

УДК 622.692

Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, С. В. СОСНОВСКИЙ, А. Н. КОЗИК, кандидат технических наук, В. В. ВОРОБЬЕВ, кандидат технических наук, ОАО «Гомельтранс-нефть Дружба», Н. В. КОВАЛЕНКО, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, С. В. ТОКАРЬ, ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, С. С. ЩЕРБАКОВ, доктор физико-математических наук, Белорусский государственный университет, Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НЕФТЕПРОВОДНОЙ ТРУБЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Исследованы общие закономерности и установлены специфические особенности деформирования трубы после длительной эксплуатации (с локальным скоплением микротрещин на внутренней поверхности) в упругой и упругопластической областях; описано ее разрушение с развитием локальных ударных волн деформации.

Трубную плетть для испытаний сварили из трех фрагментов: новая труба длиной 5 м и два фрагмента длиной 5 и 1,6 м с эксплуатационными повреждениями (рисунок 1). Эллиптические днища приварены с обеих сторон к испытываемой плетти общей длиной ~11,6 м. В одно из днищ вварен сливо-наливочный патрубок DN100 с усиливающим воротником. На рисунке 1 указано расположение продольных и поперечных сварных швов по отношению к двум зонам с трещиноподобными дефектами. Трубные плетти были демонтированы с 118 км МН Унеча – Мозырь-2 из-за большого количества дефектов. Во время визуального осмотра и после выполнения дефектоскопии были выбраны (см. рисунок 1) места для установки активных тензодатчиков в количестве 44 шт. Рядом с каждым активным находился компенсационный тензорезистор. Все датчики устанавливали в шести характерных сечениях испытуемой (поврежденной в эксплуатации) трубы; на новых отрезках трубы датчики не размещали. Активные тензорезисторы служат для измерения деформации в заданных точках поперечных сечений при испытании трубы внутренним давлением. Компенсационные тензорезисторы служат для обеспечения температурной стабилизации мостов в каждой из назначенных точек на трубе (рисунок 2). Для испытаний использована методика двухэтапного нагружения труб внутренним давлением (с инструментальным обеспечением) в соответствии с СТБ 2162–2011.

Подготовленную нефтепроводную трубу установили на испытательном полигоне (рисунок 3). Провели проверку тензометрической системы. Измерение деформаций производили с помощью системы измерительной тензометрической СИИТ-3. Методика испытаний и из-

мерений, а также обработки данных изложена в работах [1, 2].

Разрушение трубной плетти (рисунок 4), произошло при внутреннем давлении, равном 11,3 МПа. Зона разрушения – сечения I–III в непосредственной близости к тензодатчикам T₁₆, T₃₆ и T₄₆ (см. рисунок 1). Максимальное раскрытие трещины обнаружено по участку трубной плетти между сечениями VI и I (рисунок 5), при этом возникновение и развитие трещины имело следующие особенности:

- трещина развивалась не по продольному сварному соединению, как это обычно наблюдается, а параллельно ему по основному металлу, при этом расстояние между трещиной и сварным швом было ~100 мм;
- трещина возникла в непосредственной близости к одному из поперечных сварных швов (на расстоянии ~300 мм от него);
- трещина развивалась (относительно сечения трубы с наибольшим раскрытием берегов) так, что был разрушен близко расположенный поперечный сварной шов;
- концы остановившейся трещины расположены несимметрично относительно сечения с максимальным ее раскрытием (примерно 750 и 1000 мм).

На рисунках 6 и 7 все результаты испытаний представлены в виде соответствующих эпюр и графиков деформаций (а не напряжений): отдано предпочтение непосредственно измеренной, а не расчетной характеристике. Отметим, что до ~8 МПа деформирование было практически упругим, но могло сопровождаться малыми упругопластическими деформациями (см. рисунок 6), тогда как дальнейшее повышение давления вызвало существенную упругопластическую деформацию (см. рисунок 7).

