

МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА И ОПУСКАНИЯ СТРЕЛЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДЕМПФЕРОМ В ВИДЕ ГИДРОДИОДА

С. Ю. Кайгородов

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В гидравлических и пневматических системах ввиду множества факторов их работы неизбежно возникают колебания давлений и расходов. Такие колебания образуются при работе газожидкостных агрегатов, при прохождении потоков сопротивлений, а также на их появление оказывает влияние материал изготовления (его жесткость) системы. Как правило, такие явления в системах нежелательны и приводят к изменениям рабочих характеристик системы относительно расчетных данных. Таким образом, существуют различные механизмы, позволяющие «сгладить» колебания систем. В гидравлических системах, в частности в грузоподъемных машинах, часто для этого используют специальные устройства — демпферы. В настоящей работе предлагается использовать в качестве демпфера гидродиод. Обладая различным расходом в прямом и обратном направлении, он обеспечивает различную расходно-перепадную характеристику при подъеме и опускании стрелы. Данный эффект позволяет улучшить позиционирование стрелы крана при подъеме и опускании стрелы.

Ключевые слова: кран, стрела, демпфер, гидродиод, сопротивление, диодность.

В настоящее время человечество активно использует энергию, получаемую механическими, химическими, электрическими и другими путями в своей жизнедеятельности. Уже невозможно представить мир без тяжелой техники, станков, автомобилей и других вещей, облегчающих наш быт.

Наверное, самым первым и важным этапом в развитии науки стало использование механической энергии. С появлением рычага стало возможным осуществление многих вещей, недоступных человеку ранее. Дальнейшее развитие науки и техники привело к тому, что, помимо механически связанных между собой агрегатов и систем, человек стал использовать энергию воздуха и жидкости.

Развитие энергетических систем, работающих за счёт энергии движения жидкости, получили огромное распространение на многие сферы жизнедеятельности человека. Одним из самых распространённых гидравлических агрегатов в мире являются гидравлические приводы (гидроцилиндры) [1].

Тем не менее при использовании в жизнедеятельности энергии движения жидкости требуется регулировать скорость исполнительных элементов гидропривода, осуществляющих работу. При использовании объёмного гидропривода регулирование скорости выходного звена осуществляется объёмным (машинным) и дроссельным регулированием [2, 3].

Наиболее распространённым способом регулирования скорости выходного звена является дроссельное регулирование. При этом дроссели, установленные в системе, являются также и демпфирующими устройствами, обеспечивающими гашение колебаний в процессе работы по поднятию и опусканию массивных грузов [3].

Таким образом, решению задач создания высокоэффективных конструкций кран-манипуляторных установок мешает недостаточная изученность влия-

ния устройств демпфирования на снижение их динамической нагруженности, а также влияние на их производительность.

В работах [4–6] авторы рассматривают демпфирующие устройства в манипуляторах крановых установок. Такие устройства позволяют сгладить колебания давлений в системе и улучшить позиционирование стрелы крана, для чего авторы предлагают использовать сложные демпфирующие устройства.

Для улучшения позиционирования стрелы предлагается механизм подъема стрелы манипулятора [7], содержащий гидроцилиндр и дополнительный демпфер, представляющий собой дроссель в виде гидравлического диода, установленный на пути жидкости из поршневой полости гидроцилиндра (рис. 1).

В работе [8] автор описывает устройство дросселирующего устройства в виде гидродиода и исследует его характеристики численным методом.

Гидродиод в общем случае представляет собой механическое устройство, не обладающее подвижными элементами и, как следствие, практически не изнашивается и не подвержен поломкам. Благодаря особой геометрии гидродиод обладает различным сопротивлением при течении через него жидкости в одном и другом направлении. Основной характеристикой гидродиода считают диодность, выраженную как отношение расходов течения жидкости в прямом и обратном направлении [9].

