

УДК 624.014.2; 624.042.1

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА РАСТЯЖЕНИЯ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ, ОБЛАСТИ ИХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Скобло Т.С. д.т.н., профессор, Сидашенко А.И. к.т.н., профессор,
Рыбалко И.Н., к.т.н., старший преподаватель, Тихонов А.В. к.т.н., доцент,
Белкин Е.Л. инженер, Марченко А.Ю. инженер
(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
имени Петра Василенко)

Рассмотрен характер растяжения длинных стержней, что позволило определить степень и области их пластической деформации при эксплуатации.

Наблюдениями за особенностями деградации металла насосно-компрессорных труб в эксплуатации [1] требуют оценки характера их напряженного состояния. В последние годы введен в действие стандарт [2], который регламентирует подходы к расчёту напряженного состояния. Вместе с тем, этот нормативный документ не рассматривает вопросы, связанные с определением области пластичности, формируемой при эксплуатации.

Оценка области пластичности относится к задачам, которые могут быть решены с учётом жёстко пластической среды.

Целью исследований является оценка характера растяжения длинных стержней для определения степени и области их пластической деформации при эксплуатации.

За основу оценки был взят вариационный принцип наименьшего действия усилий, описанный в работах по аналитической механике [3]. Методика расчётов подробно рассмотрена в наших ранее опубликованных работах.

Представляет интерес при заданной длине трубы l определить зону (длину) пластического участка l_1 . Для этого достаточно, чтобы работа деформации пластического участка была меньше работы деформации - упруго деформируемого.

Ниже приведена таблица 1, в которой длина пластического участка соответствует предельному состоянию разрушения. Интерес представляет фактор подобия. Рассматривали 30 половинок длин труб совместно с 30 половинками в 100 раз большей длины. 9-й столбец таблицы основной. В нем приведены отношения длин зон разрушения труб меньшей относительно в сто раз большей длины. Из результатов следует, чем больше длина трубы, тем больше отношение длин этих зон, что вызывает интерес. Начиная с 65 метров в 5-м столбце, оно колеблется от $\approx 0,009$ до 0,01, что еще более интересно. В то же время числа (их порядок) представляются совершенно реальными, в пределах

принципа Сен Венано, если смотреть по отношению к толщине трубы (или $h=5,5$ мм – высоте стержня).

Таблица 1 - Сравнение параметров растяжения прямоугольных стержней, длина которых отличается в 100 раз

1 - длина в мм стержня, который принят за образец; 2 - приращение длины (мм) упругой части стержня, принятого за образец, при которой происходит разрыв пластического участка; 3 - тангенс угла упругой части стержня, принятого за образец, при котором происходит разрыв пластического участка; 4 - длина (мм) пластической части стержня, принятого за образец, при которой происходит разрыв пластического участка; 5 - длина в мм сравниваемого стержня; 6 - приращение длины (мм) упругой части сравниваемого стержня, при которой происходит разрыв пластического участка; 7 - тангенс угла упругой части сравниваемого стержня, при котором происходит разрыв пластического участка; 8 - отношение 7-го к 3-му столбцу; 9 - отношение 2-го к 6-му столбцу

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0000.5	000.002	488.6538	00.000	000050	0000.2	4.8865	0.01000	0.00015
0005.0	000.020	048.8654	00.001	000500	0002.0	0.4887	0.01000	0.00053
0050.0	000.204	004.8865	00.042	005000	0020.4	0.0489	0.01000	0.00305
0100.0	000.409	002.4433	00.127	010000	0040.9	0.0244	0.01000	0.00459
0150.0	000.613	001.6288	00.232	015000	0061.3	0.0171	0.01052	0.00565
0200.0	000.817	001.2216	00.349	020000	0081.7	0.0129	0.01052	0.00636
0250.0	001.021	000.9773	00.474	025000	0102.1	0.0103	0.01052	0.00690
0300.0	001.226	000.8144	00.604	030000	0122.6	0.0086	0.01052	0.00734
0350.0	001.430	000.6981	00.739	035000	0143.0	0.0073	0.01052	0.00769
0400.0	001.634	000.6108	00.876	040000	0163.4	0.0064	0.01052	0.00798
0450.0	001.839	000.5429	01.017	045000	0183.9	0.0057	0.01052	0.00823
0500.0	002.043	000.4887	01.158	050000	0204.3	0.0051	0.01052	0.00844
0550.0	002.247	000.4442	01.301	055000	0224.7	0.0047	0.01052	0.00862
0600.0	002.451	000.4072	01.444	060000	0245.1	0.0043	0.01052	0.00876
0650.0	002.656	000.3759	01.585	065000	0265.6	0.0040	0.01052	0.00888
0700.0	002.860	000.3490	01.730	070000	0286.0	0.0037	0.01052	0.00900
0750.0	003.064	000.3258	01.875	075000	0306.4	0.0034	0.01052	0.00911
0800.0	003.269	000.3054	02.020	080000	0326.9	0.0032	0.01052	0.00920
0850.0	003.473	000.2874	02.164	085000	0347.3	0.0030	0.01052	0.00927
0900.0	003.677	000.2715	02.306	090000	0367.7	0.0029	0.01052	0.00933
0950.0	003.881	000.2572	02.449	095000	0388.1	0.0027	0.01052	0.00939
1000.0	004.086	000.2443	02.594	100000	0408.6	0.0026	0.01052	0.00945
1500.0	006.129	000.1629	04.020	150000	0612.9	0.0018	0.01105	0.00985
2000.0	008.171	000.1222	05.434	200000	0817.1	0.0013	0.01105	0.00998
2500.0	010.214	000.0977	06.833	250000	1021.4	0.0011	0.01105	0.01005
3000.0	012.257	000.0814	08.225	300000	1225.7	0.0009	0.01157	0.01015
3500.0	014.300	000.0698	09.624	350000	1430.0	0.0008	0.01157	0.01018
4000.0	016.343	000.0611	11.015	400000	1634.3	0.0007	0.01209	0.01027
4500.0	018.386	000.0543	12.410	450000	1838.6	0.0007	0.01209	0.01029
5000.0	020.429	000.0489	13.789	500000	2042.9	0.0006	0.01209	0.01029

