

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-585184>

Оригинальное исследование



Математическая модель подъёмной системы судна на воздушной подушке

А.В. Лепешкин¹, Н.Г. Сосновский², В.Х. Нгуен²¹ Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация;² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время суда на воздушной подушке (СВП) широко применяются во всём мире благодаря своей амфибийной способности и проходимости на водных и элементарно подготовленных площадках с низкой несущей способностью. При этом на практике СВП имеют две главные системы, обеспечивающие движение: подъёмную и тяговую, которые могут быть как объединённые (работающие от одного источника механической энергии), так и отдельные.

В данной статье рассматривается СВП, имеющее отдельные подъёмную и тяговую системы. При этом подъёмная система такого СВП состоит из поршневого дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС), гидравлической трансмиссии гидрообъёмного типа, осевых вентиляторов, канала подвода и камеры образования воздушной подушки. Рассматриваемый вариант обусловлен тем, что гидрообъёмная трансмиссия обладает рядом существенных преимуществ перед механической трансмиссией с карданными валами и ремёнными передачами, широко применяемой в настоящее время. В статье рассматривается камерная схема образования воздушной подушки.

Цель исследования — разработка совместной математической модели подъёмной системы СВП, состоящей из поршневого дизельного ДВС, гидрообъёмной трансмиссии и вентилятора, подающего воздух в секции воздушной подушки.

Методы. В среде MATLAB/SIMULINK анализируется регулирование мощности двигателя при движении судна на разных опорных поверхностях с точки зрения увеличения КПД вентилятора и всей системы. Приведена расчётная схема системы, получены приемлемые переходные характеристики. Оцениваются КПД, диапазон оптимальной работы насоса и гидромотора Sauer-Danfoss. Рассматривается процесс регулирования СВП от установившегося режима до нового состояния при изменении условий движения.

Результаты. По результатам моделирования показано влияние входного управляющего сигнала (параметра регулирования режимов работы двигателя) и возмущающего сигнала (коэффициента перепада давления, определяющего свойства опорной поверхности) на параметры, характеризующие движение судна.

Заключение. Разработанная математическая модель позволяет выбирать и оценивать параметры регулирования режима работы двигателя при движении судна на разных поверхностях, анализировать и улучшать энергоэффективность системы.

Ключевые слова: судно на воздушной подушке; подъёмная система; двигатель внутреннего сгорания; гидравлическая трансмиссия; энергоэффективность; математическая модель.

Как цитировать:

Лепешкин А.В., Сосновский Н.Г., Нгуен В.Х. Математическая модель подъёмной системы судна на воздушной подушке // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 4. С. 357–366. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-585184>

Рукопись получена: 05.09.2023

Рукопись одобрена: 15.10.2023

Опубликована онлайн: 15.12.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-585184>

Original study article

Mathematical model of the hovercraft lift system

Alexander V. Lepeshkin¹, Nikolay G. Sosnovsky², Van Hoa Nguyen²

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation;

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Currently, hovercrafts are used worldwide thanks to their amphibian capabilities and mobility at water and slightly prepared areas with low supporting properties. Whereas, in practice, hovercrafts have two main systems ensuring motion, lift and traction which can be combined (operating from a common source of mechanical energy) as well as separated. This paper considers a hovercraft with separated lift and traction systems. The lift system of this hovercraft consist of piston diesel internal combustion engine (ICE), hydrostatic transmission, axial fans, feeding channel and an air-cushion plenum. The considered variant is chosen because hydrostatic transmission has a number of sufficient advantages in comparison with mechanical transmission with universal shafts and pulley drives, widely used at present time. The paper considers the open plenum lift system.

AIM: Development of the combined mathematical model of the hovercraft lift system consisting of piston diesel ICE, hydrostatic transmission and a fan supplying air into the air-cushion plenum.

METHODS: Using the MATLAB/Simulink environment, the engine power adjustment at hovercraft motion on various ground surfaces is studied with regard to increasing the efficiency of the fan and the whole system. Analytical scheme of the system is given, acceptable transient characteristics are obtained. Efficiency and range of optimal operation of the Sauer-Danfoss pump and hydraulic motor are estimated. The process of hovercraft adjustment from the established mode to a new state when motion condition change is considered.

RESULTS: According to the simulation results, there is influence of the income control signal (adjustment parameter of engine operation modes) and disturbance signal (pressure change coefficient that defines properties of ground surface) on parameters describing the hovercraft motion.

CONCLUSION: The developed mathematical model helps to choose and evaluate adjustment parameters of engine operation modes at hovercraft motion on various ground surfaces, to analyze and to improve the system energy efficiency.

Keywords: hovercraft; lift system; internal combustion engine; hydrostatic transmission; energy efficiency; mathematical model.

To cite this article:

Lepeshkin AV, Sosnovsky NG, Nguyen VH. Mathematical model of the hovercraft lift system. *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2023;17(4):357–366.

