



УДК 621.7

И.В. Цветков
ФГБОУ ВО «Тверской государственный
технический университет»
г. Тверь, Россия
E-mail: tsvet.ivan@yandex.ru
Дата поступления 23.11.2018

РАСЧЁТ УСИЛИЙ ЭКСПАНДИРОВАНИЯ ТРУБ ДЛЯ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ

Аннотация

В статье представлены расчёты усилий при экспандировании сварных труб. Для расчётов использовался метод построения кинематически допустимых полей скоростей с использованием π -теоремы Э. Букингема. Рассмотрены три различных варианта кинематически допустимых полей скоростей, что позволило выбрать вариант поля, обеспечивающий минимальную величину мощности и усилия. Получены уравнения для определения усилий при экспандировании.

Ключевые слова: трубы, экспандирование, усилия, качество труб.

Введение

В 1878 г. в Российской Империи появился первый трубопровод для транспортировки нефти в Бакинские нефтеперерабатывающие заводы из Балаханского месторождения длиной около 10 километров [1]. На сегодняшний день общая протяжённость магистральных трубопроводов превышает 230 тыс. км [2], из которых газопроводных магистралей 160,4 тыс. км, нефтепроводных магистралей 48 тыс. км, нефтепродуктовых магистралей 19,3 тыс. км [3], и их количество продолжает расти. Важность развития и усовершенствования технологий и конструкций магистральных трубопроводов отражена в Энергетической стратегии России до 2030 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р), где в качестве приоритетных направлений научно-технического развития в газовой промышленности значится «создание отечественного оборудования, технологий и материалов для строительства и эксплуатации магистральных трубопроводных систем повышенных параметров...». А в рамках основных задач нефтяного комплекса указывается необходимость «развития транспортной инфраструктуры, в том числе трубопроводной, для повышения эффективности, диверсификации структуры и направлений транспортировки нефти и нефтепродуктов».

Современные технологические процессы изготовления сварных труб предусматривают реализацию операции экспандирования т.е. упруго-пластическую деформацию трубы при её расширении давлением нескольких твердых тел — сегментов [4-11]. Применение данной операции обусловлено, прежде всего, низкой точностью при изготовлении труб методом вальцовки с последующей сваркой продольного шва, или двух продольных швов (при изготовлении трубы из двух заготовок в форме полуцилиндров).

Анализ процесса экспандирования

На рисунке 1 показано положение экспандера в процессе деформации трубы 1 [12], здесь также показаны сегменты 2, предназначенные для реализации пластической деформации трубы при давлении на её внутреннюю поверхность, и участок зазора 3 между сегментами. После каждого цикла деформации экспандер последовательно перемещают вдоль оси трубы на определенный шаг и повторяют цикл деформации расширения трубы. Экспандирование реализуют за несколько шагов, последовательно по длине трубы, с перекрытием зоны деформации в предыдущем этапе процесса деформации. Длину зоны перекрытия определяют по формуле [13, 14]:

$$l \geq 1,1 \sqrt{\frac{1,002 \cdot (D_{\text{гт}} - h) \cdot h}{2}},$$

где $D_{\text{гт}}$ – диаметр готовой трубы;
 h – толщина стенки трубы.

Положение экспандера с двенадцатью сегментами после его ввода в трубу (до начала деформации трубы) схематично по-

казано на рисунке 2. Видно, что после введения экспандера в трубу 1 сегменты 2 и 3 имеют возможность перемещения вдоль оси x (в противоположных направлениях). Сегменты 4 и 5 предназначены для движения вдоль оси y . Поверхность AB сегмента 2 имеет цилиндрическую форму и после перемещения соприкоснется с внутренней стенкой трубы вдоль образующей цилиндра — линии C .



Рисунок 1. Экспандер в процессе деформации трубы, на трубном заводе компании Tianjin Yuantai Derun Pipe Manufacturing Group Co., Ltd (Китай)