С помощью введенного коэффициента k_f при u можно было бы уточнить второй и шестой столбцы таблицы, чтобы сильно изменился 9-й столбец – характеризующий соотношение длин зон. Напрашивается вывод, о том существуют ли для длинных стержней соотношения между упругой и пластической частью (т.е. – растяжение длинных стержней в зависимости от приложенной силы и может ли быть одновременно и упругое состояние на большей части длины, и пластическое на меньшей)

Для больших длин труб понятие относительного удлинения требует уточнения.

Кроме того, как в теории пластичности при проведении дополнительных экспериментов требуется учитывать принцип подобия.

В этих расчетах не учитывалось упрочнение. Оно здесь очень маленькое.

При дальнейших расчетах его учитывали. Это сделали из-за следующего анализа, в котором рассмотрена пластическая деформация в форме участка половины хорды окружности. Возникает вопрос: почему такое малое упрочнение? С самого начала расчетов сделана программа оценки средних значений деформаций именно через радиусы по зависимостям. Получены гистограммы двух типов: для больших и малых длин. Затем получены гистограммы для большого количества длин. Это позволило выявить отношение длин участков.

При кручении не исключено появление участка эллипсовидности. Такой участок может появиться и при растяжении, исходя из геометрических соображений. Однако не исключено, что его деформация может оказаться меньше работы деформации растяжения.

Для сравнения анализ деформации пластичности может быть представлен не только как трапеция, но и в виде, как показано на рис 1.

Использованный подход заключается в том, что при вдавливании цилиндра в деформируемый металл меняется объем за счет изменения длины очага деформации, т.е. чем больше вдавливание, тем значительнее его длина. Этот прием используется при расчете вдавливания пирамидки и шарика для определения твердости.

В случае пластического растяжения стандартных образцов наблюдается картина, сходная с вдавливанием шарика. Разница в том, что в этом случае диаметр шарика неизвестен. В данной работе больше интересует вопрос, касающийся того, что происходит не со стандартным, а длинным образцом прямоугольной формы. Из экспериментов по растяжению рельсов длиной 25 метров известно, что вместо их равномерного растяжения отмечается значительное их пластическое удлинение на концах в районе щек разрывной машины. Форму изменения концов по аналогии с заводскими лабораторными испытаниями можно считать сегментом окружности. Точнее, половиной сегмента.

Известен диаметр образца до и после разрыва, а также его относительное удлинение.

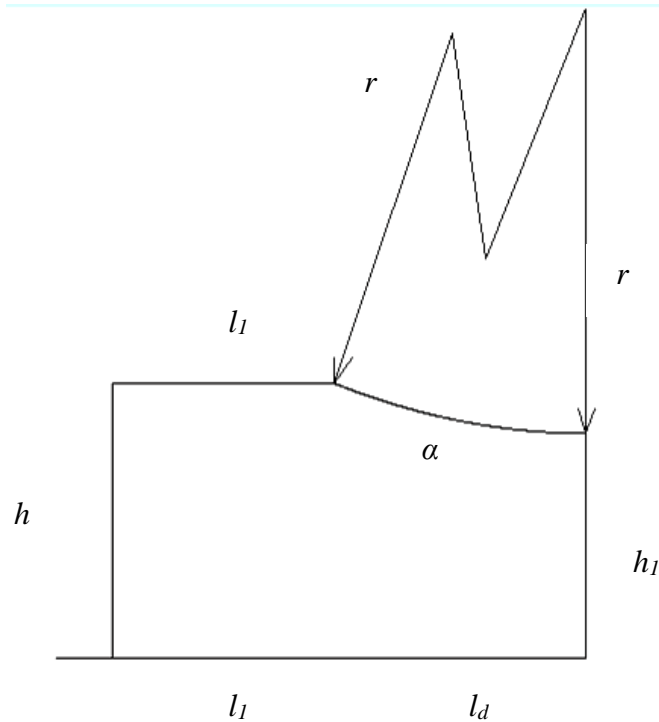


Рисунок 1 - Условие сохранения площадей

Все же с некоторым приближением его можно отнести к радиусу вдавливания:

