

УДК 621.643

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В СОЕДИНЕНИИ «РАСТРУБ» ПРИ ДЕМОНТАЖЕ

¹Михайлов В.В., ¹Дрозд Д.А., ²Елькин А.В.

¹ФГКВОУ ВПО «Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева» (филиал), Вольск, e-mail: v_v_v_u_t@mail.ru, v_v_i_t@mail.ru;

²ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва, e-mail: 25gosnihim@mil.ru

Настоящая статья посвящена исследованию основных механических явлений, возникающих в соединении «Раструб» при демонтаже сборно-разборного трубопровода. Динамику разборки подвижного соединения труб условно можно разложить на подготовительный, основной и заключительный этапы. I этап демонтажа соединения труб характеризуется выбором всех люфтов в монтажном ключе и разъемной втулке при наклоне рукоятки монтажного ключа с началом разжатия стального запорного кольца. II этап демонтажа соединения труб характеризуется разжатием стального запорного кольца. Процесс демонтажа соединения труб завершается путем организации обратного хода рычага монтажного ключа за счет его поворота до отката в сторону раструба, монтажнику необходимо продолжить движение рычага монтажного ключа в заданном направлении до полного извлечения манжеты и разъемной втулки из раструба. Выявленные особенности динамики механических явлений на деталях соединения «Раструб» при его разборке разъемным инструментом позволяют наиболее полно исследовать процесс демонтажа подвижного соединения труб.

Ключевые слова: магистральные трубопроводы, стальное запорное кольцо, манжета, раструб, разъемная втулка, соединение труб, демонтаж

THE MODELING OF THE BASIC MECHANICAL PHENOMENA THAT ARISE IN CONNECTION «TRUMPET» WHEN REMOVING

¹Mikhaylov V.V., ¹Drozdt D.A., ²Elkin A.V.

¹Branch of the Federal State Military Educational Institution of Higher Professional Education «Military Academy of LOGISTICS behalf of the army General A.V. Khrulev»,

Volsk, e-mail: v_v_v_u_t@mail.ru, v_v_i_t@mail.ru;

²25-th State research Institute of chemmotology of the Ministry of defence of the Russian Federation, Moscow, e-mail: 25gosnihim@mil.ru

This article is devoted to the study of the basic mechanical phenomena that arise in connection «Trumpet» when removing the collapsible tubing. The dynamics of disassembly of the movable pipe connections conventionally can be divided into preparatory, main and final stages. The first stage of the dismantling of the pipe connection is characterized by the choice of all the backlash in the mounting key and the split sleeve tilt arm mounting key with the beginning of the compression of steel locking ring. II stage of the dismantling of the pipe connection is characterized by the compression of steel locking ring. The process of removing pipe connection ends through the organization of reverse lever Assembly key due to its rotation to failure in the direction of the socket, the installer is required to continue movement of the lever mounting of a key in a given direction until complete extraction of the cuff, and split bushings from the bell. The features of the dynamics of mechanical phenomena on the details of the connection «Socket» when it is the dismantling of detachable tool allow you to more fully explore the process of dismantling the movable pipe connection.

Keywords: pipelines, the union of «Flare» steps to remove, internal and external loading, steel locking ring, cuff, the split sleeve, the pipe material

Динамику разборки подвижного соединения труб условно можно разложить на подготовительный (I), основной (II) и заключительный (III) этапы.

I этап демонтажа соединения труб характеризуется выбором всех люфтов в монтажном ключе (МК) и разъемной втулке (РВ) при наклоне рукоятки МК на угол ψ (рис. 1) с началом разжатия стального запорного кольца (СЗК). До полного разжатия СЗК детали соединения подвергаются переменным нагрузкам и соответствующим суммарным упругим деформациям.

