

УДК 629.114.3-585

А. П. Недялков, кандидат технических наук, Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», Москва

Е. Б. Александров, Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», Москва

А. Н. Блохин, кандидат технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ ПЛАНЕТАРНЫХ ДЕМУЛЬТИПЛИКАТОРОВ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНИЗМА

Проводится сравнительный анализ двух вариантов кинематических схем планетарных демультипликаторов многоступенчатых коробок передач. Представлены аналитические зависимости для определения моментов на деталях демультипликаторов и времени блокировки демультипликатора для рассмотренных вариантов. Обосновывается выбор оптимального способа блокировки демультипликатора.

Ключевые слова: демультипликатор, многоступенчатая коробка передач, блокировка демультипликатора.

На современных автомобилях большой грузоподъемности и тягачах автопоездов широкое распространение получили многоступенчатые механические коробки передач с числом ступеней от 8 до 18 и широкие диапазоны передаточных чисел. Такие коробки передач обеспечивают наилучшие динамические и экономические показатели автотранспортных средств [1].

Как показал опыт мирового автостроения, наиболее рациональной и перспективной является конструкция многоступенчатой коробки передач с задним планетарным демультипликатором, обеспечивающая два диапазона передаточных чисел трансмиссии. Такая конструкция обуславливает возможность получения минимальных габаритных размеров и массы коробки передач при наибольшей несущей способности, а следовательно, и ресурса.

Весьма существенной проблемой для конструкторов является обеспечение быстроты переключения диапазонов демультипликатора; при этом, как показано ниже, прежде всего на режиме включения высшего диапазона, так как он в значительной степени определяет тяговые и динамические качества автопоезда, особенно при движении на подъеме.

Ниже проведено сравнение двух кинематических схем планетарных синхронизированных демультипликаторов с точки зрения силового нагружения звеньев и времени переключения диапазонов.

Основу конструкции планетарных демультипликаторов многоступенчатых коробок передач тяжелых грузовых автомобилей составляет трехзвенный планетарный ряд с ведомым водилом и ведущим солнечным зубчатым колесом.

Соотношение действующих моментов на всех трех звеньях планетарного ряда – солнечном, коронном зубчатом колесе и водиле – определяется внутренним передаточным числом планетарного ряда

$$\alpha = \frac{Z_k}{Z_c}, \quad (1)$$

где Z_k и Z_c – соответственно, числа зубьев коронного и солнечного зубчатых колес.

Моменты M_k , M_c и M_b , соответственно, на коронном, солнечном зубчатых колесах и водиле могут быть определены по следующим зависимостям [2]:

$$M_k = \alpha M_c; \quad (2)$$

$$M_c = \frac{(1 + \alpha) M_k}{\alpha}; \quad (3)$$

$$M_b = (1 + \alpha) M_c. \quad (4)$$

Низшая передача в демультипликаторе получается соединением коронной шестерни с корпусом коробки передач; при этом согласно формуле (4) моменты M_1 и M_3 , соответственно, на ведомом и ведущем валах демультипликатора находятся в соотношении $M_3 = (1 + \alpha) M_1$, и частота вращения на ведущем и ведомом валах – в соотношении $n_1 = (1 + \alpha) n_3$.

При соединении коронного зубчатого колеса с корпусом коробки передач возникает момент в α раз (см. (2)) больший инерционного момента на входном валу демультипликатора, что сказывается на величине момента разворота при синхронизации включения низшего диапазона.

Высшая передача демультипликатора получается путем блокировки планетарного ряда.

Существуют два варианта блокировки планетарного ряда [2].

Вариант I – блокировка путем соединения водила планетарного ряда с коронным зубчатым колесом согласно схеме, представленной на рис. 1, а, 3, а.

Такая схема нашла широкое распространение и используется, в частности, в изделиях фирмы ZF, например в коробках передач 16S150 и 16S220 (рис. 2).