$$l_d = \sqrt{2r\Delta h} \quad (1)$$

$$F = P_v \Delta h - \sigma_{tek} \frac{\Delta h}{h} b h \sqrt{2r\Delta h} = \min, \text{ или} \quad (2)$$

$$F = P_v \Delta h - \sigma_{tek} \Delta h b \sqrt{2r\Delta h} = \min, \text{ или} \quad (3)$$

$$F = P_v \Delta h - \sigma_{tek} \Delta h^{1.5} b \sqrt{2r} = \min \quad (4)$$

Для сокращения записи обозначим

$$C = \sigma_{tek} b \sqrt{2r}, \quad (5)$$

тогда

$$F = P_v \Delta h - C \Delta h^{1.5} = \min \quad (6)$$

Дифференцируем F по Δh и приравниваем производную к нулю:

$$P_v - 1.5C \Delta h^{0.5} = 0, \quad (7)$$

отсюда

$$\Delta h = \frac{P_v^2}{2.25C^2} = \frac{P_v^2}{4.5\sigma_{tek}^2 b^2 r} \quad (8)$$

$$\Delta h = h - h_1 \text{ (см рис. 1) } \operatorname{arctg} \alpha.$$

В приведенных выше формулах величина r не определена.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l_d}{(r - \Delta h)} \quad (9)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \alpha$$

и площадь сегмента (см. рис 1) можно представить, как:

$$s = \alpha \frac{r^2}{2} - \frac{l_d(r - \Delta h)}{2} \quad (10)$$

Условие сохранения площадей в этом случае отличается от прямой трапеции

$$hl_1 = hl_d - s \quad (11)$$

Условие сохранения площадей при прямой трапеции

$$hl_1 = xl_1(2h - xl_1u) / 2 \quad (12)$$

То есть, в этом случае можно было варьировать параметрами l_1 и u , а при рассмотрении данного случая, в силу большой нелинейности, параметрами l_d и r . При этом

$$l_1 = l_d - \frac{s}{h} \quad (13)$$

в силу условия сохранения площадей (12).

Расчет величины u в этом случае можно приближенно принять равным

$$u = \frac{\Delta h}{l_d} \quad (14)$$

Однако, нужно заранее, прежде чем делать расчеты, понимать, какую разницу в них можно ожидать. Если соотношение между радиусом и толщиной неограниченно увеличивать, то существует предельное число, равное 1.83, при котором выполняется приближенное равенство:

$$\begin{aligned} hl_1 = hl_d - s &\approx hl_d - 2.83l_d\Delta h / 2 = hxl_1 - 2.83xl_1 \cdot xul_1 / 2 = \\ &= xl_1(h - 2.83xul_1 / 2) = hxl_1 - 2.83x^2ul_1^2 / 2 \end{aligned} \quad (15)$$

Квадратное уравнение имеет вид:

$$2.83x^2ul_1^2 - 2hxl_1 + hl_1 = 0, \quad (16)$$

решением которого является (второй корень, как и в предыдущем случае не подходит)

$$x_1 = \frac{10\sqrt{2}(5\sqrt{2}h - \sqrt{50h^2 - 2.83hl_1u})}{2.83l_1u} \approx 1 + 1.42 \frac{l_1u}{h} \quad (17)$$

Последняя формула получена путем разложения в ряд Тейлора подкоренного выражения числителя.

Следует учитывать, что написанная формула верна, если

$$1 - \frac{5.66ul_1}{h} \geq 0, \quad (18)$$

чтобы не получить корень из отрицательного числа. То есть, например, при заданных h и l_1

