалось, что встречаются случаи, когда после устранения дефекта, выявленного при испытаниях, следующее разрушение трубопровода в месте нового дефекта происходит при более низких давлениях, чем предыдущее.

В этой связи представляют интерес исследования А. Дафи, Р. Эйбера и У. Макси [2], проведенные при испытаниях образцов труб одной плавки диаметром 914 мм, толщиной стенки 10 мм из стали с пределом текучести не ниже 411,9 МПа с искусственно нанесенными поверхностными *V*-образными надрезами длиной 84, 152 и 192 мм и глубиной 5 мм.

Указанные образцы труб нагружались почти до разрушающего давления и затем выдерживались при этом давлении до тех пор, пока они не разрушались вследствие пластической деформации и роста трещин.

Было выявлено, что при давлении ниже разрушающего возможно разрушение, которое наступает не сразу, а по прошествии некоторого времени. Показано, что чем больше давление выдержки отличается от разрушающего, тем позже наступает разрушение при испытании (табл. 1).

Учитывая, что испытания проводились на разных образцах, можно допустить разброс свойств, вызванных местными вариациями толщины стенки и некоторым разбросом значений предела текучести материала в районе дефекта.

Авторы работы [2] приводят рис. 1 и табл. 2, отражающие общие выводы по их исследованию.

При кратковременном нагружении величина разрушающего давления достигает  $P_{\max}$ ;  $\Delta P$  – величина уменьшения разрушающего давления при длительной выдержке.

Было отмечено, что при давлении ниже разрушающего на 5,4 % и более разрушения образцов труб с дефектами не наблюдалось.

### Ключевые слова:

газопровод,  
испытания,  
давление.

**Keywords:**  
gas pipeline,  
tests,  
pressure.

Таблица 1

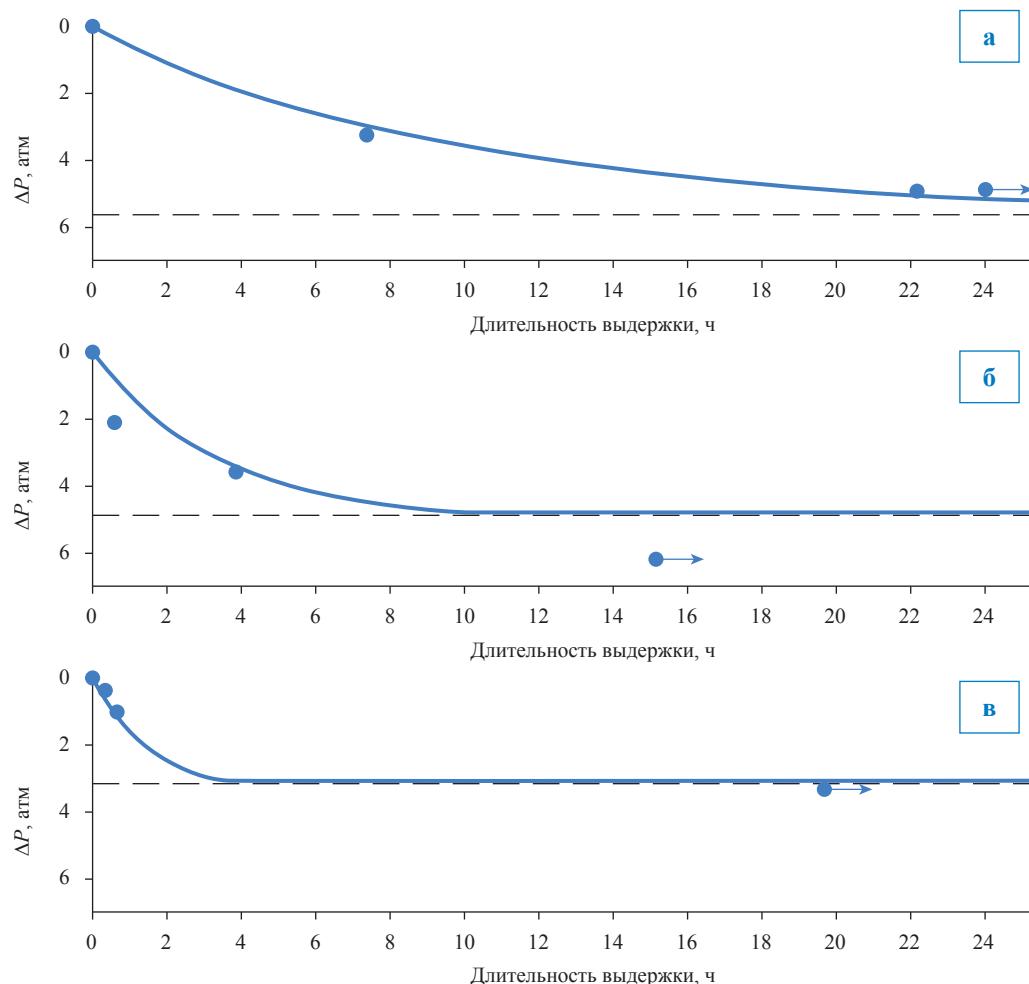
**Характеристики некоторых поверхностных дефектов, подвергшихся выдержке под давлением несколько ниже разрушающего**