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-585184>

Received: 05.09.2023

Accepted: 15.10.2023

Published online: 15.12.2023

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время суда на воздушной подушке (СВП) широко применяются во всём мире благодаря своей амфибийной способности и проходимости на водных и элементарно подготовленных площадках с низкой несущей способностью. Суда данного класса поддерживают себя над опорной (земной или водной) поверхностью с помощью воздушной подушки, создаваемой судовыми вентиляторами. При этом около одной трети всей мощности энергетической установки СВП тратится на создание этой воздушной подушки (ВП), обеспечивающей подъём основного корпуса судна.

Основные признаки классификации современных СВП, отражающие специфику общего устройства и принципа работы этих судов, следующие:

- степень взаимосвязи судна с опорной поверхностью в режиме парения и движения;
- принципиальная схема образования воздушной подушки;
- конструктивный тип ограждения воздушной подушки [1].

На практике современные СВП имеют две главные системы, обеспечивающие движение: подъёмную и тяговую, которые могут быть как объединённые (работающие от одного источника механической энергии), так и отдельные. Тяговая система используется для создания потока воздуха за кормой, заставляющего судно на воздушной подушке двигаться вперёд. Подъёмная система используется для обеспечения потока воздуха, поступающего под корпус СВП, позволяя СВП парить над опорной плоскостью. Тяговая система СВП имеет дело в основном с динамическим воздушным давлением, в то время как подъёмная система ориентирована более на давление статическое, величина которого зависит от конструкции системы подъёма, её размеров и метода управления.

В отдельном варианте подъёмная система имеет следующие преимущества: простота проектирования, лёгкость управления (в том числе и балансировки судна), лёгкость обслуживания и ремонта системы. Недостатком

при этом является то, что в отдельном варианте СВП требуются два независимых источника механической энергии: свой и для подъёмной, для тяговой систем.

В качестве источника механической энергии в рассматриваемом отдельном варианте СВП принят поршневой дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) [2, 3].

Основными вопросами, которые нужно решить при проектировании СВП, являются: уменьшение мощности, затрачиваемой на создание ВП; получение обоснованного соотношения между высотой парения и размерами судна; совершенствование системы управления ВП при движении.

Целью настоящего исследования является разработка математической модели подъёмной системы СВП, состоящей из ДВС, гидрообъёмной трансмиссии и вентилятора, подающего воздух в секции воздушной подушки (рис. 1).

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическое описание системы вентилятор-воздушная подушка СВП

Чтобы судно поднималось над опорной поверхностью, под днищем СВП должно создаваться давление воздуха:

$$p_{\pi} = G/S_{\pi},$$

где G — масса СВП; S_{π} — площадь воздушной подушки (ВП).

Вентилятор при этом создаёт поток воздуха с давлением:

$$p_{\text{в}} = K_{\pi} \cdot p_{\pi},$$

где K_{π} — коэффициент перепада давления от вентилятора к ВП, который показывает потери давления при движении воздуха и зависит от расхода воздуха, конструкции СВП и свойств опорной поверхности.

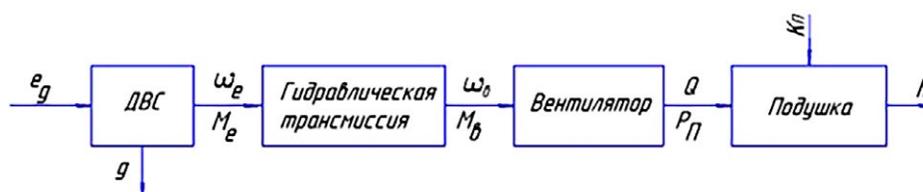


Рис. 1. Принципиальная блок-схема системы подъёма СВП: e_g — параметр регулирования режима работы двигателя; g — цикловая подача топлива; ω_e, M_e — скорость вращения и крутящий момент, передаваемый от двигателя; ω_o, M_o — скорость вращения и крутящий момент вентилятора; h — высота подъёма СВП над опорной поверхностью; Q — расход воздуха; p_{π} — избыточное давление в подушке; K_{π} — коэффициент, учитывающий условия движения СВП.

Fig. 1. Principal block diagram of the hovercraft lift system: e_g — adjustment parameter of the engine operating mode; g — cyclic fuel delivery; ω_e, M_e — rotation velocity and torque transmitted from the engine; ω_o, M_o — rotation velocity and torque of the fan; h — hovercraft lift height; Q — air flow rate; p_{π} — excessive pressure in the air-cushion; K_{π} — the hovercraft motion conditions coefficient.

Характеристика выбранного для проведения исследования вентилятора ОВ-109 в рассматриваемой области, построенная с помощью его экспериментально подтвержденной безразмерной характеристики [4], приведена на рис. 2.

При движении судна по разным поверхностям потери давления от вентилятора к ВП меняются и зависят от свойств поверхности, но давление воздуха в ВП должно сохранять своё значение, несмотря на изменение потери давления $p_b - p_n = \Delta p$, что приводит и к изменению p_b . Кроме того, может меняться вес судна из-за расходующегося топлива и перевозимого груза. При этом давление p_n под подушкой меняется, и тогда будет меняться p_b . Таким образом, изменение p_b равнозначно изменению K_n , что и будет в дальнейшем использоваться при моделировании в качестве возмущающего воздействия [5].

