

**С. Н. ШУКЛИНОВ**, д-р техн. наук, доц. ХНАДУ, Харьков

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО УСИЛИТЕЛЯ ТОРМОЗОВ В РЕЖИМЕ НАСЫЩЕНИЯ ПО ДАВЛЕНИЮ**

Приведен анализ напряженно-деформированного состояния упруго-эластичного элемента следящего устройства вакуумного усилителя тормозов для каждого участка его статической характеристики. Представлено математическое описание статической характеристики вакуумного усилителя тормозов в режиме насыщения по давлению. Установлена связь между усилием на входе и выходе вакуумного усилителя тормозов в режиме его насыщения по давлению. Предложено аналитическое определение параметров статической характеристики вакуумного усилителя в указанном режиме. Получена аналитическая зависимость коэффициента передачи следящего устройства в режиме насыщения по давлению. Определено, что коэффициент передачи следящего устройства больше единицы. Приведены расчетные и экспериментальные статические характеристики вакуумного усилителя тормозов.

**Ключевые слова:** вакуумный усилитель тормозов, статическая характеристика, следящее устройство, упруго-эластичный элемент, насыщение по давлению.

**Введение.** Вакуумный усилитель применяется практически на каждом автомобиле, оборудованном гидравлической тормозной системой с главным тормозным цилиндром. Этот аппарат позволяет существенно улучшить эргономические качества тормозного управления автомобиля. Определенное соотношение между усилием на штоке (выходе)  $F_{\text{ш}}$  усилителя и усилием управления  $F_{\text{т}}$ , приложенного со стороны водителя (на входе) обеспечивает следящее устройство. В конструкциях современных вакуумных усилителей следящее устройство чаще всего формируется на основе упруго-эластичного элемента выполненного в виде диска 2 (см. рис. 1). Такое следящее устройство позволяет получить нелинейную статическую характеристику усилителя, если обеспечить зазор  $\delta$  между торцом поршня управления и упруго-эластичным диском в момент открытия атмосферного клапана.

**Анализ последних исследований.** Анализ научно-технической литературы показывает, что нелинейная статическая характеристика вакуумного усилителя с начальной нечувствительностью является предпочтительной [1]. Причем начальная нечувствительность вакуумного усилителя должна проявляться в виде зоны отсутствия следящего действия при его включении, обусловленной зазором  $\delta$ . В этом случае характер деформации упруго-эластичного диска изменяется в зависимости от режима работы усилителя. Связь между усилием на входе (толкателе)  $F_{\text{т}}$  усилителя и его выходе (штоке)  $F_{\text{ш}}$ , установленная авторами в работах [2, 3] в зависимости от напряженно-деформированного состояния упруго-

© С. Н. Шуклинов, 2014

эластичного элемента следящего устройства определена для режимов включения и следящего действия усилителя. Авторы работы [4] приводят зависимость для определения коэффициента усиления вакуумного усилителя в режиме насыщения по давлению. Следует отметить, что предложенная зависимость между усилием на толкателе и штоке усилителя в режиме его насыщения по давлению не учитывает напряженно-деформированного состояния упруго-эластичного элемента и справедлива только для гидравлических следящих устройств.

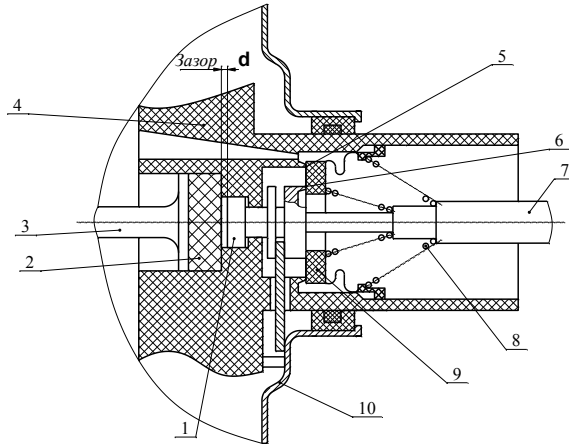


Рис. 1 – Схема следящего и клапанного устройства вакуумного усилителя в момент открытия атмосферного клапана: 1 – поршень управления; 2 – упруго-эластичный диск; 3 – шток; 4 – поршень усилителя; 5 – седло вакуумного клапана; 6 – седло атмосферного клапана; 7 – толкатель; 8 – пружина толкателя; 9 – затвор клапана; 10 – корпус усилителя.

