Скобло Т.С.,
Сидашенко А.И.,
Рыбалко И.Н.,
Белкин Е.Л.,
Марченко А.Ю.
Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, г. Харьков, Украина
E-mail: kafrm@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРА РАСТЯЖЕНИЯ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

УДК 624.014.2; 624.042.1

В работе предложена методика оценки характера растяжения насосно-компрессорных труб в эксплуатации. За основу расчётов была принята методика, приведенная в монографии Васидзу К. Для получения достоверной и наиболее полной информации эксперименты следует производить на оборудовании по растяжению и разрыву образцов различной длины (не только стандартные).

Ключевые слова: *растяжения, насосно-компрессорные трубы, принцип Сен-Венана, методика, прямоугольные стержни.*

Вступление

В последние годы введен ГОСТ [1] на расчет буровых труб. Вопрос о месте разрушения при эксплуатации труб и его характере в этом ГОСТе не рассматриваются. Много уделено внимания продольному изгибу с кручением.

В данной работе за основу расчётов была принята методика, приведенная в монографии Васидзу К. [2].

Однако, в ней также не рассмотрены вопросы, связанные с определением области пластичности. Задачи жестко пластической среды могут быть решены только с учетом определения именно этой зоны.

Постановка проблемы

Целью работы является разработка методики оценки характера растяжения длинных стержней для выдачи рекомендаций по проведению экспериментов.

Методика проведения исследований

Аналогичные подходы, особенно связанные с дифференциальными уравнениями, можно применить и к совершенно другим задачам. Например, к задачам экономики, конструкциям различных демпферов и других.

В основе оценки лежит вариационный принцип наименьшего действия, описанный в работах по аналитической механике.

Начнем рассмотрение с простейшего:

$$P\Delta l - A(\Delta l) = \min , \tag{1}$$

где P - внешняя сила; Δl - искомое удлинение от действия внешней силы; $A(\Delta l)$ - работа деформации, зависящая от удлинения.

Для случая упругой деформации растяжения она равна

$$A(\Delta l) = \frac{1}{2} E \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 V , \tag{2}$$

где E - модуль упругости (модуль Юнга); $\frac{\Delta l}{l}$ - деформация; l - длина; V - объем, $V = b \cdot h \cdot l$; b - ширина; h - высота.

В такой постановке удлинение Δl легко определяется путем дифференцирования (1) по переменной Δl и приравнивания производной нулю.

$$F = P\Delta l - \frac{1}{2}E\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 bhl = \min$$

$$\frac{dF}{d\Delta l} = P - E\frac{\Delta l}{l}bh = 0$$

Отсюда

$$\Delta l = \frac{Pl}{Ebh} \tag{3}$$

Подставляя (3) в (2), получим работу упругой деформации растяжения

$$A(\Delta l) = \frac{1}{2}E\left(\frac{Pl}{Ebhl}\right)^2 bhl = \frac{1}{2}E\left(\frac{P}{Ebh}\right)^2 bhl = \frac{P^2 l}{2Ebh}$$

Рассмотрим, чему равна предельно упругая работа деформации при

$$\frac{\Delta l}{l} = e_{tek},$$

где e_{tek} - предел текучести, который можно определить, зная напряжение текучести как

$$\frac{\sigma_{tek}}{E} = e_{tek},$$

где σ_{tek} - напряжение текучести

$$A(\Delta l) = \frac{1}{2}Ee_{tek}^2 bhl$$

Если попытаться применить такой же принцип к пластическим деформациям

$$F = P\Delta l - \sigma_{tek}\frac{\Delta l}{l}bhl = \min, \tag{4}$$

то из этого условия невозможно получить.