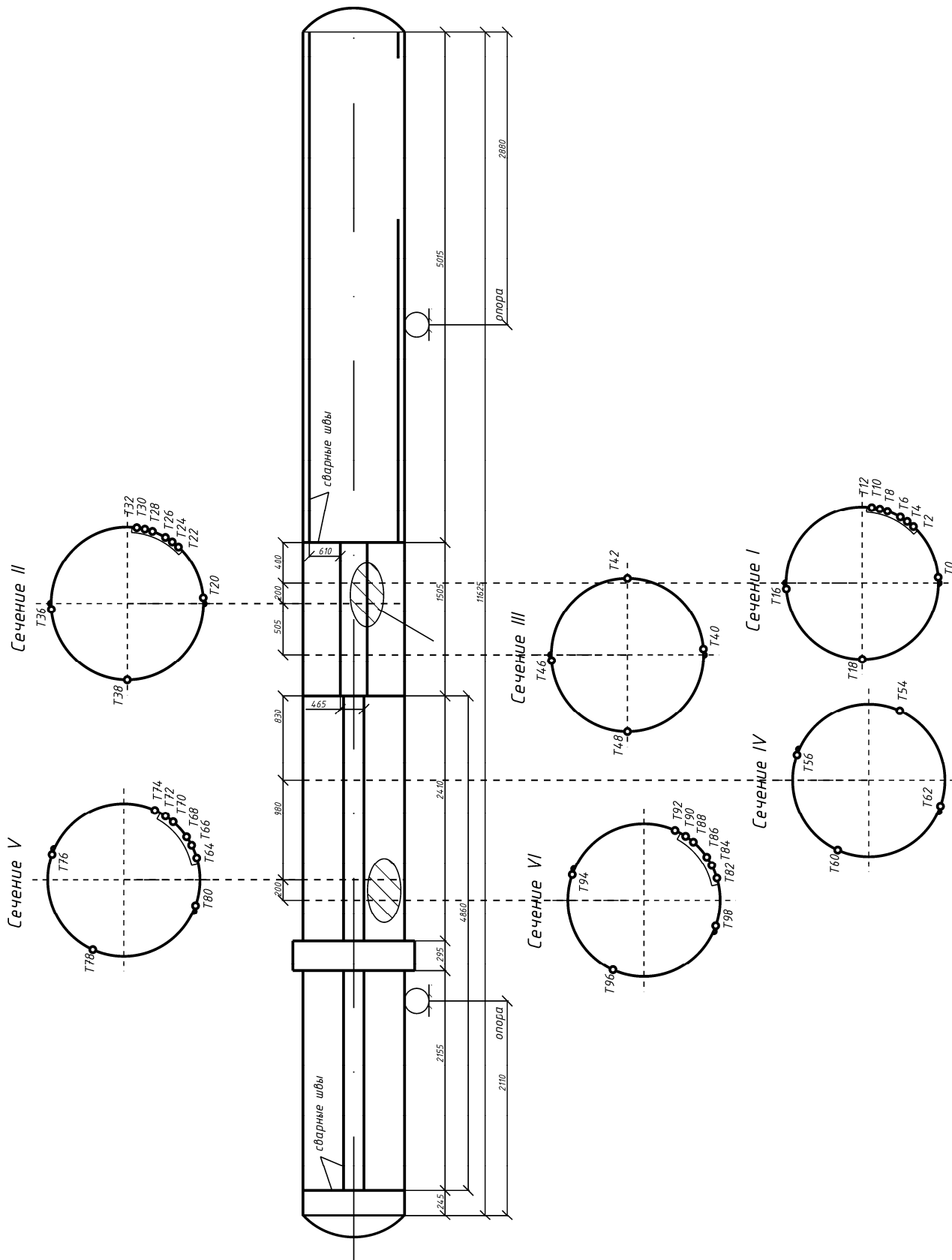


Рисунок 1 – Эскиз испытуемой плиты и схема расположения датчиков в поперечных сечениях

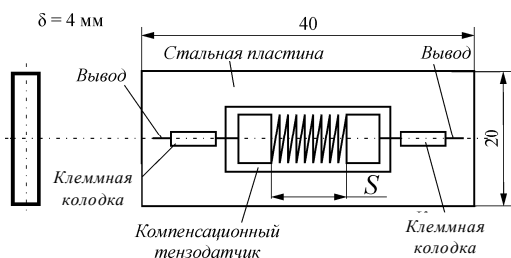


Рисунок 2 – Элемент конструкции с наклеенным компенсационным тензорезистором (S – база тензорезистора, 5 мм)

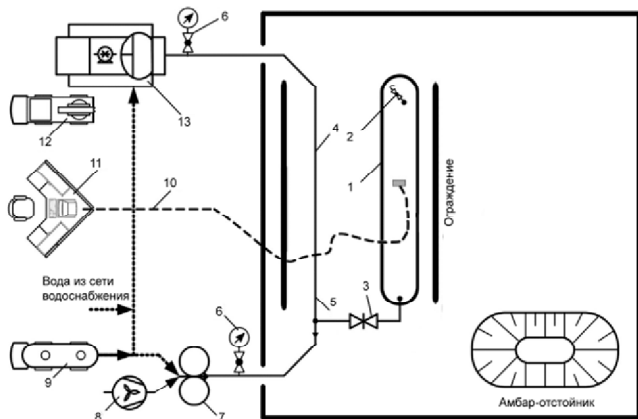


Рисунок 3 – Схема испытательного полигона:

