

**В.И. ГОЛОВЧЕНКО**, нач. бюро технич. расчетов, канд. техн. наук,  
**Л.Е. ПОЛУТОН**, гл. конструктор, **Н.Л. ИВАНИНА**, инж.,  
 ОАО „Головной специализированный конструкторско-технологический институт”, г. Мариуполь

### АНАЛИЗ НАГРУЖЕНИЯ КРЕПЕЖНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛИННОМЕРНОГО ГРУЗА ПРИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКЕ НА ГРУНТОВОМ ТРАНСПОРТНОМ АГРЕГАТЕ

Наведений аналіз навантаження елементів кріплення великогабаритного виробу від дії інерційних сил під час його транспортування на спеціальній автомобільній платформі. За результатами аналізу та на основі виведених формул призначені такі конструктивні параметри елементів кріплення, які зводять до мінімуму додаткове навантаження виробу.

An analysis of loads acting on elements for fastening of a bulky cargo to a special automobile platform during its transportation is given. On the base of results obtained and with the help of formulas derived, fastening elements structural parameters which minimize additional loading of the cargo are defined.

**Введение и описание конструкции.** Для транспортирования длинномерного крупногабаритного груза ответственного назначения в ОАО «ГСКТИ» был спроектирован специальный автомобильный полуприцеп - грунтовой транспортный агрегат (ГТА).

Транспортируемый груз представляет собой гладкую тонкую цилиндрическую оболочку кругового поперечного сечения. Для транспортировки он укладывается в горизонтальном положении на две опоры (ложементы), смонтированные на раме ГТА, и закрепляется на них от возможного сдвига и опрокидывания вследствие действия инерционных сил, возникающих при движении агрегата по автодорогам (рис. 1). С целью предохранения поверхности груза от повреждения и увеличения сцепления на опорных поверхностях ложементов смонтированы резиновые прокладки.

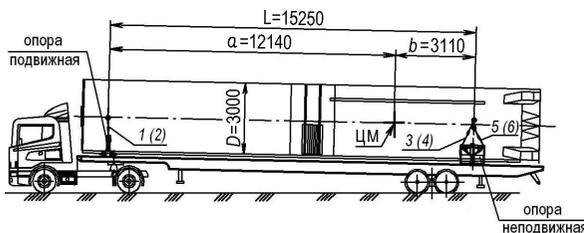


Рис. 1. Эскиз грунтового транспортного агрегата с грузом

Одна опора для груза (задняя) – неподвижная, другая (передняя) – подвижная, она имеет возможность линейного и углового перемещений вдоль и относительно продольной оси ГТА (рис. 2).

Крепление груза к опорам осуществляется винтовыми стяжками, один конец которых шарнирно закреплен на опоре, а другой – на серьге, надевае-

мой на специально вкручиваемый в обечайку груза рым-болт. Талрепы стяжек затягиваются съемными воротками. На передней опоре имеется одна пара стяжек (№1 и №2), на задней – две (№№3, 4 и 5, 6). На рис. 3 показано крепление груза к задней опоре, на рис. 4 – эскиз стяжки.

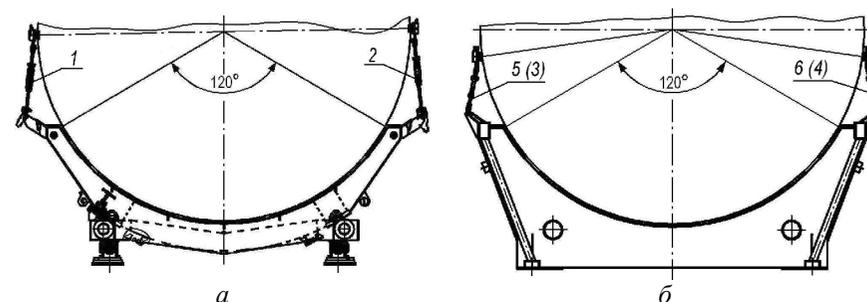


Рис. 2. Опоры для установки и крепления груза на ГТА: подвижная (а) и неподвижная (б) опоры (вид справа)

Стяжки передней опоры (подвижной) удерживают груз от опрокидывания (выкатывания из ложемента) при действии поперечной инерционной силы, а стяжки задней опоры удерживают груз как от выкатывания, так и от сдвига в продольном направлении под действием продольной инерционной силы.

Конструкция крепления относительно проста в изготовлении и в обслуживании, однако имеет существенный недостаток. Он заключается в том, что, в силу особенностей данного груза, для него весьма нежелательно воздействие местных вертикальных нагрузок. Нагрузки же от стяжек на рым-болты груза как раз и являются такими нагрузками. При транспортировании груза по дорогам к статическим нагрузкам от затяжки стяжек могут добавляться составляющие, вызываемые действием инерционных сил. Эти добавочные воздействия можно уменьшить, если применить жест-

