

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 532.516, 532.517, 517.928

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.1.125-139>**О движении гидромеханической системы
с вязкой жидкостью при периодических воздействиях****В.Л. Сенницкий***Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия**Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия**sennitskii@yandex.ru***Аннотация**

Поставлена и решена задача о движении гидромеханической системы, состоящей из вязкой жидкости и граничащих с ней твердых тел – стенки и пластины. Граница стенки проницаема для жидкости, стенка совершает заданное поступательное движение. Гидромеханическая система подвергается периодическим по времени воздействиям. Задачу о движении системы составляют уравнение движения пластины, уравнение Навье–Стокса и условия на твердых границах жидкости. Обнаружены новые гидромеханические эффекты.

Ключевые слова: вязкая жидкость, твердые тела, периодические по времени воздействия, выделенное направление в пространстве, гидромеханические эффекты

Для цитирования: Сенницкий В.Л. О движении гидромеханической системы с вязкой жидкостью при периодических воздействиях // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2025. Т. 167, кн. 1. С. 125–139. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.1.125-139>.

ORIGINAL ARTICLE

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.1.125-139>

On the motion of a hydro-mechanical system with a viscous liquid under periodic influences

V.L. Sennitskii

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

sennitskii@yandex.ru

Abstract

The problem of the motion of a hydro-mechanical system consisting of a viscous liquid and solid bodies, a wall and a plate, bordering it is formulated and solved. The wall undergoes a prescribed translational motion, and its boundary is permeable to the liquid. The hydro-mechanical system is subjected to time-periodic influences. The problem formulation includes the equation of the plate motion, the Navier–Stokes equation, and the conditions at the solid–liquid interfaces. New hydro-mechanical effects are revealed.

Keywords: viscous liquid, solid bodies, time-periodic influences, predominant direction in space, hydro-mechanical effects

For citation: Sennitskii V.L. On the motion of a hydro-mechanical system with a viscous liquid under periodic influences. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2025, vol. 167, no. 1, pp. 125–139. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.1.125-139>. (In Russian)

Введение

Одним из перспективных направлений в современной механике жидкости является изучение динамики гидромеханических систем при периодических по времени воздействиях. В этом направлении получен ряд нетривиальных результатов, обнаружены новые гидромеханические эффекты, выявлены возможности периодических воздействий на гидромеханические системы как средства качественного влияния на динамику систем, управления системами, организации заданной динамики систем (см., например, [1–9], а также [10–48]). Результаты исследований в рассматриваемом направлении могут представлять, в частности, существенный прикладной интерес [14, 43, 45–48].

В настоящей работе поставлена и решена новая задача о движении гидромеханической системы с вязкой жидкостью. Свободные части системы (движение которых не задано, требует определения) испытывают периодические по времени воздействия, характеризующиеся наличием или отсутствием выделенного направления в пространстве. Обнаружены новые гидромеханические эффекты. Установлено, в частности, что гидромеханическая система может совершать среднее по времени движение, состоящее в том, что свободная

твердая часть системы и граничащая с ней часть жидкости движутся в направлении, совпадающем с направлением внешнего стационарного силового воздействия на систему, а остальная жидкость, граничащая с неподвижной твердой частью системы, совершает движение в противоположном направлении.

1. Постановка задачи

Имеется гидромеханическая система, состоящая из вязкой несжимаемой жидкости и абсолютно твердых тел – стенки η и однородной пластины ξ (рис. 1).