Обычно эта трудность обходится введением понятия упрочнения стали при пластической деформации. Считается, что кроме основного модуля упругости между пределом текучести и временным сопротивлением существует второй, гораздо меньший, который можно назвать модулем упрочнения. Считается также, что в написанном промежутке приближенно верна линейная связь между напряжением и деформацией:

$$\sigma_{ypr} = \sigma_{tek} + E_{ypr}e_{ypr},$$

где σ_{ypr} - напряжение упрочнения; σ_{tek} - предел текучести; E_{ypr} - модуль упрочнения; e_{ypr} - деформация упрочнения.

$$F = P\Delta l - \sigma_{ypr} \frac{\Delta l}{l} bhl = \min$$

$$F = P\Delta l - \left(\sigma_{tek} + E_{ypr} \frac{\Delta l}{2l} \right) \frac{\Delta l}{l} bhl = \min$$

$$F = P\Delta l - \left(\sigma_{tek} + E_{ypr} \frac{\Delta l}{2l} \right) \Delta l bh = \min$$

$$\frac{dF}{d\Delta l} = P - \sigma_{tek} bh - E_{ypr} \frac{\Delta l}{l} bh = 0$$

Отсюда:

$$\Delta l = \frac{(P - \sigma_{tek} bh) l}{E_{ypr} bh}$$

Модуль упрочнения можно определить, зная относительное удлинение стали. Для этого вместо P в полученной формуле можно принять:

$$P_b = \sigma_b bh, \qquad \Delta l = \frac{(\sigma_b bh - \sigma_{tek} bh) l}{E_{ypr} bh},$$

или

$$\Delta l = \frac{(\sigma_b - \sigma_{tek}) l}{E_{ypr}}, \qquad \frac{\Delta l}{l} = \frac{(\sigma_b - \sigma_{tek})}{E_{ypr}}.$$

Отношение $\frac{\Delta l}{l}$, которое называется относительным удлинением известно. Для анализируемой стали оно равно 0,095.

Тогда

$$E_{ypr} = \frac{(\sigma_b - \sigma_{tek})}{0.095} = \frac{100 - 93}{0{,}095} = 73{,}68 \text{ кГ/мм2}$$

Предельно упругой силой является величина:

$$P_{tek} = \sigma_{tek} bh$$

Тогда за пределом текучести:

$$\Delta l = \frac{(P - P_{tek}) l}{E_{ypr} bh}$$

Написанная формула только при малых значениях l дает приемлемые результаты.

При больших l она неприменима потому, что противоречит принципу Сен-Венана.

Для того, чтобы найти Δl, нужно чтобы второе слагаемое в (4) со знаком минус было нелинейной функцией от Δl.

Нелинейность можно ввести только за счет того, что второе слагаемое – работа деформации в свою очередь разбивается на 2 части: первая, на которую при одной и той же силе растяжения действует упругая деформация, но на ней не сохраняется объем металла, а вторая, на которой при той же силе растяжения действует пластическая деформация и на ней сохраняется объем металла. Условие сохранения объема всегда приводит к нелинейности относительно Δl .

Рассмотрим простой пример, приведенный на рис 1.

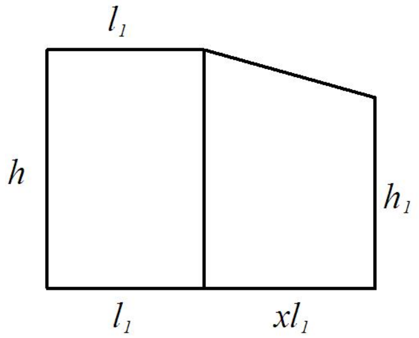

Рис 1. - Условие сохранения площадей

Считая, что при растяжении стержня, у которого ширина b намного больше высоты h , с достаточной степенью точности можно вместо условия сохранения объема записать условие сохранения площади:

$$hl_1 = xl_1\frac{h+h_1}{2}$$

Если кроме того принять, что известен тангенс угла наклона u трапеции, площадь которой приведена в правой части этого равенства, то:

$$h_1 = h - xul_1$$

Подставляя это выражение вместо h_1, получим: $hl_1 = xl_1\frac{h+h'-xul_1}{2}$, или после преобразований $2hl_1 = xl_1(2h - xul_1)$, $ul_1^2x^2 - 2hl_1x + 2hl_1 = 0$, или $ul_1x^2 - 2hx + 2h = 0$

Это уравнение с двумя корнями:

$$x_1 = \frac{h-\sqrt{h^2-2uhl_1}}{ul_1}, \qquad x_2 = \frac{h+\sqrt{h^2-2uhl_1}}{ul_1}.$$

В этом случае второй корень не подходит, потому что он очень большой.