Согласно варианту I, показанному на рис. 1 и 2, и формулам (2)–(4) при заблокированном планетарном ряду

$$M_c = M_3 = M_1; M_3 = M_B - M_{мф}^I,$$

где $M_{мф}^I$ – величина момента, передаваемого муфтой блокировки коронной шестерни и водила.

$$M_B = M_3(1 + \alpha); M_3 = M_3(1 + \alpha) - M_{мф}^I,$$

откуда $M_{мф}^I = \alpha M_3$. (5)

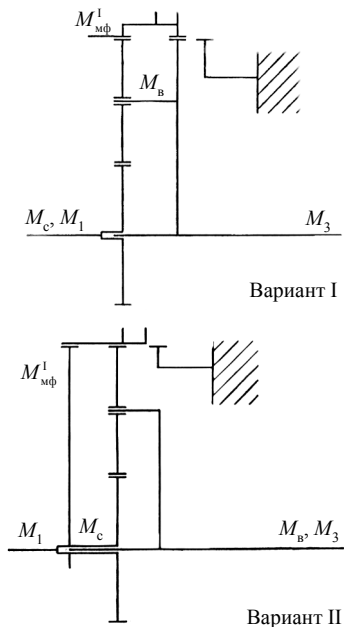


Рис. 1. Варианты блокировки планетарного ряда

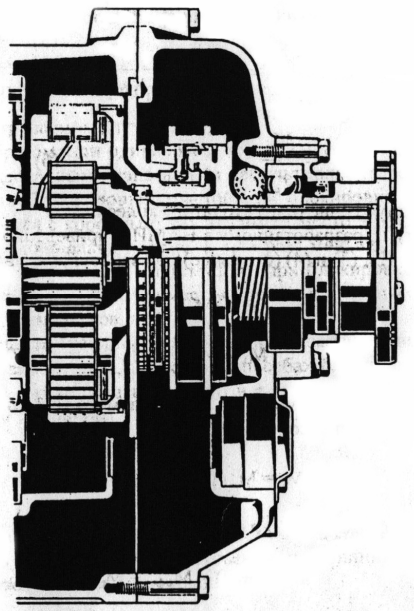


Рис. 2. Демультпликатор коробки передач ZF 16S220

Усилия, действующие на зубья заблокированного по варианту I планетарного демультпликатора,

$$P^I = \frac{M_3}{r_c}, \quad (6)$$

где r_c – радиус солнечного зубчатого колеса.

По варианту II, разработанному в НАМИ и приведенному на рис. 1, б, 3, б, и формулам (2)–(4) при заблокированном ряде

$$M_1 = M_3 + M_B; M_3 = M_B - M_{мф}^{II}, \quad (7)$$

где $M_{мф}^{II}$ – величина момента, передаваемого муфтой блокировки коронной шестерни с солнечной.

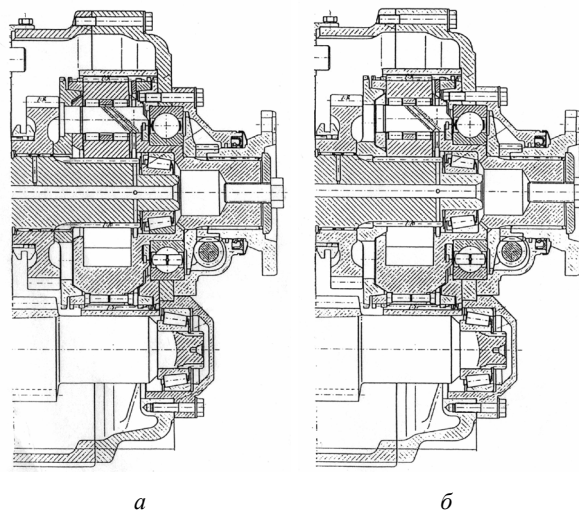


Рис. 3. Конструктивное исполнение вариантов блокировки демультпликатора: а – вариант I; б – вариант II

$$M_1 = M_B = M_c(1 + \alpha). \quad (8)$$

Согласно формулам (7) и (8)

$$M_c(1 + \alpha) = M_{мф}^{II} + M_c,$$

следовательно, $M_{мф}^{II} = \alpha M_c$.

Кроме того, $M_c = \frac{M_1}{(1 + \alpha)}$, с учетом чего

$$M_{мф}^{II} = \frac{\alpha}{(1 + \alpha)} M_1. \quad (9)$$

Усилия, действующие на зубья заблокированного по варианту II планетарного демультпликатора, составляют

$$P^{II} = \frac{M_3}{(1 + \alpha)r_c}. \quad (10)$$

Сопоставив полученные величины моментов на блокирующих муфтах $M_{мф}^I$ и $M_{мф}^{II}$, согласно формулам (5) и (9) получим:

$$\frac{M_{мф}^{II}}{M_{мф}^I} = (1 + \alpha).$$

В рассматриваемом случае $\alpha = 3,46$.