Данная система сил обусловлена двумя факторами: силой, приложенной к рычагу

МК на оси его вращения F_p , и моментом M_p , с плечом рычага l [1]:

$$M_p = F_p l.$$

Сила F_p имеет две составляющие, направленные вдоль осей OX и OY :

$$F_{px} = F_p \sin \psi; \quad F_{py} = F_p \cos \psi. \quad (1)$$

Вертикальная составляющая F_{py} через раструб соединения передается на грунт, вызывая соответствующую силу трения раструба с грунтом [2]:

$$F_T = F_{py} f_1, \quad (2)$$

где f_1 – коэффициент трения стали о грунт (его критическое значение, вызывающее сдвиг раструба, достигает максимальной величины при $f_{кр}$).

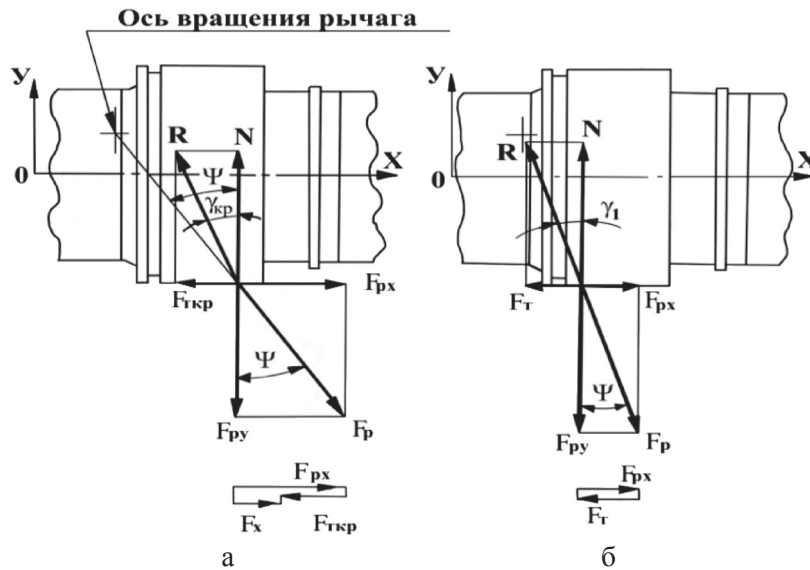


Рис. 1. Схема силового нагружения раструба соединения рычагом МК: а – в начале рабочего хода рычага; б – в конце рабочего хода рычага

Сила трения F_T направлена противоположно сдвигающей силе F_{px} и частично или полностью уравнивает ее. При этом результирующая горизонтальная осевая сила F_x способна влиять на условие равновесия раструба:

$$F_x = F_{px} - F_T \quad (3)$$

Так, в начале рабочего хода рычага МК (рис. 1, а), когда угол наклона вектора силы F_p к вертикали ψ превышает $\gamma_{кр}$, сдвигающая сила $F_{px} > F_{Tkp}$, а сила $F_x > 0$ (критическое значение силы трения $F_{Tkp} = F_{py} \cdot f_{кр}$ согласно (2) лишь частично уравнивает движущую силу F_{px}).

В заключительной части рабочего хода рычага МК (рис. 1, б) угол ψ находится в пределах $\psi = \gamma_1 \leq \gamma_{кр}$. Движущая сила F_{px} уравнивается противоположно направленной «докритической» силой трения раструба о грунт

$$F_{px} = F_T$$

а результирующая осевая сила F_x становится равной нулю

$$F_x = F_{px} - F_T = 0.$$

Подставив в равенство (3) выражения (1) и (2), получим

$$F_x = F_p (\sin \psi - f_1 \cos \psi).$$

Для обозначения сил, возникающих в сопрягающихся элементах (деталях) соединения, присвоим этим элементам

соответствующие номера: манжете – 1, СЗК – 2, раструбу – 3, микропористой подкладке – 4, РВ – 5.

К концу I этапа демонтажа элементарная сила dF_{3-2} на элемент dL СЗК заменяется элементарной силой давления РВ dF_{5-2} , направленной от точки C в сторону центра СЗК. При этом инициируется движение элемента СЗК в сторону действия элементарной силы dF_{5-2} , направленной под углом α_2 к оси Ox . Эти элементарные силы образуют уравновешенную систему сходящихся сил, а СЗК становится неподвижно зажатым между манжетой, раструбом и РВ (рис. 2).