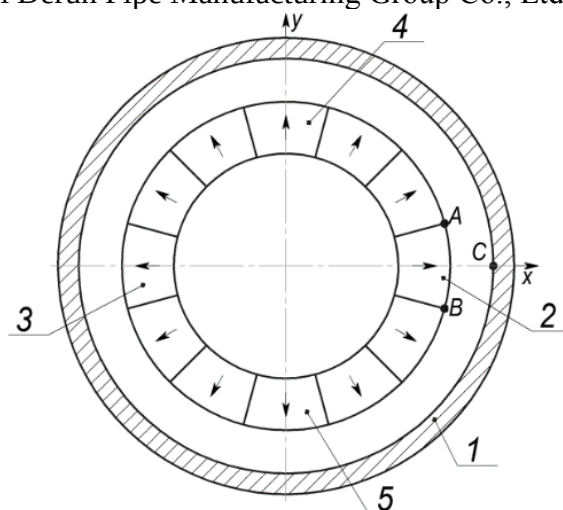


Рисунок 2. Положение экспандера при вводе его в трубу (до начала деформации трубы)

Расчёт усилий при экспандировании труб

Рассмотрим все факторы, от которых может зависеть усилие P , которое следует приложить к сегменту для деформации трубы при экспандировании по схеме, указанной на рисунке 3. В таблице 1 указаны все параметры, которые могут содержаться в функциональной зависимости, определяющей величину усилия P и их размерности.

В начале XX века Эдгар Букингем (Edgar Buckingham) сформулировал идеи т. н. π -теоремы, которая утверждает, что любое уравнение физического явления, записанное в конкретной системе единиц, может быть представлено в виде зависимости между безразмерными соотношениями, представляющими собой критерии подобия и составленными из входящих в уравнение величин [15]. На эти условия указано в ряде работ академика Л.И. Седова [16, 17, 18]. Угол α — можно измерять в радианах и считать величиной безразмерной. Обычно, при двенадцати сегментах в экспандере угол $\alpha = \frac{\pi}{6} = 0,523$.

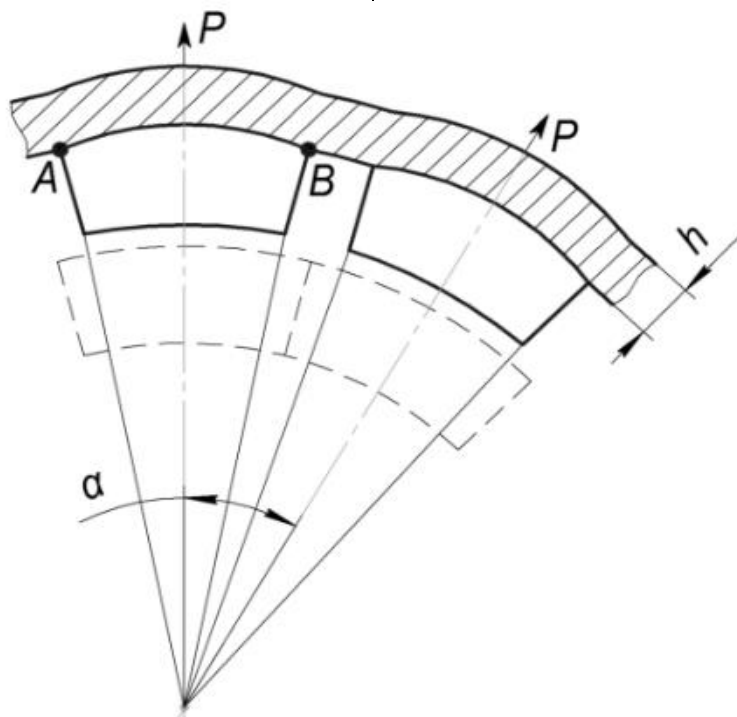


Рисунок 3. Схема перемещения сегментов экспандера в процессе деформации трубы

Таблица 1

Параметры, определяющие функциональную зависимость усилия при экспандировании

№ п/п	Обозначение величины	Наименование величины	Размерность
1	P	усилие, приложенное к каждому из сегментов	[Н]
2	α	угол раствора дуги одного сегмента или угол между центрами соседних сегментов	[рад]
3	R	наружный радиус трубы	[м]
4	h	толщина стенки трубы	[м]
5	l	длина деформируемого участка трубы	[м]
6	σ_T	предел текучести материала	[Н/м ² ~ МПа]

Из приведённых величин можно составить четыре комбинации – безразмерных независимых параметров, например:

$$A_1 = \frac{P}{\sigma_T \cdot h \cdot l}; A_2 = \frac{h}{l}; A_3 = \frac{l}{R}; A_4 = \alpha.$$

Поэтому искомое функциональное уравнение должно иметь вид:

$$f(A_1, A_2, A_3, A_4) = 0. \quad (1)$$

Если решить его относительно параметра A_1 , то получим:

$$A_1 = f(A_2, A_3, A_4) \text{ или } P = \sigma_T \cdot h \cdot l \cdot f(A_2, A_3, A_4). \quad (2)$$

