

УДК 629.35.02.001.57

С.Н. Шуклинов, д-р тех. наук, доц.,
М.Ю. Залогин, магистр,
Харьк. нац. атомоб.-дорожн. ун-т,
П.Р. Бартош, канд. тех. наук, проф.,
Белорус. нац. техн. ун-т, г. Минск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА КАБИНЫ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Введение. Эксплуатация грузового автомобиля не обходится без технического обслуживания систем управления, элементов трансмиссии, а также двигателя. Доступ к системам и агрегатам на грузовых автомобилях с бескапотной компоновкой чаще всего вызывает определенные трудности. Это вызвано тем, что при осмотре и ремонте агрегатов и систем необходимо предварительно поднять кабину. Для этого применяют механизмы подъема кабины.

Анализ последних исследований и публикаций. Существуют как механические, так и гидравлические механизмы подъема кабины. На сегодняшний день наибольшее распространение получили гидравлические механизмы подъема кабины [1].

В качестве источника давления жидкости применяют ручной насос поршневого типа, приводимый в действие с помощью рукоятки непосредственно мускульной силой человека. В качестве исполнительного элемента механизма подъема кабины используют гидравлический цилиндр поршневого типа двухстороннего действия. В настоящее время известны различные конструкции насосов и гидравлических цилиндров, отличающиеся между собой принципиальной схемой [2].

В данной статье в качестве примера рассматривается конструкция гидравлического насоса [3] механизма подъема кабины. Типичное расположение элементов гидравлического механизма подъема кабины показано на примере автомобиля КамАЗ 65115 (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения элементов гидравлического механизма подъема кабины

При анализе литературных источников [4...6] установлено, что для поднятия кабины требуется от 100 (автомобиль Reno Magnum) до 220 (автомобиль Mercedes Actros MP3 Megaspacer) возвратно-поступательных движений рукоятки с развиваемым усилием человека до 300 Н. Следовательно, при определенных параметрах кабины и механизма необходимы значительные энергетические затраты человека.

Целью работы является создание математического описание входного воздействия на механизм, динамики гидравлической цепи механизма подъема кабины, и нагрузочной характеристики.

Изложение основного материала. С целью определения характера воздействующей нагрузки на приводную рукоятку насоса проведено несколько экспериментов подъема кабины автомобиля КамАЗ 65115. В результате выявлено, что величина и темп создаваемого усилия на

DOI 10.15276/opus.2.44.2014.08

© С.Н. Шуклинов, М.Ю. Залогин, П.Р. Бартош, 2014

рукоятке имеет стохастический характер и зависит от антропометрических размеров и физического состояния человека. В этой связи для исследования рабочих процессов механизма подъема кабины целесообразно использовать каноническое воздействие на рукоятку насоса. В частности, при моделировании входного воздействия используется синусоидальный закон перемещения поршня:

$$y(t) = A \sin(\omega t),$$

где y — текущая координата перемещения поршня насоса;

$\omega = 2\pi\nu$ — угловая частота (ν — линейная частота перемещения рукоятки);

A — амплитуда движения поршня насоса;

При этом амплитуду перемещения поршня определяет его конструкция, а частота возвратно-поступательных движений поршня насоса эквивалентна линейной частоте перемещения рукоятки.

При математическом моделировании рабочих процессов механизма подъема кабины составлена динамическая схема гидравлической цепи (рис. 2), состоящая из: насоса; обратного клапана; трубопровода и гидравлического цилиндра. В гидравлической цепи жидкость рассматривается сжимаемой и сосредоточенной в объеме Y_2 , в котором сжимаемость пузырьков нерастворенного воздуха учитывается податливостью $\psi_2(p_2)$. При рассмотрении динамических процессов сделаны следующие допущения: волновые процессы в гидравлической цепи не влияют на переходной процесс; вязкость, плотность и температура рабочей жидкости и количество нерастворенного воздуха в ней не изменяются с течением времени; отсутствуют утечки.