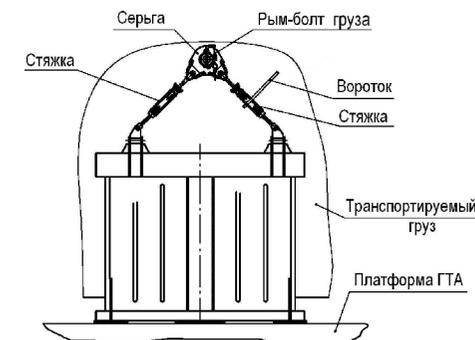


Рис. 3. Эскиз установки стяжек неподвижной опоры при транспортировке груза

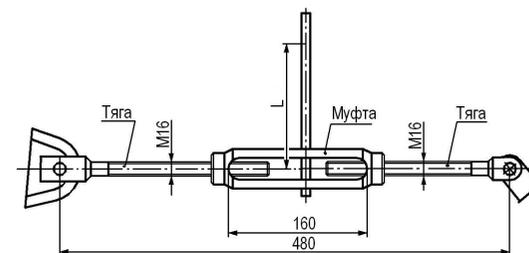


Рис. 4. Эскиз стяжки для крепления груза

кую конструкцию крепления груза к опорам. Однако поскольку жесткая конструкция крепления более сложна в изготовлении и имеет большие габариты и массу, было принято решение крепить груз стяжками. При этом проектантам была поставлена задача свести до минимально допустимого значения величину усилия предварительной затяжки стяжек и назначить такие параметры элементов крепления (длины, углы наклона, площади поперечных сечений, материал прокладок между грузом и ложементами, величины зазоров в подвижных соединениях элементов стяжек), при которых увеличение вертикальной нагрузки от стяжек на рым-болты при действии на груз продольной инерционной силы будет несущественным (не более 10% усилия предварительной затяжки стяжек). Соответственно, для обеспечения этого условия необходимо было определить допускаемые величины инерционных сил, а также определить необходимость ограничения скорости транспортировки груза либо принятия иных специальных мер. Для выполнения расчетов были заданы следующие максимальные величины коэффициентов перегрузки: 1,0 - в продольном направлении (в направлении движения) и  $\pm 0,6$  - в поперечном и вертикальном направлениях.

Расчеты выполнялись на максимальные величины коэффициентов перегрузки, причем принималось, что инерционные силы максимальной величины действуют по своим направлениям не одновременно. Расчеты нагружения стяжек от действия поперечной и вертикальной инерционных сил сложности не представляли. Они показали, что в стяжках при заданных величинах коэффициентов перегрузки дополнительные усилия к усилию предварительной затяжки не возникают, так как величина поперечной инерционной силы недостаточна, чтобы груз мог выкатиться из ложементов, а вертикальная инерционная сила меньше силы веса груза. Поэтому в данной статье приводится анализ нагружения крепежных устройств только от действия продольной инерционной силы.

**1. Назначение величины предварительной затяжки стяжек.** Исходя из определенных проектантом груза величин допускаемых нагрузок на рым-болты, было принято предварительную затяжку стяжек осуществлять с помощью воротка усилием  $P = 150$  Н, приложенным на плече  $l = 200$  мм.

**2. Определение величины продольной силы, сдвигающей груз относительно неподвижной опоры.** Передняя опора, на которую опирается груз, – подвижная, поэтому на нее передается только часть продольной инерционной силы  $F_u$ , равная силе трения, возникающей при ее перемещении вдоль рамы ГТА  $F_n = F_{mp,n}$ . На стяжки передней опоры эта сила не передается, поскольку сила трения между грузом и прокладкой ложементов передней опоры (скольжение металла по резине) больше силы трения между опорой и рамой ГТА (скольжение металла по металлу), и груз относительно передней опоры не сдвигается.

На неподвижную опору, таким образом, приходится почти вся продольная инерционная сила от транспортируемого груза  $F_n = F_u - F_n$ . Эта сила

сдвигает груз относительно неподвижной опоры. Если ее величина превышает сумму силы трения груза о ложемент неподвижной опоры и силы трения передней опоры о раму ГТА, происходит перемещение груза относительно ложементов. Рассмотрим, как при этом нагружаются стяжки.

**3. Определение деформаций стяжек при перемещении груза относительно неподвижной опоры.** Схематично картина перемещений точек крепления стяжек показана на рис. 5. Целесообразно данный рисунок рассматривать совместно с рис. 3.

Здесь горизонтальная координатная плоскость  $XOY$  проходит через точки крепления стяжек к задней опоре (точки  $A$  и  $B$ ). Вертикальная плоскость  $YOZ$  проходит через продольную вертикальную плоскость симметрии рым-болта груза. Точки  $C_3$  и  $C_5$  – точки крепления стяжек к рым-болту. Плоскость  $XOZ$  – продольная плоскость, ось  $OX$  параллельна продольной оси ГТА и груза.

При перемещении груза на величину  $\Delta$  точки крепления стяжек к рым-болту  $C_3$  и  $C_5$  переместятся также на величину  $\Delta$  и займут положения  $C'_3$  и  $C'_5$ . Стяжка 5 при этом удлинится, а стяжка 3 укоротится.