$$u \leq \frac{h}{5.66l_1} \quad (19)$$

Последнее условие наверняка выполняется, если при разрушении

$$x_1 = 1.095 \quad (20)$$

Тогда

$$1.095 = 1 + 1.42 \frac{ul_1}{h}, \text{ или} \quad (21)$$

$$u = 0.095/1.42 \frac{h}{l_1} < \frac{h}{5.66l_1}, \text{ или} \quad (22)$$

$$u = 0.0669 \frac{h}{l_1} < 0.177 \frac{h}{l_1} \quad (23)$$

Последние неравенства почти ни о чем не говорят, поэтому выполнены расчеты с этим коэффициентом. Из расчетов видно, что решение и в этом случае существует. Есть заметная разница по относительной деформации упруго растянутого участка. По длине растянутого разрывного участка разница тоже есть и - значительная. Близость к истине могут показать только эксперименты. Если в экспериментах, применить тензометрию (тензостанции с большим количеством приклеиваемых датчиков деформации), можно оценить величину упругих и пластических деформации при разрыве образца. В расчетах упругая составляющая в зависимости от длины четко становится все большей в модели трапеции [3] она доходит до 34% от деформации предела текучести при длине трубы 1000 м. По второй - (по части окружности), рассматриваемой в такой модели, деформация доходит до 72% предела текучести. В первом случае длина разрываемого участка почти в 2 раза больше, чем во втором. Может оказаться, что для коротких длин эта модель подходит больше.

Рассматривалось 30 длин, как и в предыдущем случае. Для каждой длины рассматривали 20 вариантов отношений упругой деформации к деформации разрыва (по отношению к деформации текучести, но ввиду их близости ошибкой можно пренебречь). Тем самым определяли 20 длин участков, часть длины которых шла на упругую, остальная – на пластическую деформацию.

Рассчитывали 20 вариантов касательной деформации u в пределах, выведенных для приведенных неравенств $u = 0.19 \frac{h}{l_1} < \frac{h}{2l_1}$ (24) и (23). Итого, на каждую из 30 длин приходилось 400 вариантов (20 умножить на 20 – это 400), на которых нужно определить длину разрываемого участка, то есть, рассмотреть, какие варианты имеют работу пластического участка, меньшую работы упругой деформации всего остального стержня. Длину пластического участка определяли перебором 1000 длин от нуля до полной длины участка упругой деформации. В результате получили интервал длин с выполнением требования меньшей работы на пластическую деформацию.

В таблицах 1, 2 результатов кроме средней длины искомого участка добавлены начало и конец - пластического.

Для сокращения процесса обработки, полученных данных можно на каждой длине определять средние значения u и протяжённость пластического участка. Тогда получим 600 строк, которые еще нужно умножить на 4 из-за того, что 2 варианта моделей (трапеция и часть окружности) и 2 варианта длин (одни в 100 раз больше других). Такие графики будут отражать случайный характер процесса растяжения. Для пояснения этого, рассмотрим пример. Ниже

приводится таблица 2 некоторых результатов расчетов, описанных выше. Она состоит из 5 групп строк по 4 строки в каждой группе. Перед каждой группой написано $i=20$ или $i=3$. Первое означает, что расчет соответствует максимальному значению u . Второе - значит, что расчет соответствует почти минимальному значению u . Минимальное значение u при $i=1$.

Рассмотрим значения разности 8-го и 5-го столбцов, т.е. разность отношений упругой деформации всего стержня к - предельно упругой. Видно, что она на порядки меньше при $i=3$, чем при $i=20$. Можно и по-другому подойти, рассматривая предыдущую табл. 1. Там частоту одинаковых и разных отношений тоже можно принять за меру, рассматриваемую в теории вероятностей. Касательные деформации, как было замечено многолетним применением, ранее предложенной схемой конечных элементов, тоже можно рассматривать, как случайные величины. И принцип Сен Венано, в них тоже по сути вероятностный.

Следует отметить, что можно строить не только графики средних, но и максимальных значений, потому что они всегда коррелируют между собой. При использовании последних будет меньше ошибок при программировании.

Таблица 2 - Расчетная длина различных участков

1 - длина стержня l ; 2 - длина деформируемого отрезка на стержне l_1 ; 3 - минимальный $\tan \alpha$ угла u ; 4 - расчетная длина пластически деформируемого отрезка на стержне $x_1 l_1$; 5 - отношение упругой деформации всего стержня к предельно упругой; 6 - максимальный $\tan \alpha$ угла u ; 7 - расчетная длина пластически деформируемого отрезка на стержне $x_1 l_1$; 8 - отношение упругой деформации всего стержня к предельно упругой

Справа у каждой строки стоит номер модели: 1 – расчет разрывного участка по трапеции, 2 – расчет разрывного участка по части окружности.