**Цель и постановка задачи.** Установить связь между усилием на входе  $F_T$  и выходе  $F_{ш}$  вакуумного усилителя тормозов в режиме его насыщения по давлению на основе анализа напряженно-деформированного состояния упруго-эластичного элемента следящего устройства.

**Анализ напряженно-деформированного состояния упруго-эластичного элемента следящего устройства.** Связь между усилием на входе (толкателе)  $F_T$  усилителя и его выходе (штоке)  $F_{ш}$  отражает его статическая характеристика  $F_{ш} = f(F_T)$  (рис. 2). Каждый участок статической характеристики определяет напряженно-деформированное состояние упруго-эластичного элемента следящего устройства вакуумного усилителя.

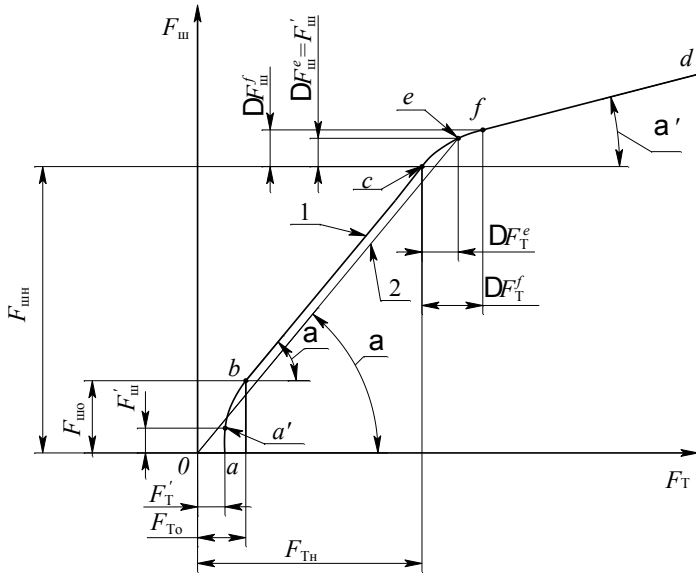


Рис. 2 – Статическая характеристика вакуумного усилителя  $F_{\text{ш}} = f(F_T)$ :

1 – с начальной нечувствительностью (зазор  $\delta > 0$ ); 2 – без начальной нечувствительности (зазор  $\delta = 0$ );  $F_T', F_{\text{ш}}'$  – усилие соответственно на поршне управления и штоке усилителя при открытии атмосферного клапана в момент касания упруго-эластичного элемента торца поршня управления (точка  $a'$  на характеристике);  $F_{T0}', F_{\text{ш}0}'$  – усилие соответственно на поршне управления и штоке усилителя после выдавливания упруго-эластичного элемента в зазор перед поршнем управления;  $F_{Tн}, F_{\text{шн}}$  – усилие соответственно на поршне управления и штоке усилителя при насыщении усилителя;  $c$  – точка насыщения усилителя по давлению при зазоре  $\delta > 0$ ;  $e$  – точка насыщения усилителя по давлению при зазоре  $\delta = 0$ .

В зоне отсутствия следящего действия  $0aa'$  (см. рис. 2) вакуумный усилитель тормозов может находиться в двух состояниях:

$0a$  – усилие на толкателе  $F_T$  не достаточно для открытия атмосферного клапана, при этом состояние упруго-эластичного элемента соответствует рис. 3а;

$aa'$  – усилие на толкателе  $F_T'$  обеспечивает перемещение поршня управления на расстояние  $h_v^{\text{max}}$  достаточное для закрытия вакуумного клапана и открытия атмосферного клапана.