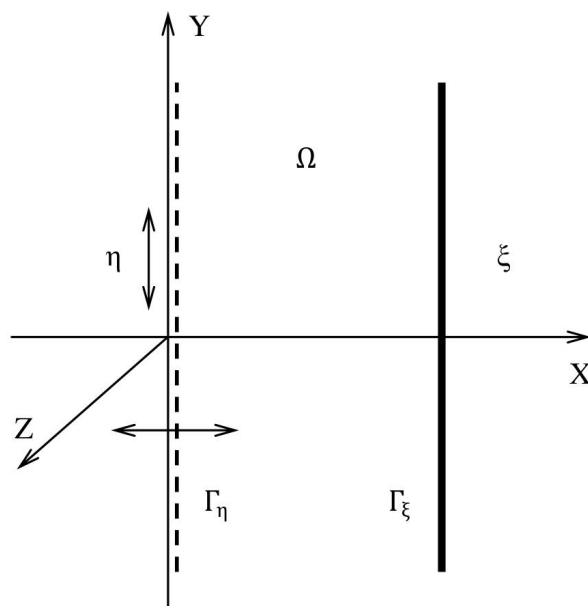


Рис. 1. Гидромеханическая система

Fig. 1. Hydro-mechanical system

Стенка η ограничена плоскостью Γ_η , перпендикулярной к оси X инерциальной прямоугольной системы координат X, Y, Z и пересекающей с осью X в точке $X = A$. Пластина ξ ограничена плоскостями $\Gamma_\xi : X = B$, $\Gamma'_\xi : X = C$ ($-\infty < Y < \infty$, $-\infty < Z < \infty$; $B > A$, $C > B$ – постоянные). Жидкость заполняет область $\Omega : A < X < B$. Граница Γ_η стенки η проницаема для жидкости. Стенка η совершает заданное поступательное движение вдоль осей X, Y ; координата A и скорость U движения стенки η в направлении оси Y периодически с периодом T изменяются со временем t ($A = \hat{A} \sin(2\pi t/T + \alpha)$; $U = \hat{U} \sin(2\pi t/T)$; $\hat{A} > 0$, α , $\hat{U} > 0$ – постоянные; скорость движения стенки η в направлении оси X составляет $dA/dt = (2\pi\hat{A}/T) \cos(2\pi t/T + \alpha)$). На пластину ξ оказывается заданное внешнее стационарное силовое воздействие. Пластина ξ является свободной, совершает поступательное движение со скоростью $\mathbf{W} = \{0, W, 0\}$, которую необходимо найти. Скорость жидкости $\mathbf{V} = \{0, V, 0\}$ и давление в жидкости P не зависят от координат Y, Z .

Требуется определить периодическое по времени движение гидромеханической системы (свободных частей гидромеханической системы – жидкости и пластины ξ).

Пусть $\tau = t/T$; $x = X/B$; $\mathbf{e} = \{0, 1, 0\}$; $\mathbf{v} = T\mathbf{V}/B = v(x, \tau)\mathbf{e}$; ρ – плотность жидкости; $p = T^2 P/(\rho B^2) = p(x, \tau)$; $\varepsilon = \hat{A}/B$; $a = A/B = \varepsilon \sin(2\pi\tau + \alpha)$; ξ' – абсолютно твердое

тело, (какая-либо) часть пластины ξ , заполняющая в (какой-либо) момент времени $t = t'$ область $B < X < C$, $Y^* < Y < Y^* + D_Y$, $Z^* < Z < Z^* + D_Z$ (Y^* , Z^* , $D_Y > 0$, $D_Z > 0$ – постоянные); ρ' – плотность пластины ξ ; $m = \rho'(C - B)D_Y D_Z$ – масса тела ξ' ; $\mathbf{U} = U\mathbf{e}$; $\mathbf{u} = T\mathbf{U}/B = u\mathbf{e}$; $\mathbf{w} = T\mathbf{W}/B = w\mathbf{e}$; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости; $Re = B^2/(\nu T)$ – число Рейнольдса; $\varkappa = \rho B/[\rho'(C - B)]$; $\mathbf{F}_{liq} = F_{liq}\mathbf{e}$ – сила, действующая на тело ξ' со стороны жидкости; $f_{liq} = T^2 F_{liq}/(mB) = -(\varkappa/Re) (\partial v/\partial x)|_{x=1}$; $\mathbf{F}_{ext} = F_{ext}\mathbf{e}$ – (не зависящая от времени) внешняя сила, действующая на тело ξ' ; $f_{ext} = T^2 F_{ext}/(m\hat{A})$.