Таким образом, качество резисторного струйного диода можно определить величиной отношения прямого $Q_{пр}$ и обратного $Q_{об}$ расходов, названной диодностью по расходу A_Q [9]:

$$A_Q = \frac{Q_{пр}}{Q_{об}}. \quad (1)$$

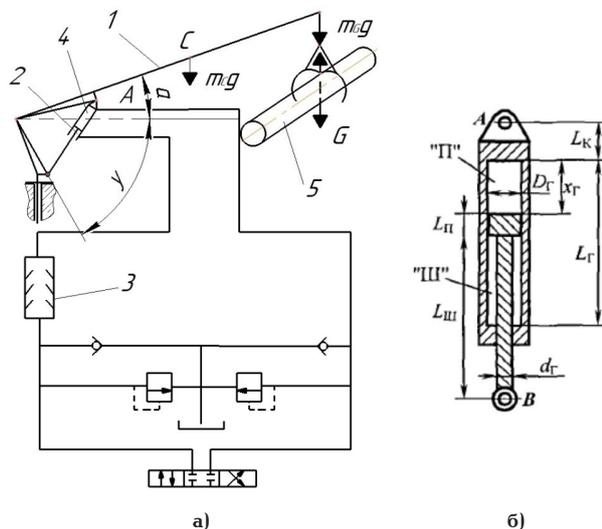


Рис. 1. Схема механизма подъема стрелы манипулятора с демпфером в виде гидродиода (а) и расчётная схема гидроцилиндра (б)

Fig. 1. Diagram of the boom lifting mechanism of the manipulator with a damper in the form of a hydrodiode (a) and the design scheme of the hydraulic cylinder (b)

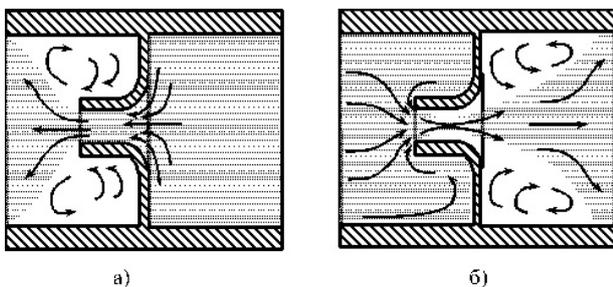


Рис. 2. Схема соплового гидродиода при течении жидкости в прямом (а) и обратном (б) направлении

Fig. 2. Diagram of the nozzle hydrodiode during the flow of liquid in the forward (a) and reverse (b) directions

Для резисторных гидродиодов помимо показателя D_Q используется также величина диодности по сопротивлению, выраженная в отношении гидравлических сопротивлений диода в обратном $\zeta_{об}$ и прямом $\zeta_{пр}$ направлении:

$$D = \frac{\zeta_{об}}{\zeta_{пр}}. \quad (2)$$

При этом зависимость между D и D_Q определяется выражением

$$D_Q = \sqrt{D}. \quad (3)$$

В результате экспериментальных исследований [9] установлено, что при течении жидкости в ламинарном режиме у резистивных диодов величина D_Q примерно равна единице, т.е. диодность данных элементов при этом условии очень мала.

Таким образом, применение гидродиода в качестве демпфирующего и дросселирующего устройства в кран-манипуляторных установках кажется перспективным.

Рассмотрим работу такой установки, схема которой представлена на рис. 1. В начале подъема стрелы

крана 1 рабочая жидкость поступает в поршневую полость 2 гидроцилиндра через гидравлический диод 3, практически не встречая сопротивления. В результате чего жидкость из штоковой полости 4 гидроцилиндра вытесняется в сливную магистраль. При опускании стрелы крана 1 рабочая жидкость поступает в штоковую полость 4 гидроцилиндра. Таким образом, вытесняется жидкость из поршневой полости 2, проходя при этом гидравлический диод 3, расположенный в обратном направлении потока, что создаёт сопротивление движению жидкости. Тем самым обеспечивается гашение избыточной скорости и колебаний давления жидкости и неравномерность движения стрелы манипулятора 1, получаемой из-за инерционных сил массы груза 5 на конце стрелы манипулятора 1.

Гидравлический диод 3 может быть представлен различными конструктивными вариантами [9–11]. При разработке математической модели механизма подъема стрелы кран-манипулятора с дополнительным демпфером использовалось описание работы соплового гидравлического диода [12]. Схема такого диода представлена на рис. 2.