Величины удлинения и укорочения стяжек равны соответственно разности длин отрезков:  $\Delta l_5 = BC'_5 - BC_5$ ,  $\Delta l_3 = AC_3 - AC'_3$ ,

$$\Delta l_5 = \sqrt{(a-d+\Delta)^2 + b^2 + h^2} - \sqrt{(a-d)^2 + b^2 + h^2}, \quad (1)$$

$$\Delta l_3 = \sqrt{(a-d)^2 + b^2 + h^2} - \sqrt{(a-d-\Delta)^2 + b^2 + h^2}. \quad (2)$$

Поскольку деформации стяжек упругие (так как напряжения в их поперечных сечениях не должны превышать предела пропорциональности материала), соответствующие им изменения усилий натяжения можно определить по закону Гука. Сумма проекций изменений усилий натяжения на вертикальную ось  $OZ$  дает изменение вертикальной нагрузки на рым-болт груза. Анализ формул (1) и (2) показывает, что удлинение стяжки 5 всегда больше укорочения стяжки 3. Следовательно, и изменение усилия в стяжке 5 будет

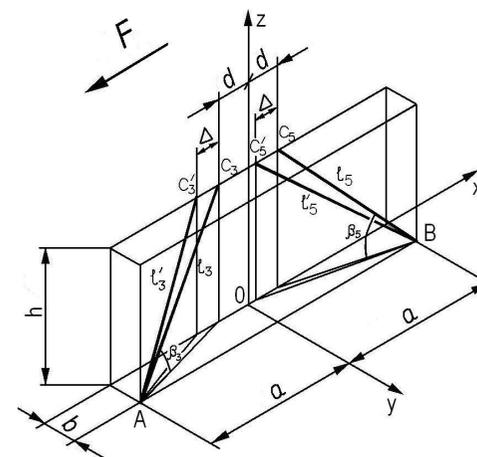


Рис. 5. Схема перемещения точек крепления стяжек к рым-болту груза от действия продольной инерционной силы

больше, чем в стяжке 3. Поскольку знаки изменений усилий в стяжках 3 и 5 разные, сумма вертикальных проекций приращений усилий остается величиной положительной. Вопрос о том, насколько велика эта сумма, проще всего решить графически. Причем, поскольку деформации стяжек упругие, а площади поперечных сечений элементов стяжек 3 и 5 одинаковы, достаточно сравнить графики изменения удлинений стяжек. На рис. 6 приведены графики абсолютных величин удлинений стяжек 3 и 5 в зависимости от перемещения груза  $\Delta$ , построенные по формулам (1) и (2) при  $a = 375$  мм,  $b = 80$  мм,  $d = 80$  мм,  $h = 370$  мм. Длины стяжек составляют 480 мм.

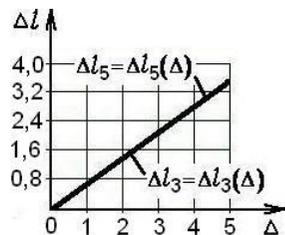


Рис. 6. Графики абсолютных величин удлинений стяжек 3 и 5 при перемещении груза относительно неподвижной опоры (мм)

Как видно из рисунка, графики удлинений стяжек слиты в одну линию даже при весьма значительных относительных деформациях ( $\varepsilon = 1\%$ ). Это значит, что дополнительная вертикальная нагрузка, создаваемая натяжением стяжки 5 вследствие перемещения груза относительно неподвижной опоры, практически полностью компенсируется соответствующим ослаблением стяжки 3 и на рым-болт не передается, т.е. суммарная вертикальная нагрузка на рым-болт от обеих этих стяжек не изменяется и остается равной той величине, которая была при предварительной затяжке стяжек. Такая картина будет иметь место до тех пор, пока стяжка 3 при дальнейшем перемещении груза не ослабнет полностью. Усилие в стяжке 3 станет равным нулю, а в стяжке 5 – равным удвоенной величине усилия предварительной затяжки. Контакты в подвижных соединениях элементов стяжки 3, созданные при ее затяжке, разомкнутся. При дальнейшем перемещении груза зазоры в подвижных соединениях стяжки 3 будут выбираться в противоположном направлении (как если бы на растянутую стяжку начала действовать сжимающая сила). И пока все зазоры не выберутся полностью, сдвигающую нагрузку от груза будет воспринимать только стяжка 5. После того, как зазоры сомкнутся, стяжка 3 опять вступит в работу, но уже будет испытывать сжатие. Поскольку стяжка представляет собой относительно тонкий стержень, допускать ее работу на сжатие весьма нежелательно. Поэтому конструкция крепления должна быть такой, при которой работа стяжек на сжатие была бы невозможной.

**4. Вывод формулы для определения усилий в стяжках при действии на груз продольной инерционной силы и ее анализ для принятия рациональных значений углов наклона стяжек.** Для вывода количественных соотношений между инерционной силой и усилиями в стяжках рассмотрим рис. 7, на котором схематично изображено твердое тело, находящееся на горизонтальной плоскости под воздействием внешней силы  $F$  и закрепленное от сдвига парой растяжек.

Вес тела –  $G$ , реакция растяжки –  $R$ , вертикальная реакция плоскости –

$N$ , коэффициент трения тела о плоскость –  $\mu$ , углы наклона растяжки –  $\alpha$  и  $\beta$ .