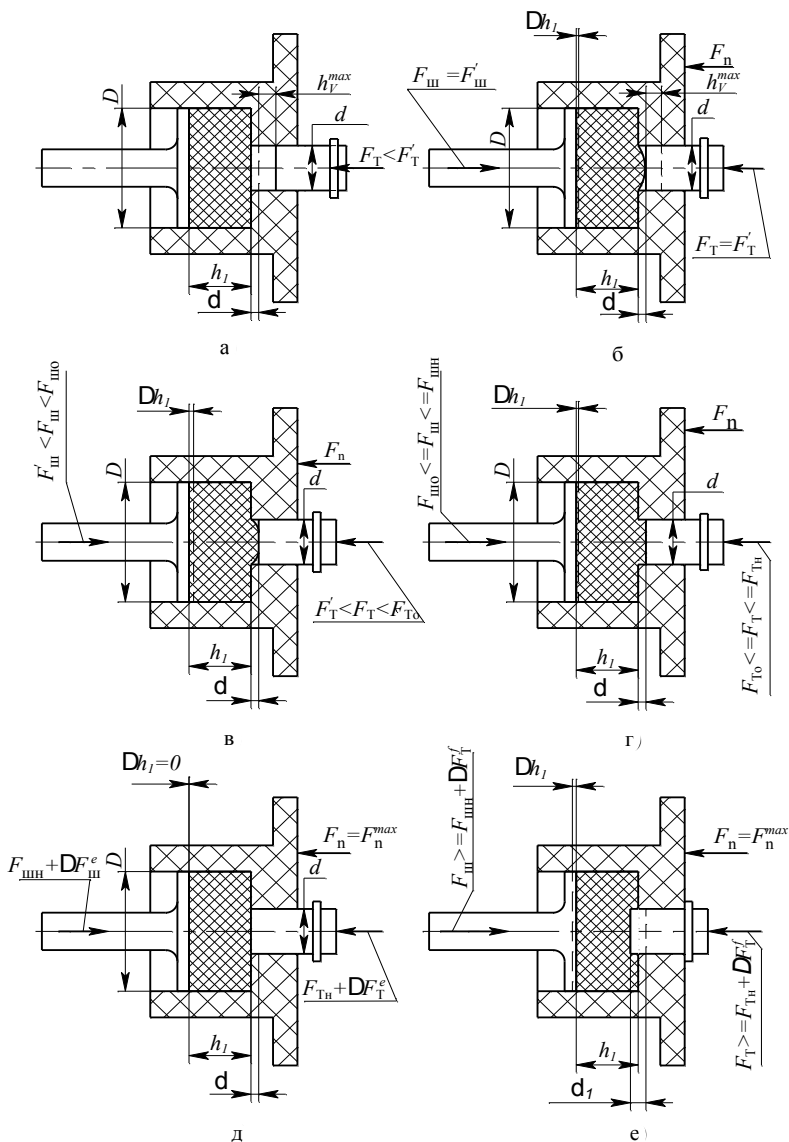


Рис. 3 – Схема напряженно-деформированного состояния упруго-эластичного элемента следящего устройства вакуумного усилителя: а, б – в зоне нечувствительности усилителя; в – в переходной зоне; г – в зоне следящего действия усилителя; д, е – в зоне насыщения усилителя по давлению;  $d, D$  – диаметры торцов, соответственно поршня управления и штока усилителя, взаимодействующих с упруго-эластичным элементом.

При этом усилии  $F_n$ , сформированное перепадом давления на поршне усилителя, выдавливает упруго-эластичный элемент в отверстие до соприкосновения его с торцом поршня управления (см. рис. 3б). Точка  $a'$  на характеристике соответствует моменту касания упруго-эластичного элемента торца поршня управления. В этом случае на штоке усилителя сформировано усилии  $F'_ш$  [3].

В переходной зоне  $a'b$  характеристики появляется следящее действие усилителя. Нелинейный характер зоны  $a'b$  обусловлен изменяющейся площадью контакта упруго-эластичного элемента с торцом поршня управления (рис. 3в). Данная зона, соответствует заполнению зазора материалом упруго-эластичного элемента с момента касания торца поршня управления (рис. 3б) до полного прилегания к его торцу (рис. 3г). Концу переходной зоны характеристики (точка  $b$ ) усилии на толкателе и на штоке соответственно равны  $F_{то}$  и  $F_{шо}$ . При этом зазор полностью заполняется материалом упруго-эластичного элемента, и усилитель переходит в режим следящего действия (соответствует участку  $bc$  статической характеристики см. рис.1). В этом случае напряженно-деформированное состояние упруго-эластичного элемента следящего устройства соответствует рисунку 3г.

В зоне насыщения усилителя по давлению (участок  $cefd$  на рис. 1) упруго-эластичный элемент следящего устройства имеет два характерных состояния как показано на рис. 3д и 3е. Начало зоны насыщения соответствующее точке  $c$  характерно тем, что в атмосферной полости вакуумного усилителя давление воздуха достигает максимального значения и равно атмосферному давлению. В этом случае увеличение усилии на поршне управления вызывает открытие атмосферного клапана, но изменения перепада давления на поршне усилителя не происходит. При этом поршень управления внедряется в упруго-эластичный элемент (см. рис. 3д и 3е).