Все элементарные силы равномерно распределены по длине СЗК, их суммирование выражается простыми определёнными интегралами. При этом суммарная осевая сила воздействия манжеты на СЗК F_{1-2} будет равна

$$F_{1-2} = \int_L dF_{1-2} \cos \alpha_1 = \cos \alpha_1 \cdot \int_L dF_{1-2}. \quad (4)$$

Аналогично выражению (4) запишем остальные суммарные осевые силы:

$$F_{5-2} = \cos \alpha_2 \cdot \int_L dF_{5-2}; \quad (5)$$

$$F_{3-2} = \cos \alpha_3 \cdot \int_L dF_{3-2} = 0 \quad (\text{при } \alpha_3 = 90^\circ). \quad (6)$$

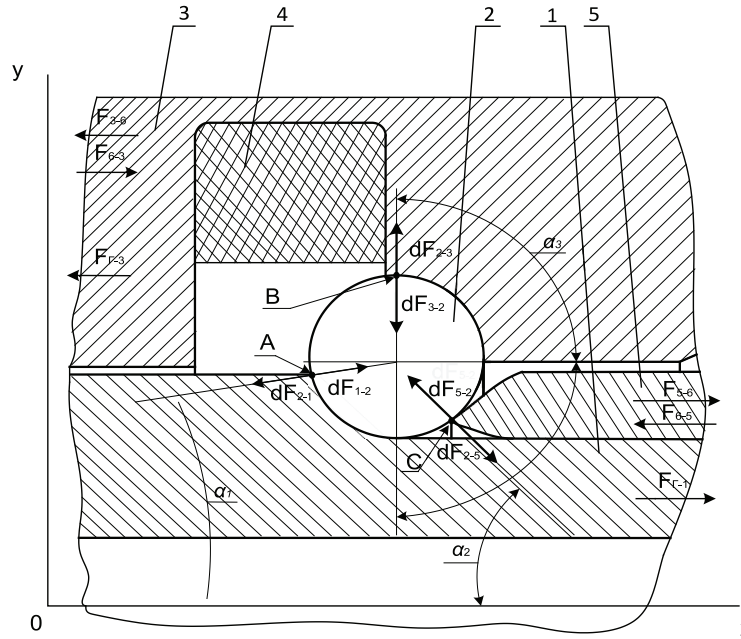


Рис. 2. Схема нагружения соединения труб на I этапе демонтажа: 1 – манжета; 2 – СЗК; 3 – раструб; 4 – микропористая подкладка; 5 – РВ

С учётом закона о равенстве действия и противодействия сил получим

$$dF_{2-1} = dF_{1-2}; \quad F_{2-1} = \cos\alpha_1 \cdot \int_L dF_{2-1}; \quad (7)$$

$$dF_{2-5} = dF_{5-2}; \quad F_{2-5} = \cos\alpha_2 \cdot \int_L dF_{2-5}; \quad (8)$$

$$dF_{2-3} = dF_{3-2}$$

$$F_{2-3} = \cos\alpha_3 \cdot \int_L dF_{2-3} = 0 \quad (\text{при } \alpha_3 = 90^\circ). \quad (9)$$

С учетом (6) условие равновесия СЗК в ходе I этапа можно записать как

$$F_{1-2} = F_{5-2}. \quad (10)$$

В начале II этапа демонтажа (рис. 3) осевая сила F_{3-2} со стороны раструба на СЗК уже более не действует. Однако с появлением