	1	2	3	4	5	6	7	8	
$i=20$									
500000.0	2380.952	0000.000023	2154.7619	0.1022	0000.000462	1623.8095	0.3425	1	
005000.0	0023.810	0000.002310	0021.5238	0.1033	0000.046200	0016.2143	0.3435	1	
500000.0	2380.952	0000.000023	2023.8095	0.1614	0000.000462	0788.0952	0.7217	2	
005000.0	0023.810	0000.002310	0020.2381	0.1614	0000.046200	0007.8810	0.7217	2	
$i=20$									
005000.0	0023.810	0000.002310	0021.5238	0.1033	0000.046200	0016.2143	0.3435	1	
000050.0	0000.238	0000.231000	0000.1674	0.3198	0004.620000	0000.0560	0.8256	1	
005000.0	0023.810	0000.002310	0020.2381	0.1614	0000.046200	0007.8810	0.7217	2	
000050.0	0000.238	0000.231000	0000.1671	0.3209	0004.620000	0000.0560	0.8256	2	
$i=3$									
500000.0	0357.143	000.000154	0281.4286	0.0342	0000.003080	0162.1429	0.0881	1	
005000.0	0003.571	000.015400	0002.7036	0.0392	0000.308000	0001.2464	0.1050	1	
500000.0	0357.143	000.000154	0245.3571	0.0505	0000.003080	0117.8571	0.1081	2	
005000.0	0003.571	000.015400	0002.4250	0.0518	0000.308000	0001.0643	0.1133	2	
$i=3$									
005000.0	0003.571	000.015400	0002.7036	0.0392	0000.308000	0001.2464	0.1050	1	
000050.0	0000.036	001.540000	0000.0048	0.1398	0030.800000	0000.0003	0.1603	1	

005000.0 0003.571 000.015400 0002.4250 0.0518 0000.308000 0001.0643 0.1133 2
 000050.0 0000.036 001.540000 0000.0048 0.1398 0030.800000 0000.0003 0.1603 2
 i=20
 000500.0 0002.381 0000.023100 0002.0976 0.1280 0000.462000 0001.4095 0.4396 1
 000050.0 0000.238 0000.231000 0000.1674 0.3198 0004.620000 0000.0560 0.8256 1
 000500.0 0002.381 0000.023100 0002.0071 0.1689 0000.462000 0000.7881 0.7217 2
 000050.0 0000.238 0000.231000 0000.1671 0.3209 0004.620000 0000.0560 0.8256 2
 i=20
 000005.0 0000.024 0002.310000 0000.0082 0.7065 0046.200000 0000.0017 1.0012 1
 000000.5 0000.002 0023.100000 0000.0002 1.0012 0462.000000 0000.0002 1.0012 1
 000005.0 0000.024 0002.310000 0000.0082 0.7065 0046.200000 0000.0017 1.0012 2
 000000.5 0000.002 0023.100000 0000.0002 1.0012 0462.000000 0000.0002 1.0012 2

Во всех 3 последующих зависимостях (рис. 2-5) приведены графики, которые расположены следующим образом.

Верхний ряд соответствует минимальному tg угла u (первый слева); расчетная длина пластически деформируемого отрезка на стержне $x_1 l_1$ (второй слева); отношение упругой деформации всего стержня к предельно упругой (третий слева). Нижний ряд соответствует максимальному tg угла u (первый слева); расчетная длина пластически деформируемого отрезка на стержне $x_1 l_1$ (второй слева); отношение упругой деформации всего стержня к предельно упругой (третий слева).