Задачу о движении гидромеханической системы составляют уравнение движения пластины ξ (тела ξ'), уравнение Навье–Стокса и условия на границах Γ_η , Γ_ξ

$$\frac{dw}{d\tau} = f_{liq} + \varepsilon f_{ext}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \tau} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{v} \quad \text{в} \quad \Omega; \quad (2)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{u} \quad \text{при} \quad x = a; \quad (3)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{w} \quad \text{при} \quad x = 1. \quad (4)$$

Отметим, что в задаче (1)–(4) периодические по времени воздействия, оказываемые на гидромеханическую систему (свободные части гидромеханической системы), при $f_{ext} \neq 0$ характеризуются наличием, а при $f_{ext} = 0$ – отсутствием выделенного направления в пространстве (выделенным является направление вектора $f_{ext}\mathbf{e}$).

2. Решение задачи

Согласно (2)–(4) имеем

$$p = p(\tau); \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad \text{в} \quad \Omega; \quad (6)$$

$$v = u \quad \text{при} \quad x = a, \quad v = w \quad \text{при} \quad x = 1. \quad (7)$$

Будем рассматривать задачу (1), (6), (7) при малых по сравнению с единицей значениях ε . Применим метод разложения по степеням малого параметра [49, 50]. Предположим, что

$$v \sim v_0 + \varepsilon v_1, \quad w \sim w_0 + \varepsilon w_1 \quad \text{при} \quad \varepsilon \rightarrow 0. \quad (8)$$

Используя (1), (6)–(8), в ε^N -приближении ($N = 0, 1$) получим

$$\frac{dw_N}{d\tau} = f_{liqN} + N f_{ext}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial v_N}{\partial \tau} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 v_N}{\partial x^2} \quad \text{в} \quad \bar{\Omega}; \quad (10)$$

$$v_N = (1 - N)u - N \frac{\partial v_0}{\partial x} a' \quad \text{при} \quad x = 0; \quad (11)$$

$$v_N = w_N \quad \text{при} \quad x = 1, \quad (12)$$

где $\bar{\Omega}$ – область $0 < X < B$; $f_{liqN} = -(\varkappa/Re) (\partial v_N/\partial x)|_{x=1}$; $a' = a/\varepsilon = \sin(2\pi\tau + \alpha)$.

Пусть $N = 0$. Задача (9)–(12) имеет решение

$$v_0 = \text{Real} (\tilde{v}_0 e^{2\pi i \tau}); \quad (13)$$

$$w_0 = \text{Real} (\tilde{w}_0 e^{2\pi i \tau}). \quad (14)$$

Здесь

$$\tilde{v}_0 = \frac{i\hat{u} \operatorname{sh} q(x-1) + \tilde{w}_0 \operatorname{sh} qx}{\operatorname{sh} q}; \quad \tilde{w}_0 = -\frac{i\hat{u}\kappa}{q \operatorname{sh} q + \kappa \operatorname{ch} q}$$

$$(q = (1+i)\lambda = (1+i)\sqrt{\pi Re}).$$

Отметим, что $q \operatorname{sh} q + \kappa \operatorname{ch} q$ не обращается в нуль ни при каких значениях $\kappa > 0$, $Re > 0$ ввиду того, что при любых значениях $\kappa > 0$, $Re > 0$ выполняется соотношение

$$\sqrt{(\kappa + \lambda)^2 + \lambda^2} e^\lambda > \sqrt{(\kappa - \lambda)^2 + \lambda^2} e^{-\lambda}.$$

Пусть $N = 1$. Преобразуем условие (11) к виду

$$v_1 = -\frac{1}{2} \operatorname{Real} (ie^{-i\alpha} \frac{d\tilde{v}_0}{dx}) + \frac{1}{2} \operatorname{Real} (ie^{i\alpha} \frac{d\tilde{v}_0}{dx} e^{4\pi i \tau}) \quad \text{при} \quad x = 0. \quad (15)$$