Относительно же первого корня, считая, что $\frac{2ul_1}{h}$ на много меньше 1, его легко оценить (из матанализа):

$$x_1 = \frac{h-\sqrt{h^2-2uhl_1}}{ul_1} = \frac{h-h\sqrt{1-\frac{2ul_1}{h}}}{ul_1} \approx \frac{h-h+h\frac{ul_1}{h}+h\frac{u^2l_1^2}{2h^2}}{ul_1} = 1+\frac{ul_1}{2h} \qquad (5)$$

Причем его значение, строго больше 1.

Имеется замечание. Формула (5) получена путем разложения в ряд Тейлора до многочлена 2-го порядка.

Проверка показала, что ошибка (5) сохранения площади при максимальном относительном удлинении составляет 10 процентов (что больше, чем по ГОСТ на 0,5%) и достигает 4,2 %.

Для второго корня такая же оценка дает:

$$x_2 = \frac{h + \sqrt{h^2 - 2uhl_1}}{ul_1} = \frac{h + h\sqrt{1 - \dfrac{2ul_1}{h}}}{ul_1} \approx \frac{h + h + h\dfrac{ul_1}{h} + h\dfrac{u^2 l_1^2}{2h^2}}{ul_1} = \frac{2h}{ul_1} + 1 + \frac{ul_1}{2h}$$

При малых u получим огромное число для x_2, чего не может быть.

Итак,

$$l_1 x_1 = l_1 \frac{h - \sqrt{h^2 - 2uhl_1}}{ul_1} = l_1 + \Delta l_1, \qquad l_1 x_1 = \frac{h - \sqrt{h^2 - 2uhl_1}}{u} = l_1 + \Delta l_1,$$

$$\Delta l_1 = \frac{h - \sqrt{h^2 - 2uhl_1}}{u} - l_1 \tag{6}$$

Теперь условие минимума можно записать так:

$$F = P(\Delta l + \Delta l_1) - \frac{1}{2} E \left(\frac{\Delta l}{l - l_1} \right)^2 bh(l - l_1) - A(l_1, \Delta l_1, u) = \min .$$

$A(l_1, \Delta l_1, u)$ работа пластической деформации и она формально зависит от трех параметров, в силу предпоследней формулы (6), ее можно считать зависящей от двух параметров: $A(l_1, u)$. Но если считать l_1 и u независимыми, то невозможно при одних и тех же P и l найти единственное решение. Возникает необходимость решения вариационной задачи определения u как функции от l_1. Это сложная задача, связанная с решением дифференциальных уравнений Эйлера. В настоящей работе делали сравнительные расчеты работы деформации по описываемой прямой утонения и по сегменту окружности. Особой разницы не выявлено. Существенная разница обнаруживается при попытке оценки u с помощью предельных значений относительного удлинения или утонения. Но для рассматриваемой стали не оговаривается величина относительного утонения. Поэтому ниже приводится методика оценки u по предельному удлинению. Обозначим коэффициент предельного удлинения буквой x с индексом не 1, как в формуле для сохранения объемов, а с индексом udl, т.е. x_{udl}.

Например, для стали класса Р с предельным удлинением 0,095 $x_{udl} = 1{,}095$, тогда условие сохранения объема в предельном случае составит:

$$hl_1 = x_{udl} l_1 (2h - u x_{udl} l_1)/2, \quad \text{или} \quad h = x_{udl}(2h - u x_{udl} l_1)/2 .$$

Отсюда находим предельное значение u :

$$u = \frac{2h(x_{udl} - 1)}{x_{udl}^2 l_1} \tag{7}$$

Оно характеризует механические свойства не хуже, чем модуль упрочнения. Это тангенс угла наклона в предельном состоянии трапеции, показанной на рис. 1. То есть, величина, связанная с касательной деформацией e_{xy}, входящая в формулу интенсивности касательных деформаций:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_x - e_y)^2 + (e_y - e_z)^2 + (e_z - e_x)^2 + \frac{3}{2}(e_{xy}^2 + e_{xz}^2 + e_{yz}^2)} \tag{8}$$

$$e_x = \ln x_{udl} \approx (x_{udl} - 1), \quad e_y = -e_x, e_z = 0, \quad e_{xy} = u/2, \quad e_{xy} = u/k, \quad e_{xz} = 0, \quad e_{yz} = 0 \tag{9}$$

Коэффициент k, входящий в формулы (9), может быть использован при обработке результатов испытания металла на растяжение. При расчетах в настоящей работе он был принят равным 2.

