



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТРУБОПРОВОД ПО АНАЛИЗУ ЭПЮР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

С. К. ФОМИЧЕВ, С. Н. МИНАКОВ, С. В. МИХАЛКО, М. А. ЯРЕМЕНКО, А. С. МИНАКОВ

*Предпринята попытка проанализировать механизмы силового воздействия на трубопровод путем разложения эпюры продольных напряжений на постоянную и переменные составляющие. Такое разложение дает представление о процессах осевого (постоянная составляющая) и изгибающего воздействий (переменная составляющая). Наличие осевого воздействия определяется по неравенству продольных напряжений 0,3 от кольцевых, что согласуется с теорией упругости. На практике по результатам мониторинга этих процессов можно судить о конкретных воздействиях на трубопровод и принять обоснованные технологические решения.*

*An attempt is made to analyze the mechanisms of force impact on the pipeline by decomposition of the epure of longitudinal stresses into the constant and variable components. Such decomposition gives an idea of the processes of axial impact (constant component) and bending impact (variable component). Presence of axial impact is determined by the inequality of longitudinal stresses of 0.3 of the circumferential stresses, which is in agreement with the theory of elasticity. In practice the results of monitoring these processes provide an estimate of the specific impacts on the pipeline and allow taking substantiated technology decisions.*

Украина имеет разветвленную сеть газо-, нефте-, продуктопроводов и является транзитной страной. Учитывая, что срок эксплуатации этих сооружений составляет 30...55 лет, проблема обеспечения безаварийной работы принимает все более важное значение. Одной из задач решения указанной проблемы является мониторинг напряженного состояния магистральных трубопроводов.

Кроме постоянных, временных длительных, кратковременных нагрузок в результате деформаций земной поверхности трубопровод начинает испытывать особые нагрузки [1], учесть которые на этапе проектирования не всегда представляется возможным. По прошествии десятков лет эти процессы могут принимать непредсказуемый характер, поэтому важное значение имеет мониторинг напряженного состояния магистральных трубопроводов, а также оценка силовых воздействий на трубопровод. Воздействие на трубопровод указанных нагрузок выражается в появлении дополнительных продольных напряжений  $\sigma_m$ . Внутреннее давление вызывает не только кольцевые напряжения  $\sigma_r$ , но и продольные  $\sigma_m$ , зависящие от положения оси трубопровода и влияния на него окружающей среды. Подземные магистральные трубопроводы заземлены в грунте и не могут перемещаться в продольном направлении, поэтому при расчете трубопроводы можно рассматривать как заземленные. В связи с этим наряду с кольцевыми напряжениями внутреннее давление вызывает также продольные растягивающие напряжения, которые равны  $\mu\sigma_r$ , где  $\mu$  — коэффициент Пуассона, равный 0,3. В непосредственной бли-

зости от резких поворотов трубопроводов на очень ограниченных участках продольные напряжения от внутреннего давления могут достигать значений, составляющих 50 % кольцевых напряжений [2].

Системы мониторинга напряженного состояния трубопроводов [3, 4] позволяют отслеживать реальные значения продольных  $\sigma_m$  напряжений. Измерение напряженного состояния трубопровода проводится в выбранных сечениях. Преобразователи устанавливаются симметрично в одном сечении. Измеренные значения напряжений поступают в головной офис организации, которая эксплуатирует трубопровод [3]. Анализ полученных данных требует от персонала соответствующей квалификации и опыта, который зачастую отсутствует. Специалисты по полученным данным напряженного состояния принимают технологические решения, направленные на обеспечение безаварийной работы, поэтому необходимо знать какие процессы нагружения трубопровода развиваются на конкретном участке. Такому анализу эпюр продольных напряжений трубопроводов для выявления характера их нагружения (осевого или изгибающего) посвящена настоящая работа.