Учитывая (15), сделаем в (9), (10), (12) подстановку

$$v_1 = \operatorname{Real} (\bar{v} + \tilde{v}_1 e^{4\pi i \tau}), \quad w_1 = \operatorname{Real} (\bar{w} + \tilde{w}_1 e^{4\pi i \tau}) \quad (16)$$

($\bar{v}$, $\tilde{v}_1$ – функции x ; $\bar{w}$, $\tilde{w}_1$ – постоянные). Используя полученные в результате этого формулы и (13)–(15), определим задачи

$$\frac{\kappa}{Re} \frac{d\bar{v}}{dx} \Big|_{x=1} = f_{ext}; \quad (17)$$

$$\frac{d^2 \bar{v}}{dx^2} = 0 \quad \text{в} \quad \bar{\Omega}; \quad (18)$$

$$\bar{v} = -\frac{i}{2} e^{-i\alpha} \frac{d\tilde{v}_0}{dx} \quad \text{при} \quad x = 0, \quad \bar{v} = \bar{w} \quad \text{при} \quad x = 1; \quad (19)$$

и

$$4\pi i \tilde{w}_1 = -\frac{\kappa}{Re} \frac{d\tilde{v}_1}{dx} \Big|_{x=1}; \quad (20)$$

$$\frac{d^2 \tilde{v}_1}{dx^2} - 4\pi i Re \tilde{v}_1 = 0 \quad \text{в} \quad \bar{\Omega}; \quad (21)$$

$$\tilde{v}_1 = \frac{i}{2} e^{i\alpha} \frac{d\tilde{v}_0}{dx} \quad \text{при} \quad x = 0, \quad \tilde{v}_1 = \tilde{w}_1 \quad \text{при} \quad x = 1. \quad (22)$$

Задача (17)–(19) имеет решение

$$\bar{v} = f_{ext} \frac{Re}{\kappa} x - \frac{i}{2} e^{-i\alpha} \frac{q}{\operatorname{sh} q} (i\hat{u} \operatorname{ch} q + \tilde{w}_0); \quad (23)$$

$$\bar{w} = \bar{v} \Big|_{x=1}. \quad (24)$$

Задача (20)–(22) имеет решение

$$\tilde{v}_1 = \frac{(Qe^{\sqrt{2}q} - \tilde{w}_1)e^{-\sqrt{2}qx} - (Qe^{-\sqrt{2}q} - \tilde{w}_1)e^{\sqrt{2}qx}}{2 \operatorname{sh} \sqrt{2}q}; \quad (25)$$

$$\tilde{w}_1 = \frac{\varkappa Q}{\sqrt{2}q \operatorname{sh} \sqrt{2}q + \varkappa \operatorname{ch} \sqrt{2}q}, \quad (26)$$

где

$$Q = \frac{i}{2} e^{i\alpha} \frac{q}{\operatorname{sh} q} (i\hat{u} \operatorname{ch} q + \tilde{w}_0).$$

Отметим, что $\sqrt{2}q \operatorname{sh} \sqrt{2}q + \varkappa \operatorname{ch} \sqrt{2}q$ не обращается в нуль ни при каких значениях $\varkappa > 0$, $Re > 0$ ввиду того, что при любых значениях $\varkappa > 0$, $Re > 0$ выполняется соотношение

$$\sqrt{(\varkappa + \sqrt{2}\lambda)^2 + 2\lambda^2} e^{\sqrt{2}\lambda} > \sqrt{(\varkappa - \sqrt{2}\lambda)^2 + 2\lambda^2} e^{-\sqrt{2}\lambda}.$$

Формулами

$$v = v_0 + \varepsilon v_1, \quad w = w_0 + \varepsilon w_1 \quad (27)$$

и (5), (13), (14), (16), (23)–(26) определяется приближенное решение задачи (1)–(4).

3. Анализ и выводы

Стенка η , совершающая заданное движение, в среднем по времени покоится.