При математическом моделировании были приняты следующие допущения: давление и плотность воздуха по объёму каждой полости ВП распределяются равномерно.

Математическая модель дизельного двигателя ЗМЗ-514

В данном исследовании для системы подъёма СВП используется поршневой дизельный двигатель ЗМЗ-51432.10 CRS, удовлетворяющий предъявляемым техническим требованиям.

В анализируемом случае этот дизельный двигатель регулируют с целью обеспечения заданных показателей

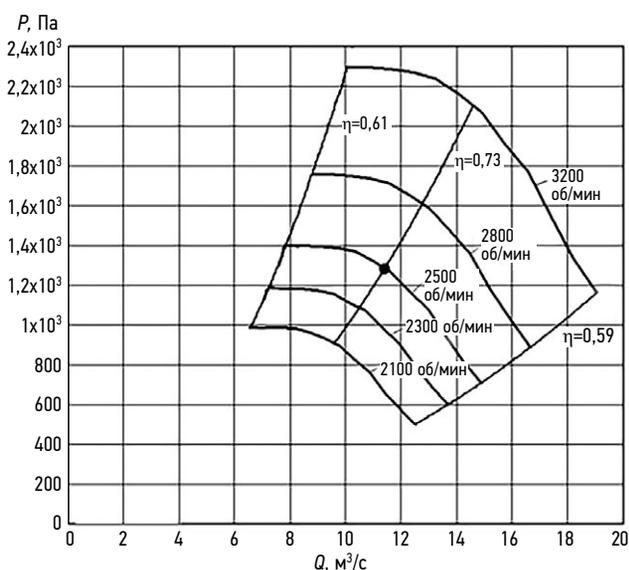


Рис. 2. Напорно-расходная характеристика вентилятора ОВ-109 при разных частотах вращения: точка I — требуемая точка работы; η — КПД вентилятора.

Fig. 2. Head and rate characteristic of the OV-109 fan at various rotation velocities: point I — the required operation point; η — fan efficiency.

его работы на эксплуатационных режимах по мощности, экономичности, приёмности, надёжности и т. д.

Из-за особенностей ДВС обычно в процессе выбора двигателя для транспортных систем он рассчитывается по максимальной мощности потребителя. Однако в рассматриваемом случае во время работы двигатель использует максимальную мощность потребителя только в течение короткого промежутка времени. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев ДВС осуществляет свою работу на режимах частичных нагрузок. По причине указанных фактов возникает необходимость эффективного регулирования мощностей ДВС с целью достижения высокого КПД на режимах неполных нагрузок.

В этом исследовании регулирование дизеля осуществляется регулированием цикловой подачи топлива [6, 7].

С помощью программы ДИЗЕЛЬ-РК и метода идентификации характеристик двигателя получена зависимость момента от угловой скорости вращения вала двигателя ω_e и от параметра регулирования работы двигателя e_g , которая имеет вид [8]:

$$M_e = A_0 + A_1 \cdot \omega_e + A_2 \cdot \omega_e^2 + A_3 \cdot \omega_e^3 + A_4 \cdot \omega_e^4, \quad (1)$$

где соответствующие коэффициенты определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{cases} A_0 = -1099,56e_g - 460,05; \\ A_1 = 20,46e_g + 6,94; \\ A_2 = -0,114e_g - 0,0391; \\ A_3 = 0,00028e_g + 9,76E-5; \\ A_4 = -2,58E-7e_g - 9,09E-8. \end{cases} \quad (2)$$

Отметим, что погрешность получившегося математического описания работы ДВС соответствует значениям R^2 для $M_e = f(\omega_e)$ в пределах от 0,977 до 0,986, а для $A_i = f(e_g)$ — в пределах от 0,971 до 0,984, что может быть признано удовлетворительным для планируемых исследований.

В приведённых зависимостях: $e_g = \frac{N}{N_{\max}}$ — параметр регулирования режима работы двигателя; N — текущая мощность двигателя; N_{\max} — максимальная мощность двигателя; область моделирования режимов работы двигателя от параметра регулирования его работы проводилась в пределах $0,4631 \leq e_g \leq 0,9539$.

Полученная математическая идентификация работы двигателя позволяет получить его характеристики с допустимыми отклонениями от исходных данных, может использоваться в разрабатываемой математической модели системы подъёма СВП в сочетании с математическими моделями других элементов этой системы [9].

Математическая модель гидрообъёмной трансмиссии системы подъёма СВП

Гидрообъёмная трансмиссия обладает рядом существенных преимуществ перед механической трансмиссией с карданными валами и ремёнными передачами, широко применяемой в настоящее время:

1. надёжность, высокое быстродействие, плавность работы, высокая энергоёмкость, удобный монтаж и простота обслуживания;
2. гидропривод надёжно работает в условиях экстремальных температур (-50 до +50°C).