В зоне насыщения усилителя по давлению его характеристика имеет две определяющие точки  $e$  и  $f$ . Точка  $e$  на характеристике соответствует состоянию следящего устройства, в котором упруго-эластичный элемент выдвинут из зазора  $\delta$  и принял исходную форму – форму диска (рис. 3д). Точка  $f$  статической характеристики усилителя соответствует состоянию его следящего устройства, в котором поршень управления максимально внедрился в упруго-эластичный элемент до образования жесткой механической связи с поршнем усилителя (рис. 3г).

Внедрение поршня управления в упруго-эластичный элемент обуславливает увеличение в нем действующих напряжений и как следствие увеличения давления на его торец, которое с учетом положений изложенных в работе [2] в общем случае можно определить по зависимости:

$$\Delta p_i = \frac{\delta_i}{h_1} E(A + 2\mu_{\text{тр}} C), \quad (1)$$

где  $\Delta p_i$  – увеличение давления упруго-эластичного элемента на торце поршня управления;  $\delta_i$  – внедрение поршня управления в упруго-эластичный элемент;  $h_1$  – толщина упруго-эластичного диска;  $E$  – модуль упругости материала упруго-эластичного диска;  $A = 1.5 + \frac{1}{1 - \frac{d^2}{D^2}} \ln \frac{D}{d}$  –

коэффициент [2];  $C = \frac{h_1}{d} \cdot \frac{1}{1 - \frac{d}{D}} + \frac{d}{h_1} \cdot \left[ \frac{1}{6} + \frac{\frac{1}{3} \frac{d^3}{D^3} - \frac{d}{D} + \frac{2}{3}}{2 \frac{d}{D} \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right)} \right]$  – коэффициент [2];

$\mu_{\text{тр}}$  – коэффициент трения.

Для перемещения поршня управления на величину зазора  $\delta$ , при котором упруго-эластичный элемент принимает форму диска, необходимо на толкателе обеспечить приращение усилия  $\Delta F_{\text{T}}^e$ . С учетом выражения (1) можно записать:

$$\Delta F_{\text{T}}^e = \frac{\delta}{h_1} E(A + 2\mu_{\text{тр}} C) S_{\text{пш}}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – внедрение поршня управления в упруго-эластичный элемент равное величине зазора;  $S_{\text{пш}}$  – площадь торца поршня управления.

В соответствии с приращением усилия  $\Delta F_{\text{T}}^e$  приложенного к толкателю на штоке усилителя будет сформировано усилие  $\Delta F_{\text{ш}}^e$ . Поскольку усилитель находится в режиме насыщения, постольку приращение усилия на штоке определяется приращением усилия на толкателе и свойствами следящего устройства. Для точки  $e$  статической характеристики можно записать:

$$\Delta F_{\text{ш}}^e = \Delta F_{\text{T}}^e tg\alpha', \quad (3)$$

где  $tg\alpha'$  – коэффициент усиления следящего устройства вакуумного усилителя.

Коэффициент усиления  $tg\alpha'$  следящего устройства оценивает отношение приращения выходного сигнала к приращению входного сигнала после насыщения усилителя по давлению. Для определения коэффициента

усиления следящего устройства  $tg\alpha'$  рассмотрим равенство (4), которое определяет приращение усилия на штоке после насыщения усилителя по давлению:

$$\Delta F_{ш} = \Delta F_T + \mu_{тр} \pi D h_1 \Delta \sigma, \quad (4)$$

где  $\Delta \sigma$  – приращение напряжения деформации в зоне прилегания упруго-эластичного элемента к штоку при внедрении поршня управления.

В правой части выражения (4) второй компонент характеризует силы трения упруго-эластичного элемента о стенки отверстия в поршне. При внедрении поршня управления 6 в упруго-эластичный элемент, объем деформируемой цилиндрической зоны 1 уменьшается, и часть материала вытесняется в кольцевую зону 2 (см. рис. 4) [2]. Это обуславливает перемещение части объема из кольцевой зоны 2 в кольцевую зону 3 и смещение поршня усилителя 5 относительно поршня управления 6 до образования жесткой связи 8. Знак «+» в уравнении (4) обусловлен тем, что направление сил трения  $a$  со стороны поршня усилителя, приложенных к материалу упруго-эластичного диска в кольцевой зоне деформации 2 совпадает с направлением усилия на поршне управления 6.