Анализировать данные мониторинга удобно путем построения эпюр продольных напряжений. Рассмотрим прямолинейный участок трубопровода. Для начала в качестве силового воздействия примем только внутреннее давление. Тогда кольцевые напряжения  $\sigma_r$  определяются по формуле Лапласа, а продольные — по формулам

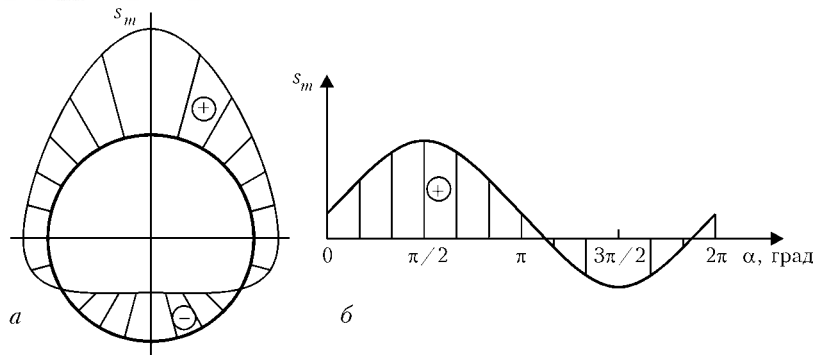


Рис. 1. Эпюра продольных напряжений от внутреннего давления и изгиба в полярных (а) и декартовых (б) координатах

$$\sigma_m = 0,3\sigma_t \quad (1)$$

Указанная эпюра напряжений изгиба будет уравновешенной, т. е.

$$(\sigma_m - \bar{\sigma}_m)_{\text{ср. ариф}} = 0. \quad (7)$$

Среднее арифметическое продольных напряжений определяется по следующей формуле:

$$\bar{\sigma}_m = \frac{\sum_{i=0}^{2\pi} \sigma_{mi}(\alpha)}{i_{\text{max}}}, \quad (2)$$

Приведенные выше рассуждения будут справедливы и при изгибе трубопровода в двух направлениях.

Анализ максимальных и минимальных  $\sigma_{\text{изг}}$  при мониторинге напряженного состояния трубопроводов может дать представление о развитии изгибающих процессов, соответственно анализ  $\bar{\sigma}_m$  — о развитии процессов сжатия–растяжения трубопровода. Очевидно, что при

$$\bar{\sigma}_m = 0,3\sigma_t \quad (8)$$

отсюда

$$\bar{\sigma}_m = \sigma_m = 0,3\sigma_t. \quad (3)$$

Для случая, если имеется еще изгибающее воздействие на трубопровод (перемещение грунта, просадки), то к продольным напряжениям от давления добавятся еще напряжения от изгиба:

$$\sigma_m = 0,3\sigma_t + \sigma_{\text{изг}}. \quad (4)$$

растяжения–сжатия трубопровод дополнительно не испытывает, т. е.

$$\sigma_{\text{доп. ос}} = \bar{\sigma}_m - 0,3\sigma_t = 0, \quad (9)$$

На рис. 1 приведены эпюры продольных напряжений от внутреннего давления и изгиба в полярных и декартовых координатах.

Если вновь определить среднее арифметическое продольных напряжений (2), получим

$$\bar{\sigma}_m = 0,3\sigma_t. \quad (5)$$

Вычитая из продольных напряжений среднее арифметическое, получаем эпюру от изгиба (рис. 2).

Таким образом,

$$\sigma_{\text{изг}} = \sigma_m - \bar{\sigma}_m. \quad (6)$$

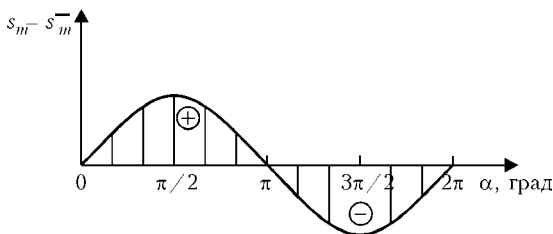


Рис. 2. Эпюра продольных напряжений от внутреннего давления и изгиба в декартовых координатах за вычетом среднего арифметического

где  $\sigma_{\text{доп. ос}}$  — дополнительные (кроме составляющей от внутреннего давления) осевые напряжения.

При

$$\sigma_{\text{доп. ос}} \neq 0 \quad (10)$$

трубопровод дополнительно испытывает нагрузки сжатия–растяжения и по изменению значения  $\sigma_{\text{доп. ос}}$  можно говорить о тенденции развития процессов осевого нагружения.

Рассмотрим реальный случай перехода трубопровода через овраг.

Схема трубопровода с указанием сечений мониторинга напряженного состояния указана на рис. 3.