1 – испытываемая труба; 2 – кран для выпуска воздуха; 3 – задвижка; 4, 5 – напорные водоводы; 6 – образцовые манометры; 7 – пневматическая насосная станция; 8 – компрессор; 9 – автоцистерна; 10 – кабель, тензометрической системы; 11 – тензометрическая станция; 12 – автомобиль с гидроманипулятором, осветительной установкой, сварочным постом и ремонтной мастерской; 13 – гидравлическая насосная станция



Рисунок 4 – Разрушенная трубная плеть после испытаний

Эпюры окружной деформации ϵ на первой стадии испытания представлены на рисунке 6. При значениях внутреннего давления 2,2; 4,5; 6; 8 МПа во всех исследованных сечениях эпюры оказываются несимметричными. Эти особенности связаны, по-видимому, с нестабильностью свойств материала трубы в соответствующих зонах, а также с возможным технологическим нарушением симметричности трубы. Видно, что это практически область упругого деформирования с проявлением малых упругопластических деформаций. Это хорошо подтверждается данными рисунка 8.

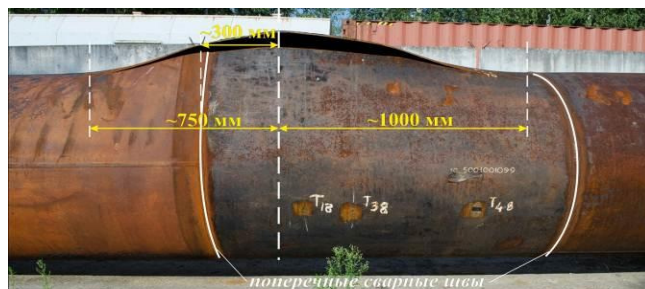


Рисунок 5 – Характер разрушения трубной плети

При увеличении давления свыше 8 МПа эпюры деформирования оказались, так сказать, неклассическими (см. рисунки 7 и 9). Изучение этих данных не привело авторов к полному пониманию обнаруженных здесь особенностей деформирования и разрушения плети, хотя некоторые из них наблюдались и ранее [1–3]. Возможно, что это обусловлено образованием пространственно разнесенных зон локального пластического деформирования из-за местной неоднородности свойств материала в связи с физическими и технологическими (в частности, коррозионно-механическими) дефектами. Быть может, здесь следует говорить о локальной потере устойчивости трубы в процессе нагружения.

Можно отметить следующие основные особенности деформирования в упругопластической области и разрушения трубы, имеющей скопление трещиноподобных дефектов.

А. Зона возникновения и развития трещины (сечения I, II, III на рисунках 6 и 7).

1 По всей видимости, первичная трещина образовалась в сечении I, где обнаружено наибольшее ее раскрытие. Об этом свидетельствуют эпюры окружных напряжений: ясно виден результат действия гидроудара; при $p = 10,5$ МПа образовалась деформация растяжения, которая достигает $\epsilon = 9,4 \cdot 10^{-3}$, при этом на противоположной стороне трубы растягивающая деформация падает практически до нуля, а при повышении давления до 11 МПа здесь обнаруживается и неожиданное сжатие. Некоторые соображения по этому поводу можно найти в работе [3].

2 В зоне расположения тензодатчиков T_{20} , T_{24} , T_{26} , T_{28} , T_{30} , T_{32} (см. сечение II) при этом возникают вибрации, так что деформации здесь оказываются волнообразными, достигая значения $7-9 \cdot 10^{-3}$.

3 Последовательное увеличение давления ($10 \rightarrow 10,5 \rightarrow 11$ МПа) не сопровождается последовательным же ростом деформаций, напротив, они неожиданно изменяются по численному значению, так что, например, при давлении 10,5 МПа они выше, чем при давлении 11 МПа (см. рисунки 7 и 9).

4 Колебательное изменение деформаций приводит и еще к одному неожиданному результату: при давлениях 10,5 и 11 МПа обнаруживаются точки, где деформация падает практически до нуля (T_{22} , T_{26} , T_{32}) и даже переходит в сжимающую (T_{24}).