Опыты показывают, что зависимость усилия от параметра $A_3 = \frac{l}{R}$ является линейной, поэтому можно сделать вывод, что функция f не зависит от параметра A_3 (линейная зависимость уже определена формулой (2)). Следовательно, формула имеет вид:

$$P = \sigma_T \cdot h \cdot l \cdot f\left(\frac{h}{R}, \alpha\right). \quad (3)$$

Такой должна быть формула для определения усилия P , которое необходимо приложить к каждому из сегментов (если учесть и упругую деформацию, то необходимо учесть модуль упругости E [МПа] и добавить еще, по меньшей мере один, безразмерный параметр, например, для идеальной пластической среды (σ_T/E), но здесь для определения верхних границ усилий мы будем использовать модель жёстко-пластической среды с использованием только одного параметра σ_T) [19].

Очевидно, что наиболее простое кинематически допустимое поле скоростей можно получить, приняв что участок трубы AB движется параллельно усилию P при срезе вдоль плоскостей, проходящих через A и B , с размером участка среза $\frac{h}{\cos(0,5\alpha)}$.

В этом случае:

$$P = k \left(\frac{2hl}{\cos(0,5\alpha)} \right), \quad P = \frac{2\sigma_T}{\sqrt{3}} \cdot \frac{hl}{\cos(0,5\alpha)}. \quad (4)$$

Срезом на краю участка длиной l и размерами $(h2R\alpha)$ можно пренебречь, т.к. $l \gg h$ и $l > R$. Формула (4) соответствует функциональной зависимости (3) при функции:

$$f\left(\frac{h}{R}, \alpha\right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{\cos(0,5\alpha)} \right). \quad (5)$$

Например, если $R = 0,5$ м, $h = 0,04$ м, $l = 2,0$ м и $\alpha = \pi/6 = 30^\circ$, то функция $f\left(\frac{h}{R}, \alpha\right) = 1,19$. По формуле (4) определим, при $\sigma_T = 500$ МПа, усилие P :

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{500 \cdot 0,04 \cdot 2}{0,965} = 47,86 \text{ МН}, \quad \text{и можно принять с запасом } 10\%, P = 50 \text{ МН}.$$

Конечно, фактически среза не происходит, но такое поле скоростей является кинематически возможным и, следовательно, определяет верхнюю границу возможных величин усилий деформации.

Согласно зависимости (4) характерна линейная зависимость усилия от величины

(hl) , и увеличение усилий с возрастанием угла α .

Разумеется, можно иначе реализовать выбор безразмерных параметров A_i ($i = 1, 2, 3, 4$). Можно, принять: $A_1 = \frac{P}{\sigma_T h^2}$, $A_2 = \frac{h}{R}$, $A_3 = \frac{l}{R}$, $A_4 = \alpha$. Тогда зависимость $f(A_1, A_2, A_3, A_4) = 0$ приведёт к формуле: $P = \sigma_T h^2 f(A_2, A_3, A_4)$.

С учётом линейной зависимости P от l получим формулу:

$$P = \frac{\sigma_T h^2 l}{R} \cdot f(A_2, A_4).$$

При таком выборе безразмерных параметров, рассмотрение кинематически допустимого поля скоростей приведёт к формуле (4) при функции:

$$f\left(\frac{h}{R}, \alpha\right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{h} \cdot \left(\frac{1}{\cos(0,5\alpha)} \right).$$

Таковы должны быть формулы, определяемые принятым полем скоростей. Но выбор параметров, соответствующей формуле (3), конечно предпочтительнее, он прямо приводит к формуле (4) для верхней оценки усилия при простой функции $f(\alpha)$, согласно формуле (2) (эта функция зависит только от α , и не зависит от параметра $\frac{h}{R}$, например, при $n = 12$, $\alpha = 30^\circ$, $f(\alpha)$ – является постоянной величиной).

В работах [10, 20] была предложена технология совместной деформации экспандирования двух труб при их стыковке (соединении) для сборки и сварки в линии трубопровода. В этом случае также применимы формулы (3) и (4) для расчётов необходимых усилий экспандирования.

Теперь построим другой вариант кинематически допустимого поля скоростей, схема которого приведена на рисунке 4. Примем, что сегмент с поверхностью A_1A в процессе экспандирования перемещается со скоростью v_0 вдоль оси y . С такой же скоростью перемещаются соседние сегменты, углы между векторами их скоростей равны $\alpha = (2\pi)/n$, где n — число сегментов.