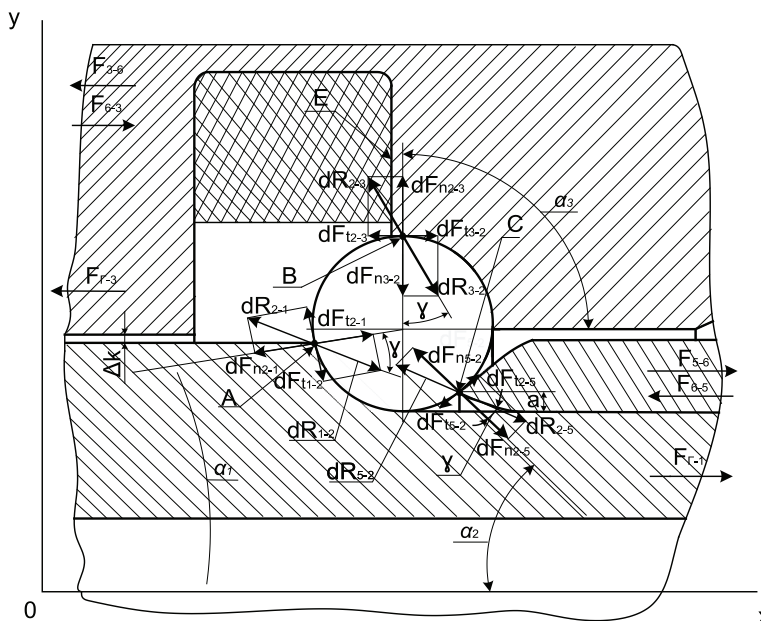


Рис. 3. Схема нагружения соединения в статической стадии II этапа демонтажа

со стороны РВ осевой силы F_{5-2} СЗК подготовлено к началу движения из радиусной выемки раструба, но ещё удерживается элементарными силами трения dF_{i3-2} , пропорциональными силам нормального давления СЗК на выемку раструба

$$dF_{i3-2} = f \cdot dF_{n2-3}, \quad (11)$$

где f – коэффициент трения скольжения СЗК по поверхностям деталей 1, 3, 5.

В статической стадии II этапа демонтажа соединения силы нормальной реакции раструба dF_{n2-3} и силы трения dF_{i3-2} дают равнодействующую элементарную реакцию dR_{3-2} , действующую на элемент dL СЗК, отклоненную от нормали к контактирующим поверхностям на угол трения $\gamma = \text{arctg } f$.

Силы трения на СЗК со стороны манжеты и РВ аналогичны (11):

$$dF_{i1-2} = f dF_{n2-1}; \quad dF_{i2-5} = f dF_{n2-5}. \quad (12)$$

Суммарная осевая сила воздействия манжеты на СЗК с учетом (12) равна

$$F_{1-2} = (\cos \alpha_1 + f \sin \alpha_1) \cdot \int_L dF_{n1-2}.$$

Используя выражения (5) и (6), получим суммарные осевые силы воздействия на СЗК со стороны РВ и раструба

$$F_{5-2} = (\cos \alpha_2 + f \sin \alpha_2) \cdot \int_L dF_{n5-2};$$

$$F_{3-2} = \int_L (dF_{n3-2} \cos \alpha_3 + dF_{i3-2}) = f \int_L dF_{n3-2}, \quad (13)$$

где α_1 , α_2 и α_3 – углы наклона нормалей к контактирующим поверхностям в точках A , C и B соответственно, относительно продольной оси трубопровода.

В формуле (13) при $\alpha_3 = 90^\circ$ каждой элементарной нормальной силе dF_{n3-2} соответствует уравновешивающая её, противоположно направленная сила. Эти силы не дают суммарной осевой составляющей. Все элементарные силы трения dF_{i3-2} направлены в одну сторону параллельно продольной оси трубопровода и, суммируясь, дают осевую равнодействующую силу трения F_{i3-2} , равную F_{3-2} .