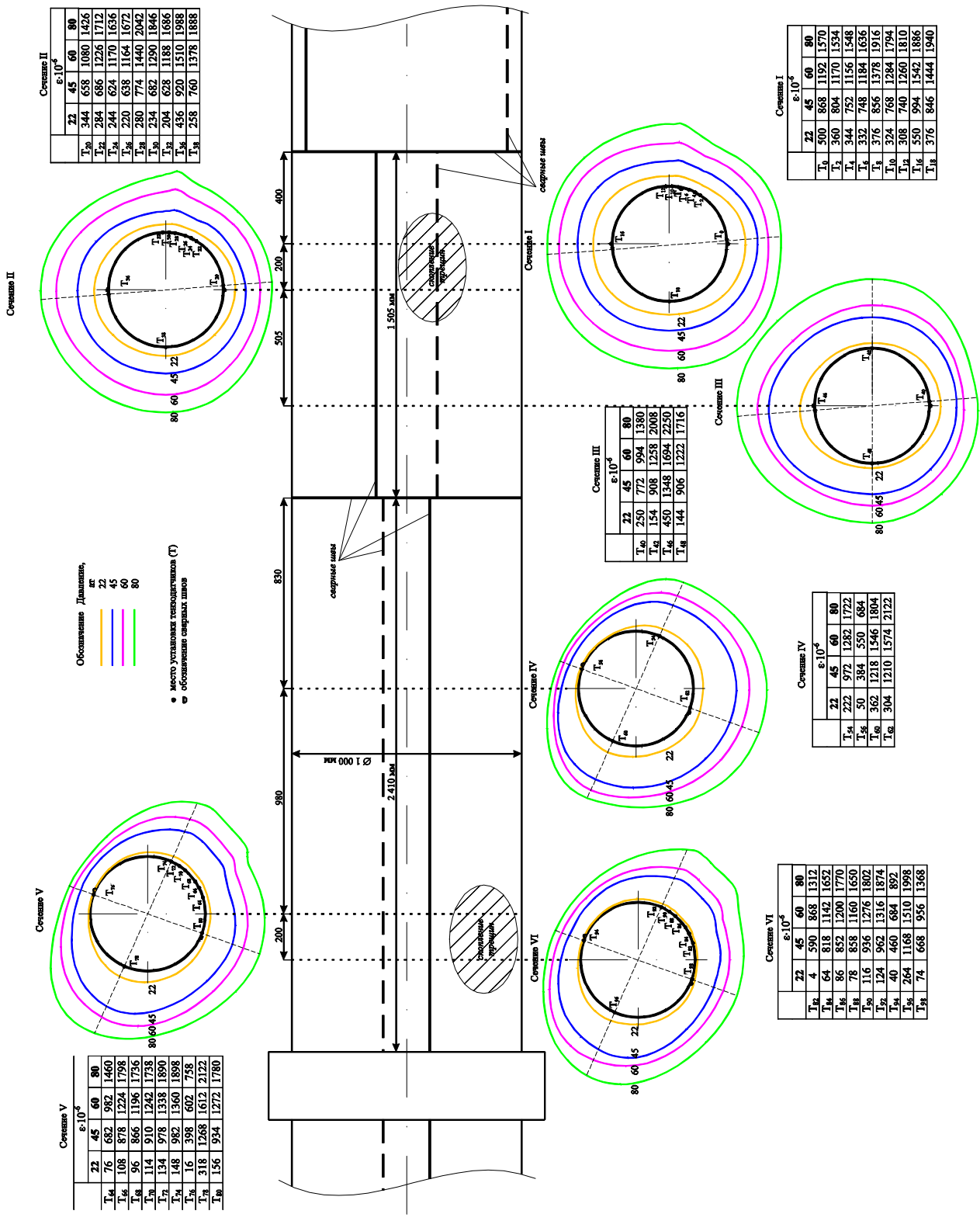


Рисунок 6 – Характер деформирования трубной плети и эпюры окружных деформаций в ее характерных сечениях в зависимости от уровня внутреннего давления ($p < 8$ МПа)