Принципиальная схема гидрообъёмной трансмиссии системы подъёма СВП, представленная на рис. 3, содержит три нерегулируемые аксиально-поршневые гидромашины: основной насос 2 и два гидромотора 5. Вал насоса приводится во вращение от двигателя 1. Насос двумя трубопроводами 4 соединён с гидромоторами 5, валы которых соединены каждый со своим вентилятором 6 воздушной подушки.

Утечки рабочей жидкости восполняет подпиточный насос 3, приводимый во вращение от вала основного насоса. При падении значения давления в одном из трубопроводов ниже допустимого, соответствующий подпиточный клапан 7 открывается и пропускает жидкость под давлением из напорной магистрали подпиточного насоса до тех пор, пока в трубопроводе не восстановится необходимый уровень давления. После этого подпиточный клапан под действием давления в трубопроводе закрывается.

Для построения математической модели гидрообъёмной трансмиссии использованы уравнения расходов в узловых точках гидросистемы с учётом сжимаемости жидкости, дифференциальные уравнения, характеризующие изменения моментов на валах систем двигатель-насос и гидромотор-вентилятор, а также

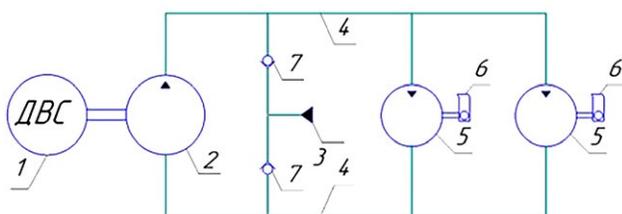


Рис. 3. Принципиальная схема гидрообъёмной трансмиссии системы подъёма СВП: 1 — двигатель ЗМЗ-51432.10 CRS; 2 — нерегулируемый аксиально-поршневой насос Danfoss; 3 — поток, поступающий от подпиточного насоса; 4 — трубопровод; 5 — нерегулируемый аксиально-поршневой гидромотор Danfoss; 6 — осевой вентилятор; 7 — подпиточный клапан.

Fig. 3. Principal scheme of the hydrostatic transmission of the hovercraft lift system: 1 — the ZMZ-51432.10 CRS engine; 2 — the Danfoss non-adjustable axial piston pump; 3 — flow from a feeding pump; 4 — a hydraulic line; 5 — the Danfoss non-adjustable axial-piston hydraulic motor; 6 — an axial fan; 7 — a feeding valve.

уравнения потерь механической энергии в гидросистеме [10–12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дальнейшие исследования посвящены анализу адекватности разрабатываемой математической модели. Для этого рассматриваются переходные процессы, сопровождающие регулирования системы подъёма СВП при изменении её условий движения от одного установившегося режима до нового состояния.

При этом в качестве базового принят режим движения СВП, характеризующийся следующими параметрами: частота вращения вентилятора $n_v = 2500$ об/мин; давление в воздушной подушке $p_n = 853$ Па; расход воздуха СВП $Q = 22,76$ м³/с; $K_n = 1,5$.

Данные параметры используются в качестве начальных условий исследуемых переходных процессов.

Управление СВП за счёт регулирования режима работы двигателя

При моделировании за входной (управляющий) сигнал принимается параметр регулирования режимов работы двигателя e_g , а возмущающим сигналом является изменение коэффициента перепада давления K_n в соответствии с изменением свойств опорной поверхности при движении судна.

Исследование проводилось для двух случаев:

- 1) при изменении величины K_n от 1,5 до 1,1;
- 2) при изменении величины K_n от 1,5 до 1,7.

Для моделирования гидропривода использован пакет MATLAB Simulink, полученные результаты моделирования показаны в виде переходных процессов, представленных на рис. 4 и 5.

В первом случае изменение давления на 1-й секунде моделируемого процесса (рис. 4) из-за изменения коэффициента K_n вызвало изменение выходных сигналов, представленных на рис. 4: высота СВП над опорной поверхностью, частота вращения вала гидромотора и вентилятора, частота вращения вала двигателя и насоса, КПД вентилятора, насоса, гидромотора и мощность двигателя.

Установившиеся значения расчётных параметров системы при изменении K_n от 1,5 до 1,1 при отсутствии управления приведены в соответствующих строках табл. 1, а в строке РД (регулирование двигателем) значения параметров при использовании предлагаемой системы регулирования.

Анализ показывает, что при изменении K_n от 1,5 до 1,1, что соответствует передвижению с одной опорной поверхности на другую, которая имеет меньший коэффициент потерь, расход воздуха увеличивается и высота над поверхностью h повышается.