Оценим меру влияния сил трения в местах взаимодействия СЗК с деталями 1, 3 и 5 на потребную осевую силу F_{5-2} действующую на кольцо со стороны РВ. Для элемента dL СЗК уравнения равновесия, составленные с учётом коэффициента трения f и отклонения равнодействующих эле-

ментарных реакций dR от нормали в точках взаимодействия на угол трения γ имеют вид по оси OX :

$$dR_{1-2} \cos(\alpha_1 - \gamma) - dR_{5-2} \cos(\alpha_2 - \gamma) + dR_{3-2} \sin \gamma = 0; \quad (14)$$

по оси OY :

$$dR_{1-2} \sin(\alpha_1 - \gamma) + dR_{5-2} \sin(\alpha_2 - \gamma) - dR_{3-2} \cos \gamma = 0. \quad (15)$$

В дальнейших алгебраических преобразованиях при любых сочетаниях элементарных и суммарных сил взаимодействия деталей 1, 2, 3 и 5 можно использовать следующие зависимости [3]

$$dF_n = dR \cos \gamma; \quad dF_t = f dF_n = \text{tg } \gamma dF_n; \\ dF_t = dR \sin \gamma; \quad (16)$$

$$dF_r = dR \sin(\alpha - \gamma); \quad dF_a = dR \cos(\alpha - \gamma);$$

$$F_a = \cos(\alpha - \gamma) \int_L dR, \quad (17)$$

где α – угол наклона нормали к продольной оси трубопровода в точке взаимодействия деталей, определяющих радиальную составляющую силу dF_r и осевые составляющие сил dF_a или F_a .

Полагая, что осевое усилие воздействия грунта на манжету $F_{\Gamma-1}$ от одной ветви трубопровода равно усилию воздействия грунта на растроб $F_{\Gamma-3}$ от другой ветви ($F_{\Gamma-1} = F_{\Gamma-3}$) [4], выполнив в (14) и (15) алгебраические преобразования с учетом зависимостей (16)–(17), окончательно получим формулу для определения суммарной осевой силы трения F_{3-2} , действующей на СЗК со стороны раструба

$$F_{3-2} = F_{\Gamma-1} \frac{f [\text{tg}(\alpha_1 - \gamma) + \text{tg}(\alpha_2 - \gamma)]}{1 - f \text{tg}(\alpha_2 - \gamma)}. \quad (18)$$

Сдвиг СЗК относительно радиусной выемки раструба одновременно характеризуется сдвигом демонтируемой трубы. При этом РВ, воздействуя на СЗК с осевой движущей силой F_{5-2} , преодолевает суммарную осевую силу F_{3-2} и силу натяжения трубопровода $F_{\Gamma-1}$ (или $F_{\Gamma-3}$), что выражается уравнением

$$F_{5-2} = F_{3-2} + F_{\Gamma-1}.$$

С учетом (18) зависимость для определения F_{5-2} можно выразить как

$$F_{5-2} = F_{\Gamma-1} \frac{1 + f \text{tg}(\alpha_1 - \gamma)}{1 - f \text{tg}(\alpha_2 - \gamma)}. \quad (19)$$

Для определения величин F_{3-2} и F_{5-2} необходимо знать углы α_1 и α_2 .

Принимая значения радиуса (r) сечения СЗК и зазора (Δk) между манжетой и раструбом (определяется по проекции на ось OY расстояния от верхней кромки радиусного выступа манжеты до центра сечения СЗК), среднее значение угла α_1 можно определить выражением

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{\Delta k}{r}.$$

Величины f , γ и α_1 определены законом трения скольжения и заданными при проектировании конкретными размерами деталей соединения «Раструб».

Влияние величины угла α_2 сказывается на взаимодействии СЗК с нагруженными деталями демонтируемого соединения. Так, согласно (19), с увеличением значения угла α_2 осевая движущая сила F_{5-2} возрастает. Среднее значение угла α_2 можно определить выражением

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{r - a}{r},$$

где a – координата точки C , совпадающей с точкой сопряжения окружности элемента dL кольца с образующей рабочего конуса РВ.

Когда суммарная сила трения F_{13-2} и осевая сила F_{3-2} под действием возрастающего усилия монтажника и осевой движущей силы F_{5-2} достигают критических значений ($f = f_{кр}$), статическая стадия II этапа демонтажа завершается полной готовностью к сдвигу СЗК (вместе с РВ и манжетой) от-

носительно контактной точки B к кромке радиусной выемки раструба.

