

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

К. С. ЗАРЕМБО и Л. М. ЕМЕЛЬЯНОВ

О ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ И ДЕФОРМАЦИЯХ ПОДЗЕМНЫХ  
ГАЗОПРОВОДНЫХ ТРУБ

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 18 X 1950)

Современные инженерные способы расчета подземных газопроводных труб на прочность основываются, как известно, на представлении, что трубы абсолютно защемлены окружающим грунтом. Это представление явилось предметом опытной проверки при исследованиях работы газопроводных труб, предпринятых для обоснования оптимальной глубины их укладки.

Опыты проводились\* как на действующих, так и на специально для этой цели построенных опытных газопроводах. Исследования велись со стальными трубами, соединенными электросваркой, диаметром  $d$  300 и 500 мм, толщиной стенок 8–12 мм, уложенными на глубине  $H$  от 0,5 до 2,0 м в различные грунты (от песков до плотных суглинков) и находившимися в эксплуатации от 3–4 мес. до 5 лет; исследования проводились в различные сезоны года. Давление газа в опытах изменялось циклично и ступенчато в пределах от 0 до 45 атм.

В качестве измерительной аппаратуры были применены как механические индикаторы, так и электрические приборы: омические тензодатчики и специально сконструированные по такой же электрической схеме электрические индикаторы и динамометры, позволявшие проводить исследования дистанционно, без искажения естественных условий заложения и эксплуатации труб в грунте.

Примененные для измерения перемещений и деформаций труб в грунте механические индикаторы имели цену деления от 0,01 мм и ход штока до 10 мм. Электрические индикаторы (см. рис. 1) имели ход штока 6–7 мм, цена деления электронного измерителя соответствовала перемещению штока прибора на 0,015–0,017 мм.

Приборы устанавливались группами в наиболее характерных местах (створах) газопровода. В каждом створе устанавливалось от 2 до 5 индикаторов для измерения перемещений поверхности трубы и деформаций ее сечения.

Приборы крепились к стальным сваям, забитым в землю вблизи трубы. Механические индикаторы закладывались в открытых шурфах,

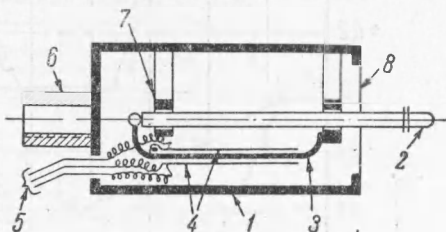


Рис. 1. Схема электрического индикатора. 1 — корпус прибора; 2 — головка подвижного штока, касающаяся поверхности исследуемой трубы; 3 — стальная С-образная пластинка; 4 — активный и компенсационный тензодатчики, наклеенные на пластинку 3; 5 — выводные провода для присоединения к кабелю; 6 — гнездо для крепления прибора к опорной свае; 7 — направляющие втулки; 8 — резиновая пластинка

\* Постановка и проведение первых исследований работы подземных газопроводных труб, как и инициатива применения электротензометрического метода при этих исследованиях, принадлежит одному из нас (К. С. Зарембо).

электрические после установки и соответствующей защиты и изоляции засыпались землей.

Одним из самых существенных результатов проведенных исследований, подтвержденным при всех без исключения опытах, было установление факта перемещаемости газопроводных труб в грунте. Изменения грунтовых характеристик и условий заложения и эксплуатации труб не меняли качественной стороны этого явления.