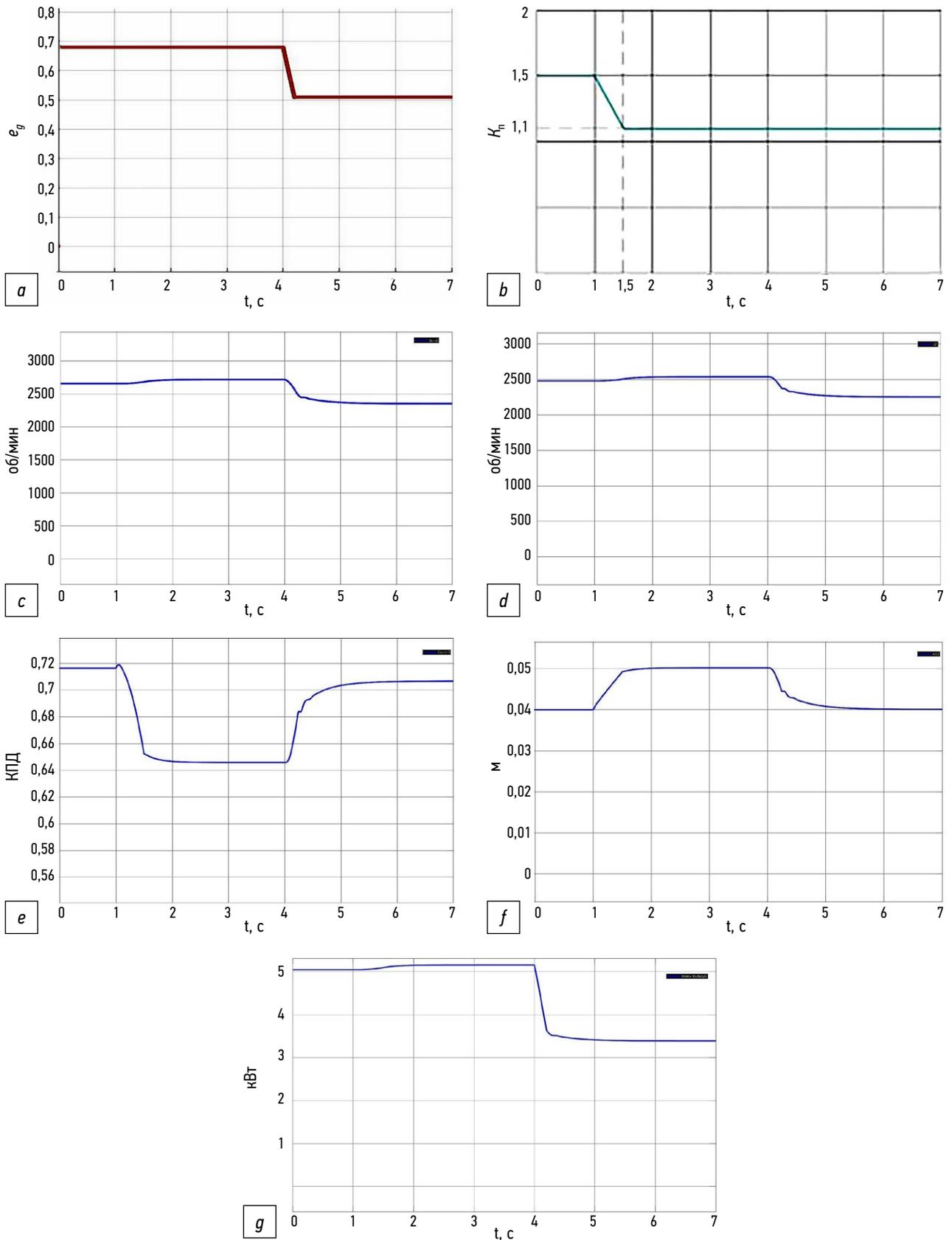


Рис. 4. Переходные процессы при уменьшении K_n : *a* — параметр регулирования двигателя e_g ; *b* — сигнал K_n ; *c* — частота вращения двигателя n_d ; *d* — частота вращения вентилятора n_b ; *e* — КПД вентилятора η_b ; *f* — высота СВП над опорной поверхностью h ; *g* — мощность двигателя N_g .

Fig. 4. Transient processes at K_n decreasing: *a* — engine adjustment parameter e_g ; *b* — signal K_n ; *c* — engine rotation velocity n_d ; *d* — fan rotation velocity n_b ; *e* — fan efficiency η_b ; *f* — hovercraft height above the ground h ; *g* — engine power N_g .

Таблица 1. Параметры системы-1**Table 1.** The system 1 parameters

K_n	e_g	n_d , об/мин	P_c , МПа	n_b , об/мин	η_n , %	η_r , %	η_b , %	h , мм	N_g , кВт
1,5	0,68	2659	25,44	2479	88,98	89,10	71,65	39,95	50,47
1,1	0,68	2719	25,41	2537	88,98	89,10	64,59	50,16	51,55
РД	0,51	2361	19,07	2256	88,91	89,67	70,68	40,06	33,89

Это приводит к изменению рабочей точки вентилятора и выходу из зоны наилучших КПД вентилятора 71,65% до 64,59%. Уменьшение параметра регулирования двигателя e_g от 0,68 до 0,51 на 4-й секунде моделируемого процесса соответствует уменьшению количества топлива, потребляемого двигателем, что приводит к уменьшению скорости вращения вала насоса, а также гидромотора. В результате расход воздуха уменьшается и уменьшается высота подъёма СВП до исходной высоты. Это позволяет СВП экономить энергию в более лёгких условиях, чем это было изначально рассчитано ($K_n=1,5$). Рабочая точка вентилятора при этом также вернётся к исходной зоне (высокой эффективности).