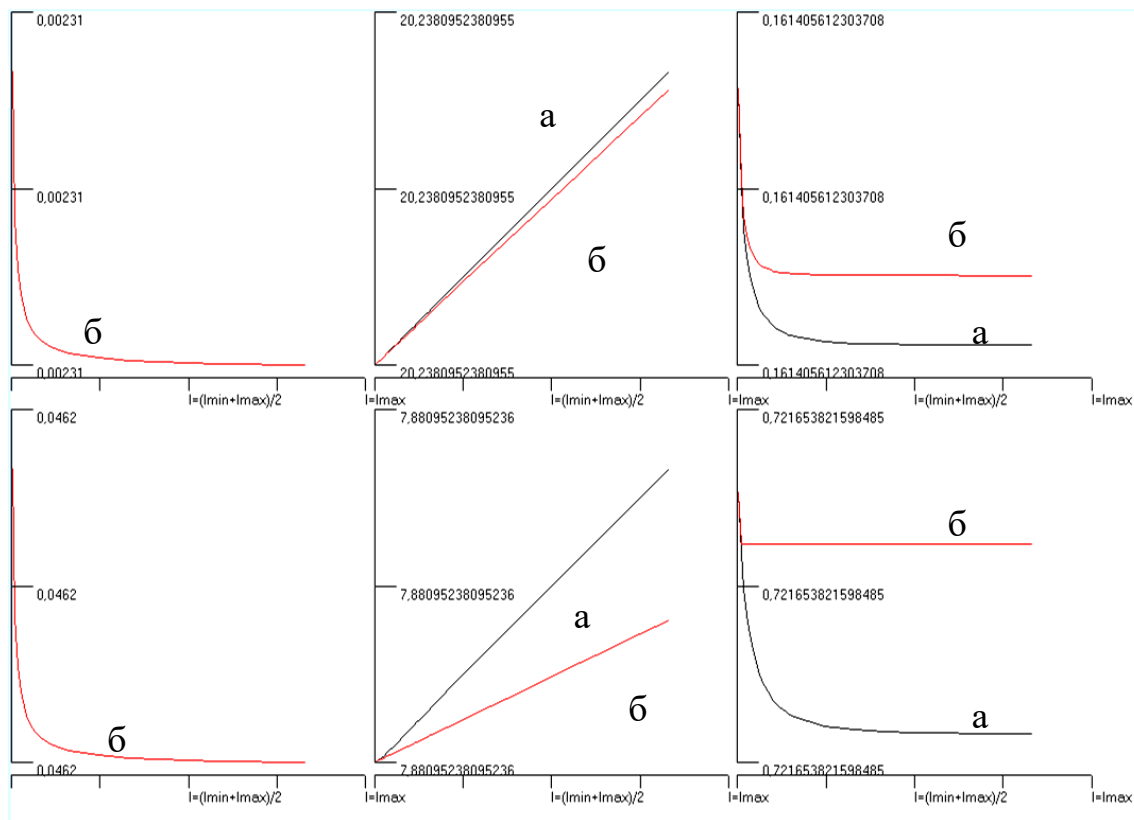


Рисунок 2 - Изменение пластичности на половине длины стержня от 50 до 500мм через 50 мм: а - приведены графики, соответствующие пластическим участкам в виде трапеции; б - пластическим участкам в виде части окружности

Рассмотрена половина длины.

В качестве примера рассмотрим в нижнем ряду рисунок третий слева. Это отношение упругой деформации к пределу текучести. С ростом длин коротких стержней оно быстро, но плавно снижается от 0.82 до 0.34. Для длинных стержней это отношение постоянное – 0.34. Короткие образцы – это половина длины, которая начинается с 50мм.

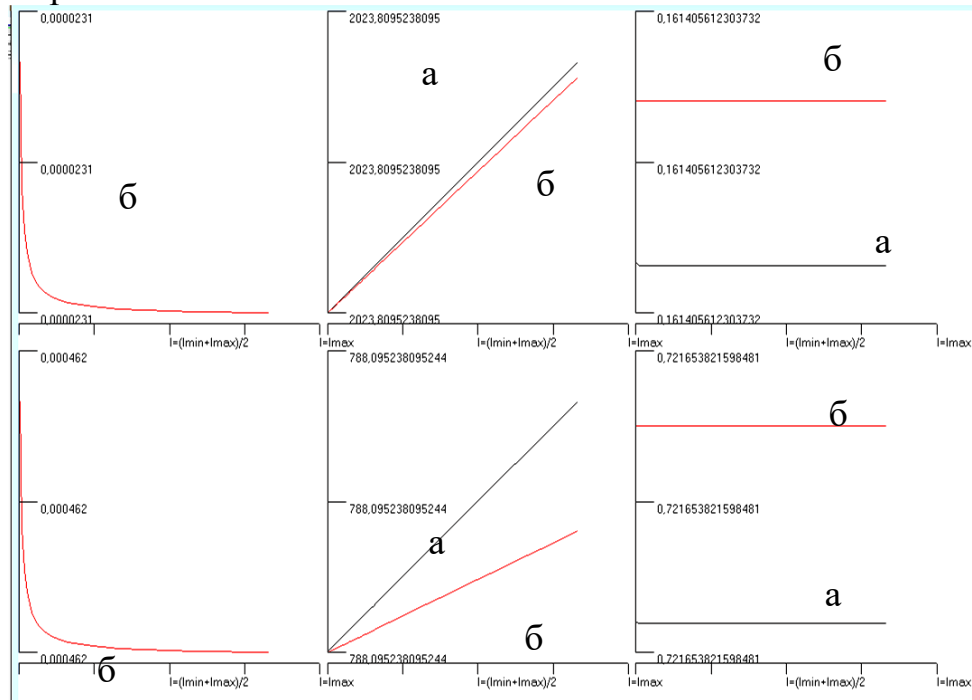


Рисунок 3 - Изменение пластичности на длине стержня от 5000 до 500000мм через 5000мм: а - приведены графики, соответствующие пластическим участкам в виде трапеции; б - пластическим участкам в виде части окружности