Расчет коэффициента сопротивления соплового гидродиода в прямом направлении приблизительно вычисляется согласно формуле [9]:

$$\zeta_{пр} = 0,03 + \left(1 - \frac{\omega}{\Omega}\right)^2, \quad (4)$$

где ω — площадь сопла; Ω — площадь подводящей трубы.

Расчет коэффициента сопротивления соплового гидродиода в обратном направлении приблизительно вычисляется согласно формуле [9]:

$$\zeta_{об} = \left(1 - \frac{\varepsilon\omega}{\Omega}\right)^2. \quad (5)$$

Коэффициент сужения потока определяется в соответствии с работой [13] выражением

$$\varepsilon = \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\omega}{\Omega}(1 + \zeta_{вх})}\right] \frac{\Omega}{\omega}. \quad (6)$$

Автор [9] приводит сведения о расчетных результатах вычисления диодности различных гидродиодов, из которых следует, что максимальное отношение прямого расхода к обратному (величина D) у соплового гидродиода составляет не более 3–4. При этом прямое сопротивление диода ($\zeta_{пр}$) очень мало (порядка 0,07–0,04), что делает его чувствительным к нагрузке.

Математическая модель рабочего процесса механизма подъема и опускания стрелы кран-манипулятора с дополнительным демпфером в виде гидродиода включает два основных уравнения:

1) уравнение движения стрелы манипулятора с учетом колебаний груза

$$(J_C + J_G) \frac{d^2 a}{dt^2} = \left[P_{п} \frac{\pi D_G^2}{4} - P_{ш} \frac{\pi (D_G^2 - d_G^2)}{4} \right] \times \frac{L_A \sin(a + \gamma) \sqrt{L_{ВУ}^2 + L_{ВХ}^2}}{L_{ш} + L_{п} + L_{к} + x_{г}} - m_c g L_C \cos a - m_G g L_G \cos a - k_{тс} L_G^2 \frac{da}{dt}, \quad (7)$$

где J_C и J_G — моменты сил инерции стрелы и груза, [кг·м²]; a — угол поворота стрелы кран-манипулятора, [рад]; P_{II} и P_{III} — давление жидкости в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндра крана, [Па]; D_r — внутренний диаметр гидроцилиндра, [м]; d_r — диаметр штока, [м]; L_A — расстояние от шарнира O до точки A крепления гидроцилиндра к корпусу, [м]; L_{BX} , L_{BY} — декартовы координаты точки B крепления гидроцилиндра относительно шарнира O , [м]; L_{III} — длина штока гидроцилиндра, [м]; L_{II} — ширина поршня гидроцилиндра, [м]; L_K — расстояние от границы рабочей полости гидроцилиндра до точки его крепления к корпусу, [м]; x_r — ход поршня, [м]; m_C — масса стрелы крана, [кг]; L_C — расстояние от шарнира O до центра тяжести стрелы крана C , [м]; m_G — масса груза, закреплённого на стреле крана, [кг]; L_G — расстояние от шарнира O до точки G приложения силы тяжести подвешенного груза, [м]; k_{TC} — коэффициент вязкого трения при вращательном движении стрелы крана, [Нс/м];

2) уравнение расходов рабочей жидкости

$$\frac{\pi}{4} D_r^2 \frac{dx}{dt} = S \sqrt{\frac{2}{\rho \xi} (\Delta p) + \frac{W_p}{E} \frac{dp}{dt}}, \quad (8)$$

где ρ — плотность масла; ξ — коэффициент местного сопротивления через гидравлический диод; S — площадь проходного сечения гидродиода; Δp — перепад давлений на гидравлическом диоде; W_p — объем масла в поршневой полости ГА; E — приведенный модуль упругости наконечника штока ГА, модуль упругости масла.