Таким образом, при одинаковом крутящем моменте, передаваемом заблокированным планетарным демультпликатором, момент, передаваемый блокирующей муфтой при блокировке солнечного зубчатого колеса с коронным, как это имеет место в разработанной в НАМИ принципиальной схеме, в 4,46 раза меньше, чем момент, воспринимаемый блоки-

рующей муфтой при блокировке коронной шестерни с водилом, как это имеет место в конструкциях планетарных демультипликаторов, например, фирмы ZF.

Сопоставление усилий, действующих в зацеплении зубчатых колес планетарного ряда, при обоих способах блокировки (формулы (6) и (10)) также показывает, что и с этих позиций блокировка солнечного и коронного зубчатых колес значительно целесообразней $\frac{P^{II}}{P^I} = (1 + \alpha)$.

Столь значительное снижение усилий в зацеплении уменьшает возможность бринеллирования зубьев и подшипников при длительном движении на высшем диапазоне.

С вышеизложенным связаны также особенности синхронизации звеньев планетарного демультипликатора коробки передач при его блокировке, выполненной по вариантам I и II, которые могут быть оценены сопоставлением времени синхронизации элементов демультипликатора по каждому из вариантов.

В основу приводимого ниже сопоставления обоих вариантов положено допущение, в соответствии с которым скорость движения автомобиля в процессе синхронизации постоянна, что достаточно хорошо отражает переключение на высший диапазон при движении по горизонтальному участку дороги, в этом случае падение скорости за время синхронизации и в действительности пренебрежимо мало, и $\omega_b = \omega_3 = \text{const}$ на отрезке времени Δt (Δt – время синхронизации).

При сопоставлении вариантов принято также, что моменты инерции короны, сателлитов и вторичного вала коробки передач в обоих случаях одинаковы. Одинаковыми для обоих вариантов принято считать и потери мощности при синхронизации (моменты ведения).

Рассмотрим вариант I. Момент синхронизатора воздействует на коронную шестерню. К ней же могут быть приведены все моменты инерции синхронизируемых элементов.

Уравнение равновесия коронной шестерни

$$M_{сн} - M_{пвт} \alpha - M_{баш} = [J_{првт} + J_K + 5J'_{прст}] \frac{\Delta\omega^I}{\Delta t^I},$$

где $M_{сн}$ – момент на конусах синхронизатора; $M_{пвт}$ – суммарный момент потерь (момент ведения), действующий на все элементы вторичного вала; $M_{баш}$ – момент трения, создаваемый башмаками, передвигающими коронную шестерню вдоль оси при синхронизации; $\Delta\omega^I$ – разница угловых скоростей коронной шестерни в начале и конце синхронизации. Поскольку в начале синхронизации коронная шестерня остановлена, а в конце синхронизации вращается со скоростью выходного вала, то

$$\Delta\omega^I = \omega_3 = \omega_b;$$

Δt^I – время синхронизации при первом варианте блокировки демультипликатора; $J_{првт}$ – приведенный

к коронной шестерне момент инерции вторичного вала

$$J_{првт} = J_{вт} U_{вт-к}^2,$$

где $J_{вт}$ – момент инерции вторичного вала коробки перемены передач; $U_{вт-к}$ – передаточное число от вторичного вала к коронной шестерне демультипликатора, то есть $U_{вт-к} = \alpha$; J_K – момент инерции коронной шестерни; $J'_{прст}$ – приведенный к коронной шестерне момент инерции сателлита:

$$J'_{прст} = J_{ст} U_{ст-к}^2,$$

где $J_{ст}$ – момент инерции сателлита; $U_{ст-к}$ – передаточное число от сателлита к коронной шестерне в движении сателлита относительно нее.

Величина $U_{вт-к}$ может быть определена следующим образом:

$$\omega_{ст}^B = \omega_K^B \frac{Z_K}{Z_{ст}},$$

где $\omega_{ст}^B$ – угловая скорость коронной шестерни относительно водила; $Z_{ст}$ – число зубьев сателлита; Z_K – число зубьев коронной шестерни.