Примем поле скоростей, состоящее из совокупности жестких зон. Зона $AOCC_1O_1A_1$ совершает движение вдоль оси y со скоростью v_0 , а жёсткая зона ABO совершает движение со скоростью v_1 по оси z_1

под углом $0,5\alpha$ к оси y . Угол между линиями AB и осью z_1 равен γ , при этом $\operatorname{tg}\gamma = (0,5AB)/h$, а размер AB :

$$\begin{aligned} AB &= CD + 2h \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha) \\ &= 2u \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha) + 2h \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha). \end{aligned}$$

Здесь u – перемещение сегментов до момента, показанного на рисунке 4а от начального положения, соответствующего соприкосновению сегментов. Угол γ между плоскостью AO и осью z_1 определён условием:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{(2u + h) \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha)}{2h} = \left(0,5 + \frac{u}{h}\right) \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha).$$

Длина отрезка AO равна:

$$\begin{aligned} AO &= \sqrt{h^2 + (u + h)^2 \cdot \sin^2(0,5\alpha)} \\ &= h \sqrt{1 + \left(1 + \frac{u}{h}\right)^2 \sin^2(0,5\alpha)}. \end{aligned}$$

Условием того, что такое поле скоростей будет являться кинематически допустимым будет непрерывность нормальных составляющих скорости на линии AO и BO .

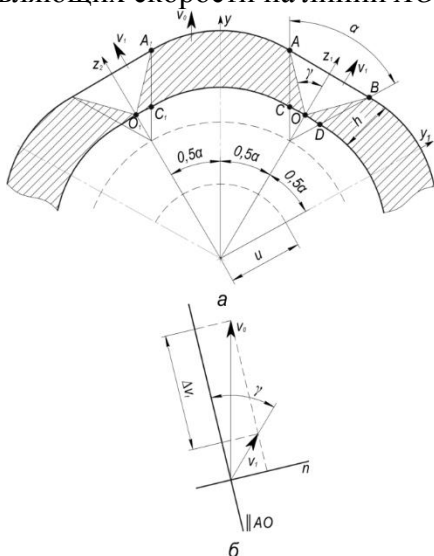


Рисунок 4. Вариант кинематически допустимого поля скоростей:

а – расположение жёстких зон; б – векторы скоростей этих зон

Схема скоростей приведена на рисунке 4б, откуда видно, что проектируя скорости v_0 и v_1 на нормаль n к границе жёстких зон AO , получим:

$$\begin{aligned} v_1 &= v_0 \frac{\sin(\gamma - 0,5\alpha)}{\sin \gamma} \\ &= v_0 [\cos(0,5\alpha) - \sin(0,5\alpha) \cdot \operatorname{ctg}\gamma]. \end{aligned}$$

Это условие определяет связь величин v_1 и v_0 , а разрыв тангенциальных составляющих скорости равен:

$$\begin{aligned} \Delta v_t &= v_0 \frac{\cos(0,5\alpha)}{\sqrt{1 + \left(0,5 + \frac{u}{h}\right)^2 \operatorname{tg}^2(0,5\alpha)}} \\ &\left\{ 1 + \operatorname{tg}^2(0,5\alpha) \left(\frac{u}{h} + 0,5 \right) - \frac{\operatorname{ctg}(0,5\alpha)}{0,5 + \frac{u}{h}} + \frac{\left[1 + \left(0,5 + \frac{u}{h}\right)^2 \operatorname{tg}^2(0,5\alpha) \right]^{1,5}}{\left(0,5 + \frac{u}{h}\right) \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha)} \right\}. \end{aligned}$$

Если при малых углах $0,5\alpha$ пренебречь величинами, содержащими $\operatorname{tg}^2(0,5\alpha)$ и принять $\cos(0,5\alpha) = 1$ то получим:

$$\begin{aligned} \Delta v_t &\approx v_0 \left[1 + \frac{1}{\left(0,5 + \frac{u}{h}\right) \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha)} + \frac{1,5 \left(0,5 + \frac{u}{h}\right)^2 \operatorname{tg}^2(0,5\alpha)}{\left(0,5 + \frac{u}{h}\right) \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha)} - \frac{1}{\left(0,5 + \frac{u}{h}\right) \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha)} \right] \\ &\approx v_0 \left[1 + 1,5 \left(0,5 + \frac{u}{h}\right) \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha) \right]. \end{aligned}$$