Данные уравнения решаются объединением в систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} & (J_C + J_G) \frac{d^2 a}{dt^2} = \left[P_{II} \frac{\pi D_r^2}{4} - P_{III} \frac{\pi (D_r^2 - d_r^2)}{4} \right] \times \\ & \times \frac{L_A \sin(a + \gamma) \sqrt{L_{BY}^2 + L_{BX}^2}}{L_{III} + L_{II} + L_K + x_r} - \\ & - m_C g L_C \cos a - m_G g L_G \cos a - k_{TC} L_G^2 \frac{da}{dt} \\ & \frac{\pi}{4} D_r^2 \frac{dx}{dt} = S \sqrt{\frac{2}{\rho \xi} (\Delta p) + \frac{W_p}{E} \frac{dp}{dt}} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Здесь объем масла в поршневой полости ГА (W_p) выражается как

$$W_p = \frac{\pi}{4} D^2 (x_{\max} - x), \quad (10)$$

где x_{\max} — максимальная величина перемещения поршня гидроцилиндра или его максимальная длина хода, x — текущее перемещение поршня гидроцилиндра или его текущая длина хода.

Стоит отметить, что при использовании в качестве демпфера гидродиода, ξ в прямом и обратном направлении будет различным. Причём расположение гидродиода в системе будет оказывать значительную роль на её работу.

Расположение гидродиода в системе, как показано на рис. 1, позволяет обеспечивать снижение скорости опускания стрелы крана с тяжёлым грузом из-за существенного роста сопротивления течения жидкости в обратном направлении относительно прямого, при котором осуществляется поднятие стрелы.

Решая систему уравнений (1) применительно к механизму подъёма стрелы манипулятора с демп-

фером в виде гидравлического диода, можно получить, например, график зависимости скорости движения стрелы кран-манипулятора от времени. Сопоставление полученного графика с аналогичным для механизма подъёма стрелы манипулятора без демпфирующих устройств или с иными их вариантами позволит произвести анализ полученных данных.

Такой анализ позволит определить наиболее оптимальные конструктивные параметры используемых демпфирующих устройств в виде гидравлических диодов в конструкции манипулятора.

Стоит отметить, что конструктивно гидравлические цилиндры в системе механизма подъёма стрелы кран-манипуляторных установок незначительно отличаются от гидравлических цилиндров, применяемых в других системах, механизмах и агрегатах. Таким образом, сфера возможного применения гидродиодного демпфирования таких гидроцилиндров огромна.

Стоит отметить, что применение именно соплового гидравлического диода в конструкции системы механизма подъёма стрелы кран-манипулятора не является обязательным, так как существует множество иных конструктивных решений гидродиодов.

Таким образом, возможно использование и других видов гидравлических диодов, что, безусловно, скажется на характеристиках самой системы.

При расчёте рассмотренной системы механизма подъёма стрелы кран-манипулятора с применением других видов гидравлических диодов система полученных уравнений (9) остаётся прежней. Для решений данной системы уравнений необходимо учитывать коэффициент местного сопротивления через гидравлический диод (ξ), который будет отличаться не только для прямого и обратного направления течения жидкости через гидродиод, но и при выборе другой конструкции гидродиода.

Список источников

1. Орлов Ю. М. Объемные гидравлические машины. Конструкция, проектирование, расчет. Москва: Машиностроение, 2006. 222 с. ISBN 5-217-03335-5.
2. Схиртладзе А. Г., Иванов В. И., Кареев В. Н. Гидравлические и пневматические системы. 2-е изд., доп. Москва: Станкин; Янус-К, 2003. 544 с. ISBN 5803701351.
3. Башта Т. М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем. Москва: Машиностроение, 1974. 606 с.
4. Сидоров А. А. Исследование функционирования манипулятора с демпфирующим устройством в гидросистеме с применением ЭВМ // Вестник КрасГАУ. 2009. No. 9. С. 187–190.
5. Сидоров А. А., Бухтояров Л. Д. Моделирование работы гидропривода механизма подъёма стрелы лесного манипулятора // Вестник КрасГАУ. 2009. No. 10. С. 112–115.
6. Бухтояров Л. Д., Попиков П. И., Сидоров А. А. Оптимизация параметров демпфера гидропривода механизма подъёма стрелы лесного манипулятора // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2011. No. 6. С. 102–105.
7. Цветков И. В., Перов С. А., Кайгородов С. Ю., Литвинов О. В. Гидродиодное регулирование рабочей жидкости в грузоподъемных машинах военного назначения // Наука и военная безопасность. 2020. No. 3 (22). С. 84–87.
8. Гимадиев А. Г., Уткин А. В. Исследование характеристик вихревого гидравлического дросселя для систем подготовки проб теплоносителя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.