Передаточное число для приведения момента инерции может быть определено по условию соосности $Z_{ст} = \frac{Z_K - Z_c}{2}$, следовательно, $\omega_{ст}^B = \omega_K^B \frac{2Z_K}{Z_K - Z_c}$,

или, с учетом формулы (1) $\omega_{ст}^B = -\omega_K^B \frac{2\alpha}{\alpha - 1}$,

$$\text{и } U_{ст-к}^B = \frac{\omega_{ст}^B}{\omega_K^B} = -\frac{2\alpha}{\alpha - 1}.$$

После подстановки выражений для приведенных моментов инерции и $\Delta\omega^I$ уравнение равновесия коронной шестерни примет следующий вид:

$$M_{сн} - \alpha M_{пвт} - M_{баш} = \left[J_{вт} \alpha^2 + J_K + 5J_{ст} \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} \right)^2 \right] \frac{\Delta\omega^B}{\Delta t^I}, \quad (11)$$

и время синхронизации

$$\Delta t^I = \frac{\left[J_{вт} \alpha^2 + J_K + 5J_{ст} \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} \right)^2 \right] \Delta\omega^B}{M_{сн} - \alpha M_{пвт} - M_{баш}}. \quad (12)$$

Во II варианте момент синхронизатора воздействует на вторичный вал коробки передач (как непосредственно, так и через коронную шестерню, сателлит и солнечную шестерню). Уравнение равновесия вторичного вала

$$M_{сн} + \frac{M_{сн}}{\alpha} - M_{пвт} - \frac{M_{баш}}{\alpha} = [J_{вт} + J_{прк} + 5J''_{прст}] \frac{\Delta\omega^{II}}{\Delta t^{II}},$$

где $M_{сн}$ – момент синхронизатора, непосредственно воздействующий на вторичный вал; $\frac{M_{сн}}{\alpha}$ – момент

синхронизатора, передаваемый на вторичный вал через коронную шестерню, сателлит и солнечную шестерню. Поскольку $M_{\text{сн}}$ разгоняет коронную шестерню, он через сателлит тормозит солнечную шестерню (и вторичный вал) так же, как и момент синхронизатора $M_{\text{сн}}$, действующий непосредственно на вторичный вал, поэтому оба слагаемых входят в уравнение равновесия с одинаковым знаком;

$M_{\text{пвт}}$, $M_{\text{баш}}$ и $J_{\text{вт}}$ – см. выше; $J_{\text{прк}}$ – приведенный ко вторичному валу момент инерции коронной шестерни, $J_{\text{прк}} = J_{\text{к}} U_{\text{к-вт}}^2$, где $U_{\text{к-вт}} = \frac{1}{\alpha}$; $J_{\text{прст}}^{\text{II}}$ – приведенный ко вторичному валу момент инерции сателлита, $J_{\text{прст}}^{\text{II}} = U_{\text{ст-вт}}^2$, где $U_{\text{ст-вт}}$ – передаточное число от сателлита к вторичному валу, $U_{\text{ст-вт}} = \frac{\omega_{\text{ст}}^{\text{B}}}{\omega_{\text{вт}}^{\text{B}}}$, где $\omega_{\text{ст}}^{\text{B}}$ –

угловая скорость сателлита относительно водила $\omega_{\text{ст}}^{\text{B}} = -\omega_{\text{вт}}^{\text{B}} \frac{Z_{\text{с}}}{Z_{\text{ст}}}$, где $Z_{\text{с}}$ – число зубьев солнечной шестерни. С учетом условия соосности (см. выше)

$$\omega_{\text{ст}}^{\text{B}} = -\omega_{\text{вт}}^{\text{B}} \frac{2Z_{\text{с}}}{Z_{\text{к}} - Z_{\text{с}}} = -\omega_{\text{ст}}^{\text{B}} \frac{2}{\alpha - 1}, \text{ откуда } U_{\text{ст-вт}}^{\text{B}} = \frac{2}{\alpha - 1}.$$

Входящий в уравнение равновесия вторичного вала параметр $\Delta\omega^{\text{II}}$ – изменение скорости вторичного вала в процессе синхронизации – определяется по следующим соображениям.