Обратимся к вопросу о среднем по времени движении свободных частей гидромеханической системы (жидкости и пластины ξ). Используя (13), (14), (16), (23)–(27), найдем

$$\langle \mathbf{v} \rangle = \varepsilon \left\{ f_{ext} \frac{Re}{\varkappa} x + \frac{1}{2} \hat{u} \operatorname{Real} \left[e^{-i\alpha} \frac{q}{\operatorname{sh} q} \left(\operatorname{ch} q - \frac{\varkappa}{q \operatorname{sh} q + \varkappa \operatorname{ch} q} \right) \right] \right\} \mathbf{e}; \quad (28)$$

$$\langle \mathbf{w} \rangle = \langle \mathbf{v} \rangle|_{x=1}. \quad (29)$$

Здесь

$$\langle \dots \rangle = \int_{\tau}^{\tau+1} \dots d\tau'$$

– оператор усреднения по (безразмерному) времени τ ; $\langle \mathbf{v} \rangle$ – средняя (по времени τ) безразмерная скорость жидкости; $\langle \mathbf{w} \rangle$ – средняя безразмерная скорость пластины ξ .

Формулы (28), (29) имеют место для любого значения числа Рейнольдса $Re > 0$. Эти формулы, в частности, свидетельствуют о существовании эффекта, состоящего в том, что в рассматриваемых гидромеханических условиях и при наличии, и в отсутствие выделенного направления в пространстве (то есть и при $f_{ext} \neq 0$, и при $f_{ext} = 0$) на фоне колебаний свободные части гидромеханической системы совершают стационарное движение.

Рассмотрим вопрос о среднем по времени движении свободных частей гидромеханической системы при значениях Re , больших по сравнению с единицей. Используя (28), (29), получим

$$\langle \mathbf{v} \rangle \sim \varphi \mathbf{e}, \quad \langle \mathbf{w} \rangle \sim \varphi|_{x=1} \mathbf{e} \quad \text{при } Re \rightarrow \infty \quad (\text{для } f_{ext} \neq 0); \quad (30)$$

$$\langle \mathbf{v} \rangle \sim \chi \mathbf{e}, \quad \langle \mathbf{w} \rangle \sim \chi \mathbf{e} \quad \text{при } Re \rightarrow \infty \quad (\text{для } f_{ext} = 0), \quad (31)$$

где

$$\varphi = \frac{f_{ext}}{\varkappa} \varepsilon Re x; \quad \chi = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \hat{u} \varepsilon \sqrt{Re} \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right).$$

Согласно (30), (31) на фоне колебаний имеет место следующее.

1. Если $f_{ext} \neq 0$, то жидкость в области $\bar{\Omega}$ и пластина ξ движутся в направлении, совпадающем с направлением вектора $f_{ext}\mathbf{e}$.

2. Если $f_{ext} = 0$, то при $\sin(\alpha + \frac{\pi}{4}) > 0$ жидкость в области $\bar{\Omega}$ и пластина ξ (как “одно целое”) совершают поступательное движение в направлении, совпадающем с направлением вектора $\mathbf{e}$; при $\sin(\alpha + \frac{\pi}{4}) < 0$ – совершают поступательное движение в направлении, противоположном направлению вектора $\mathbf{e}$; при $\sin(\alpha + \frac{\pi}{4}) = 0$ жидкость в области $\bar{\Omega}$ и пластина ξ покоятся.

Рассмотрим вопрос о среднем по времени движении свободных частей гидромеханической системы при значениях Re , малых по сравнению с единицей. Используя (28), (29), получим

$$\langle \mathbf{v} \rangle \sim \psi \mathbf{e}, \quad \langle \mathbf{w} \rangle \sim \psi|_{x=1} \mathbf{e} \quad \text{при } Re \rightarrow 0, \quad (32)$$

где

$$\psi = \frac{\varepsilon}{\kappa} [f_{ext} x + \pi \hat{u}(\kappa + 1) \sin \alpha] Re.$$

Согласно (32) на фоне колебаний имеет место следующее.

1. Если $f_{ext} \neq 0$, $\sin \alpha = 0$, то жидкость в области $\bar{\Omega}$ и пластина ξ движутся в направлении, совпадающем с направлением вектора $f_{ext}\mathbf{e}$.