2015. Т. 14, № 4. С.110–117. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-110-117.

9. Лебедев И. В., Трескунов С. Л., Яковенко В. С. Элементы струйной автоматики. Москва: Машиностроение, 1973. 359 с.

10. Пат. 2598125 Российская Федерация, МПК G 05 D 7/01. Гидравлический и пневматический прямоточный диод / Кайгородов С. Ю., Болштынский А. П., Щерба В. Е. № 2015129270/11; заявл. 16.07.15; опубл. 20.09.16., Бюл. № 26.

11. Пат. 2718196 С1 Российская Федерация, МПК G 05 D 7/01. Гидропневматический диод с закольцованным движением рабочей среды / Кайгородов С. Ю. № 2019131679; заявл. 08.10.19; опубл. 31.03.20, Бюл. № 10.

12. Кайгородов С. Ю., Шапошков А. А., Цветков И. В. Методика расчета применения сопловых гидродиодов в конструкции двухтрубного гидравлического амортизатора // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 4. С. 82–89. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-82-89.

13. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва, Ленинград: Госэнергоиздат, 1960. 464 с.

КАЙГОРОДОВ Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» Омского государственного технического университета, г. Омск.
SPIN-код: 4982-0580
AuthorID (РИНЦ): 686382
AuthorID (SCOPUS): 57189358881
ResearcherID: O-3019-2017
Адрес для переписки: sergey7-2005@mail.ru

Для цитирования

Кайгородов С. Ю. Модель рабочего процесса механизма подъема и опускания стрелы с дополнительным демпфером в виде гидродиода // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 2. С. 52–57. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-52-57.

Статья поступила в редакцию 16.04.2023 г.
© С. Ю. Кайгородов

THE MODEL OF WORKING PROCESS OF THE BOOM LIFTING AND LOWERING MECHANISM WITH AN ADDITIONAL DAMPER IN THE FORM OF HYDRODIODE

S. Yu. Kaigorodov

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

In hydraulic and pneumatic systems, due to the many factors of their operation, pressure and flow fluctuations inevitably occur. Such fluctuations are formed during the operation of gas-liquid aggregates, during the passage of resistance flow, and their appearance is influenced by the material of manufacture (its rigidity) of the system. As a rule, such phenomena in systems are undesirable and lead to changes in the performance characteristics of the system relative to the calculated data. Thus, there are various mechanisms to "smooth out" the fluctuations of the systems. In hydraulic systems, in particular in lifting machines, I often use special devices for this — dampers. In this paper, it is proposed to use a hydrodiode as a damper. Having a different flow rate in the forward and reverse direction, it provides a different flow-drop characteristic when lifting and lowering the boom. This effect allows you to improve the positioning of the crane boom when lifting and lowering the boom.

Keywords: crane, boom, damper, hydrodiode, resistance, diode.