Баланс давлений жидкости для участка $Y_1 - Y_2$ динамической цепи можно описать известным уравнением [7]:

$$p_j + p_l + p_m + p_1 = p_2,$$

где p_j — инерционные потери давления жидкости;

p_l — потери давления жидкости по длине;

p_m — потери давления жидкости в местных сопротивлениях;

p_1, p_2 — давления жидкости в поршневой полости насоса и гидроцилиндра соответственно.

Уравнение движения жидкости с учетом неразрывности [7]

$$a_1 \ddot{z} + a_2 \dot{z} + a_3 z^2 \operatorname{sgn}(\dot{z}) + p_2 = p_1,$$

где a_1, a_2, a_3 — коэффициенты уравнения.

Скорость изменения давления в поршневой полости насоса

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{S_n \dot{y} - S_c \dot{z}}{S_n (y_{\max} - y) + V_0} E,$$

где S_n, S_c — площадь поршня насоса и гидроцилиндра, соответственно;

\dot{y}, \dot{z} — скорость перемещения поршня насоса и гидроцилиндра, соответственно;

y, y_{\max} — текущее и максимальное перемещение поршня насоса, соответственно;

E — модуль упругости жидкости, содержащей нерастворенный воздух;

V_0 — объем камеры сжатия.

Объемный модуль E упругости жидкости, содержащей нерастворенный воздух, может быть определен по выражению (1). Это справедливо при допущении, что воздушные пузырьки при сжатии не растворяются [8].

$$E = E_{\text{ж}} \frac{V_f / V_a + 1}{V_f / V_a + E p_0 / p^2}, \quad (1)$$

где $E_{\text{ж}}$ — объемный модуль упругости чистой жидкости, не содержащей нерастворенного воздуха;

V_f — объем жидкости в жидкостно-воздушной смеси при заданном давлении p ;

V_a — объем воздуха в смеси с жидкостью при атмосферном давлении p_0 .

Скорость поршня гидроцилиндра с учетом податливости жидкости

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dz_1}{dt} - \left(\frac{S_n}{S_{\text{ц}}} y_{\text{max}} + z_{\text{min}} + l_{\text{тр}} \frac{f_{\text{тр}}}{S_{\text{ц}}} + z_{\text{ц}} \right) \frac{1}{E} \frac{dF(z)}{dt},$$

где $F(z)$ — усилие на штоке гидроцилиндра.

Усилие на штоке гидроцилиндра определяется нагрузкой кабины. Для определения усилия $F(z)$ составим кинематическую схему (рис. 3).

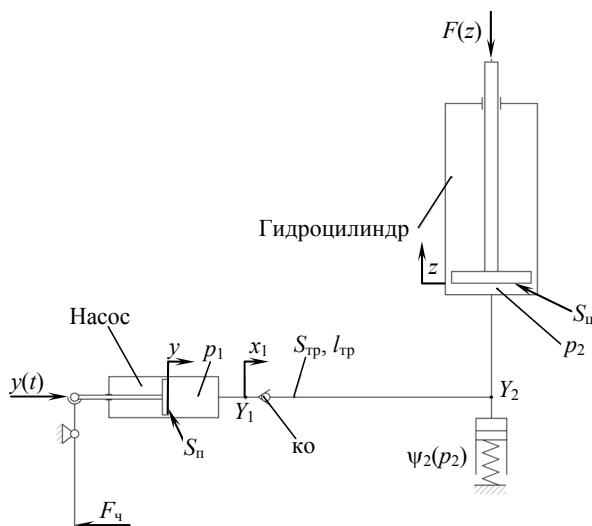


Рис. 2. Динамическая схема гидравлической цепи механизма подъема кабины: $y(t)$ — закон изменения перемещения поршня насоса; y — перемещение поршня насоса; p_1 — давление в поршневой полости насоса; S_n — площадь поршня насоса; x_1 — перемещение столба жидкости; $S_{\text{тр}}$ — площадь сечения трубопровода; $l_{\text{тр}}$ — длина трубопровода; $S_{\text{ц}}$ — площадь поршня гидроцилиндра; p_2 — давление в поршневой полости гидроцилиндра; z — перемещение поршня гидроцилиндра; $\psi_2(p_2)$ — коэффициент податливости жидкости; $F(z)$ — усилие на штоке гидроцилиндра со стороны кабины; $F_{\text{ч}}$ — мускульная сила человека, приложенная к рукоятке насоса; ко — клапан обратный