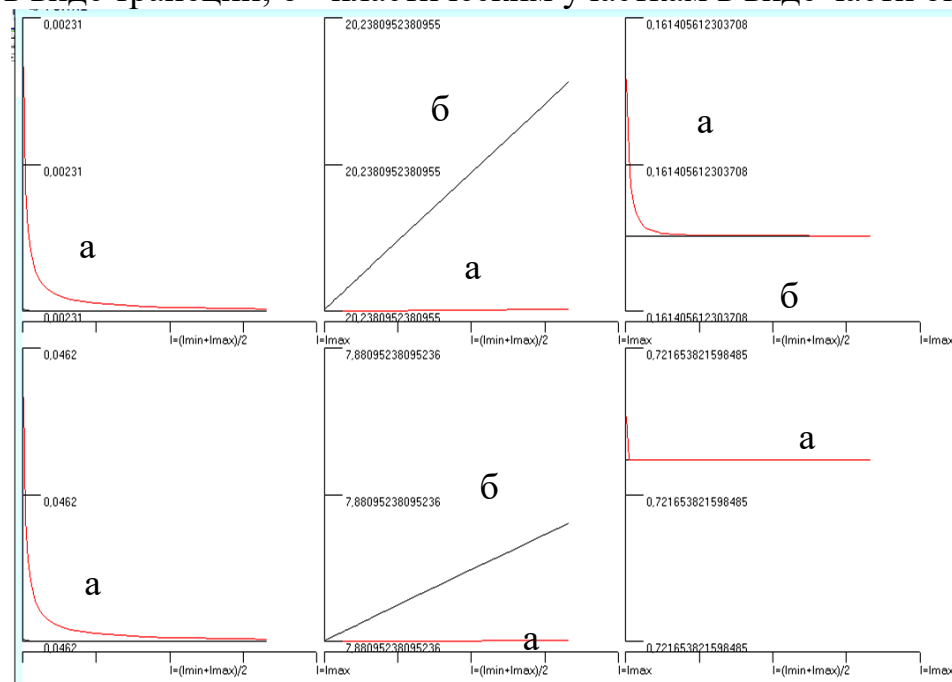


Рисунок 4 - Совмещение коротких (а) и длинных стержней (б) при пластической деформации по трапеции

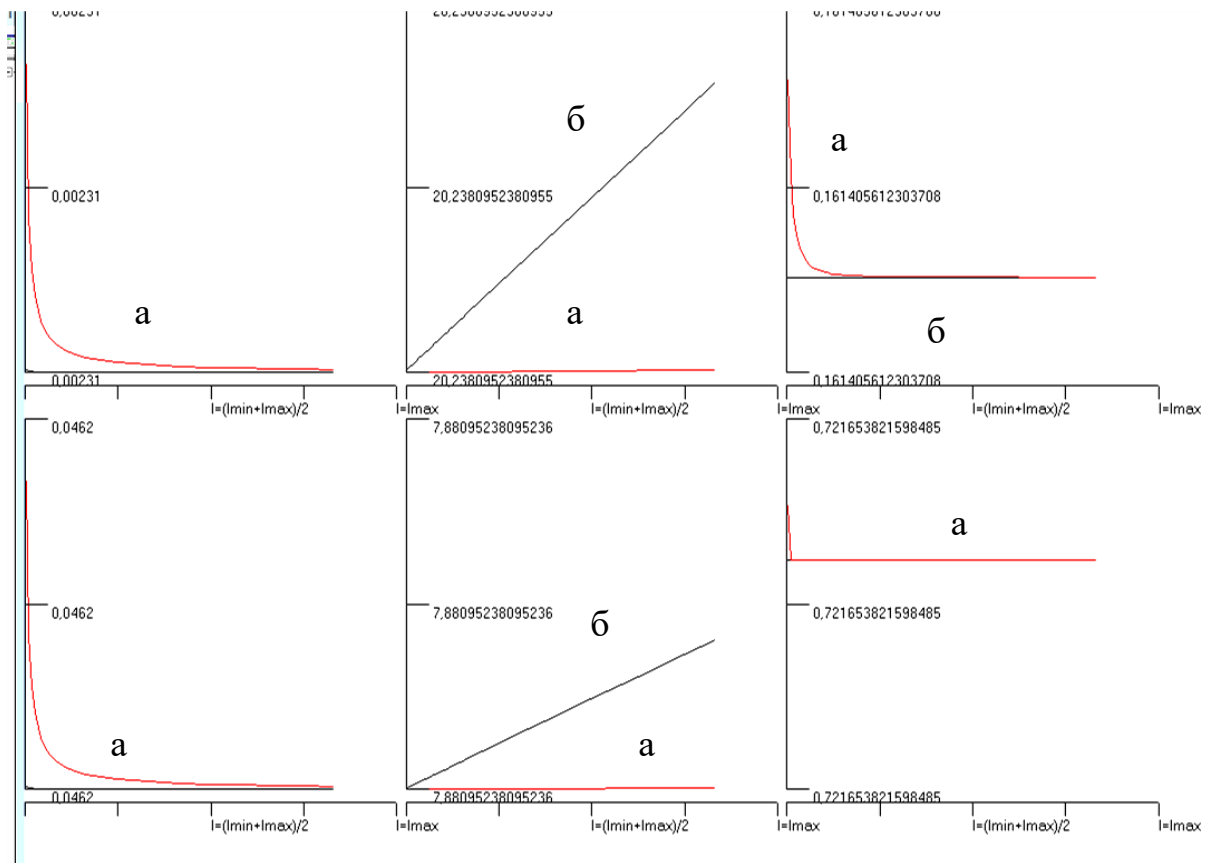


Рисунок 5 - Совмещение коротких (а) и длинных стержней (б) при пластической деформации по части окружности

На этом рисунке сохранён масштаб предыдущего (рис. 4) по вертикальной оси, чтобы наглядно видеть разницу. Но она видна и из приведенных выше таблиц.