References

1. Orlov Yu. M. Ob"yemnyye gidravlicheskiye mashiny. Konstruktsiya, proyektirovaniye, raschet [Volumetric hydraulic machines. Construction, design, calculation]. Moscow, 2006. 222 p. ISBN 5-217-03335-5. (In Russ.).
2. Skhirtladze A. G., Ivanov V. I., Kareyev V. N. Gidravlicheskiye i pnevmaticheskiye sistemy [Hydraulic and pneumatic systems]. 2nd ed., supplement. Moscow, 2003. 544 p. ISBN 5803701351. (In Russ.).
3. Bashta T. M. Ob"yemnyye nasosy i gidravlicheskiye dvigateli gidrosistem Volumetric pumps and hydraulic motors of hydraulic systems. Moscow, 1974. 606 p. (In Russ.).
4. Sidorov A. A. Issledovaniye funktsionirovaniya manipulyatora s dempfiyushchim ustroystvom v gidrosisteme s primeneniyyem EVM [Research of operation of the manipulator with damping device in hydrosystem with computer application] // Vestnik KrasGAU. *Bulletin of KrasGAU*. 2009. No. 9. P. 187–190. (In Russ.).
5. Sidorov A. A., Bukhtoyarov L. D. Modelirovaniye raboty gidroprivoda mekhanizma pod"yema strely lesnogo manipulyatora [Modeling the work of the hydrodrive of lifting mechanism of the wood manipulator arm] / A. A. Sidorov, L. D. Bukhtoyarov // Vestnik KrasGAU. *Bulletin of KrasGAU*. 2009. No. 10. P. 112–115. (In Russ.).
6. Bukhtoyarov L. D., Popikov P. I., Sidorov A. A. Optimizatsiya parametrov dempera gidroprivoda mekhanizma pod"yema strely lesnogo manipulyatora [Parameters Optimization of Hydraulic Actuator Damper for Boom Hoisting Mechanism of Forest Manipulator] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Lesnoy Zhurnal*. 2011. No. 6. P. 102–105. (In Russ.).
7. Tsvetkov I. V., Perov S. A., Kaygorodov S. Yu., Litvinov O. V. Gidrodiodnoye regulirovaniye rabochey zhidkosti v gruzopod"yemnykh mashinakh voyennogo naznacheniya [Hydrodiodic regulation of the working fluid in lifting machines designed for military use] // Nauka i voyennaya bezopasnost'. *Science and Military Security*. 2020. No. 3 (22). P. 84–87. (In Russ.).
8. Gimadiyev A. G., Utkin A. V. Issledovaniye kharakteristik vikhrevogo gidravlicheskogo drosselya dlya sistem podgotovki prob teplonositelya [Study of characteristics of the vortex throttling valve for the system of water sample conditioning] // Vestnik Samarskogo universiteta. *Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 14, no. 4. P. 110–117. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-110-117. (In Russ.).
9. Lebedev I. V., Treskunov S. L., Yakovenko V. S. Elementy struynoy avtomatiki. [Elements of jet automation]. Moscow, 1973. 359 p. (In Russ.).
10. Patent 2598125 Russian Federation, IPC G 05 D 7/01. Gidravlicheskiy i pnevmaticheskiy pryamotoknyy diod [Hydraulic and pneumatic direct-flow diode] / Kaygorodov S. Yu., Bolshtyansky A. P., Shcherba V. E. No. 2015129270/11. (In Russ.).
11. Patent 2718196 C1 Russian Federation, IPC G 05 D 7/01. Gidropnevmaticheskiy diod s zakol'tsovannym dvizheniyem rabochey sredy [Hydropneumatic diode with looped movement of the working medium] / Kaygorodov S. Yu. No. 2019131679. (In Russ.).
12. Kaygorodov S. Yu., Shaposhkov A. A., Tsvetkov I. V. Metodika rascheta primeneniya soplovykh gidrodiodov v konstruktsii dvukhtrubnogo gidravlicheskogo amortizatora [Method for calculating the use of nozzle hydrodiodes in design of two-tube hydraulic shock absorber] // Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 4. P. 82–89. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-82-89. (In Russ.).
13. Idelchik I. E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Hydraulic resistance handbook]. Moscow, Leningrad, 1960. 464 p. (In Russ.).

KAIGORODOV Sergey Yurievich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Hydromechanics and Transport Machines Department, Omsk State Technical University. Omsk.
SPIN-code: 4982-0580
AuthorID (RSCI): 686382
AuthorID (SCOPUS): 57189358881
ResearcherID: O-3019-2017
Correspondence address: sergey7-2005@mail.ru

For citations

Kaigorodov S. Yu. The model of working process of the boom lifting and lowering mechanism with an additional damper in the form of hydrodiode // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, No. 2. P. 52–57. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-52-57

Received April 16, 2023.
© **S. Yu. Kaigorodov**