Во втором случае при изменении свойств опорной поверхности при движении судна увеличивается полный напор вентилятора из-за увеличения K_n от 1,5 до 1,7. Полученные при моделировании результаты отражены в переходных процессах, представленных на рис. 5.

Установившиеся значения расчётных параметров системы при изменении K_n от 1,5 до 1,7 и после регулирования режима работы приведены в табл. 2.

Анализ показывает, что при изменении K_n от 1,5 до 1,7, что соответствует передвиганию с одной опорной поверхности на другую, которая имеет более высокий коэффициент потерь, расход воздуха уменьшается и высота над поверхностью h снижается. Это приводит к изменению рабочей точки вентилятора и выходу этой точки из зоны наилучших КПД. КПД вентилятора уменьшается от 71,65% до 63,72%. Увеличение параметра регулирования двигателя e_g от 0,68 до 0,75 на 4-й секунде моделируемого процесса соответствует увеличению количества топлива двигателя, что приводит к увеличению скорости вращения вала насоса,

а также гидромотора. В результате расход воздуха увеличится, высота СВП также увеличится до исходной высоты, что позволит СВП улучшить свою способность передвигаться в новых условиях. Рабочая точка вентилятора возвращается к исходной зоне (высокой эффективности). При этом очевидно, что для движения машины в более тяжёлых условиях требуется больший расход топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель гидравлической трансмиссии и вентилятора построена на основе экспериментальных данных и использует реальные методы расчёта, поэтому результаты моделирования являются достаточно точными и значимыми на практике. Полученная математическая модель системы позволяет выбирать и оценивать оптимальную частоту вращения вала гидромотора (вентилятора) для конкретных поверхностей в соответствии с параметром регулирования двигателя. Эта модель позволяет отслеживать изменения КПД насоса и гидромотора, а также изменения параметров гидротрансмиссии.

Моделирование двигателя, гидравлической трансмиссии и вентилятора, подающего воздух в секции воздушной подушки, позволяет получить характеристики системы. Моделирование позволяет исследовать изменения параметров и методов управления, оценивать влияние той или иной части на функционирование всей системы, способствуя экономии времени и средств.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Ван Хоа Нгуен — поиск публикаций по теме статьи, выполнение исследований, написание

Таблица 2. Параметры системы-2**Table 2.** The system 2 parameters

K_n	e_g	n_d , об/мин	P_c , МПа	n_b , об/мин	η_n , %	η_r , %	η_b , %	h , мм	N_g , кВт
1,5	0,68	2659	25,44	2479	88,98	89,10	71,65	39,95	50,47
1,7	0,68	2724	25,40	2542	88,98	89,10	63,72	32,07	51,63
РД	0,75	2829	28,08	2610	88,88	88,79	70,91	40,63	59,02