№ образца	$\sigma_{0,5}$ , кГ/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , кГ/мм <sup>2</sup>	Длина поверхностного дефекта, мм	Разрушающее давление, ати	Длительность выдержки, мин	$\Delta P$ , атм
1.1	51,8	64,2	84	113	0	0
1.2	51,8	64,2	84	111	720 <sup>1</sup>	-2
1.3	51,8	64,2	84	110	431	-3
1.4	51,8	64,2	84	105	1210	-8
2.1	51,2	64,3	152	90	0	0
2.2	51,2	64,3	152	88	10	-2
2.3	51,2	64,3	152	85	222	-5
2.4	51,2	64,3	152	83 <sup>2</sup>	1345 <sup>2</sup>	-7
3.1	48,3	62,8	190	76	21	0
3.2	48,3	62,8	190	73	0	-3
3.3	48,3	62,8	190	74	3	-2
3.4	48,3	62,8	190	70	24	-6

Примечание

<sup>1</sup> Основание *V*-образного надреза дало трещину, хотя ни течи, ни разрыва не последовало; однако датчики перемещения у конца надреза показали близость момента разрушения.

<sup>2</sup> При выдержке разрушения не наступило.



**Рис. 1. Графики испытаний труб [2]:**  
**а – длина дефектов – 84 мм, глубина – 5 мм; б – длина дефектов – 152 мм, глубина – 5 мм;**  
**в – длина дефектов – 190 мм, глубина – 5 мм**

Таблица 2

**Данные о снижении разрушающего давления при длительной выдержке под давлением [6]**

Размер дефекта, мм	$\Delta P_{\max}$ , ати (атмосфер технических избыточных)	$P_{\max}$ , ати	$(\Delta P_{\max}/P_{\max}) \times 100$ , %
84	5,6	113	5,0
152	4,9	90	5,4
190	3,2	73	4,3

Этот нижний уровень давления, при котором еще происходит рост дефекта, был назван К.Ф. Тиффани [4] «пороговым уровнем интенсивности напряжений». При этом важным выводом стало то, что разрушающее напряжение отличается примерно на 5 % от предела длительной прочности при любых размерах дефектов для трубных сталей.

Испытания повышенным давлением, предшествовавшие цель «вырвать» дефектные трубы на испытываемом участке, проводились, в частности, в 1993–1995 гг. в рамках переиспытания гидравлическим способом и комплексного обследования действующей системы магистральных трубопроводов в ООО «Газпром трансгаз Югорск» [3]. Переиспытания проводились на участках со стресс-коррозионными дефектами. В процессе переиспытания участка газопровода при подъеме давления наблюдалось разрушение дефекта, давление снижалось до атмосферного, дефект устранился, после чего аналогичные циклы повторялись до разрушения очередного дефекта или достижения давления испытания.