Динамическая стадия нагружения II этапа демонтажа начинается с разжатия СЗК, когда его средняя плоскость выходит за пределы радиусной выемки раструба и продолжает движение влево от поперечной плоскости E раструба (рис. 4). При этом изменяется распределение сил по дуге СЗК в местах его взаимодействий с РВ, меняются углы наклона нормалей и векторов нормальных сил в местах взаимодействий с манжетой α_1 и раструбом α_3 [5].

На стадии динамического нагружения радиальные составляющие всех действующих на СЗК сил вызывают его радиальные перемещения Δr , а появляющаяся со стороны раструба осевая составляющая – осевые перемещения Δx . С увеличением радиальных перемещений СЗК возрастают радиальные усилия его разжатия и движущая суммарная осевая сила F_{5-2} .

При разжатии СЗК на него действует векторный силовой комплекс:

- со стороны РВ – отклонённый от нормали на угол трения вектор равнодействующей силы F'_{5-2} (резльтирующий вектор сил F'_{n5-2} и F'_{t5-2});

- со стороны раструба – отклонённый от нормали на угол трения вектор силы F'_{3-2} (его действие учитывается на пятне контакта в сечении кольца);

- со стороны манжеты – отклонённый от нормали на угол трения вектор сил F'_{1-2} (его действие также учитывается на пятне контакта в сечении кольца).

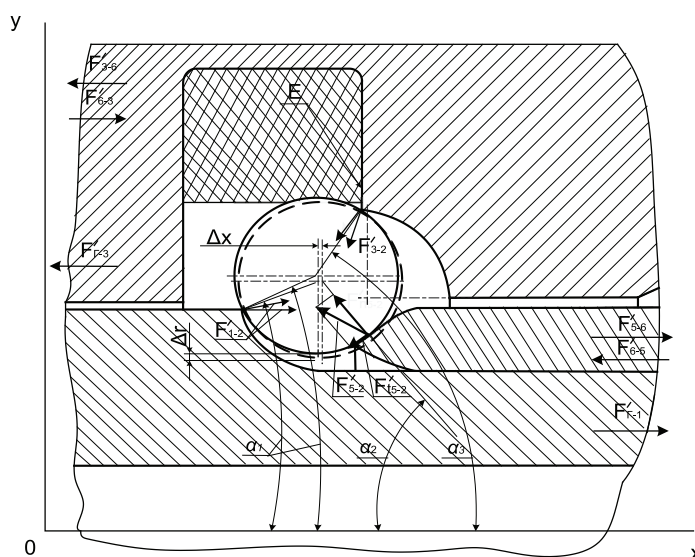


Рис. 4. Схема нагружения соединения в динамической стадии II этапа демонтажа (начальный период разжатия СЗК)

На динамической стадии II этапа демонтажа перемещения манжеты относительно раструба и особенности передачи осевого силового потока от трубы к трубе через демонтируемое соединение и МК обеспечивают высокую вероятность значительного изменения связей трубопровода с грунтом и усилий его натяжения в соединениях с соблюдением условий неравенства ($F'_{\Gamma-1} = F'_{\Gamma-3}$) \neq ($F_{\Gamma-1} = F_{\Gamma-3}$). При этом выражение силового потока можно представить рядом

$$F'_{\Gamma-1} = F'_{2-1} = F'_{1-2} = F'_{\Gamma-3}. \quad (20)$$

При выводе выражения (20) также использовались зависимости (16)–(17).

Динамическая стадия II этапа демонтажа характеризуется моментом прекращения соприкосаний СЗК по всей длине L дуги с кромкой радиусной выемки раструба и выталкиванием кольца в полость микропористой подкладки. При этом осевые составляющие F'_{3-2} силового воздействия раструба на СЗК отсутствуют и не вызывают нарушения плоскостности его осевой линии.

Учитывая незначительное силовое воздействие на СЗК микропористой подкладки, можно утверждать, что при дальнейшем разжатии кольца на него действует система сил со стороны РВ и только одной из двух деталей соединения:

а) до радиуса R_{p1} – РВ и манжеты (рис. 5, а);

б) до радиуса R_{p2} – РВ и поперечной стенки E_1 раструба (рис. 5, б).