Так как в начале синхронизации солнечная шестерня вращается со скоростью $\omega_{\text{в}}$ ($1 + \alpha$), а в конце синхронизации – со скоростью $\omega_{\text{в}}$, то

$$\Delta\omega^{\text{II}} = \omega_{\text{в}} (1 + \alpha) - \omega_{\text{в}} = \alpha \omega_{\text{в}}.$$

После подстановки выражений для приведенных моментов инерции и $\Delta\omega^{\text{II}}$ уравнение равновесия вторичного вала приобретает следующий вид:

$$M_{\text{сн}} + \frac{M_{\text{сн}}}{\alpha} - M_{\text{пвт}} - \frac{M_{\text{баш}}}{\alpha} = \left[J_{\text{вт}} \alpha^2 + \frac{J_{\text{к}}}{\alpha^2} + 5J_{\text{ст}} \left(\frac{2}{\alpha - 1} \right)^2 \right] \frac{\omega_{\text{в}} \alpha}{\Delta t^{\text{II}}},$$

или

$$M_{\text{сн}} - M_{\text{пвт}} \alpha - M_{\text{баш}} + M_{\text{сн}} \alpha = \left[J_{\text{вт}} \alpha^2 + J_{\text{к}} + 5J_{\text{ст}} \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} \right)^2 \right] \frac{\omega_{\text{в}}}{\Delta t^{\text{II}}},$$

и время синхронизации

$$\Delta t^{\text{II}} = \frac{\left[J_{\text{вт}} \alpha^2 + J_{\text{к}} + 5J_{\text{ст}} \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} \right)^2 \right] \Delta\omega^{\text{B}}}{M_{\text{сн}} - \alpha M_{\text{пвт}} - M_{\text{баш}} + M_{\text{сн}} \alpha}.$$

Результатом сопоставления времени синхронизации для обоих вариантов блокировки демультипликатора является следующее выражение:

$$\frac{\Delta t^{\text{I}}}{\Delta t^{\text{II}}} = \frac{M_{\text{сн}} - M_{\text{пвт}} \alpha - M_{\text{баш}} + M_{\text{сн}} \alpha}{M_{\text{сн}} - M_{\text{пвт}} \alpha - M_{\text{баш}}},$$

или

$$\frac{\Delta t^{\text{I}}}{\Delta t^{\text{II}}} = 1 + \frac{\alpha M_{\text{сн}}}{M_{\text{сн}} - M_{\text{пвт}} \alpha - M_{\text{баш}}},$$

$$\frac{\Delta t^{\text{I}}}{\Delta t^{\text{II}}} = 1 + \frac{\alpha}{1 - \alpha \frac{M_{\text{пвт}}}{M_{\text{сн}}} - \frac{M_{\text{баш}}}{M_{\text{сн}}}}. \quad (13)$$

Выражение (13) свидетельствует о том, что соотношение времени синхронизации для обоих вариантов зависит от параметра α планетарного ряда и от величины потерь в коробке передач, препятствующих синхронизации: чем больше параметр α и потери, тем больше выигрыш по времени синхронизации у варианта II блокировки демультипликатора.

Количественно выигрыш по времени синхронизации может быть продемонстрирован на примере демультипликатора с внутренним передаточным числом $\alpha = 3,46$. Потери на вторичном валу и в башмаках, передвигающих коронную шестерню вдоль оси, могут быть ориентировочно оценены, соответственно, как 0,15 и 0,1 от $M_{\text{сн}}$. Тогда соотношение времени синхронизации первого и второго вариантов блокировки составит

$$\frac{\Delta t^{\text{I}}}{\Delta t^{\text{II}}} = 1 + \frac{3,46}{1 - 3,46 \cdot 0,15 - 0,10} = 10,08,$$

что свидетельствует о весьма значительном преимуществе варианта II по времени синхронизации.

Таким образом, вариант II блокировки планетарного демультипликатора, разработанный в НАМИ [3], имеет весьма существенные преимущества по распределению усилий, действующих на звенья демультипликатора, и в особенности по времени синхронизации звеньев демультипликатора при его блокировке, то есть при включении высшего диапазона, по сравнению с широко распространенным вариантом I.

С учетом указанных преимуществ именно этот вариант использован в конструкции разрабатываемой многоступенчатой коробки передач.

Представляется очевидным, что процесс синхронизации при включении низшего диапазона протекает при обоих вариантах блокировки демультипликатора одинаково.