Такой порядок переиспытаний позволил исследовать поведение дефектов, подвергшихся малоцикловым нагрузлениям. Из 28 разрушившихся дефектов, которые подверглись воздействию нескольких циклов нагрузления (2 и более), наибольший интерес вызывают те дефекты, у которых величины давлений на отдельных циклах, не приведших к разрушению, оказались выше давления последнего, разрушающего цикла. Насчитывалось 7 таких дефектов (табл. 3).

Полученные давления были пересчитаны с учетом высотных отметок, что позволило получить диаграммы нагрузления этих дефектов (рис. 2, 3).

Примечательно поведение дефектов 1.3, 1.4 газопровода Ямбург – Елец I и дефекта 2.2 газопровода Уренгой – Центр I, которые разрушились через несколько циклов после максимального нагружения.

Поведение этих дефектов демонстрирует последовательное снижение порогового давления в последних циклах нагрузления. Этот эффект показывает, что многократное достижение

Таблица 3

**Величины давления в участках системы магистральных газопроводов Краснотурьинского ЛПУМГ при циклических нагрузлениях, МПа**

№ дефекта	Номера циклов нагрузления дефектов, $N_n$								I	II
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Ямбург – Елец I ( $1420 \times 15,7$ )										
1.1	8,11	9,01	8,91						1,11	1,11
1.2	8,55	9,45	9,35	9,7	9,94	9,9			0,4	0,4
1.3	8,15	9,05	8,95	9,3	9,54	9,5	9,51		0,31	-0,11
1.4	8,76	9,66	9,56	9,91	10,15	10,11	10,12	9,86	2,86	2,57
Уренгой – Центр I ( $1420 \times 15,7$ )										
2.1	7,5	8,1	8,6	8,7	8,8	8,4			4,55	4,55
2.2	7,5	8,1	8,6	8,7	8,8	8,4	8,3		5,68	1,19
Уренгой – Петровск ( $1420 \times 16,5$ )										
3.1	7,7	9,1	9,7	9,89	9,4				4,95	4,95

## Примечания

I – снижение давления при разрыве относительно максимального давления нагрузления дефекта (%);

II – снижение давления при разрыве относительно предпоследнего цикла нагрузления дефекта (%).

Зеленым цветом окрашены значения давления циклов максимального нагружения дефектов, не приведших к разрушению. Желтым цветом – давления разрушения дефектов на последнем цикле нагрузления.