Мощность деформации равна:

$$N = 2k \cdot AO \cdot l \cdot \Delta v_t$$

или

$$\begin{aligned} N &= \frac{2\sigma_T h l v_0}{\sqrt{3}} \sqrt{1 + \left(\frac{u}{h} + 1\right)^2 \sin^2(0,5\alpha)} \\ &\cdot \left[1 + 1,5 \left(0,5 + \frac{u}{h}\right) \operatorname{tg}(0,5\alpha) \right]. \end{aligned}$$

Эту мощность надо приравнять к мощности внешней силы $N_I = P v_0$ и пренебрегая $\sin^2(0,5\alpha)$ получим усилие:

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \cdot h l \left[1 + 1,5 \left(0,5 + \frac{u}{h}\right) \operatorname{tg}(0,5\alpha) \right].$$

Данная функция соответствует формуле (3) при:

$$f\left(\frac{h}{R}, \alpha\right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[1 + 1,5 \left(0,5 + \frac{u}{h}\right) \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha) \right].$$

Например, если $R = 0,5$ м, $h = 0,04$ м, $l = 2,0$ м и $\alpha = 30^\circ$, $u/h = 1$, $\sigma_T = 500$ МПа, то получим $P = 74,13$ МН. Значения, определяемые этой формулой несколько выше, чем значения определённые формулой (4). Можно также построить поле скоростей содержащее на переходном участке трубы (между соседними сегментами) не одну, а две жёсткие зоны, которые совершают поступательное движение в радиальном направлении. Такое, кинематически допу-

стимое поле скоростей приведено на рисунке 5. В этом варианте имеется жёсткая зона $ABODFGA$, которая совершает движение вдоль оси y со скоростью v_0 равной скорости поверхности экспандера. На границе с соседними аналогичными жёсткими зонами (которые совершают движения вдоль осей y_1 и y_2 , рисунок 5) расположены не одна, а две жесткие зоны BOC и DOE . Их скорости равны v_1 и v_2 соответственно. На рисунке 5а показаны расположения жёстких зон, а на рисунках 5б и 5в схемы скоростей на границах соседних жёстких зон. Такое поле скоростей было построено в работе [21], для таких схем деформации, как прессование, волочение, прокатка. При реализации этих процессов происходит течение металла с уменьшением его толщины, а при экспандировании реализуется процесс с увеличением размеров деформируемых участков от DE до BC . Проекции векторов v_1 и v_2 на нормали к линиям BO и DO должны быть равны проекциям на нормали к указанным поверхностям жёсткой зоны $ABODFGA$. Для удобства, на рисунке 6 показано расположение тех же жёстких зон при их повороте на угол $0,5\alpha$. В этой схеме жёсткие зоны AOB и DOC совершают движение со скоростями v_1 и v_2 вдоль оси z , а

заштрихованные жёсткие зоны (правее BOC и левее AOD) совершают движение вдоль осей z_1 и z_2 .

На рисунках 6б и 6в показаны схемы скоростей на граничных плоскостях AO и DO . Видно, что проекции на нормали n равны, а тангенциальные составляющие скорости имеют разрывы, определяющие расход мощности деформации. Однако, приведённое в источнике [21] решение, определяет величину мощности деформации в виде:

$$N = 2kv_0l\left(\frac{h^2 + H_c^2}{h \cdot H_c}\right)h,$$

где H_c – средняя толщина трубы. Можно записать эту формулу в виде:

$$N = 2kv_0lh\left(m + \frac{1}{m}\right),$$

где $m = \frac{h}{H_c}$ – отношение толщины стенки трубы к средней толщине зоны деформации. При $N = Pv_0 = \frac{2\sigma_T}{\sqrt{3}}v_0hl\left(m + \frac{1}{m}\right)$ можно считать, что в данном случае в формуле (3) $f\left(\frac{h}{R}, \alpha\right) = \frac{2}{\sqrt{3}}\left(m + \frac{1}{m}\right)$.