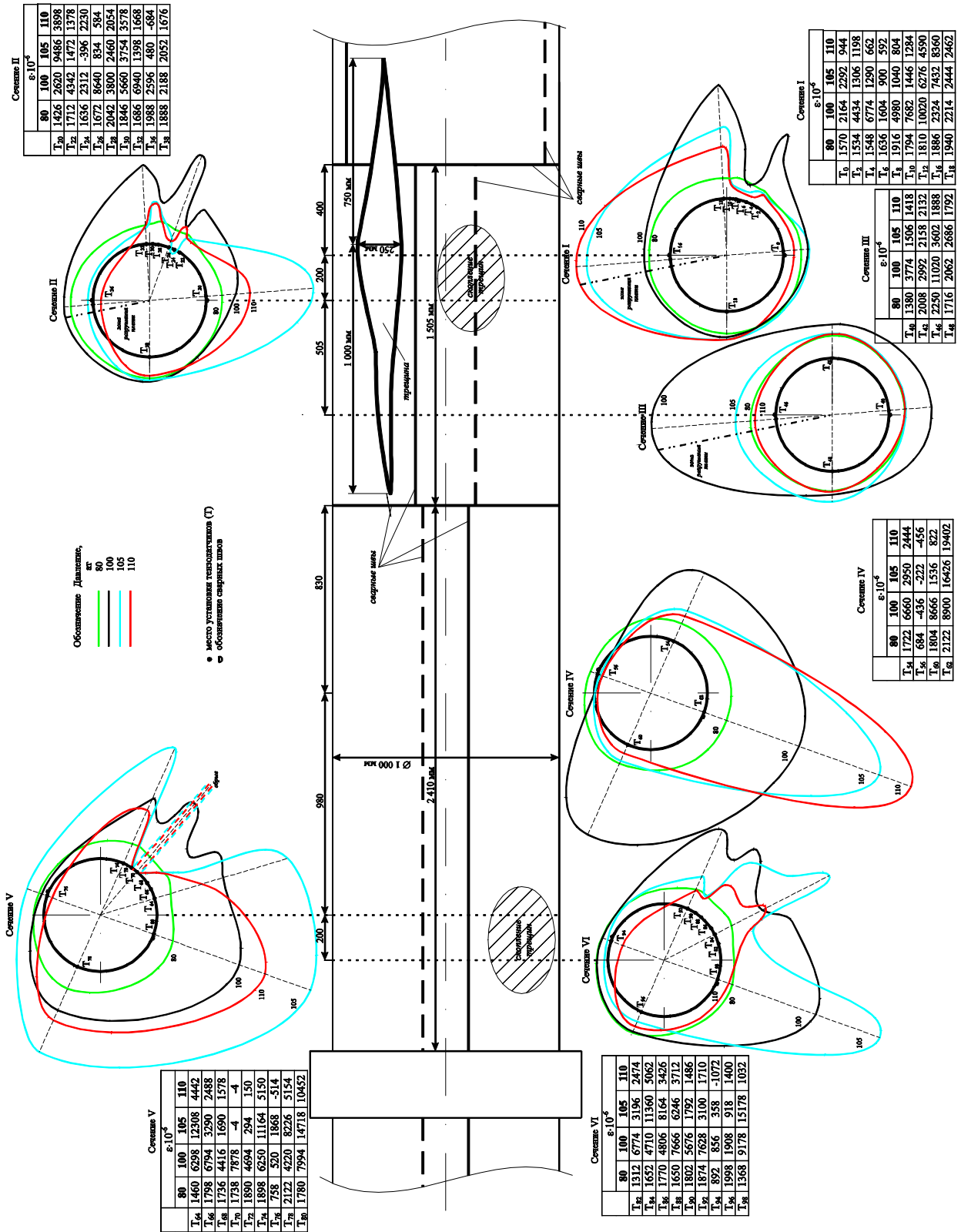


Рисунок 7 – Характер деформирования и разрушения трубной плети и эшоры окружных деформаций в ее характерных сечениях в зависимости от уровня внутреннего давления ($p > 8$ МПа)