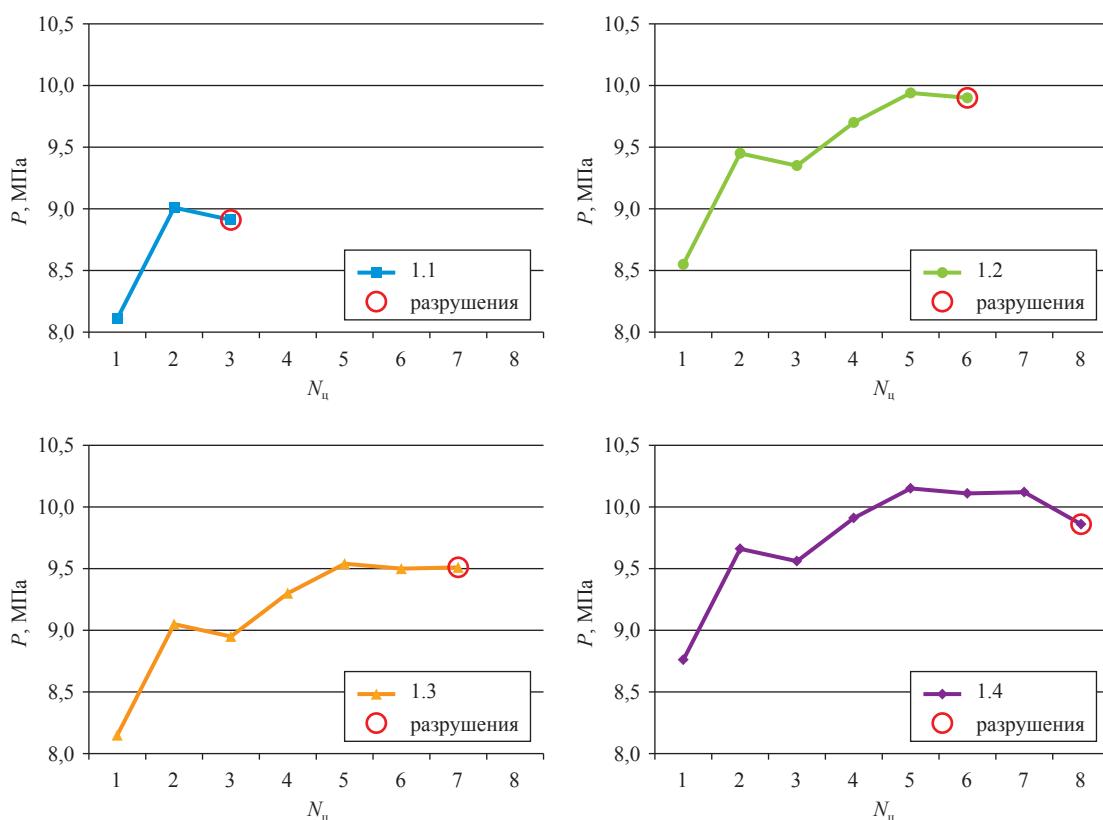


Рис. 2. Диаграммы циклического нагружения дефектов 1.1–1.4 до разрушения на газопроводе Ямбург – Елец I