Рассмотрение этого процесса показало, что он описывается тем же уравнением, что и при блокировке демультипликатора по варианту I (см. (11)), и время синхронизации может быть подсчитано по зависимости (12), то есть оно значительно больше, чем при блокировке демультипликатора по выбранному в процессе разработки варианту II.

Но увеличенное время синхронизации при включении низшего диапазона не снижает эксплуатационных качеств трансмиссии, так как оно может быть компенсировано более ранним (то есть при более

высокой частоте вращения коленчатого вала двигателя) его включением с возможностью выхода на максимальную частоту, что дает возможность полного использования мощностных показателей двигателя.

Список литературы

1. Недялков А. П. Механические синхронизированные коробки передач / Совершенствование технико-экономических показателей автомобильной техники : сб. науч. тр. / НАМИ. – 1993. – Вып. 214. – С. 73–85.

2. Александров Е. Б., Недялков А. П., Трикоз А. А. Сопоставление двух вариантов блокировки планетарных демультипликаторов многоступенчатых коробок передач по величинам усилий между звеньями и времени синхронизации при переключении диапазонов демультипликаторов : сб. науч. тр. / НАМИ. – 1999. – Вып. 223. – С. 96–107.

3. Недялков А. П., Инатов А. А. Перспективные разработки конструкций механических коробок передач с механическим и автоматическим управлением // Автомобили : сб. науч. тр. / НАМИ. – 2004. – Вып. 232. – С. 63–89.

A. P. Nedyalkov, Candidate of Technical Sciences, Central Research Automobile and Engine Institute “NAMI”
 E. B. Aleksandrov, Central Research Automobile and Engine Institute “NAMI”
 A. N. Blokhin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University after R. E. Alekseev

Analytical Study of Kinematic Schemes of Multiple-Speed Gearbox Planetary Demultipliers and Determination of the Planetary Mechanism Optimal Parameters

The comparison analysis of two variants of kinematic schemes of multiple-speed gearboxes planetary final drives is presented. Authors describe analytical relations for determination of demultiplier parts torque and its blocking time for the presented variants. The optimal method of demultiplier blocking is justified.

Key words: demultiplier, multiple-speed gearboxes, demultiplier blocking.

УДК 539.374: 620.178.3

С. В. Добровольский, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет
 В. И. Добровольский, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ ГИДРООСНАСТКИ

Приведены результаты выполненных 14 конечноэлементных решений краевых задач о концентрации главных напряжений и их градиентов в ответственных за разрушение галтелях нормированных типоразмеров корпусов гидравлических домкратов, гаек и насосов. Предложены соответствующие факторные модели для промежуточных типоразмеров указанных деталей, используемых при совершенствовании конструкций гидрооснастки.

Ключевые слова: гидравлические домкраты, гайки, насосы; концентрация напряжений.

Для повышения качества монтажно-демонтажных работ, сокращения простоев оборудования и увеличения производительности труда выполнены систематические работы по совершенствованию узлов гидрооснастки [1, 2]. Выпущен каталог типовых силовых органов (гидравлических гаек, домкратов и насосов) [3]. Вместе с тем исследований концентрации напряжений в указанных деталях не проводилось. В связи с этим в данной работе приводятся результаты исследования необходимых для прочностных расчетов коэффициентов концентрации главных напряжений и их градиентов в ответственных за разрушение галтелях указанных деталей.

Гидродомкраты используются для подъема массивных деталей и узлов бумагоделательных машин. Корпус гидродомкрата представляет собой толстостенный цилиндр, соединенный с днищем нормированным галтельным переходом радиусом $r = 1$ мм

(рис. 1). Типоразмеры (ТР) корпусов нормированных гидродомкратов приведены в табл. 1.

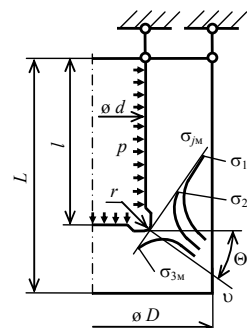


Рис. 1. Расчетная схема корпуса гидродомкрата

Гидрогайки предназначены для монтажа и демонтажа подшипниковых узлов, зубчатых колес, полумуфт и других деталей. Такие гайки имеют