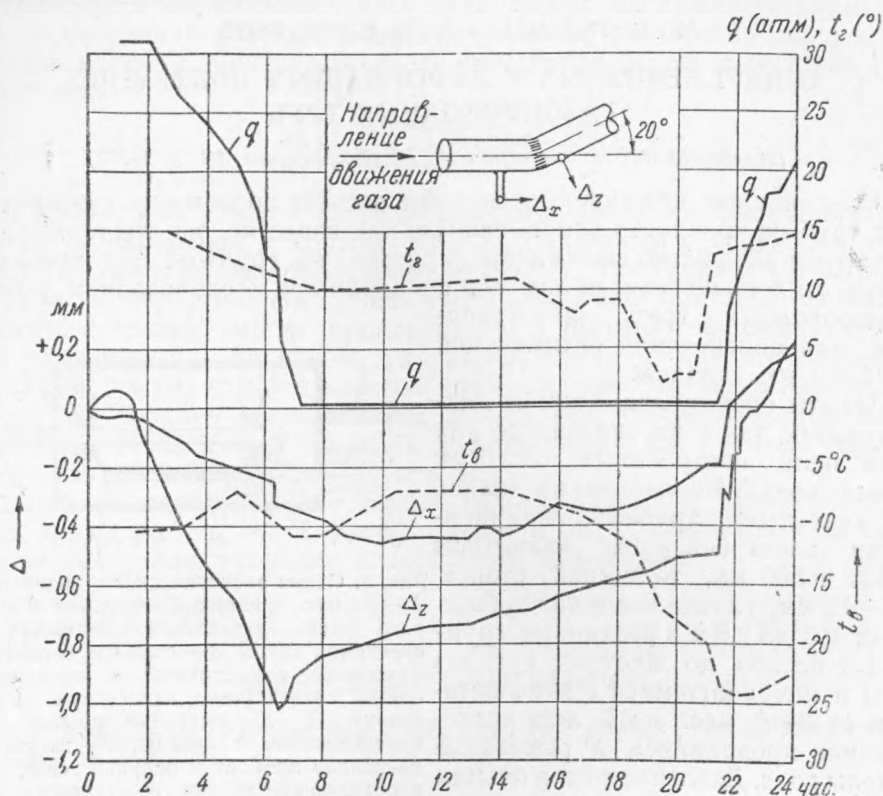


Рис. 2

Наибольшей величины перемещения наблюдались в местах поворотов оси трубы. При повышении давления газа труба всегда перемещалась от центра кривизны, а при снижении давления к центру кривизны оси трубы. В условиях проведенных опытов эти поперечные перемещения в плоскости поворота достигали 1,8—2,0 мм.

Поперечные перемещения поверхности трубы, ортогональные плоскости ее поворота, были заметно меньшей величины (порядка 0,2—0,4 мм). Лишь в местах, где труба имела значительную начальную овальность, они достигали 1 мм.

Продольные перемещения трубы на поворотных ее участках обычно не превышали 0,25 мм и только в одном случае (см. рис. 2) достигли 0,45 мм.

На практически прямолинейных участках газопровода поперечные и продольные перемещения трубы колебались в пределах 0,25 мм и обуславливались, очевидно, небольшими искривлениями оси трубы.

В качестве иллюстрации на рис. 2 приведен совмещенный график перемещений поверхности трубы и изменений давления газа  $q$  (атм.) и температур (воздуха  $t_0$  и газа  $t_2$ ), относящийся к опыту, проведенному 21 III 1948 г. с трубами ( $d = 300$  мм,  $\delta = 11$  мм,  $H = 2$  м), пролежавшими в плотном суглинистом грунте свыше 5 лет. Измерения

велись в месте горизонтального поворота оси трубы ( $20^\circ$ ). Особенно велики здесь оказались горизонтальные поперечные перемещения  $\Delta_z$ , превысившие 1 мм; продольные перемещения  $\Delta_x$  достигли 0,45 мм.

Другой пример развития поперечных и продольных перемещений приведен на рис. 3 (см. таблицу в подписи к рисунку).



Рис. 3. Развитие поперечных и продольных перемещений трубы ( $d=300$  мм,  $\delta=11$  мм,  $H=1,7$  м) на горизонтальном ее повороте под углом  $85^\circ$  (радиус поворота оси трубы 10 м) при повышении давления газа на 40 атм.

| Точки замера | № опытов | $\Delta_z$   | $\Delta_x$   | Точки замера | № опытов | $\Delta_z$     | $\Delta_x$     |
|--------------|----------|--------------|--------------|--------------|----------|----------------|----------------|
| а            | 3        | 0,02         |              | д            | 3 {      | 0,58<br>0,55   |                |
| б            | 2        | 0,01         | 0,23         | е            | 2        | 1,23           | -0,32          |
| в            | 3 {      | 1,31<br>1,31 | 0,03<br>0,09 | ж            | 3 {      | -0,24<br>-0,27 | -0,14<br>-0,16 |
| з            | 3 {      | 1,75<br>1,70 | 0,02<br>0    | з            | 2<br>3 { | -0,02<br>+0,03 |                |

При замерзании грунта все виды перемещений заметно уменьшаются. В условиях опытного газопровода ( $d=500$  мм,  $\delta=6,4$  мм,  $H=0,5$  м), заложенного в мелкопесчанистом грунте, перемещения при промерзании грунта уменьшались примерно в 1,6 раз. Перемещаемость труб, заложенных ниже зоны промерзания, от времени года практически не зависела. Установленная зависимость перемещаемости труб от агрегатного состояния окружающего грунта согласуется с разработанной Н. А. Цытовичем с сотрудниками теорией равновесного состояния воды в мерзлых грунтах <sup>(1)</sup>.