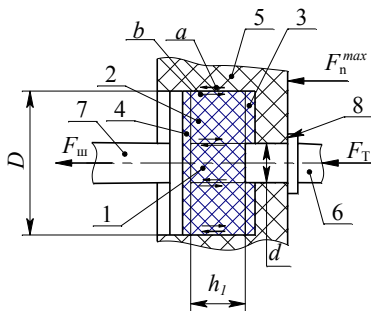


Рис. 4 – Схема деформации упруго-эластичного диска следящего устройства вакуумного усилителя в режиме насыщения по давлению: 1 – цилиндрическая зона деформации; 2 – кольцевая зона деформации; 3 – кольцевая зона вытесняемого объема; 4 – недеформированная зона; 5 – поршень усилителя; 6 – поршень управления; 7 – шток; 8 – жесткая механическая связь поршня управления с поршнем усилителя;  $a$  – направление сил трения поршня;  $b$  – направление сдвига при деформации упруго-эластичного диска;  $F_n^{max}$  – усилие на поршне усилителя при насыщении по давлению.

Учитывая, что приращение напряжения деформации в недеформированной зоне 4 упруго-эластичного элемента (см. рис. 4) при внедрении в него поршня управления равно:

$$\Delta\sigma = \frac{4\Delta F_T}{\pi D^2}, \quad (5)$$

из равенства (4) несложно получить зависимость приращения усилия на штоке от приращения усилия на толкателе

$$\Delta F_{ш} = \Delta F_T \left( 1 + 4\mu_{тр} \frac{h_1}{D} \right). \quad (6)$$

Приращение усилия на толкателе после точки  $c$  до величины  $\Delta F_T^f$  определяет максимальное внедрение поршня управления в упруго-эластичный элемент и образование жесткой механической связи с поршнем усилителя, что соответствует точке  $f$  статической характеристики (рис. 2).

Приращение усилия  $\Delta F_T^f$  в соответствии с выражением (1) определяет уравнение (7).

$$\Delta F_T^f = \frac{\delta_1}{h_1} E(A + 2\mu_{тр} C) S_{пш}, \quad (7)$$

где  $\delta_1$  – внедрение поршня управления в упруго-эластичный элемент при максимальном открытии атмосферного клапана усилителя;

Прирост усилия на толкателе  $\Delta F_T^f$  вызывает соответствующее увеличение усилия на штоке  $\Delta F_{ш}^f$ :

$$\Delta F_{ш}^f = \Delta F_T^f \operatorname{tg}\alpha'. \quad (8)$$

С учетом (8), определим коэффициент усиления следящего устройства вакуумного усилителя:

$$\operatorname{tg}\alpha' = \frac{\Delta F_{ш}}{\Delta F_T} = 1 + 4\mu_{тр} \frac{h_1}{D}. \quad (9)$$

Выражение (9) отражает зависимость коэффициента усиления следящего устройства вакуумного усилителя от геометрических параметров упруго-эластичного диска и коэффициента трения.

С учетом полученных зависимостей можно определить усилие на штоке вакуумного усилителя в режиме насыщения по давлению после образования жесткой связи между поршнем управления и поршнем усилителя:



$$F_{ш}^d = F_{шн} + (F_T^d - F_{Тн}) \operatorname{tg} \alpha', \quad (10)$$

где  $F_T^d, F_{ш}^d$  – усилие соответственно на толкателе и штоке вакуумного усилителя тормозов в режиме его насыщения по давлению.

На рисунке 5 представлена экспериментальная статическая характеристика 1 вакуумного усилителя тормозов ХАДИ-3510010. На этом же рисунке нанесена и расчетная характеристика 2 этого же усилителя, построенная по разработанным зависимостям. Хорошее соответствие расчетных значений экспериментальным данным – очевидно.