Уравнения равновесия тела в форме проекций сил на оси координат имеют вид:

$$\sum X = -F + mN + 2R \cos \alpha \cdot \cos \beta = 0; \quad \sum Z = -G + N - 2R \sin \alpha = 0.$$

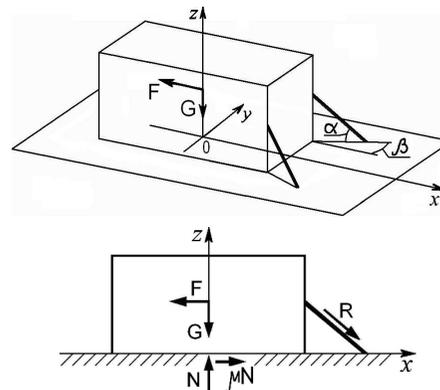


Рис. 7. К выводу формулы для определения усилия в стяжках от действия продольной силы

Выражая из второго уравнения  $N$  и подставляя его в первое уравнение, получаем реакцию плоскости в точке крепления растяжки:

$$R = \frac{F - mG}{2(m \sin \alpha + \cos \alpha \cos \beta)}. \quad (3)$$

Усилие в растяжке численно равно реакции.

Из полученной формулы следует, что: 1) благодаря силе трения сила, передающаяся на растяжку, уменьшается (числитель формулы), 2) вследствие возникающего натяжения растяжки сила прижатия груза к плоскости увеличивается,

что дополнительно увеличивает силу трения (первое слагаемое выражения в скобках в знаменателе). Как видно, возникновение силы дополнительного прижатия груза делает зависимость (3) нелинейной относительно величины коэффициента трения.

На рис. 8 представлена эта зависимость при  $F = G = 10$  кН,  $\alpha = 50^\circ$ ,  $\beta = 0, 15$  и  $30^\circ$ . Величины углов наклона растяжки приняты как наиболее часто встречающиеся в практике крепления грузов при транспортировке. Для оценки степени нелинейности зависимости здесь же приведены графики формулы (3), но без учета возникновения до-

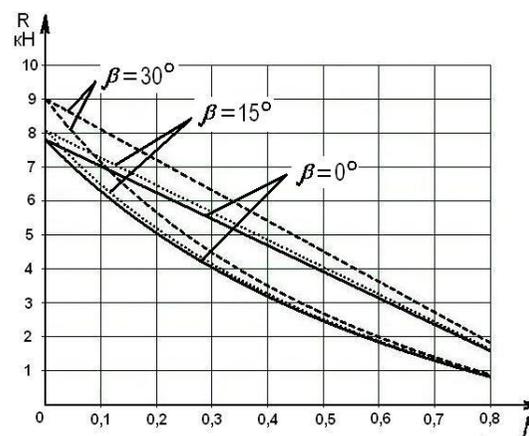


Рис. 8. Графики изменения усилия в растяжке в зависимости от величины коэффициента трения  $\mu$  и угла  $\beta$  при  $\alpha = 50^\circ$

полнительной силы трения (прямые линии). Из рисунка видно, что эффект прижатия груза к плоскости, учитываемый первым слагаемым в знаменателе формулы (3), весьма существенно снижает величину усилия в растяжке. Поэтому для решения поставленной задачи уменьшения вертикальной нагрузки от стяжек на груз целесообразно использовать его в максимально возможной степени.

Для этого вначале выполняем анализ зависимости величины усилия в растяжке от величин углов наклона  $\alpha$  и  $\beta$  и коэффициента трения  $\mu$ . Степень влияния величины угла  $\beta$  видна из рис. 8: минимальное значение усилия в растяжке имеет место при  $\beta = 0$ , в интервале  $0 < \beta < 15^\circ$  усилие увеличивается незначительно, при  $\beta > 15^\circ$  наблюдается существенное увеличение усилия. Дальнейший анализ формулы (3) будем проводить в предположении, что  $\beta = 15^\circ$ .

Из представленных на рис. 9 графиков, построенных для трех значений коэффициента трения  $\mu = 0,3, 0,4$  и  $0,5$  при  $\beta = 15^\circ$ , видно, что оптимальная величина угла  $\alpha$  составляет примерно  $30^\circ$ . Однако величины этого угла в интервале от нуля до  $50^\circ$  также можно считать приемлемыми.

На рис. 10 приведен трехмерный график зависимости усилия  $R$  от углов  $\alpha$  и  $\beta$  при коэффициенте трения  $\mu = 0,5$ . График показывает, что при значениях углов наклона растяжки  $\alpha = 0 \dots 50^\circ$  и  $\beta = 0 \dots 15^\circ$  усилие в ней превышает минимально возможное значения весьма незначительно. Такой характер график имеет и для других значений коэффициента трения в весьма широком интервале ( $\mu = 0 \dots 0,8$ ).

Выполненный анализ дает основание рекомендовать при проектировании неподвижной опоры ГТА так располагать на ней узлы крепления стяжек, чтобы угол  $\alpha$  не превышал  $50^\circ$ , а угол  $\beta$  не превышал  $15^\circ$ . Что касается назначения материала прокладки между ложементом и грузом, то рекомендации очевидны: материал должен быть мягким и обеспечить по возможности максимальную силу трения на поверхности контакта прокладки с грузом. Судя по графикам на рис. 9, увеличение коэффициента трения позволяет весьма существенно уменьшить усилия в стяжках.