Одновременно с перемещениями трубы были измерены деформации ее сечения. Последние состояли не только в изменении поперечных размеров, но и формы сечения, особенно при наличии начальной его овальности. На рис. 4, III приведено распределение радиальных перемещений поверхности трубы при повышении давления газа от 0 до 45 атм. в одном из экспериментальных створов, в котором, как видно из рисунка, имелась значительная начальная овальность сечения трубы\*. В большинстве случаев при повышении давления газа сечение трубы приближалось к окружности.

Наблюдавшиеся перемещения и деформации труб относятся к упругим. Устранение вызывающего их фактора приводит трубу в исходное положение и состояние. Это было прослежено как количественно при опытах с изменением давления газа, так и качественно при наблюдениях за состоянием трубы при прохождении поблизости автомашин или поездов, при увлечении газовым потоком механических загрязнений и т. п.

\* Створ был заложен на горизонтальном повороте газопровода; левая точка на рисунке соответствует выпуклой стороне трубы.

Зависимости перемещений трубы и деформаций ее сечения от давления газа были близкими к линейным (рис. 4, II). Это относится в первую очередь к условиям разгрузки трубы; при повышении давления газа отклонения от линейной зависимости наблюдались более часто. Экспериментально установлено, что все виды перемещений и де-

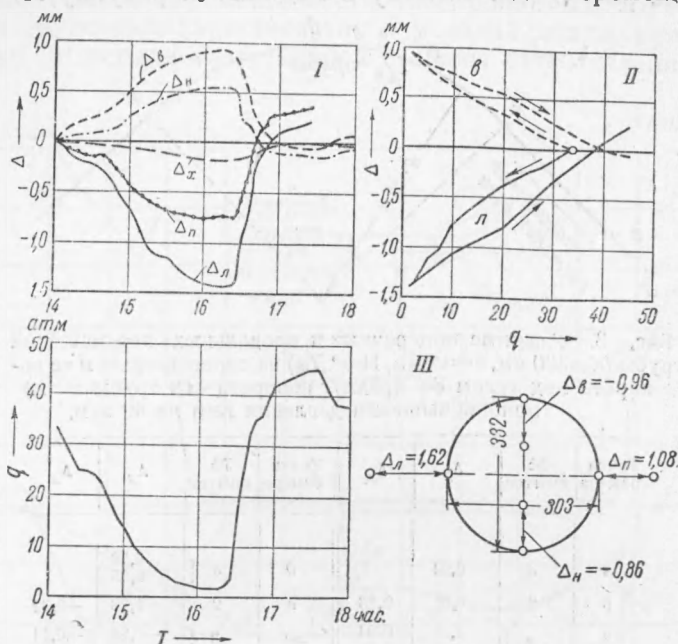


Рис. 4. Графики перемещений:  $\Delta_v$  и  $\Delta_n$  — вертикальные перемещения верхней и нижней образующих трубы;  $\Delta_n$  и  $\Delta_x$  — горизонтальные перемещения правой и левой (по ходу газа) образующих трубы;  $\Delta_x$  — продольные перемещения трубы

формаций труб, вне зависимости от условий их заложения, совпадали во времени с изменениями вызывающих их факторов: давления газа и температурных условий (рис. 2, 4, I).

Установленные явления и зависимости изменяют существующие представления о полной заземленности стальных труб в земле, являющихся элементом упруго-сопряженной системы „труба—грунт“. Под влиянием внешних и внутренних воздействий (изменения давления газа, температурного режима и др.) в этой системе возникают соответствующие перемещения и деформации.

Эти данные приводят к выводу о необходимости учета фактора динамичности как при расчетах труб на прочность, так и при установлении технических условий на строительство и эксплуатацию стальных трубопроводов.

В заключение приносим глубокую благодарность чл.-корр. АН СССР Н. А. Цытовичу и Ю. И. Боксерману за ценные советы и внимание к этой работе, С. В. Виноградову, Л. И. Ефимову, К. М. Сульженко, А. Л. Халифу и А. М. Чекотилло за помощь в работе.

Институт мерзлотоведения им. В. А. Обручева  
Академии наук СССР,  
Главнефтегаз Министерства нефтяной промышленности и  
Гидромелиоративный институт им. В. Р. Вильямса

Поступило  
31 VIII 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Н. А. Цытович, Изв. АН СССР, сер. геол., № 3 (1947); сер. геогр. и геофиз., № 5 (1945).