В условиях изменения силы натяжения трубопровода $F''_{\Gamma-1}$ (или $F''_{\Gamma-3}$) и возрастания суммарной движущей осевой силы F''_{5-2} ди-

намика развития механических явлений при условно постоянном коэффициенте трения между кольцом и сопряжёнными деталями соединения может быть следующей.

При большой силе $F''_{\Gamma-1}$ натяжения трубопровода разжатие СЗК происходит при минимальном зазоре δ . С достижением радиуса разжатия R_{p1} СЗК сечениями в точках A_1 и H опирается на манжету и РВ и под действием осевого усилия F''_{5-2} сдвигается к стенке E_1 раструба к точке B_1 (рис. 5, а).

С увеличением движущего осевого усилия F''_{5-2} передняя кромка РВ упирается в радиусный выступ манжеты, инициируя под действием суммарного усилия F''_{5-1} ее движение внутрь раструба. При этом СЗК с достижением радиуса разжатия R_{p2} своими сечениями в точках A_2 и K опирается на манжету и РВ и вместе с ними сдвигается до упора в поперечную стенку E_1 раструба в точке B_2 (рис. 5, б). Манжета под действием силы F''_{5-1} продолжает движение, ее контакт с СЗК в точке A_2 прекращается и силовое взаимодействие переносится в точку B_2 . Для II этапа демонтажа изложенного понимания наиболее значимых механических явлений достаточно. Имея общее представление об их развитии, можно перейти к описанию III этапа демонтажа.

При достижении контакта торца манжеты с раструбом ее движение прекращается, а радиус разжатия СЗК достигает значения R_{p3} (рис. 6). При этом разжатое СЗК закатывается на поверхность РВ, его контактные точки перемещаются в положение N на поверхности РВ и B_3 на стенке E_1 раструба. С полным разжатием СЗК зафиксированная

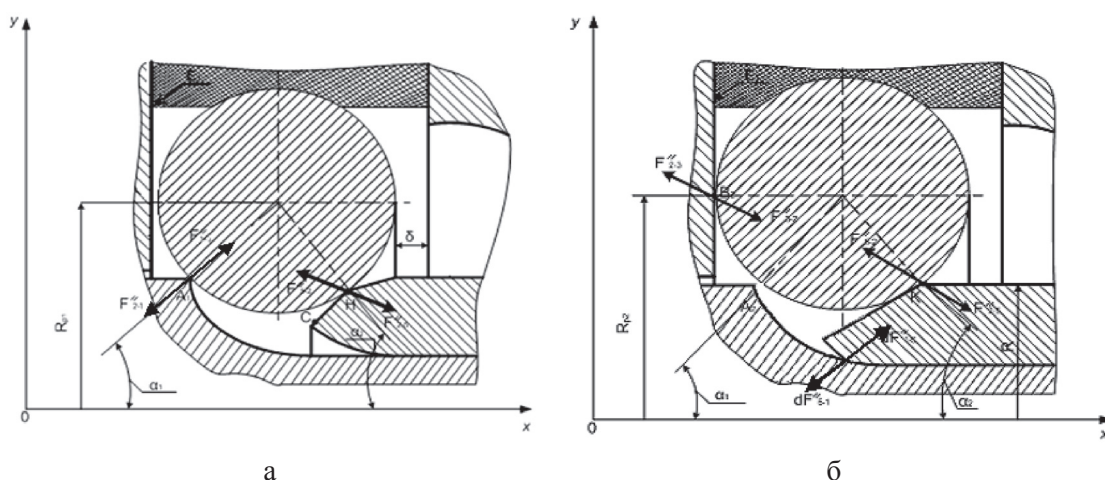


Рис. 5. Схема нагружения соединения при разжатии СЗК:
а – до радиуса R_{p1} ; б – до радиуса R_{p2} .