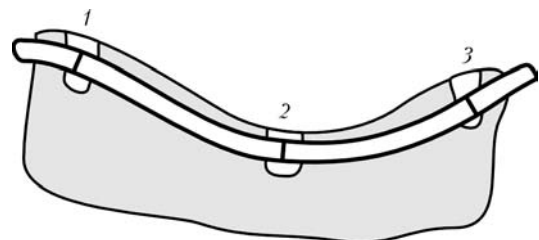


Рис. 3. Схема сечений 1–3 трубопровода для мониторинга напряженного состояния перехода через овраг



Анализ эшюр

Сечение	Напряжение	Угол, град												Напряжения		
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	$\sigma_t$	$\bar{\sigma}_m$	$\sigma_{доп. ос}$
1	$\sigma_m$	83	90	102	117	130	140	145	144	137	125	110	95	159	118	71
	$\sigma_{изг}$	-35	-28	-16	-1	12	22	27	26	19	7	-8	-23	-	-	-
2	$\sigma_m$	151	145	125	116	79	54	48	63	96	137	148	150	159	109	62
	$\sigma_{изг}$	42	36	16	7	-30	-55	-61	-46	-13	28	39	41	-	-	-
3	$\sigma_m$	84	80	90	112	130	141	144	137	122	103	90	86	159	110	63
	$\sigma_{изг}$	-26	-30	-20	2	20	31	34	27	12	-7	-20	-24	-	-	-