2. Если $f_{ext} = 0$, $\sin \alpha \neq 0$, то при $\sin \alpha > 0$ жидкость в области $\bar{\Omega}$ и пластина ξ (как “одно целое”) совершают поступательное движение в направлении, совпадающем с направлением вектора $\mathbf{e}$; при $\sin \alpha < 0$ – совершают поступательное движение в направлении, противоположном направлению вектора $\mathbf{e}$.

3. Если $f_{ext} = 0$, $\sin \alpha = 0$, то жидкость в области $\bar{\Omega}$ и пластина ξ покоятся.

4. Если $f_{ext} \sin \alpha > 0$, то жидкость в области $\bar{\Omega}$ и пластина ξ движутся в направлении, совпадающем с направлением вектора $f_{ext}\mathbf{e}$.

5. Если $f_{ext} \sin \alpha < 0$, $|f_{ext}| < \pi \hat{u}(\kappa + 1) |\sin \alpha|$, то свободные части гидромеханической системы совершают движение, которое может характеризоваться как “необычное”; жидкость в области $\bar{\Omega}$ и пластина ξ движутся в направлении, противоположном направлению вектора $f_{ext}\mathbf{e}$, то есть направлению внешнего силового воздействия на пластину ξ (при $\sin \alpha > 0$ жидкость и пластина движутся в направлении, совпадающем с направлением вектора $\mathbf{e}$; при $\sin \alpha < 0$ – движутся в направлении, противоположном направлению вектора $\mathbf{e}$).

6. Если $f_{ext} \sin \alpha < 0$, $|f_{ext}| > \pi \hat{u}(\kappa + 1) |\sin \alpha|$, то пластина ξ движется в направлении, совпадающем с направлением вектора $f_{ext}\mathbf{e}$, при том, что для значения $x = x^* = -\pi \hat{u}(\kappa + 1) (\sin \alpha) / f_{ext}$ скорость жидкости равна нулю, при $x^* < x < 1$ жидкость движется в направлении, совпадающем с направлением вектора $f_{ext}\mathbf{e}$, при $0 < x < x^*$ жидкость совершает движение в направлении, противоположном направлению вектора $f_{ext}\mathbf{e}$, то есть направлению внешнего силового воздействия на пластину ξ и направлению движения пластины ξ . “Толщина” $1 - x^*$ области $x^* < x < 1$ “правильного” направления движения жидкости может быть сколь угодно малой по сравнению с “толщиной” x^* области $0 < x < x^*$ “необычного” направления движения жидкости (и наоборот).

7. Если $f_{ext} \sin \alpha < 0$, $|f_{ext}| = \pi \hat{u}(\kappa + 1) |\sin \alpha|$, то пластина ξ покоится, а жидкость в области $\bar{\Omega}$ совершает движение в направлении, противоположном направлению вектора $f_{ext}\mathbf{e}$.

Результаты проведенного изучения среднего движения свободных частей гидромеханической системы при больших и малых значениях числа Рейнольдса Re , в частности,

свидетельствуют о том, что периодические по времени воздействия на гидромеханические системы способны быть средством организации предписанных качественных изменений в динамике систем.

Заключение

Присутствующие в данном исследовании и в ряде других работ (например, в [7, 8, 37, 40–42]) периодические по времени воздействия, характеризующиеся отсутствием выделенного направления в пространстве, представляют интерес, в частности, ввиду того, что при таких воздействиях на механические системы в среднем по времени каждое частичное периодическое воздействие является нулевым, “отсутствует”; в среднем по времени “ничего не происходит” (например, в данной работе в среднем по времени стенка η “стоит на месте”), но свободные части систем совершают среднее движение. Причиной эффектов среднего движения свободных частей механических систем является согласованность (друг с другом) воздействий, оказываемых на системы, что находится в непосредственной связи с принципом среднего движения [7, 9, 18, 41, 51].