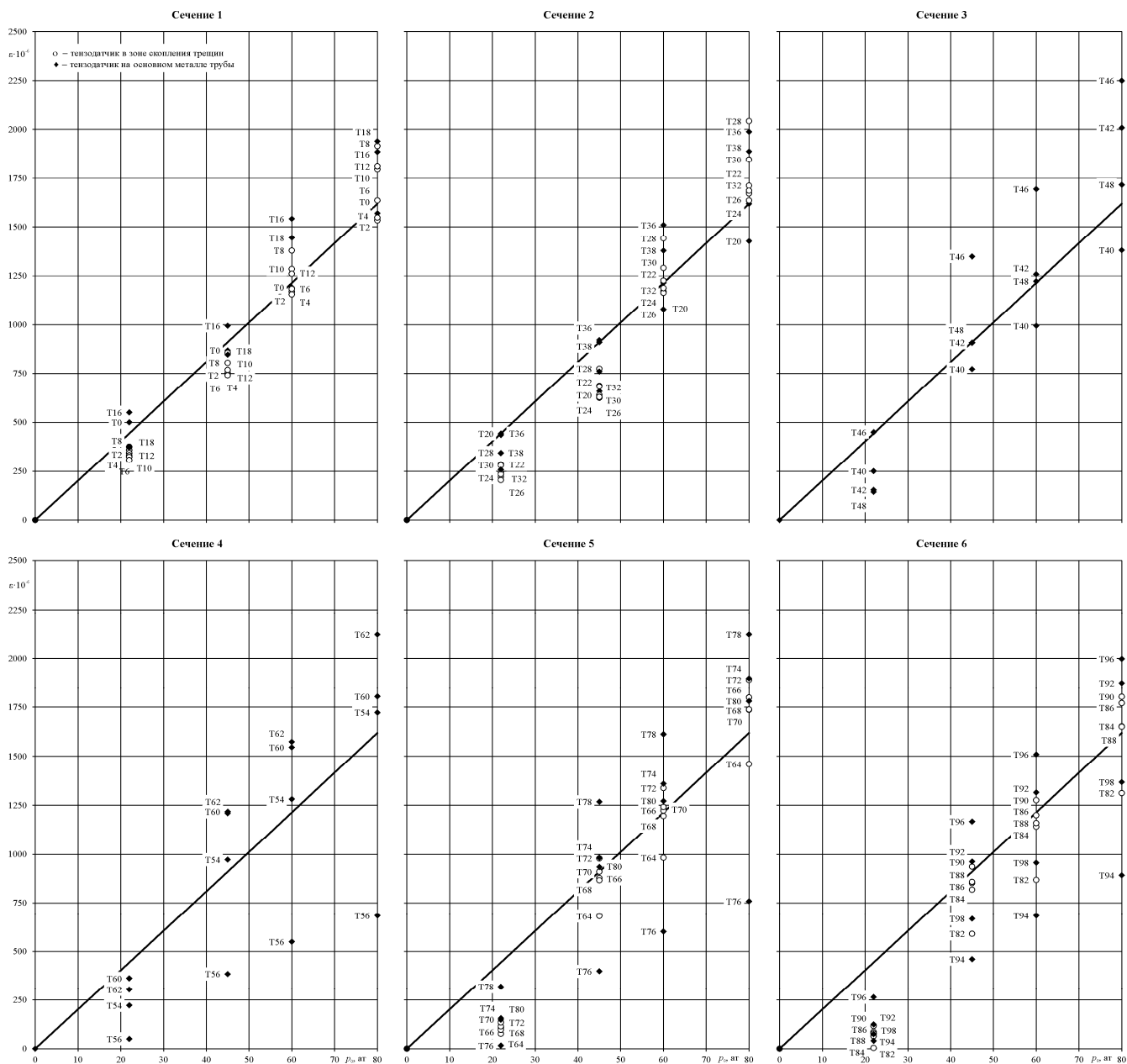


Рисунок 8 – Кривые процесса упругого деформирования (линии) на первом этапе нагружения

5 Далее трещина расходится влево и вправо по образующей трубы геометрически несимметрично. Налево (к сечению III) она развивается штатно (классически), тогда как ее форма направо (к сечению I) не ожидаема. По-видимому, встречая зону поперечного сварного шва повышенной прочности, трещина сначала получает наибольшее раскрытие, а затем, преодолевая сварной шов, принимает штатное развитие.

6 В этой связи эпюры деформирования в сечении I можно рассматривать как своеобразный частный случай затухающих деформаций (и вибраций) по отношению с сечением II, с тем, однако, принципиальным отличием, что максимальная растягивающая деформация ($\epsilon = 8 \cdot 10^{-3}$) обнаруживается уже в ожидаемой зоне трещины.

7 В сечении III распределение деформаций кажется классическим (максимальная деформация в зоне трещины), но обнаруживается непоследовательное изменение (перераспределение) наибольшей деформации в связи с ростом давления. Например, при давлении

10 МПа деформация значительно больше, чем при давлении 10,5 и 11 МПа. Такая «игра деформаций» требует, конечно, осмысления.

Б. Участок трубы без физической трещины, но со скоплением трещиноподобных дефектов (сечения IV, V, VI на рисунках 6 и 7).

Особенности эпюр деформирования здесь есть, по существу, своеобразное отражение эпюр деформирования в зоне сечений I–III. Это означает, следовательно, что ударная волна вызывает многообразные особенности деформирования трубы достаточно далеко от физической трещины (~2 м).

Обработка результатов испытаний представлена на рисунках 8–10.

Заключение

1 Экспериментально установлено, что разрушающее давление при испытании трубной плети, в которой обнаружены скопление трещиноподобных дефектов, составляет 11,3 МПа.