С учетом (9) формула (8) может быть представлена в виде:

$$e_i = 0{,}47\sqrt{6e_x^2 + \frac{3}{8}u^2}$$

Работа пластической деформации участка длиной l_1, шириной b и высотой h приближенно (точнее результат можно получить с применением конечных элементов) равна:

$$a_r = \sigma_{tek} e_i b h l_1 = \sigma_{tek} 0{,}47\sqrt{6e_x^2 + \frac{3}{2}u^2}\, b h l_1$$

С учетом (7) и (9):

$$a_r = e_i = \sigma_{tek} 0{,}47\sqrt{6(x_{udl}) - 1^2 + \frac{3}{2}\left[\frac{kh(x_{udl} - 1)}{x_{udl} l_1}\right]^2}\, b h l_1 =$$

$$= \sigma_{tek} 0{,}47(x_{udl} - 1)\sqrt{6x_{udl}^2 l_1^2 + 1{,}5h^2k^2}\, bh / x_{udl}$$

Поскольку в дальнейшем будет проведено дифференцирование по l_1, то для сокращения записей используем:

$$c = 6x_{udl}^2 \tag{10}$$

$$d = 1{,}5h^2k^2 \tag{11}$$

$$a_1 = \sigma_{tek} 0{,}47(x_{udl} - 1) bh / x_{udl} \tag{12}$$

Тогда:

$$a_r = a_1\sqrt{cl_1^2 + d}\text{, а } \frac{da_r}{dl_1} = \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} \tag{13}$$

Рассмотрим формулу пластического состояния (4). Она теперь разбивается на 3 слагаемых:

$$F = P\Delta l - \sigma_{tek}\frac{\Delta l_1}{l - l_1} bh(l - l_1) - a_r(l_1) = \min, \tag{14}$$

где l_1 - длина участка, на котором произойдет разрушение (или, на котором удлинение достигнет предельной по ГОСТ величины), а работа деформации $a_r(l_1)$ рассчитывается по (12).

Предположим, что удлинение участка длиной $l - l_1$ (где l - полная длина) равно удлинению при σ_{tek}, то есть:

$$\Delta l_1 = e_{tek}(l - l_1) \tag{15}$$

Общее удлинение в таком случае можно представить, как:

$$\Delta l = e_{tek}(l - l_1) + (x_{udl} - 1) l_1 \tag{16}$$

Формула (14) с учетом (10), (11), (15), (16) переходит в:

$$F = P\left[e_{tek}\left(l - l_1\right) + \left(x_{udl} - 1\right)l_1\right] - \sigma_{tek} e_{tek}\left(l - l_1\right)bh - a_1\sqrt{cl_1^2 + d} = \min \qquad (17)$$

Получено нелинейное относительно l_1 выражение для F. Чтобы найти l_1 нужно определить производную F по l_1 и приравнять ее к нулю.

Учитывая (13), получим

$$\frac{dF}{dl_1} = P\left(-e_{tek} + x_{udl} - 1\right) + \sigma_{tek} e_{tek} bh - \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0 \qquad (18)$$

Заметим, что в этом уравнении нигде нет общей длины l. Такое уравнение можно отнести к классу локальных уравнений Сен-Венана. Это введенный в этой работе термин.