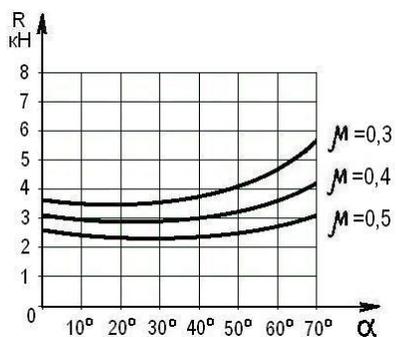


Рис. 9. Графики зависимости усилия в растяжке от величины угла  $\alpha$  и коэффициента трения  $\mu$  при  $\beta = 15^\circ$

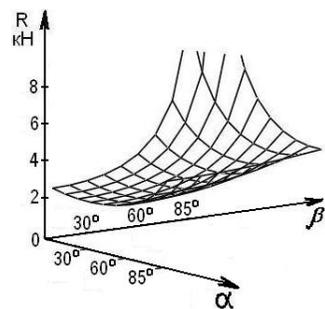


Рис. 10. График зависимости усилия  $R$  от углов  $\alpha$  и  $\beta$  при коэффициенте трения  $\mu = 0,5$

Применительно к транспортируемому на ГТА грузу при определении усилий в стяжках неподвижной опоры, возникающих при смещении груза под действием продольной инерционной силы с помощью формулы (3), необходимо иметь в виду следующее. Сила  $F$  представляет собой силу, сдвигающую груз относительно неподвижной опоры, т.е. силу  $F_u = P_u - F_{mp.n}$ . Сила трения подвижной опоры о раму транспортного агрегата равна  $F_{mp.n} = m_n V_n$ , где  $m_n$  – коэффициент трения на поверхности контакта подвижной опоры и платформы, а  $V_n$  – вертикальная нагрузка на платформу агрегата от подвижной опоры. Нагрузка  $V_n$  включает в себя вес подвижной опоры  $G_{o.n.}$ , часть веса груза, приходящуюся на подвижную опору в статическом состоянии агрегата  $G_z \cdot \frac{b}{L}$ , и динамическую добавку, вызванную действием продольной инерционной силы  $P_u \cdot \frac{D}{2L}$ . Таким образом,

$$F = P_u - m_n \left( G_{o.n.} + G_z \cdot \frac{b}{L} + P_u \cdot \frac{D}{2L} \right). \quad (4)$$

Величина, обозначенная в формуле (3) как  $G$ , представляет собой силу веса тела, – силу, прижимающую тело к плоскости без учета дополнительного воздействия усилия в растяжке, возникающего при сдвиге груза. Для случая транспортируемого нами груза в качестве силы  $G$  в формуле (3) принимаем нагрузку на ложемент неподвижной опоры, равную суммарному воздействию силы веса груза  $G_z \cdot \frac{a}{L}$ , динамической добавки (со знаком минус) от силы инерции груза  $P_u \cdot \frac{D}{2L}$  и суммы вертикальных составляющих сил предварительной затяжки стяжек неподвижной опоры  $P_{в.см} = 4P_{зам.см} \sin a$ , где  $P_{зам.см}$  – усилие предварительной затяжки одной стяжки:

$$G = G_z \cdot \frac{a}{L} - P_u \cdot \frac{D}{2L} + 4P_{зам.см} \sin a. \quad (5)$$

Наконец, в качестве коэффициента трения  $\mu$  принимаем коэффициент трения груза о ложемент неподвижной опоры:  $m = m_n$ .

С учетом выполненных подстановок формула (3) приобретает следующий вид:

$$R = \frac{P_u - m_n \left( G_{o.n.} + G_z \cdot \frac{b}{L} + P_u \cdot \frac{D}{2L} \right) - m_n \left( G_z \cdot \frac{a}{L} - P_u \cdot \frac{D}{2L} + 4P_{зам.см} \sin a \right)}{2(m_n \sin a + \cos a \cos b)}. \quad (6)$$

Если далее выразить силу инерции через коэффициент перегрузки

( $P_u = kG_2$ ), формулу (6) можно представить в виде

$$R = \frac{kG_2 \left[ 1 + \frac{D}{2L}(m_n - m_n) \right] - G_2 \left( m_n \frac{a}{L} + m_n \frac{b}{L} \right) - m_n G_{o.n.} - 4m_n P_{зам.см} \sin a}{2(m_n \sin a + \cos a \cos b)}. \quad (7)$$

Формулой (7) можно пользоваться, если величина получаемого по ней усилия находится в интервале значений  $P_{зам.см} < R < 2P_{зам.см}$ . Смысл нижнего предельного значения состоит в том, что, поскольку стяжки имеют предварительную затяжку, дополнительное удлинение стяжек **5** и **6** при приложении внешней нагрузки возможно только тогда, когда величина этой нагрузки превышает усилие предварительной затяжки.