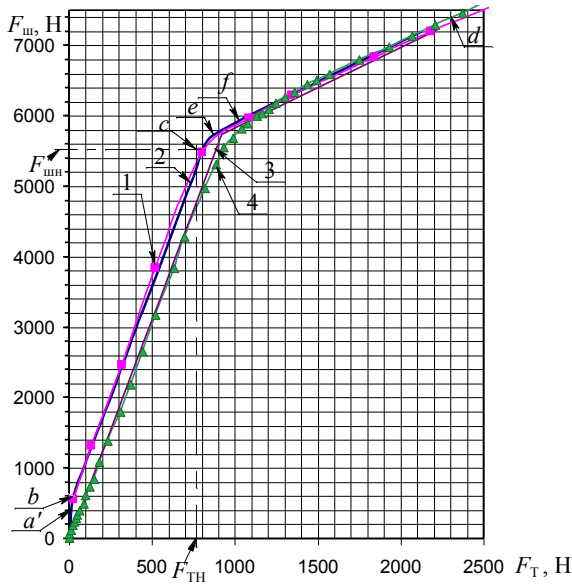


Рис. 5 – Экспериментальная и расчетная статические характеристики вакуумного усилителя ХАДИ-3510010: 1 – экспериментальная характеристика; 2 – расчетная характеристика; 3, 4 – экспериментальная и расчетная характеристики усилителя без начальной нечувствительности; точки  $a'$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $d$  соответствуют рисунку 2.

Экспериментально подтверждено, что коэффициент усиления следящего устройства в режиме насыщения по давлению больше единицы, в частности для вакуумного усилителя ХАДИ-3510010 определено что  $\operatorname{tg} \alpha' = 1,08 \div 1,12$ .

На рисунке 5 нанесены также экспериментальная 3 и расчетная 4 статические характеристики вакуумного усилителя, не имеющего начальной нечувствительности. Для получения экспериментальной характеристики 3 в усилителе ХАДИ-3510010 был увеличен линейный размер поршня

управления на величину зазора  $\delta = 0,5$  мм. Хорошее совпадение этих характеристик еще раз подтверждает адекватность описания напряженно-деформированного состояния упруго-эластичного диска следящего устройства.

**Выводы.** Таким образом, определен характер деформации упруго-эластичного элемента следящего устройства, установлены связь между усилием на входе и выходе вакуумного усилителя тормозов в режиме его насыщения по давлению и зависимость коэффициента усиления следящего устройства от его геометрических параметров.

Полученные зависимости (2, 3, 7 – 10) позволяют конструктору на стадии проектирования определить статическую характеристику вакуумного усилителя тормозов со следящим устройством на основе упруго-эластичного диска в режиме насыщения по давлению и оценить влияние на эту характеристику геометрических параметров упруго-эластичного диска.

**Список литературы:** 1. Шуклинов С.Н. Анализ статической характеристики вакуумного усилителя / С.Н. Шуклинов // Вестник МАДИ (ГТУ). – 2009. – Вып. 3(18). – С. 7–11. 2. Туренко А.Н. Удельное усилие на поршне управления вакуумного усилителя тормозов / А.Н. Туренко, С.Н. Шуклинов // Вестник ХНАДУ. – 2010. – Вып. 49. – С. 39–46. 3. Шуклинов С.Н. Удельное усилие на штоке вакуумного усилителя тормозов / С.Н. Шуклинов // Вестник НТУ ХПИ «Автомобиле и тракторостроение». – 2010. – Вып. 33. – С. 54 – 63. 4. Гришкевич А.И. Автомобили: Конструкция, конструирование и расчет. Системы управления и ходовая часть: учеб. пособие для вузов/ А.И. Гришкевич, Д.М. Ломако, В.П. Автушко и др.; под ред. А.И. Гришкевича. – Мн.: Выш. шк., 1987. – 200 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shuklinov S.N. "Analiz staticheskoy harakteristiki vakuumnogo usilitelya." *Vestnik MADI (GTU)*. No. 3(18). 2009. p. 7–11. Print. 2. Turenko A.N., and S.N. Shuklinov "Udelnoe usilie na porshne upravleniya vakuumnogo usilitelya tormozov." *Vestnik HNADU*. NO. 49. 2010. p. 39–46. Print. 3. Shuklinov S.N. "Udelnoe usilie na shtoke vakuumnogo usilitelya tormozov." *Vestnik KhPI (NTU). Tematicheskij vypusk: Avtomobile- i traktorostroenie*. NO. 33. 2010. p. 54 – 63. Print. 4. *Avtomobili: Konstrukciya, konstruirovaniye i raschet. Sistemy upravleniya i hodovaya chast: ucheb. posobie dlya vuzov.* A.I. Grishkevich, D.M. Lomako, V.P. Avtushko i dr.; pod red. A.I. Grishkevicha. – Mn.: Vysh. shk., 1987. – 200 p. Print.

*Поступила (received) 22.12.2014*