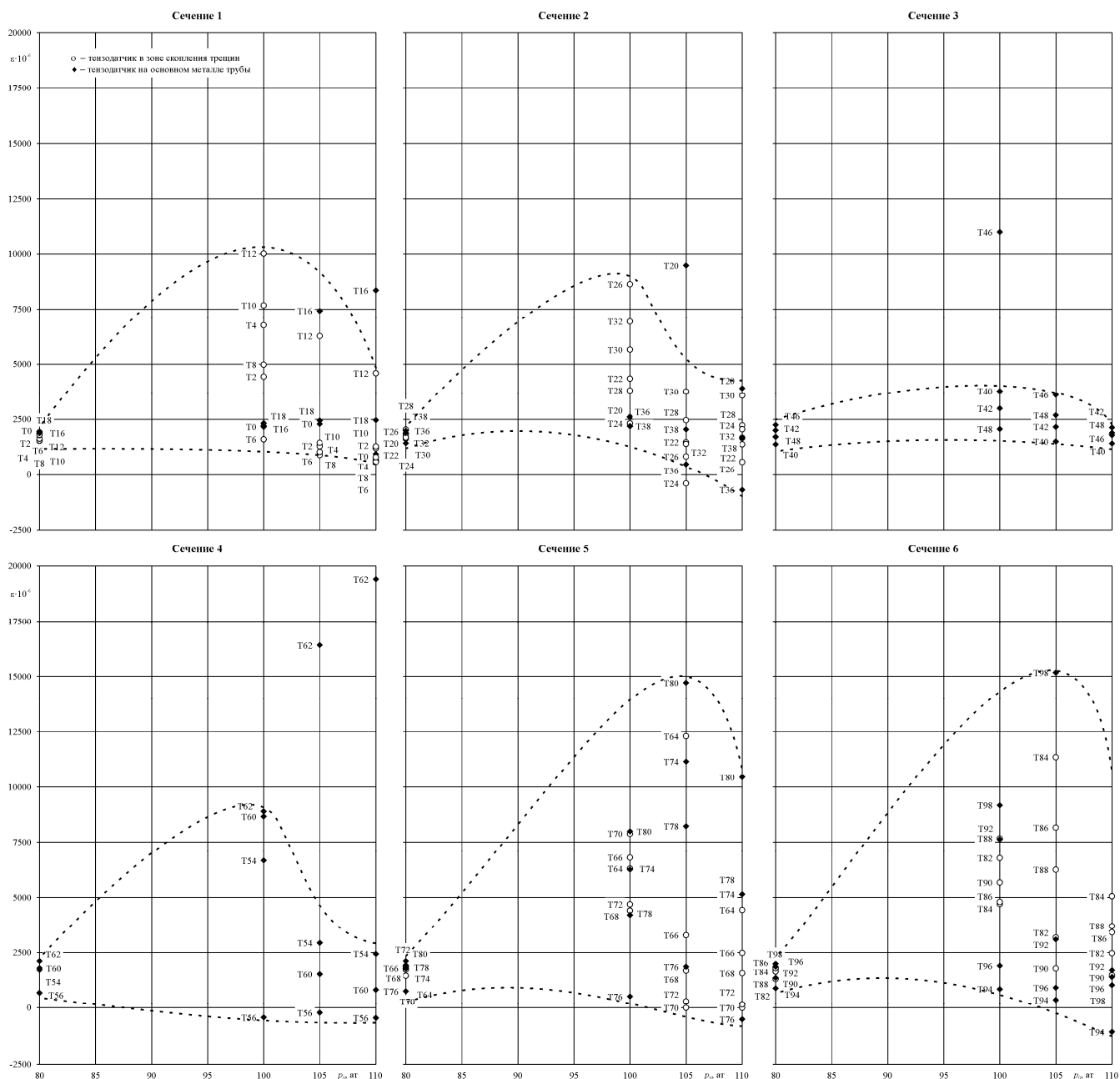


Рисунок 9 – Кривые процесса упругопластического деформирования (линии) на втором этапе нагружения

2 Разрушение плети произошло по основному металлу параллельно продольному сварному соединению на расстоянии ~ 100 мм от него. Трещина возникла в непосредственной близости к одному из поперечных сварных швов (на расстоянии ~ 300 мм от него) и развивалась (относительно сечения трубы с наибольшим раскрытием берегов) так, что был разрушен близко расположенный поперечный сварной шов. Концы остановившейся трещины расположены несимметрично относительно сечения с максимальным ее раскрытием (примерно 750 и 1000 мм).

3 На эпюрах окружных деформаций в зоне возникновения трещины обнаруживается действие гидроудара: действие наблюдается и на расстоянии ~ 2 м от разрушающей трещины.

4 В зоне действия гидроудара обнаруживаются колебания распределений деформаций (волны деформаций), при этом, в зависимости от давления, происходит активное перераспределение деформаций.