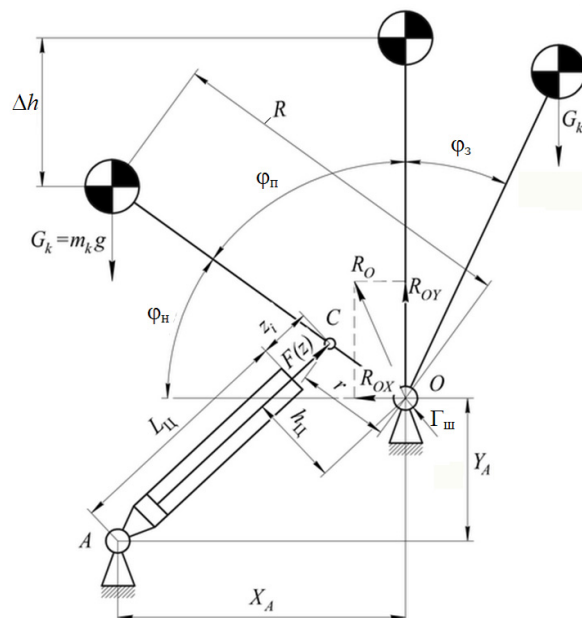


Рис. 3. Кинематическая схема механизма подъема кабины: X_A, Y_A — координаты оси крепления гидроцилиндра; $\varphi_{\text{П}}, \varphi_{\text{З}}$ — угол подъема, угол запрокидывания кабины соответственно; $L_{\text{Ц}}$ — длина гидроцилиндра; $z_{\text{ц}}$ — ход штока гидроцилиндра; $\varphi_{\text{Н}}, R$ — координаты центра масс кабины; $h_{\text{Ц}}$ — плечо действия усилия штока гидроцилиндра; G_k — сила тяжести кабины

Уравнение движения кабины в общем виде

$$m_k \ddot{\varphi} - k \dot{\varphi} - c_k \varphi = F(z) h_{\text{ц}} - G_k R \cos(\varphi) - M_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где k — коэффициент демпфирования;

c_k — жесткость вспомогательных устройств (сервопружин).

Ввиду малых значений скорости углового ускорения, первыми двумя компонентами в левой части уравнения можно пренебречь. Уравнение (2), в случае отсутствия вспомогательных устройств, приобретает вид уравнения статического равновесия

$$F(z) h_{\text{ц}} = G_k R \cos(\varphi) - M_{\text{тр}},$$

откуда,

$$F(z) = \frac{G_k R \cos(\varphi) \pm M_{\text{тр}}}{h_{\text{ц}}},$$

где $M_{\text{тр}} = \sqrt{R_{Ox}^2 + R_{Oy}^2} f_{\text{тр}} r_{\text{ш}}$ — момент трения в шарнире (R_{Ox} , R_{Oy} — реакции, действующие в шарнире);

$f_{\text{тр}}$ — коэффициент трения;

$r_{\text{ш}}$ — радиус шарнира;

“+” — при подъеме кабины;

“−” — при опускания кабины.

Результаты. Математическая модель механизма подъема кабины реализована в системе моделирования динамических и событийно управляемых процессов Simulink системы инженерных и научных расчетов Matlab. Модель позволяет описать динамические процессы, протекающие при подъеме кабины с учетом податливости жидкости, учесть потери на трение, а также количественно оценить энергетические затраты человека при подъеме кабины. Энергетические затраты человека при управлении механизмом подъема кабины определяются изменением потенциальной энергии и КПД механизма.

Потенциальная энергия при подъеме кабины увеличивается пропорционально увеличению высоты центра масс и определяется как

$$\Pi = G_k \Delta h,$$

где Δh — высота центра масс кабины.