Для сокращения записи обозначим:

$$a_2 = P(-e_{tek} + x_{udl} - 1) + \sigma_{tek} e_{tek} bh \qquad (19)$$

С учетом (19) формула (18) переходит в:

$$a_2 = \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0 \qquad (20)$$

Исходя из того, что подкоренное выражение больше 0, преобразуем (20) к виду:

$$a_2\sqrt{cl_1^2 + d} = ca_1 l_1$$

Возводим обе части в квадрат:

$$a_2^2 c l_1^2 + a_2^2 d = c^2 a_1^2 l_1^2$$

и находим l_1:

$$l_1 = \sqrt{\frac{a_2^2 d}{c\left(ca_1^2 - a_2^2\right)}} \qquad (21)$$

Возвратимся к введенным обозначениям (10) - (12), (19) и (21). Множитель при P, равный $\left(-e_{tek} + x_{udl} - 1\right)$ строго больше нуля потому, что относительное удлинение на порядок превышает деформацию текучести. Поскольку в (21) в знаменателе под корнем P входит со знаком минус, то можно сказать, что с увеличением P величина l_1 растет.

Но более детальное исследование формулы (21) на компьютере показало, что если на стержне имеется участок пластичности длиной $l - l_1$, то суммарная работа деформации (второе и третье слагаемые в (17)) только возрастает от увеличения растягивающей силы P. Рассмотренный случай наиболее часто встречается. Допустим, имеет место случай, когда от слишком большого давления бура произошел в каком-то месте продольный изгиб трубы (такой, при котором продольная деформация трубы от изгиба получила пластическую деформацию). Тогда, с помощью растягивающей силы P буровой мастер пытается не только вытащить трубу вместе с буром, но и одновременно ее выпрямить.

В металлургии известен эксперимент с правкой 25 метровых рельсов растяжением. При этом ничего не получилось – пластически растягивались только концы. Известно изобретение одной австрийской фирмы «Voestalpine Stahl Donawitz GmbH», Леобен, Австрия, суть которого заключается в том, что растяжение в таком случае производится последовательно на коротких участках (по принципу движения гусеницы). Неизвестно, можно ли это изобретение использовать в пространстве обсадной трубы, но рассмотрим, работает ли вариационный принцип, если участок длиной $l - l_1$ находится в упругом состоянии. Прежде перейти к рассмотрению случая упругого состояния на длине $l - l_1$, в начале следует откорректировать зависимость(21), изменив (17) на:

$$F = P(x_{udl} - 1)l_1 - a_1\sqrt{cl_1^2 + d} = \min;$$

Теперь:

$$a_2 = P(x_{udl} - 1)$$

$$l_1 = \sqrt{\frac{a_2^2 d}{c\left(ca_1^2 - a_2^2\right)}} = hkP\left(x_{udl} - 1\right)\sqrt{\frac{1,5}{6x_{udl}^2\left[6x_{udl}^2\sigma_{tek}0,47\left(x_{udl}-1\right)bh/x_{udl} - P\left(x_{udl} - 1\right)\right]}} =$$

$$= hkP\sqrt{\frac{\left(x_{udl} - 1\right)}{4x_{udl}^2\left(6x_{udl}P_{tek}0,47 - P\right)}} = \frac{hkP}{2x_{udl}}\sqrt{\frac{x_{udl} - 1}{6x_{udl}P_{tek}0,47 - P}} \qquad (22)$$

В этой формуле обозначено $P_{tek} = \sigma_{tek}bh$ - характеризует предельно упругую силу сечения стержня.

Формула (22) формально показывает, что принцип Сен-Венана пропорционален h. Это в точности совпадает с этим принципом. Но в этом принципе лишь сказано, что длина зоны l_1 принимается в пределах от одной до 2 высот, а, 3 высоты – это уже много. У нас высота (толщина трубы) 5,5мм.

Расчеты сделаны в зависимости от k. При $k = 2$ и с силой разрушения получили 4,5мм, то есть, почти h.

Формулу (22) можно рекомендовать для обработки экспериментов по растяжению. Учитывая данные ГОСТ, можно уточнять методом наименьших квадратов параметр k (параметром касательной деформации стали). Если он окажется устойчивым для данной марки стали, то его физический смысл связан с относительным сужением.

Наиболее трудной задачей является определение упругой области при совместном наличии упругой и пластической деформаций. То, что кроме рассматриваемой задачи такие примеры существуют, можно убедиться на технологии производства гнутых профилей из широкого тонкого листа. Там очень малая по объему зона пластичности и огромная зона упругости. Казалось бы, что ее длину можно было бы считать бесконечной, но эксперименты показывают, что это не так: зона упругости ограничена короблением листа перед участком пластичности. Это можно наблюдать и визуально.