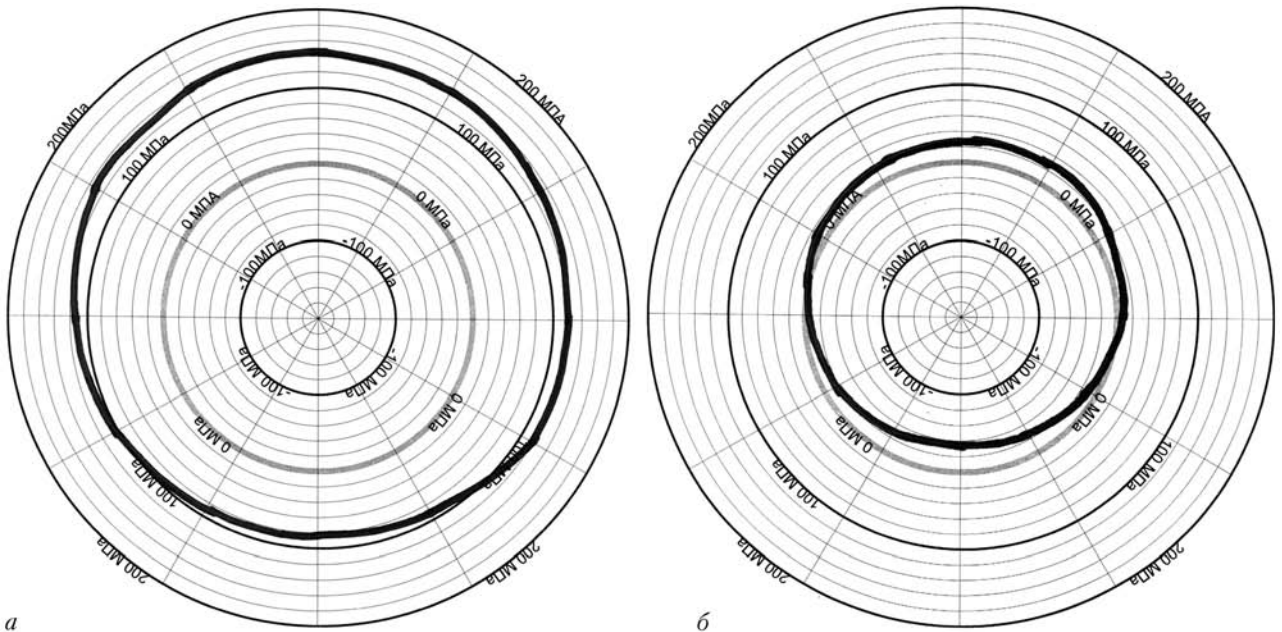


Рис. 4. Эшюры продольных напряжений в сечении 1: а — исходные; б — изгибающие

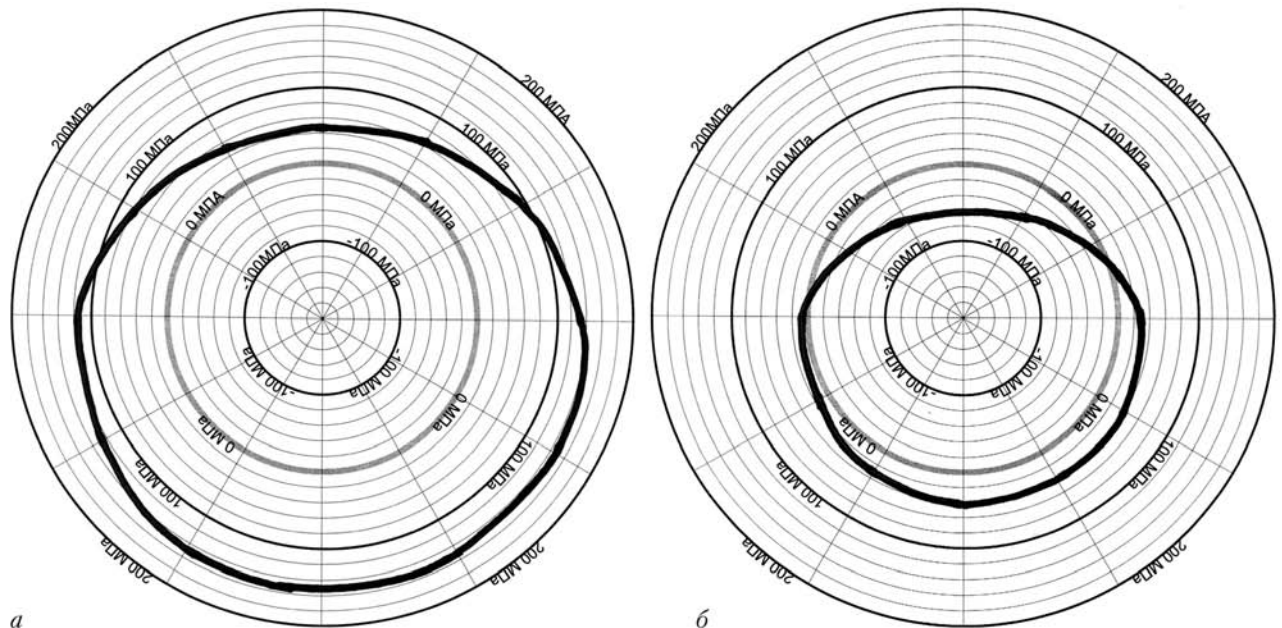


Рис. 5. Эшюры продольных напряжений в сечении 2: а — исходные; б — изгибающие

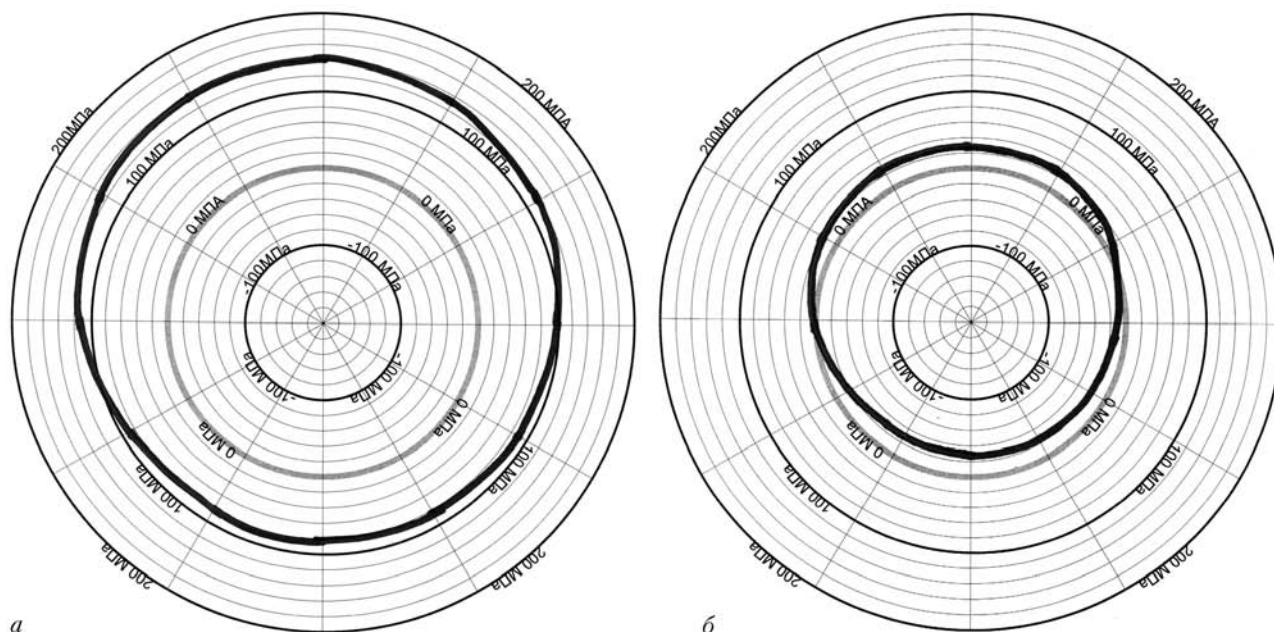


Рис. 6. Эпюры продольных напряжений в сечении 3: а — исходные; б — изгибающие

Анализ эпюр представлен в таблице. Расчет продольных нормальных напряжений проводили по методике, описанной в работе [5]. Рассматривали трубопровод диаметром 356 мм с толщиной стенки 8 мм, находящийся под давлением 7,8 МПа (порядок отсчетов напряжений снизу трубопровода (0°) по часовой стрелке).

Из таблицы видно наличие  $\sigma_{\text{доп. ос}}$  порядка 63...71 МПа, которые наиболее вероятно вызваны оползневыми процессами. Соответствующие эпюры продольных нормальных напряжений представлены на рис. 4–6.

Анализ эпюр показывает изгиб трубопровода в сечении 1 и 3 с растягивающими волокнами сверху, на сечении 2 — внизу. Такая схема нагружения трубопровода согласуется с теорией упругости.

### Выводы

Для переходов, подверженных циклическим (суточным) тепловым нагрузкам, анализ мониторинга  $\sigma_{\text{изг}}$ ,  $\bar{\sigma}$ ,  $\sigma_{\text{доп. ос}}$  позволяет судить о самих нагрузках, а также о работе компенсаторов. Так, наличие в переходе существенной составляющей  $\sigma_{\text{доп. ос}}$  свидетельствует о недостаточной работе компенса-

тора, а наличие больших  $\sigma_{\text{изг}}$  в компенсаторах — об излишней жесткости последних.