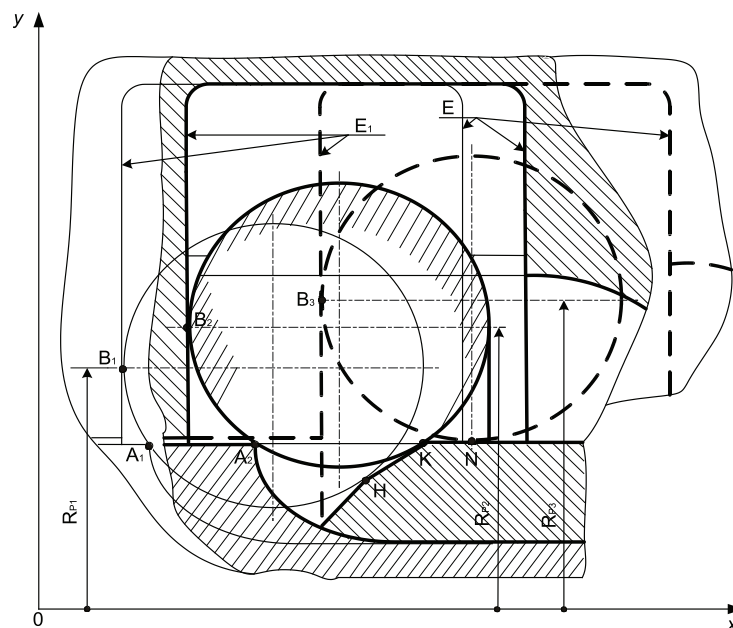


Рис. 6. Перемещение деталей соединения «Раструб» при его демонтаже (относительно условно неподвижной РВ)

от продольного перемещения заведенными за буртик манжеты кулачками РВ готова к III этапу демонтажа.

Процесс демонтажа соединения труб завершается путем организации обратного хода рычага МК за счет его поворота до отказа в сторону раструба (заключительный – III этап демонтажа). При возвращении рычага МК в исходное положение зафиксированная кулачками РВ манжета начинает движение в заданном направлении. СЗК, упираясь в поперечную стенку E_1 раструба, попадает в пространство между точками A_2 манжеты и K разъемной втулки.

Накопленная ранее при разжатии СЗК потенциальная энергия расходуется в виде механической работы сил упругости при его перемещении с окружности R_{P3} на окружность R_{P2} и сопровождается ударом кольца по кромке выступа манжеты в точке A_2 . Этот удар монтажник слышит как щелчок. При дальнейшем извлечении манжеты из раструба СЗК под действием передающихся от поперечной стенки E_1 раструба сил, разжимаясь до радиуса R_{P3} , занимает положение за кромкой радиусного выступа манжеты. Для преодоления возникающих при надвигании СЗК на кромку выступа

манжеты сил трения в точке A_2 монтажнику необходимо продолжить движение рычага МК в заданном направлении до полного извлечения манжеты и РВ из раструба.

Выявленные особенности динамики механических явлений на деталях соединения «Раструб» при его разборке разъемным инструментом позволяют наиболее полно исследовать процесс демонтажа подвижного соединения труб.

Список литературы

1. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1975. – 872 с.
2. Елькин А.В., Морозов Н.А. и др. Процессы взаимодействия деталей соединения «Раструб» при его максимальном нагружении // Научно-технический сборник № 29. – Ульяновск: УВВТУ, 1998. – С. 61.
3. Михин Н.М. О связи площади касания и сближения при неподвижном и скользящем контактах // Трение твердых тел. – М.: Наука, 1969.
4. Михайлов В.В. Теоретическое исследование механических явлений и осевых усилий нагружения разъемной втулки при демонтаже соединения «Раструб» // Аспирант и соискатель. – М.: Спутник +, 2007. – № 2. – С. 152.
5. Серeda В.В., Елькин А.В. и др. Математическая модель нагружения соединения «Раструб». Химическое и нефтегазовое машиностроение. – М.: Новый век, 1999. – № 11. – С. 13.
6. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1995. – 670 с.