Величина верхнего предельного значения равна той величине усилия, при которой суммарная вертикальная нагрузка на опору от усилий в стяжках  $P_{6.см}$  еще равна сумме вертикальных проекций усилий предварительной затяжки всех стяжек, ибо формула (6) выведена именно для этого значения  $P_{6.см}$  (последнее слагаемое в числителе формулы (6)). В интервале усилий  $P_{зам.см} < R < 2P_{зам.см}$  это условие выполняется, так как величина  $P_{6.см}$ , как было отмечено выше, остается постоянной: после того, как под действием продольной инерционной силы стяжки **5** и **6** получают дополнительное удлинение, груз сместится в направлении действия силы, стяжки **3** и **4** при этом укоротятся и, соответственно, ослабнут. Однако, несмотря на перераспределение усилий в стяжках, до тех пор, пока стяжки **3** и **4** полностью не ослабнут и не выключатся из работы, сумма вертикальных проекций усилий в стяжках неподвижной опоры остается постоянной и равной  $P_{6.см} = 4P_{зам.см} \sin a$ . Это следует из анализа графика на рис. 5: к моменту выключения стяжек **3** и **4** из работы они укоротятся на величину удлинения, полученного от предварительной затяжки, а стяжки **5** и **6** получают дополнительное удлинение, равное удлинению от усилия предварительной затяжки. Следовательно, величины приращения усилий в стяжках в этот момент будут равны величине усилия предварительной затяжки:  $\Delta R = P_{зам.см}$ . Таким образом, в момент выключения стяжек **3** и **4** из работы усилия в стяжках станут равными

$$R_3 = R_4 = P_{зам.см} - \Delta R = 0; \quad R_5 = R_6 = P_{зам.см} + \Delta R = 2P_{зам.см},$$

а сумма вертикальных проекций этих усилий будет равняться

$$P_{6.см} = (R_5 + R_6) \sin a = 4P_{зам.см} \sin a.$$

Следует заметить, что если при решении задачи обеспечения сохранности груза при транспортировании на ГТА параметры элементов крепления выбраны конструктором так, что величины усилий в стяжках, определенные по формуле (7), не будут превышать указанный верхний предел, можно считать, что по-

ставленная задача решена наилучшим образом, так как вертикальная нагрузка на рым-болты груза от продольной инерционной силы действовать не будет.

**5. Анализ формулы для определения усилий в стяжках с целью выбора материала прокладки и выполнение числового расчета.** Формула (3), очевидно, имеет смысл только тогда, когда ее числитель больше нуля, т.е. когда сила  $F$ , достаточно велика, чтобы преодолеть силу трения тела о плоскость и вызвать его перемещение. Но чтобы вызвать перемещение рассматриваемого нами груза относительно неподвижной опоры, сила инерции должна преодолеть не только силы трения, но также и усилия предварительной затяжки стяжек. Произведем анализ условий, при которых усилия в стяжках **5** и **6** от силы инерции груза могут стать равными усилию предварительной затяжки, а также проанализируем влияние величин коэффициента перегрузки  $k$  и коэффициента трения груза относительно ложементы неподвижной опоры  $m_n$  на величину усилия  $R$ , определяемого по формуле (7).

В соответствии с полученными выше рекомендациями величины углов наклона стяжек принимаем равными  $\alpha = 50^\circ$  и  $\beta = 15^\circ$ . Числовые величины параметров, характеризующих рассматриваемый груз и схему его крепления, имеют следующие значения:  $G_2 = 70630$  Н,  $G_{o.n.} = 3435$  Н,  $L = 15250$  мм,  $a = 12150$  мм,  $b = 3100$  мм,  $D = 3000$  мм,  $m_n = 0,2$ . Величина усилия предварительной затяжки стяжки определялась по заданной величине крутящего момента на воротке ( $M_6 = Pl = 3 \cdot 10^4$  Н·мм) по формуле [1]

$$P_{зам.см} = \frac{M_6}{d_2 \operatorname{tg}(\lambda + \rho')}, \quad (8)$$

где  $d_2$  – средний диаметр резьбы тяги стяжки ( $d_2 = 14,701$  мм);  $\lambda$  – угол подъема винтовой линии резьбы ( $\lambda = 0,0433$  рад);  $\rho'$  – приведенный угол трения в резьбе ( $\rho' = 0,2049$ ).

В этой формуле учтено, что момент на воротке, создаваемый для затяжки стяжки, преодолевает моменты сил трения в двух резьбовых соединениях муфты (см. рис. 4). Величина усилия предварительной затяжки стяжки, вычисленная по формуле (8), равна  $P_{зам.см} = 8050$  Н.

График функции  $R(k, m_n)$ , построенный по формуле (7) при этих значениях входящих в нее параметров, представлен на рис. 11а.