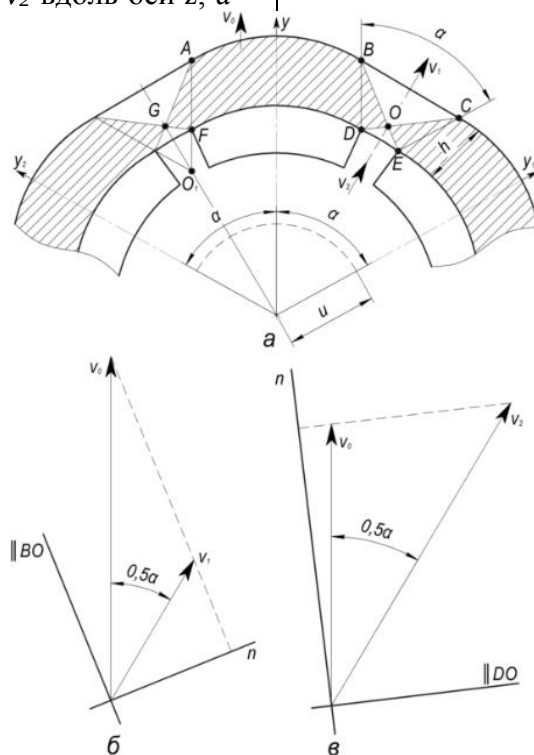


Рисунок 5. Схема варианта допустимого поля скоростей при экспандировании:
а – расположение жёстких зон; б – схема скоростей на граничной поверхности BO ;
в – схема скоростей на граничной поверхности DO