При этом работа, выполняемая человеком, при подъеме кабины

$$A_{\text{чел}} = \frac{\Pi}{\eta_{\Gamma} \eta_{\text{М}}},$$

где η_{Γ} , $\eta_{\text{М}}$ — гидравлический и механический КПД механизма подъема кабины.

Нагрузочная характеристика (рис. 4) механизма подъема кабины соответствует параметрам автомобиля КамАЗ 65115: $m_k=600$ кг; $R=0,6$ м; $L_{\text{ц}}=0,3$ м; $\psi_{\text{н}}=30^\circ$; $X_A=0,42$ м; $Y_A=0,285$ м, $r=0,19$ м; $r_{\text{ш}}=0,04$ м; $f_{\text{тр}}=0,3$.

Очевидно, что сила трения в шарнире поворота кабины уменьшается по мере увеличения угла подъема кабины. Также необходимо отметить, что усилия на штоке гидроцилиндра при подъеме и опускании кабины отличаются и зависят от момента трения в шарнире и направления движения кабины.

Характеристика потенциальной энергии кабины (рис. 5) и выполняемой работы при подъеме кабины соответствует параметрам: $S_{\text{тр}}=12,56 \cdot 10^{-6}$ м²; $l_{\text{тр}}=2$ м; $S_{\text{ц}}=12,56 \cdot 10^{-4}$ м²; $S_{\text{п}}=15,38 \cdot 10^{-5}$ м²; $y_{\text{max}}=0,024$ м; $z_{\text{min}}=0,002$ м; $k=23$; $\mu_1=\mu_2=0,7$; $\xi=2,5$; $V_d/V_f=5$ %; $E_{\text{ж}}=1400$ МПа.

Следует отметить, что затрачиваемая энергия для поднятия кабины зависит от механического и гидравлического КПД. Также значительное влияние оказывает объем нерастворенного воздуха, находящегося в жидкости.

Выводы. Основные научные и прикладные результаты исследований:

— Разработаны математические модели входного воздействия и нагрузочной характеристики на механизм

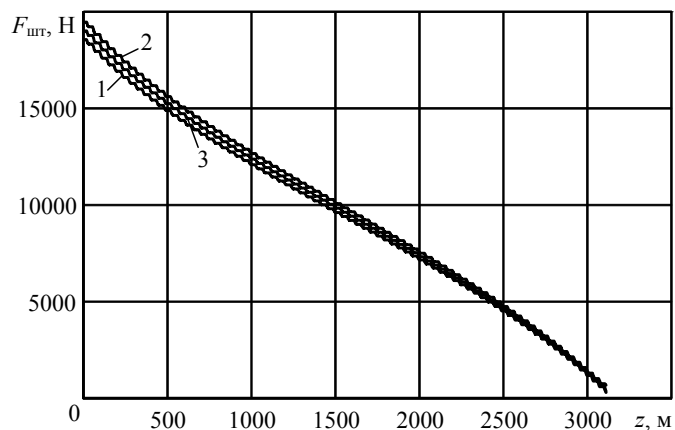


Рис. 4. График зависимости усилия $F_{\text{шт}}$ от хода штока z гидроцилиндра: без трения в шарнире (1), при подъеме кабины на угол $\varphi_{\text{н}}$ до ВМТ (2), при опускании кабины из ВМТ до начального угла $\varphi_{\text{н}}$ (3)

подъема кабины, а также движения жидкости в гидравлической цепи с учетом податливости.

— Разработанная математическая модель нагрузочной характеристики механизма подъема кабины позволяет оценить характер действия усилия, а также работу трения в шарнире.

— Выполнена количественная оценка энергетических затрат человека при воздействии на рукоятку насоса при подъеме кабины.

— Результаты математического моделирования позволяют опередить КПД механизма и КПД гидравлической системы.