Из него следует, что при увеличении коэффициента перегрузки  $k$  усилия  $R$  в стяжках **5** и **6** увеличиваются, а при увеличении коэффициента трения  $m_n$  – уменьшаются. Из графика также видно, что при определенных значениях  $k$  и  $m_n$  величина  $R$  не достигает величины  $P_{зам.см}$ . При этих значениях  $k$  и  $m_n$  груз не смещается относительно неподвижной опоры, а стяжки **5** и **6** дополнительно не нагружаются. Для определения совокупности предельных значений  $k$  и  $m_n$ , при которых груз еще не перемещается и не создает

дополнительного натяжения стяжек, необходимо решение уравнения  $R(k, m_n) = P_{зам.см}$ . Поскольку аналитически решение такого уравнения найти сложно, оно было получено графически как линия пересечения поверхности  $R(k, m_n)$  с плоскостью  $R = P_{зам.см}$ , показанная на рис. 11б. Из этого рисунка видно, что при заданной для выполнения анализа максимальной величине коэффициента перегрузки  $k = 1,0$  транспортируемый груз не будет сдвигаться относительно неподвижной опоры, если величина коэффициента трения  $m_n$  груза о ложемент опоры будет более  $m_n \approx 0,7$ . Поскольку подобрать материал для прокладки с таким высоким коэффициентом трения оказалось невозможным, стало очевидным, что добиться того, чтобы при данном способе крепления груза стяжки дополнительно не нагружались и, соответственно, не увеличивали бы нагрузки на рым-болты, не удастся. Однако чтобы максимально уменьшить величину приращения усилий в стяжках, было решено использовать для прокладки между грузом и ложементом материал с наибольшим коэффициентом трения среди имеющихся материалов – резину.

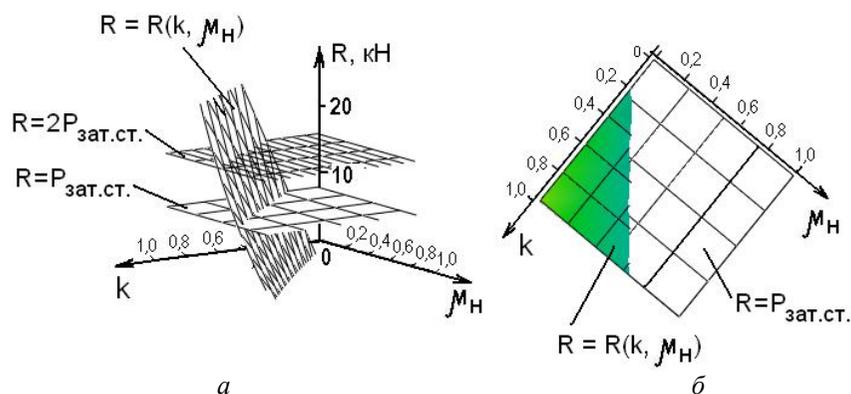


Рис. 11. График зависимости усилий в стяжках 5 и 6 неподвижной опоры от коэффициента перегрузки  $k$  и коэффициента трения  $m_n$  (а); проекция на плоскость  $kO m_n$  линии пересечения поверхности  $R(k, m_n)$  с плоскостью  $R = P_{зам.см}$  (б)

Величина коэффициента трения резины по поверхности груза составляет  $m_n = 0,5$ . При таком коэффициенте трения груз под действием продольной инерционной силы, как видно из графика на рис. 11б, может смещаться относительно неподвижной опоры при коэффициенте перегрузки  $k \approx 0,8$ . Это значит, что, например, при движении ГТА юзом в результате экстренного торможения на дороге с асфальтовым или бетонным покрытием продольная инерционная сила уже может передаваться на стяжки (коэффициент сцепления шин при таком покрытии  $j = 0,7...0,8$  [2]).

При заданном для проведения анализа значении  $k_{max} = 1,0$  и  $m_n = 0,5$  величины усилий в стяжках 5 и 6, полученные по формуле (7), составляют  $R_5 = R_6 = 14290$  Н. Следовательно, приращение усилий в этих стяжках дополнительно к усилию предварительной затяжки равно  $\Delta R = R_5 - P_{зам.см} = 6240$  Н. Стяжки 3 и 4 ослабнут, усилия в них будут составлять  $R_3 = R_4 = P_{зам.см} - \Delta R = 1810$  Н. Как видно, все стяжки остаются в натянутом состоянии.

Суммарная вертикальная нагрузка от стяжек на рым-болты груза осталась неизменной: в статическом состоянии она была равной  $P_{в.см} = 4P_{зам.см} \sin \alpha = 24665$  Н и при воздействии продольной инерционной силы с коэффициентом перегрузки  $k_{max} = 1,0$  осталась такой же:  $P_{в.см} = (R_3 + R_4 + R_5 + R_6) \sin 50^\circ = 24665$  Н.

Полученный результат говорит о том, что принятые по результатам выполненного анализа углы наклона стяжек, величина усилия предварительной затяжки, материал прокладки являются в совокупности оптимальными, поскольку при этом наборе значений параметров продольная инерционная сила не создает дополнительной вертикальной нагрузки на рым-болты груза.

Величина нормального напряжения в поперечных сечениях тяг стяжек 5 и 6 составляет  $\sigma = \frac{4R_5}{\pi d_1^2} = 95$  МПа, где  $d_1 = 13,835$  мм – внутренний диаметр резьбы тяги. Материал тяг – конструкционная сталь, имеющая предел текучести  $\sigma_T = 240$  МПа. Величина коэффициента запаса прочности  $n = \frac{\sigma_T}{\sigma} = 2,5$  доста-

точна. Остальные элементы стяжек также имеют достаточные запасы прочности.