5 Обобщение рисунков 8 и 9, данное на рисунке 10, приводит к двум выводам. Во-первых, с ростом давления растет и неравномерность распределения деформаций по сечению: медленно – на первой стадии квазиупругого деформирования (до 8 МПа) и сильно – на стадии упругопластического деформирования (более 8 МПа). Однако, во-вторых, далее обнаруживается пик деформаций (см. линии средних деформаций на рисунке 10 в области давления порядка 10 МПа). Наконец, в третьих, место разгрузки трубы сопровождается интенсивным перераспределением деформаций – вплоть до возникновения сжатия в отдельных зонах (при $p_0 \sim 10,5 \dots 11,0$ МПа).

6 Неравномерность деформирования сечений трубы может описываться как своеобразное рассеяние деформаций в данных ее точках: ее особенность состоит в том, что в упругопластической области оно в 8–10 раз больше, чем в квазиупругой области.

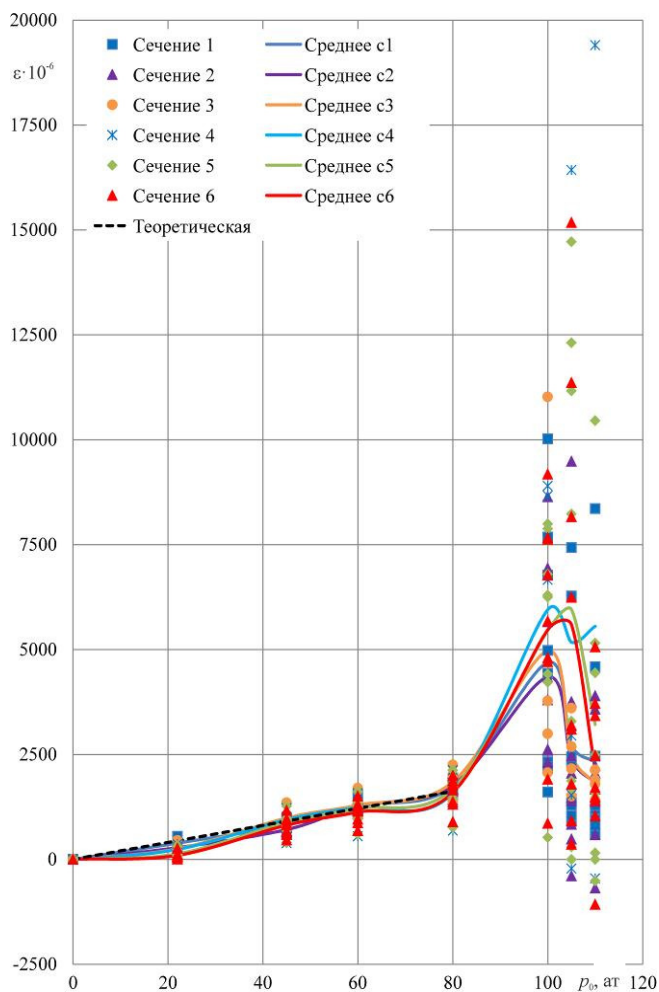


Рисунок 10 – Кривые деформирования по сечениям

Получено 20.05.2016

L. A. Sosnovskiy, S. V. Sosnovskiy, A. N. Kozik, V. V. Vorobyov, N. V. Kovalenko, S. V. Tokar, S. S. Sherbakov. Study of deformation and destruction oil pipes under load of internal pressure after prolonged use.

Studied general patterns and specific features installed pipe deformation after prolonged use (with local accumulation of micro-cracks on the inner surface) in elastic and elastic-plastic areas; described its destruction with the development of the local deformation of the shock waves.

Авторы считают, что изложенные результаты экспериментального исследования особенностей деформирования и разрушения трубной плети со скоплением трещиноподобных дефектов требуют дальнейшего осмысления и анализа. Очевидным и главным заключением здесь следует считать предложение: с целью оценки и прогнозирования ресурса нефтепроводных труб необходимы исследования возникновения и развития их повреждаемости в различных условиях. Особенное внимание следует уделить анализу ансамблей трещиноподобных дефектов, которые обнаруживаются методами ВТД, поскольку именно они «ведут» трубу к предельному состоянию (разрушению). Задача эта представляется (с теоретической точки зрения) новой и практически очень важной, ее эффективное решение потребует значительных усилий.

Список литературы

1 Методы и результаты экспериментальных исследований линейного участка нефтепровода как трибофатической системы / С. В. Сосновский [и др.] // Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск : БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 351–360.

2 Козик, А. Н. Локальные повреждения нефтепроводных труб и прогнозирование их коррозионно-механической прочности / А. Н. Козик, В. В. Воробьев, О. М. Еловой // Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск : БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 659–664.

3 Щербаков, С. С. Механика трибофатических систем / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский. – Минск : БГУ, 2010. – 407 с.