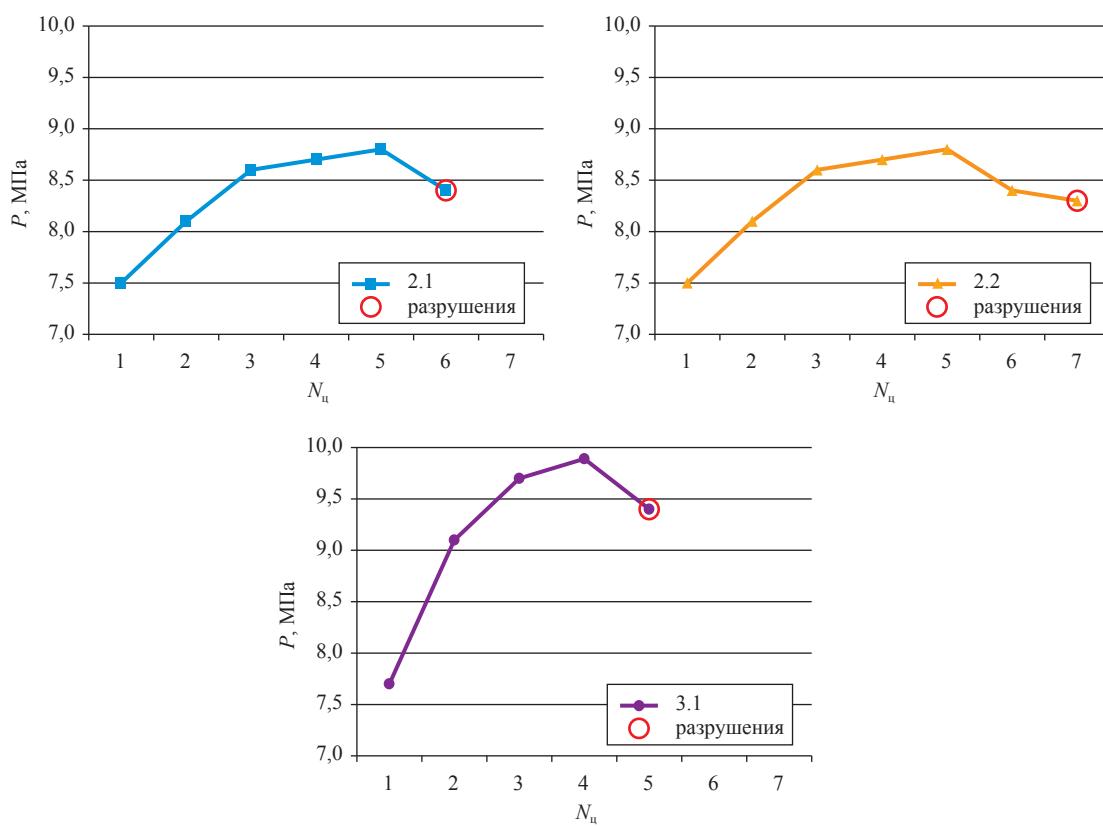


Рис. 3. Диаграммы циклического нагружения дефектов 2.1, 2.2 и 3.1 до разрушения на газопроводах Уренгой – Центр I и Уренгой – Петровск

порогового давления может снижать его при каждом следующем цикле нагружения без разрушения.

Таким образом, дефекты трубопровода характеризуются двумя характерными давлениями:

- пороговым давлением, при достижении и превышении которого дефект развивается;
- разрушающим давлением, при достижении которого происходит разрыв.

При давлении в трубопроводе ниже порогового дефекты не претерпевают изменений, и разрушения не наблюдаются в течение долгого времени (если только развитие дефектов не происходит по причине коррозии либо стресс-коррозии).

При проведении переиспытаний [3] был обнаружен эффект скачкообразного перехода дефектов на более низкий уровень характерных давлений с последующей приостановкой развития.

Этот эффект позволяет утверждать, что при начале снижения давления происходит фиксация характерных давлений, полученных при выдержке давления в трубопроводе при постоянном давлении.

Циклические нагрузки изменяют состояние дефектов, только когда максимальное дав-

ление циклов достигнет величины порогового давления. В противном случае они не будут влиять на рост дефекта.

Учитывая необходимость обеспечения некоторого запаса надежности, следует принять, что давление испытания на прочность должно быть выше рабочего в 1,1 раза, что соответствует существующим нормативным требованиям.

Результаты проведенных испытаний [3] подтверждаются также выводами более поздних исследований Х. Хейнса, Дж. Кифнера и М. Розенфельда [5] о не более чем 5%-ном отличии порогового напряжения от разрушающего.

Проведенный анализ подходов к вопросу назначения величины испытательного давления для магистральных газопроводов в целом подтвердил обоснованность существующих взглядов.

Показано, что давление при испытаниях участков магистрального газопровода на прочность необходимо назначать таким образом, чтобы в процессе последующей эксплуатации не достигалось величины порогового давления, что исключает развитие дефектов, инициированных внутренним давлением в процессе испытаний трубопровода.

## Список литературы

1. Березин В.Л. Испытание магистральных нефтепродуктопроводов как метод повышения их надежности: тематич. науч.-технич. обзор / В.Л. Березин, В.В. Постников, Э.М. Ясин. – ВНИИОЭНГ, 1972. – (Серия «Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов»).
2. Даффи А. О поведении дефектов в сосудах давления / А. Даффи, Р. Эйбер, У. Макси; под. ред. Ю.М. Работнова // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению: сб. ст. – М.: Мир, 1972.
3. Галиуллин З.Т. Переиспытание и комплексное обследование магистральных газопроводов, подверженных стресс-коррозии: обз. инф. / З.Т. Галиуллин, С.В. Карпов, М.И. Королев и др. – М.: ИРЦ Газпром, 1996. – 35 с. – (Серия «Транспорт и подземное хранение газа»).
4. Тиффани К.Ф. Прикладные вопросы вязкости разрушения / К.Ф. Тиффани, Дж.Н. Мастерс. – М.: Мир, 1968.
5. Хейнс Х. Гидроиспытания трубопровода: о выборе времени выдержки под давлением / Х. Хейнс, Д. Кифнер, М. Розенфельд // Oil & Gas Jurnal Russia. – 2012. – № 11.