Ожидать коробления толстой трубы на участке упругости не следует. А вот на участке пластичности труба вполне может принять форму эллипса от растяжения или от скручивания. Продольный пластический изгиб уже рассмотрен. При пластическом скручивании трубы может возникнуть зона эллипсовидности.

Установлено, что в характеристиках ГОСТов относительное удлинение и сужение зависят от длины. В экспериментальных данных отсутствует такая информация.

Рассмотрим несколько моделей растяжения трубы, развертку которой можно считать прямоугольным стержнем. Постановка задач отличается только множителем при силе P.

Таким же образом, как и рассмотрено выше, можно вывести формулу, когда на части стержня имеет место упругая деформация, а на остальной – пластическая. Ее, длину, как и в предыдущем случае, обозначаем l_1. Вся длина стержня обозначается l.

Тогда:

$$F = P\left[\Delta l + \left(x_{udl} - 1\right)l_1\right] - \frac{1}{2}E \cdot \left[\frac{\Delta l}{l - l_1}\right]^2 \left(l - l_1\right)bh - a_1\sqrt{cl_1^2 + d} = \min \tag{23}$$

В (28) неизвестными считаются Δl и l_1.

Сначала находим производную (23) по Δl и приравниваем ее нулю.

$$\frac{dF}{d\Delta l} = P - E\frac{\Delta l}{\left(l - l_1\right)}bh = 0$$

Отсюда:

$$\Delta l = \frac{P\left(l - l_1\right)}{Ebh} \tag{24}$$

Затем находим производную (23) по l_1 и приравниваем ее нулю.

$$\frac{dF}{dl_1} = P(x_{udl} - 1) - E\frac{\Delta\left(l - l_1\right)^2}{\left(l - l_1\right)^2}bh - \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0 \tag{25}$$

Подставляем в (25) выражение (24):

$$\frac{dF}{dl_1} = P(x_{udl} - 1) - E\frac{P^2\left(l - l_1\right)^2}{\left(l - l_1\right)^2 E^2 b^2 h^2}bh - \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0,$$

или

$$\frac{dF}{dl_1} = P\left(x_{udl} - 1\right) - \frac{P^2}{Ebh} - \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0$$

Обозначим:

$$a_3 = P\left(x_{udl} - 1\right) - \frac{P^2}{Ebh}$$

Уравнение (24) превращается в:

$$a_3 - \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0 \tag{26}$$

Преобразуем (26), считая, что подкоренное выражение не равно 0:

$$a_3\sqrt{cl_1^2 + d} = ca_1 l_1$$

Возводим обе части в квадрат:

$$a_3^2 cl_1^2 + a_3^2 d = c^2 a_1^2 l_1^2$$

Теперь находим l_1:

$$l_1 = \sqrt{\frac{a_3^2 d}{c\left(ca_1^2 - a_3^2\right)}}$$

При этом, работа упругой деформации равна:

$$A[\Delta(l-l_1)]=\frac{P^2(l-l_1)}{2Ebh}$$

Рассмотрим несколько зависимостей, соответствующих другим функциям F , похожим на (23), но отличающиеся от нее первым слагаемым.

$$F=P\Delta l-\frac{1}{2}E\left[\frac{\Delta l}{l-l_1}\right]^2(l-l_1)\cdot bh-a_1\sqrt{cl_1^2+d}=\min \tag{27}$$

Эти результаты, получены по системе Derive, то есть, по системе с автоматическим дифференцированием и выводом формул:

$$zn=cP^2(2bEh-P)^2,$$

$$f_1=a_1bcEh, \tag{28}$$

$$f_2=\sqrt{c\left[a_1^2b^2cE^2h^2-dP^4(2bEh-P)^4\right]},$$

$$l_1=\frac{f_1+f_2}{zn}, \tag{29}$$

$$\Delta l=\frac{l_1(bEh-P)+lP}{bEh} \tag{30}$$

Второй вариант. При расчёте вариант учитывает также зависимости (28) – (30).