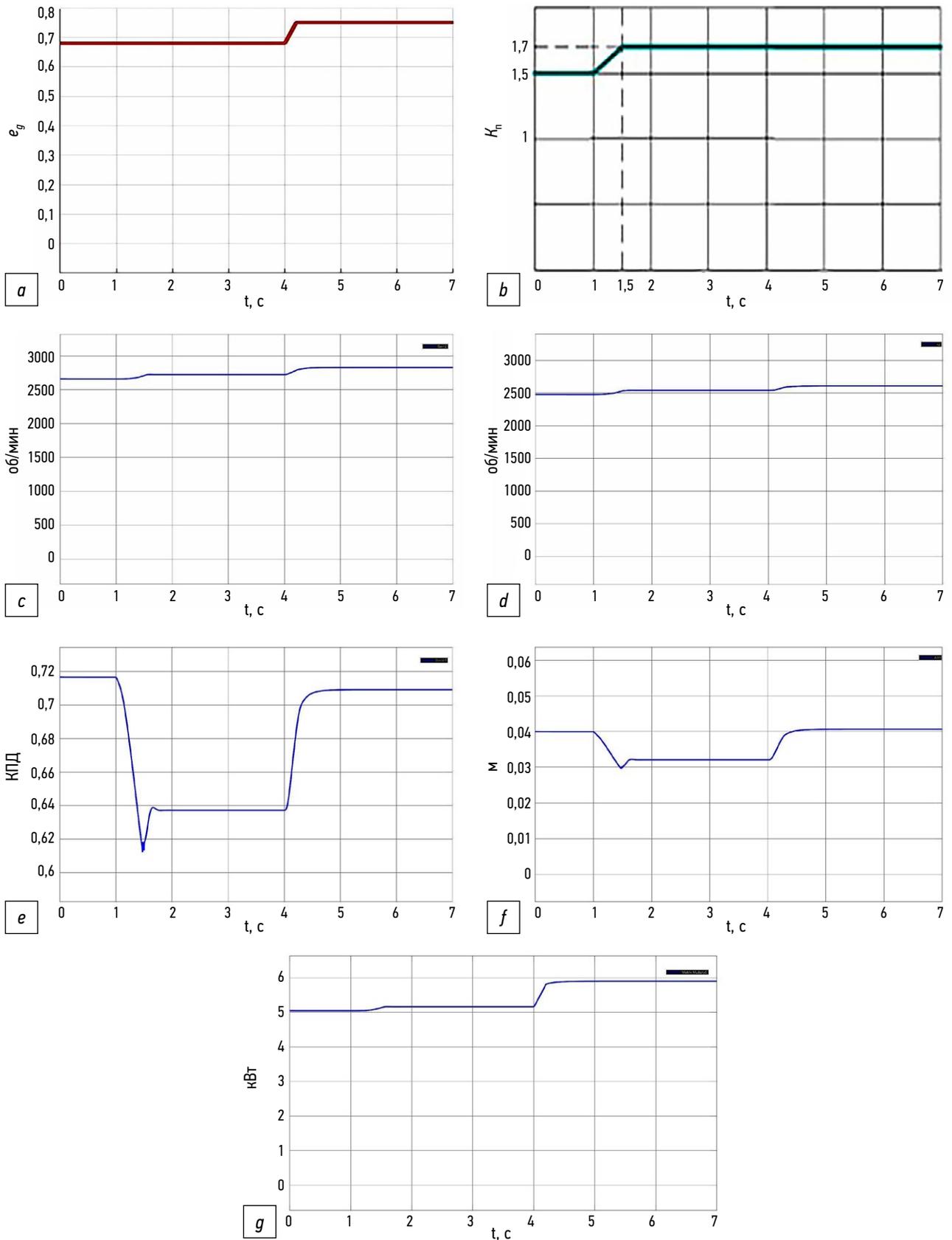


Рис. 5. Переходные процессы при увеличении K_n : a — параметр регулирования двигателя e_g ; b — сигнал K_n ; c — частота вращения двигателя n_d ; d — частота вращения вентилятора n_b ; e — КПД вентилятора η_b ; f — высота СВП над опорной поверхностью h ; g — мощность двигателя N_g .

Fig. 5. Transient processes at K_n increasing: a — engine adjustment parameter e_g ; b — signal K_n ; c — engine rotation velocity n_d ; d — fan rotation velocity n_b ; e — fan efficiency η_b ; f — hovercraft height above the ground h ; g — engine power N_g .

текста рукописи; А.В. Лепешкин — научное руководство, редактирование текста рукописи, утверждение финальной версии; Н.Г. Сосновский — научное руководство, редактирование текста рукописи, утверждение финальной версии. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов И.В., Ледян Ю.П., Щербакова М.К. Конструкция быстроходных судов. В. 3 ч. Ч. 3 Суда на воздушной подушке. Минск: БНТУ, 2015.
2. Князев С.И., Ломовских А.Е., Гулиев Э.Р.О. Разработка стенда для исследования влияния коэффициента воздуха на энергетические и экономические показатели двигателей внутреннего // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения. 2019. С. 84–87.
3. Кухаренок Г.М. Теория рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания: методическое пособие для студентов заочной формы обучения специальности «Двигатели внутреннего сгорания». Минск: БНТУ, 2011.
4. Брусиловский И.В. Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ. Москва, Недра, 1978.
5. Сосновский Н.Г., Нгуен В.Х. Расчётные исследования гидравлической трансмиссии судна на воздушной подушке // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 4. С. 46–54. doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-46-54
6. Программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК [internet] [дата обращения: 05.09.2023]. Режим доступ: <https://diesel-rk.com/>
7. Патент СССР. SU 1673909 A1 / 30.08.1991. Хохлов Ф.Ф., Штыка М.Г., Штыка А.Г. Способ регулирования мощности дизеля. Дата обращения: 20.05.2023. Режим доступа: <https://patents.su/4-1673909-sposob-regulirovaniya-moshhnosti-dizelya.html>

REFERENCES

1. Kachanov IV, Ledyan YuP, Shcherbakova MK. *Construction of high-speed vessels*. In 3 Parts. P. 3. *Hovercraft*. Minsk: BNTU; 2015. (in Russ).
2. Knyazev SI, Lomovskikh AE, Guliev ERO. Development of a stand to study the influence of the air coefficient on the energy and economic performance of internal combustion engines. *Nauka i obrazovanie na sovremenno etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya*. 2019;84–87. (in Russ).
3. Kukharenek GM. *Theory of working processes of internal combustion engines: a methodological guide for students*

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. Van Hoa Nguyen — search for publications, writing the text of the manuscript; A.V. Lepeshkin — scientific supervision, editing the text of the manuscript, approval of the final version; N.G. Sosnovsky — scientific supervision, editing the text of the manuscript, approval of the final version. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