Рассматривая изменения  $\sigma_{\text{изг}}$ ,  $\bar{\sigma}$ ,  $\sigma_{\text{доп. ос}}$  во времени, можно представить картину работы участков трубопровода и производя расчеты на прочность, прогнозировать степень «опасности» таких участков с целью более рационального планирования мероприятий по повышению работоспособности трубопровода.

1. СНиП 2.05.06-85\*. Магистральные трубопроводы. — М.: ГУП ЦПП, 1997. — 60 с.
2. Камерштейн А. Г., Рождественский В. В., Ручимский М. Н. Расчет трубопроводов на прочность: Справоч. кн. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефтян. и горной лит-ры, 1963. — 424 с.
3. Пятиуровневая модульная система мониторинга напряженного состояния трубопроводов, сосудов под давлением, хранилищ, резервуаров магнитоанізотропним методом / С. К. Фомичев, С. Н. Минаков, В. В. Кочубей и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2006. — № 3. — С. 9–15.
4. Автономная система мониторинга механических напряжений магистральных трубопроводов с использованием возможностей GSM связи / С. К. Фомичев, С. Н. Минаков, М. А. Яременко и др. // Там же. — 2008. — № 1. — С. 9–12.
5. Особенности измерения механических напряжений электромагнитным методом в трубопроводах и сосудах давления газового и нефтяного комплекса / А. Я. Недосека, С. К. Фомичев, С. Н. Минаков и др. // Там же. — 1996. — № 1. — С. 55–56.

Нац. техн. ун-т «КПИ»  
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
Киев

Поступила в редакцию  
23.03.2009