Следует заметить, что поскольку стяжки 3 и 4 при действии продольной инерционной силы полностью не ослабевают, а остаются все время натянутыми, вопрос о назначении необходимой величины зазоров в подвижных соединениях их элементов специального решения не потребовал. Величины зазоров были назначены по общепринятым для таких соединений нормам точности. Эскизы подвижных соединений элементов стяжек и поля допусков сопрягаемых деталей приведены на рис. 12 и 13.

Организационные меры по обеспечению сохранности и целостности груза при транспортировке должны быть направлены на обеспечение надлежащего состояния дорожного покрытия на маршруте следования ГТА с грузом, устранение препятствий с дороги и недопущение возможности столкновения с встречным транспортом. Как показано выше, при резком же торможении агрегата и движении юзом даже по сухому асфальту или бетону дополнительные вертикальные нагрузки на груз от стяжек не возникают.

**Выводы.** Выполненный анализ нагружения элементов крепления груза при транспортировке на ГТА позволил спроектировать рациональную конструкцию опор и стяжек, при которой обеспечивается сохранность груза от действия возникающих при транспортировке перегрузок.

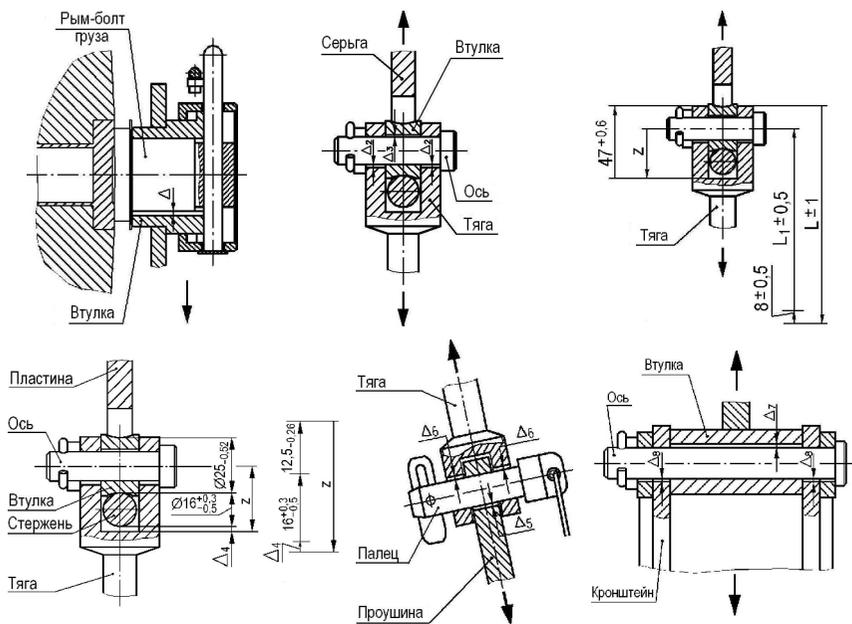


Рис. 12. Схемы расположения зазоров в сопряжениях элементов стяжки при ее предварительной затяжке

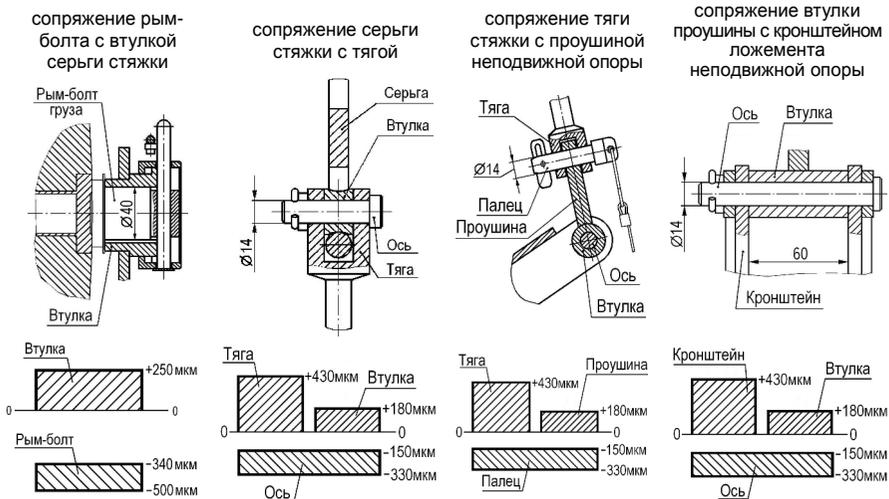


Рис. 13 – Эскизы сопряжений и схемы расположения полей допусков сопрягаемых деталей

**Список литературы:** 1. Батурин А.Т., Ицкович Г.М. и др. Детали машин. – Изд. 6. – М.: «Машиностроение», 1971. – 466 с. 2. Артамонов М.Д., Иларионов В.А., Морин М.М. Основы теории и конструкции автомобиля. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Машиностроение, 1974. – 288 с.

Поступила в редколлегию 30.10.08