8. Лепешкин А.В., Курмаев Р.Х., Катанаев Н.К. Идентификация работы двигателя самоходной машины для использования в математической модели её движения (на примере двигателя DT466) // Известия МГТУ «МАМИ». 2007. Т. 1, №. 2. С. 68–73. doi: 10.17816/2074-0530-69558
9. Лепешкин А.В., Нгуен В. К вопросу об описании ДВС в математической модели системы подъёма судна на воздушной подушке (на примере двигателя ЗМЗ-51432.10 CRS) // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 2. С. 107–114. doi: 10.17816/2074-0530-472097
10. Сосновский Н.Г., Брусов В.А., Нгуен В.Х. Моделирование гидропривода с объёмным регулированием амфибийного транспортного средства // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2021. № 11(119). doi: 10.18698/2308-6033-2021-11-2127
11. Брусов В.А., Мерзликин Ю.Ю., Меньшиков А.С. Разработка системы управления параметрами гидравлической системы транспортного средства с комбинированным шасси на воздушной подушке // Труды НАМИ. 2021. № 1. С. 35–46. doi: 10.51187/0135-3152-2021-1-35-46
12. Сосновский Н.Г., Нгуен В.Х. Расчётные исследования гидравлической трансмиссии судна на воздушной подушке // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 4. С. 46–54. doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-46-54

of correspondence courses in the specialty "Internal combustion engines". Minsk: BNTU; 2011. (in Russ).

4. Brusilovsky IV. *Aerodynamic designs and characteristics of TsAGI axial fans*. Moscow; Nedra; 1978. (in Russ).
5. Sosnovsky NG, Nguyen VH. Computational studies of the hydraulic transmission of a hovercraft. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*. 2023;4:46–54. (in Russ). doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-46-54
6. DIESEL-RK software [internet] Accessed: 05.09.2023. Available from: <https://diesel-rk.com/>

7. Patent USSR 1673909 / 30.08.1991. Khokhlov FF, Shtyka MG, Shtyka AG. Sposob regulirovaniya moshchnosti dizelya. (in Russ). Accessed: 05.09.2023. Available from: <https://patents.su/4-1673909-sposob-regulirovaniya-moshchnosti-dizelya.html>
8. Lepeshkin AV, Kurmaev RKh, Katanaev NK. Identification of the operation of the engine of a self-propelled machine for use in the mathematical model of its movement (on the example of the DT466 engine). *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2007;1(2):68–73. (in Russ). doi: 10.17816/2074-0530-69558
9. Lepeshkin AV, Nguyen V. To the question of the description of the internal combustion engine in the mathematical model of the lifting system of the hovercraft (on the example of the ZMZ-51432.10 CRS engine). *Izvestiya MG TU MAMI*. 2023;17(2):107–114. (in Russ). doi: 10.17816/2074-0530-472097
10. Sosnovsky NG, Brusov VA, Nguyen VKh. Modeling of a hydraulic drive with volumetric control of an amphibious vehicle. *Inzhenernyy zhurnal: Nauka i innovatsii*. 2021;11(119). (in Russ). doi: 10.18698/2308-6033-2021-11-2127
11. Brusov VA, Merzlikin YuYu, Men'shikov AS. Development of a control system for the hydraulic system parameters of a vehicle with a combined chassis on an air cushion. *Trudy NAMI*. 2021;(1):35–46. (In Russ). doi: 10.51187/0135-3152-2021-1-35-46
12. Sosnovsky NG, Nguyen VH. Computational studies of the hydraulic transmission of a hovercraft. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*. 2023;4:46–54. (in Russ). doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-46-54

ОБ АВТОРАХ

* Нгуен Ван Хоа,

аспирант кафедры «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»;
адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1;
ORCID: 0009-0000-0843-2738;
eLibrary SPIN: 7676-2873;
e-mail: thoigian226@gmail.com

Лепёшкин Александр Владимирович,

профессор, канд. техн. наук,
профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика»;
ORCID: 0000-0002-5590-7422;
eLibrary SPIN: 4412-6948;
e-mail: a.v.lepeshkin@mospolytech.ru

Сосновский Николай Геннадьевич,

канд. техн. наук,
доцент кафедры «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»;
ORCID: 0009-0001-3474-9058;
eLibrary SPIN: 2272-9699;
e-mail: sosn@bmstu.ru

AUTHORS' INFO

* Van Hoa Nguyen,

Postgraduate of the Hydromechanics, Hydromachines and Hydro-Pneumoautomatics Department;
address: 5 bldg 1 2nd Baumanskaya street, 105005 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0009-0000-0843-2738;
eLibrary SPIN: 7676-2873;
e-mail: thoigian226@gmail.com

Alexander V. Lepeshkin,

Professor, Cand. Sci. (Tech.),
Professor of the Industrial Heat Power Engineering Department;
ORCID: 0000-0002-5590-7422;
eLibrary SPIN: 4412-6948;
e-mail: a.v.lepeshkin@mospolytech.ru

Nikolay G. Sosnovsky,

Cand. Sci. (Tech.),
Associate Professor of the Hydromechanics, Hydromachines and Hydro-Pneumoautomatics Department;
ORCID: 0009-0001-3474-9058;
eLibrary SPIN: 2272-9699;
e-mail: sosn@bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author