$$F=P(\Delta l+l_1)-\frac{1}{2}E\left[\frac{\Delta l}{l-l_1}\right]^2(l-l_1)bh-a_1\sqrt{cl_1^2+d}=\min, \tag{31}$$

$$zn=cP^2(4bEh-P)^2,$$

$$f_2=\sqrt{c\left[a_1^2b^2cE^2h^2-dP^4(4bEh-P)^4\right]}.$$

В обоих вариантах формула (30) для расчета упругого перемещения Δh от силы P одинаковы: чем больше длина стержня l, тем пропорционально больше Δh . Разница в определении пластического перемещения l_1 . По первому варианту оно больше, чем по второму. Но вопрос о влиянии длины стержня на пластическую деформацию очень важен. Испытания, в отличии от ГОСТ нужно проводить не на одной, а на нескольких разных длинах.

Во всех формулах (23), (27), (31) в третьем слагаемом, по крайней мере, один параметр – тангенс u угла наклона пластически деформируемого участка по прямой (рис 1) почти произвольный. Его можно связывать со значением касательной деформации. В начале рассмотрим ограничения на этот тангенс.

При выводе формулы (5) было написано, что удлинение x_1 довольно точно можно представить в виде $x_1=1+\frac{ul_1}{2h}$, не забывая при этом, что она верна, если $1-\frac{2ul_1}{h}\geq 0$, чтобы не получить корень из отрицательного числа. То есть, чтобы, например, при заданных h и l_1 :

$$u\leq\frac{h}{2l_1}.$$

Последнее условие наверняка выполняется, если при разрушении $x_1 = 1{,}095$, тогда:

$$1{,}095 = 1 + \frac{ul_1}{2h}, \text{ или } u = 0{,}19\frac{h}{l_1} < \frac{h}{2l_1}.$$

Кроме того, формула (5) показывает, что если имеется 2 стержня с одной и той же высотой h с одинаковым значением относительного удлинения x_1, то у них ul_1 одно и то же число. Если у двух стержней одной и той же высоты, но разной толщины имеет место одно и то же относительное удлинение и сужение, тогда длины пластических участков, на которых происходит разрушение, должны быть пропорциональны длине стержней. Вместе с тем, такой вывод противоречит принципу Сен-Венана, согласно которому длина участка разрушения соответствует порядку нескольких толщин стержня. Это может свидетельствовать о том, что относительное сужение также зависит от длины стержня. В связи с этим, эксперименты следует производить на оборудовании по растяжению и разрыву образцов различной длины (не только стандартные).

Литература

1. 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. ISO/TR 10400: 2007 Petroleum and natural gas industries – Eguation and calculation for the properties of casing, tubing, drill pipe and line pipe used as casing or tubing (MOD). - М.: Стандарт – информ, 2014 – 250 с.
2. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. / К. Васидзу - М: Мир, 1987. – 542с.

Summary

Scoblo T., Sidashenko A., Rybalko I., Belkin E., Marchenko A. Development of the methods of estimation of the character of tension pump-compressor pipes in operation

Was proposed a method of assessing the nature of stretching the tubing in use. For a basis of calculation was adopted by the procedure described in the monograph by K. Vasidzu. For the most accurate and complete information, the experiments should be carried out on the equipment for stretching and tearing samples of different lengths (not just the standard).

***Keywords**: the principle of Sen-Venana, methodology, rectangular rods, tension, pump-compressor pipes.*

References

1. GOST P 54918 – 2012 (ISO/TR 10400: 2007) «Trubyi obsadnyie, nasosno-kompressornyie, burilnyie i trubyi dlya truboprovodov neftyanoy i gazovoy promyishlennosti» Formulyi i raschet svoystv. ISO/TR 10400: 2007 Petroleum and natural gas industries – Eguation and calculation for the properties of casing, tubing, drill pipe and line pipe used as casing or tubing (MOD). - M.: Standart – inform, 2014 – 250 s.
2. Vasidzu K. Variatsionnyie metodyi v teorii uprugosti i plastichnosti. / K. Vasidzu - M: Mir, 1987. – 542s.