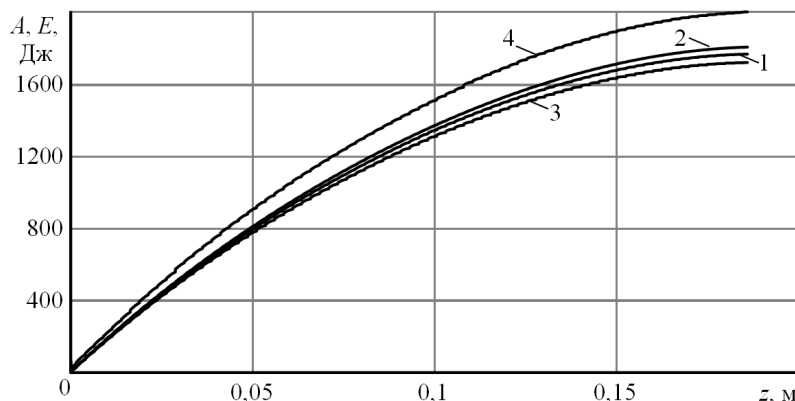


Рис. 5. График зависимости энергии E от хода штока z гидроцилиндра: без трения в шарнире (1), при подъеме кабины на угол φ_n до ВМТ (2), при опускании кабины из ВМТ до начального угла φ_n (3), выполняемой работы человека при подъеме кабины (4)

Литература

1. Шуклінов, С.М. Аналіз функціональних властивостей механізмів підйому кабін вантажних автомобілів / С.М. Шуклінов, М.Ю. Залогін // Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф., 21–23 жовтня 2013 р., Вінниця. — Вінниця: ВНТУ, 2013. — С. 183 — 184.
2. Анализ конструктивных особенностей объемных гидроприводов для подъема кабины / Г.А. Аврунин, В.А. Богомолов, В.И. Клименко [и др.] // Промислова гідроліка і пневматика. — 2012. — Вип. 1(35). — С. 86 — 97.
3. Пат. 87429 Україна, МПК F15B 15/00. Насос гідролічного механізму підйому кабін / Богомолов В.О., Клименко В.І., Шуклінов С.М., Залогін М.Ю.; патентовласники Богомолов В.О., Клименко В.І., Шуклінов С.М., Залогін М.Ю. — № u201309317; заявл. 25.07.2013; надр. 10.02.2014, Бюл. № 3.
4. Лапшин, Ф. Последняя дуэль / Федор Лапшин // Грузовики и автобусы: приложение к газете “Авторевю”. — 2012. — № 7.
5. Лапшин, Ф. Рядные / Федор Лапшин // Грузовики и автобусы: приложение к газете “Авторевю”. — 2013. — № 11.
6. Cab Tilt [Электронный ресурс] / Power-Packer: We Power Your Ideas. — Режим доступа: <http://www.powerpackerus.com/portfolio-item/cab-tilt/> (Дата обращения: 20.02.2014).
7. Lamb, H. Hydrodynamics / H. Lamb. — 2nd ed. — Miami: HardPress Publishing, 2012. — 622 p.
8. Cho, B.-H. Estimation Technique of Air Content in Automatic Transmission Fluid by Measuring Effective Bulk Modulus / B.-H. Cho, H.-W. Lee, J.-S. Oh // International Journal of Automotive Technology. — 2002. — Vol. 3, Issue 2. — PP. 57 — 61.

References

1. Shuklinov, S.M. and Zalugin, M.Yu. (2013). Analysis of the functional properties of the lifting mechanisms of truck cabs. In V.V. Grabko (Ed.), *Proceedings of VI International Scientific Practical Conference “Modern Technologies and Prospects of Development of Motor Transport”* (pp. 183-184). Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University.
2. Avrunin, G.A., Bohomolov, V.A., Klymenko, V.I., Zalugin, M.Yu., Moroz, I.I. and Kabanenko, I.V. (2012). Analysis of structural features of volumetric hydraulic drives for cab lifting. *Industrial Hydraulics and Pneumatics*, 1, 86-97.
3. Bohomolov, V.O., Klymenko, V.I., Shuklinov, S.M. and Zalugin, M.Yu. (2014). *Pump of hydraulic mechanism of cabin lift*. Ukraine Patent: UA 87429.