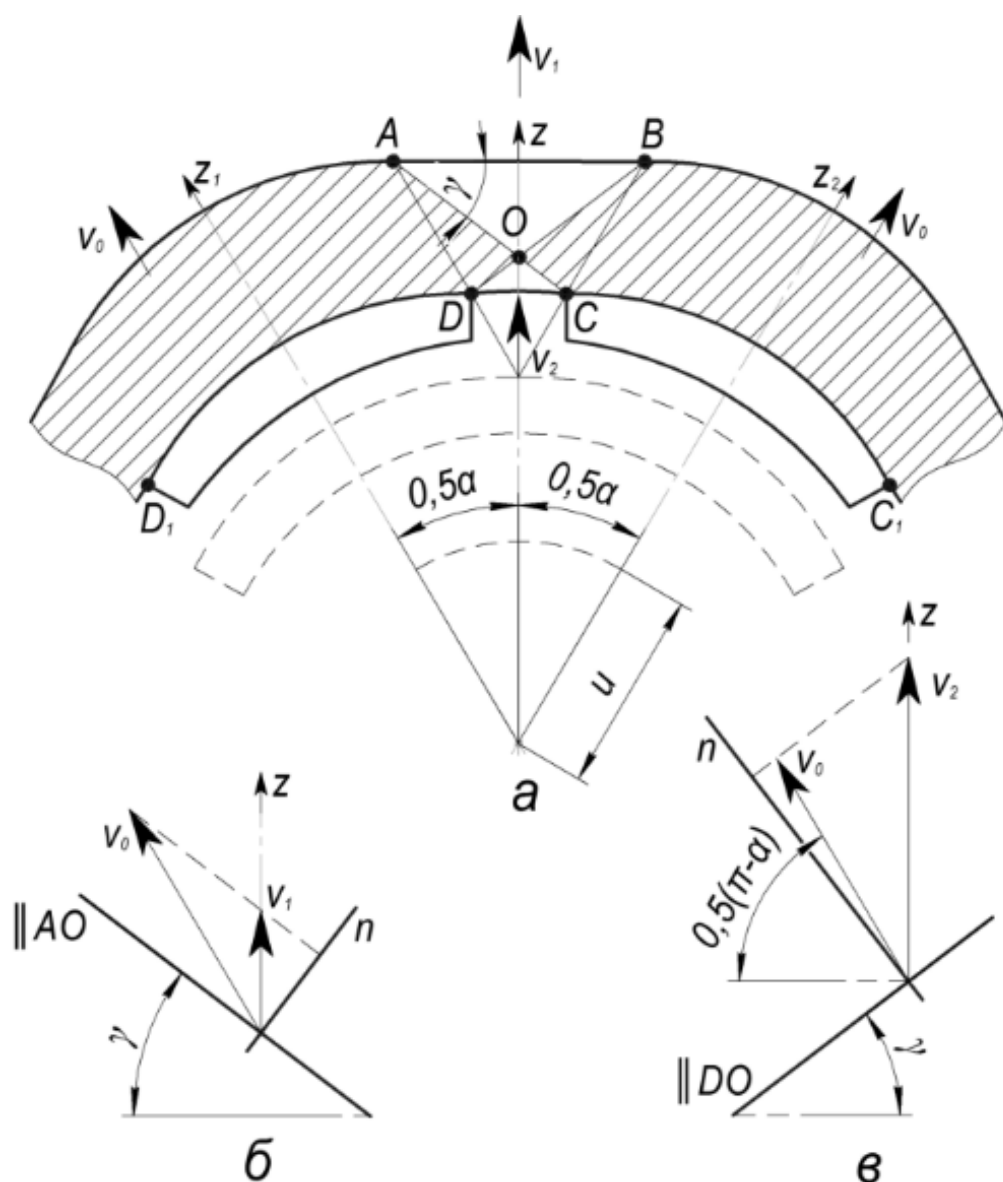


Рисунок 6. Схема кинематически допустимого поля скоростей при экспандировании
а – расположение жёстких зон; б, в – схема скоростей жёстких зон

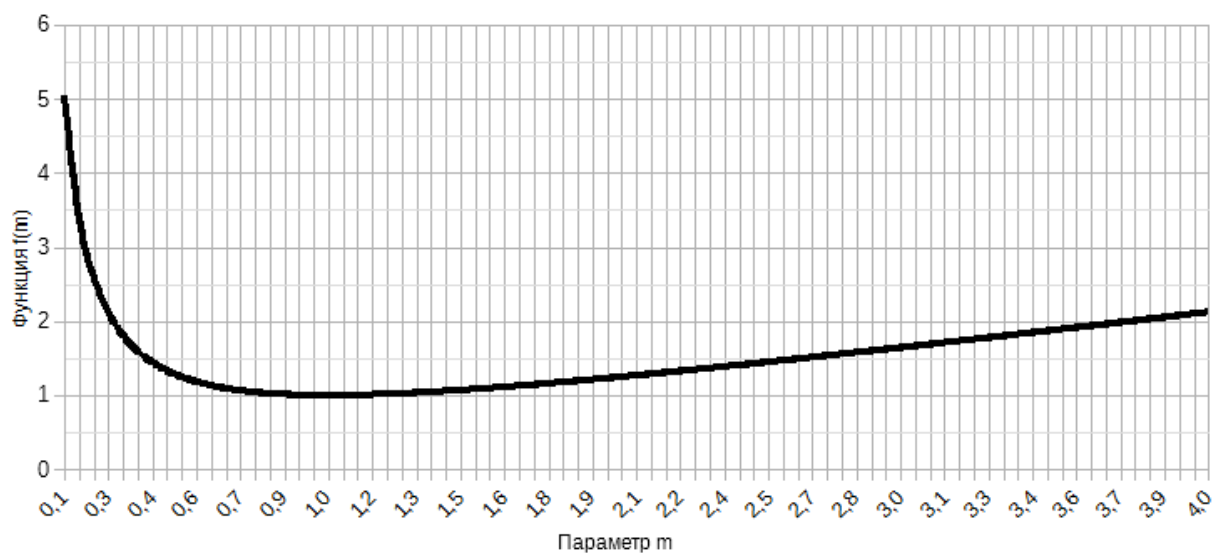


Рисунок 7. График функции $f(m) = 0,5\left(m + \frac{1}{m}\right)$

Но в данную формулу входит функция $\left(m + \frac{1}{m}\right)$, которая при $m \rightarrow 0$, стремится к бесконечности, это определяет существенное завышение величины мощности при малых m . График функции $f(m) = 0,5 \left(m + \frac{1}{m}\right)$ приведён на рисунке 7. Он определяет незначительное завышение мощности и соответственно величины усилия при величине m в диапазоне $0,5 \leq m \leq 2$. Однако при $m \rightarrow 0$ функция быстро возрастает и определяет очень сильное завышение величин мощности, поэтому следует использовать для расчётов формулу (4), определяющую меньшую величину усилия.

Заключение

В современных технологических процессах при производстве сварных труб для магистральных трубопроводов нефти и газа широкое применение нашла технологическая операция экспандирования.

Пластическая деформация, возникающая при реализации операции экспандирования, значительно повышает точность труб и способствует выравниванию геометрической формы трубы. Рассмотрение процесса пластической деформации и расчет необходимых усилий методом построения кинематически допустимых полей скоростей, позволяют сделать заключение о необходимости определения усилий, необходимых для реализации операций экспандирования труб для безошибочного выбора технологического оборудования для осуществления этого процесса.