Например, рассмотрим в нижнем ряду третий слева рисунок. Это отношение упругой деформации к пределу текучести. С ростом длин коротких стержней оно так же быстро, но плавно снижается от 0,82 до 0,72. Для длинных стержней это отношение постоянное – 0,72. Учитывая наличие характерных совпадений, следует в дальнейшем рассмотреть вариационный принцип для упруго – пластических систем.

Выводы

1. Решение задачи растяжения длинных стержней представляется актуальной, несмотря на то, что с виду кажется элементарной. Например, эксперименты с растяжением закаленных рельсов Р65 длиной 25 метров показали они пластически удлиняются на их концах. При этом нагрузка не превышала предельно упругой.

Аналогичные эффекты возникают при бурении глубоких скважин. Так, в строительном деле нельзя делать слишком большое предварительное растяжение арматуры в изгибаемых даже стандартных плитах междуэтажных

перекритий.

2. В основу расчета упруго пластического растяжения положен принцип минимума разности между работой внешних и внутренних сил. Это принцип минимума энтропии, но некоторые авторы называют его принципом минимума потенциальной энергии.

3. Основной новизной работы является расчет пластически деформируемого объема металла. В расчете учитывали принцип сохранения объема до и после деформации

4. Новизной также является приведение принципа сохранения объема к решению квадратичного уравнения. За счет разложения, его решения в ряд Тейлора с членами до второго порядка, удаётся находить минимум энтропии (потенциальной энергии) в виде формул. В них устанавливается связь между длиной пластически деформируемого участка и внешней силой.

5. Формулы получены для двух вариантов пластически деформируемых областей: в виде прямолинейной и криволинейной (по части окружности) трапеции.

Расчеты, проведенные по полученным формулам, показали, например, что только для пластического участка в виде прямолинейной трапеции с внешней силой разрушения длина такого участка равна его высоте. Это соответствует принципу Сен Венано.

Полученные формулы можно рекомендовать для обработки экспериментов по растяжению длинных стержней, потому что они содержат свободные параметры, связанные с касательными деформациями.

Их можно считать параметром касательной деформации стали, если он окажется устойчивым для анализируемой марки стали. Его физический смысл связан с относительным сужением.

Полученные формулы также показали, что для стержня, растянутого до предела текучести энтропия уменьшается только за счет пластических участков. Это полностью сходится с хорошо известным фактом образования шейки перед разрывом образца.

6. Рассмотрели разность отношений упругой деформации всего стержня к предельно упругой. Видно, что она на порядок меньше для коротких, чем - для длинных стержней.

На графиках приведены отношения упругой деформации к пределу текучести. С ростом длин стержней оно быстро, но плавно изменяется от 0,82 до 0,72. Для длинных стержней это отношение постоянное – 0,72. Рассмотрены короткие образцы, половина длины которых начинается с 50мм. У стандартных образцов, половина длины равна 40мм. Так что тензометрия для стандартных образцов покажет только отношение близкое к 1, т.е., использовать её не целесообразно.

Список литературы:

1. Скобло Т.С. Анализ влияния структурно-механических факторов на коррозионную повреждаемость насосно-компрессорных труб в условиях углекислотной скважинной коррозии / Т.С. Скобло, А.Ю. Марченко // Сталь. – М., 2014. - №12. – С. 84-88.
2. ГОСТ Р 54918 – 2012 (ISO/TR 10400: 2007) «Трубы обсадные, насосно – компрессорные, бурильные и трубы для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности» Формулы и расчет свойств, М.: Стандарт – информ 2014 – 250 с. ISO/TR 10400: 2007 Petroleum and natural gas industries – Equation and calculation for the properties of casing, tubing, drill pipe and line pipe used as casing or tubing (MOD).
3. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. / К. Васидзу - М: Мир, 1987. – 542с.

Анотація

Аналіз характеру розтягування насосно-компресорних труб і визначення ступеня, області їх пластичної деформації при експлуатації

Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Рибалко І.М., Тіхонов О.В.,
Белкін Й.Л., Марченко О.Ю.

Розглянуто характер розтягування довгих стрижнів, що дозволило визначити ступінь і області їх пластичної деформації при експлуатації.

Abstract

Analysis of character of extension of pump-compressor pipe and determination of extent of their operation plastic deformation

Skoblo T., Sidashenko A., Rybalko I., Tikhonov A., Professor,
Belkin E., Marchenko A.

In paper was consider the nature of long extension rods, which are allowed to determine the extent and scope of their plastic deformation during operation.