4. Lapshin, F. (2012, July 20). Last Duel. *Autoreview: Trucks and buses*. Retrieved http://trucks.autoreview.ru/_archive/section/detail.php?ELEMENT_ID=125895
5. Lapshin, F. (2013, November 20). Inlines. *Autoreview: Trucks and buses*. Retrieved http://trucks.autoreview.ru/_archive/section/detail.php?ELEMENT_ID=133403
6. Power-Packer (n.d.). Cab Tilt. *Power-Packer: We Power Your Ideas*. Retrieved from <http://www.powerpacker.com/portfolio-item/cab-tilt/>
7. Lamb, H. (2012). *Hydrodynamics* (2nd ed.). Miami: HardPress Publishing.
8. Cho, B.-H., Lee, H.-W. and Oh, J.-S. (2002). Estimation technique of air content in automatic transmission fluid by measuring effective bulk modulus. *International Journal of Automotive Technology*, 3(2), 57-61.

АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

С.М. Шуклінов, М.Ю. Залогін, П.Р. Бартош **Математичне моделювання робочих процесів механізму підйому кабіни вантажного автомобіля.** Виконано математичне моделювання робочих процесів механізму підйому кабіни. Модель складається з вхідного впливу на механізм; рівняння руху рідини, що описує гідравлічні процеси, а також рівняння руху кабіни. Розроблено математичні моделі вхідного впливу і навантажувальної характеристики на механізм підйому кабіни, а також руху рідини в гідравлічному ланцюзі з урахуванням піддатливості. Розроблено математичну модель навантажувальної характеристики механізму підйому кабіни, що дозволяє оцінити характер дії зусилля, а також роботи тертя в шарнірі. Виконана кількісна оцінка енергетичних затрат людини при впливі на рукоятку насоса при підйомі кабіни. Результати математичного моделювання дозволяють визначити ККД механізму і гідравлічної системи. Наведено результати чисельного моделювання.

Ключові слова: механізм підйому кабіни, вантажний автомобіль, математична модель, податливість, енергія.

С.Н. Шуклинов, М.Ю. Залогин, П.Р. Бартош **Математическое моделирование рабочих процессов механизма подъема кабины грузового автомобиля.** Выполнено математическое моделирование рабочих процессов механизма подъема кабины. Модель состоит из входного воздействия на механизм, уравнения движения жидкости, описывающего гидравлические процессы, а также уравнения движения кабины. Разработаны математические модели входного воздействия и нагрузочной характеристики на механизм подъема кабины, а также движения жидкости в гидравлической цепи с учетом податливости. Разработанная математическая модель нагрузочной характеристики механизма подъема кабины позволяет оценить характер действия усилия, а также работу трения в шарнире. Выполнена количественная оценка энергетических затрат человека при воздействии на рукоятку насоса при подъеме кабины. Результаты математического моделирования позволяют опередить КПД механизма и гидравлической системы. Приведены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: механизм подъема кабины, грузовой автомобиль, математическая модель, податливость, энергия.

S.M. Shuklinov, M.Yu. Zalogin, P.R. Bartosh **Mathematical simulation of the truck cabin lifting gear working processes.** The mathematical model of the truck cabin lifting gear working processes has been simulated and studies. The model includes the initial force applied to the mechanism, the fluid flow equation describing the hydraulic processes, as well as the cabin repositioning motion equations. Mathematical models of the initial force and load characteristic on the cab lifting mechanism are developed, as well as the models of the fluid flow in the hydraulic circuit considering the mechanical compliance. The developed mathematical model allows to evaluate the effort nature as well as the friction work at the hinge. The quantitative assessment of energy losses on exposure to the pump handle when lifting the cabin is carried out. The mathematical simulation results allow the efficiency of the gear and hydraulic system to be determined. Also presented are the results of numerical modeling.

Keywords: cabin lifting gear, truck, mathematical model, mechanical compliance, energy.

Рецензент д-р техн. наук., проф. Одес. нац. политехн. ун-та Сурьянинов Н.Г.

Поступила в редакцию 7 марта 2014 г.