Библиографический список

1. Иванов А.И., Никишин А.А., Макаренко О.А. Трубопроводный транспорт России конца XIX — начала XX века // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 4. С. 67-69.
2. Драчёв К.А., Римлянд В.И., Савченко В.В. Распространение акустических волн в металлических трубах // Вестник ТОГУ. 2014. № 4(35). С. 17-24.

3. Митряев С. Отечественные нанотехнологии — российской трубопроводной системе // Энергетическая стратегия. 2011. №3. С. 88-89.
4. Жмойдин Г.И. В поисках своего пути — трубный комплекс России // Производство проката. 2002. №7. С. 36-46.
5. Шинкин В.Н. Сопротивление материалов для металлургов. М.: Изд. дом МИСиС. 2013. 655 с.
6. Анучкин М.П. Прочность сварных магистральных трубопроводов. М.: Гостопиздат. 1963. 196 с.
7. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Engineering calculations for processes involved in the production of large diameter pipes by the SMS-Meer technology // Metallurgist. 2012. Vol. 56. №11-12. Pp. 833-840.
8. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю. Моделирование процесса экспандирования сварных труб большого диаметра // Сталь. 2017. №3. С. 41-43.
9. Дерикс В., Гензер Б., Новые технологии экономичного и гибкого производства труб большого диаметра // Труды XII Международной научно-практической конференции «Трубы - 2005». Ч.1. Челябинск: ОАО «РосНИТИ». 2005. С. 105-108.
10. Бровман М.Я. Усовершенствование технологии изготовления сварных трубопроводов // Машиностроитель. 2017. №6. С. 24-30.
11. Стеклов О.И., Варламов, Д.П. Анализ рисков магистральных газопроводов России по данным мониторинга результатов внутритрубной диагностики // Сварочное производство. 2013. №9. С. 28-34.
12. Информационные материалы компании Tianjin Yuantai Derun Pipe Manufacturing Group Co., Ltd. URL: <http://www.86steelpipe.com/about-us/production-process> (дата обращения: 22.11.2018).
13. Пат. 1731369 СССР, МПК B21D44/02. Способ калибрования сварных двухшовных труб на гидромеханических экспандерах / Иванов Е.И., Соболевский Э.И., Коломенский В.К., Калинушкин П.Н., Таничев А.Г., Козырев В.А., Ракитянский В.Г., Андреев

- Ю.П., Котов И.И. Кузьминский В.М.; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности. № 4765525/27; заявл. 06.12.89; опубл. 07.05.92.
14. Цветков И.В. Технологии повышения точности и надёжности сборки магистральных нефтегазопроводов // Актуальные проблемы машиноведения, безопасности и экологии в природопользовании: материалы IV-ой Международной научно-практической конференции. Т.1. Тверь: ТвГТУ, 2018. С. 173-181.
15. Тихонов А.И. Основы теории подобия и моделирования (электрические машины): Учеб. пособие / Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». 2011. 132 с.
16. Седов Л.И. Введение в механику сплошной среды. М.: Физматгиз. 1962. 284 с.
17. Седов Л.И. Математические методы построения новых моделей сплошных сред // Успехи математических наук. 1965. Т.20. вып. 5. С. 121-180.
18. Седов Л.И. Размышления о науке и учёных. М.: Наука. 1980. 440 с.
19. Цветков И.В. Методы расчёта усилий при экспандировании сварных труб // Производство проката. 2018. №5. С. 19-25.
20. Бровман М.Я., Цветков, И.В. Инновационные технологии создания магистральных трубопроводов нефти и газа // Машиностроение: инновационные аспекты развития: материалы I международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: СПбФ НИЦ МС, 2018. №1. С. 53-59.
21. Бровман М.Я. Применение теории пластичности в прокатке. М.: Металлургия. 1964. 247 с.

Information about the paper in English

I.V. Tsvetkov

Tver State Technical University,

Tver, Russian Federation

E-mail: tsvet.ivan@yandex.ru

Received 23.11.2018

CALCULATING FORCES OF THE VOLUME EXPANSION OF PIPES FOR GAS AND OIL PIPELINES

Abstract

The paper presents calculations of forces applied for expansion of welded pipes. To make the calculations, a method of constructing kinematically admissible fields of speeds, using the Buckingham π theorem. Three options of kinematically admissible fields of speeds were studied to choose an option of the field ensuring minimum power and force. Equations to calculate forces during the expansion were worked out.

Keywords: pipes, expansion, forces, pipe quality.