Полученные результаты в сочетании с результатами других теоретических исследований нетривиальной динамики гидромеханических систем при периодических воздействиях могут использоваться как теоретическая основа при организации направленных экспериментальных исследований в области механики жидкости, при разработке перспективных методов управления гидромеханическими системами и создании гидромеханических систем, обладающих предписанными свойствами, при проведении исследований в области технических наук, исследований прикладного характера.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Челомей В.Н. Парадоксы в механике, вызываемые вибрациями // Докл. АН СССР. 1983. Т. 270, № 1. С. 62–67.
2. Сенницкий В.Л. О движении кругового цилиндра в вибрирующей жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 1985. № 5. С. 19–23.
3. Сенницкий В.Л. Преимущественно однонаправленное движение газового пузыря в вибрирующей жидкости // Докл. АН СССР. 1991. Т. 319, № 1. С. 117–119.
4. Lyubimov D.V. New approach in the vibrational convection theory // Proc. 14 IMACs Congr. on Computational and Applied Mathematics. Atlanta, GA: Ga. Inst. Technol., 1994. P. 59–68.
5. Сенницкий В.Л. О движении включения в однородно и неоднородно колеблющейся жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 2007. Т. 48, № 1. С. 79–85.
6. Иванова А.А., Козлов В.Г., Щипицын В.Д. Подъемная сила, действующая на цилиндрическое тело в жидкости вблизи границы полости, совершающей поступательные колебания // Прикл. мех. техн. физ. 2014. Т. 55, № 5. С. 55–63.
7. Сенницкий В.Л. Парадоксальное движение жидкости // Междунар. журн. прикл. и фундам. иссл. 2017. № 8 (ч. 1). С. 28–33. <https://doi.org/10.17513/mjpf.11753>.

8. *Сенницкий В.Л.* Об особенностях течения жидкости в поле силы тяжести // Сиб. электрон. матем. изв. 2022. Т. 19, № 1. С. 241–247. <https://doi.org/10.33048/semi.2022.19.018>.
9. *Сенницкий В.Л.* О движении вязкой жидкости со свободной границей // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2024. Т. 166, кн. 1. С. 99–110. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2024.1.99-110>.
10. *Сенницкий В.Л.* Движение шара в жидкости, вызываемое колебаниями другого шара // Прикл. мех. техн. физ. 1986. № 4. С. 31–36.
11. *Луговцов Б.А., Сенницкий В.Л.* О движении тела в вибрирующей жидкости // Докл. АН СССР. 1986. Т. 289, № 2. С. 314–317.
12. *Любимов Д.В., Любимова Т.П., Черепанов А.А.* О движении твёрдого тела в вибрирующей жидкости // Конвект. течен. Пермь: Перм. пед. ин-т, 1987. С. 61–71.
13. *Челомей В.Н.* Избранные труды. М.: Машиностроение, 1989. 336 с.
14. *Сенницкий В.Л.* О движении газового пузыря в вязкой вибрирующей жидкости // Гагаринск. науч. чтен. по космонавт. и авиац., 1988. М.: Наука, 1989. С. 267.
15. *Сенницкий В.Л.* Преимущественно однонаправленное движение сжимаемого твердого тела в вибрирующей жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 1993. № 1. С. 100–101.
16. *Sennitskii V.L.* On motion of inclusions in uniformly and non-uniformly vibrating liquid // Proc. Int. Workshop on G-jitter. Potsdam, NY: Clarkson Univ., 1993. P. 178–186.
17. *Lyubimov D.V.* Thermovibrational flows in nonuniform systems // Microgravity Q. 1994. V. 4, No 1. P. 221–225.
18. *Сенницкий В.Л.* Движение включений в колеблющейся жидкости // Сиб. физ. журн. 1995. № 4. С. 18–26.
19. *Kozlov V.G.* Solid-body dynamics in cavity with liquid under high-frequency rotational vibration // Europhys. Lett. 1996. V. 36, No 9. P. 651–656. <https://doi.org/10.1209/epl/i1996-00282-0>.
20. *Сенницкий В.Л.* О поведении газового пузыря в вязкой колеблющейся жидкости в присутствии силы тяжести // Прикл. мех. техн. физ. 1997. Т. 38, № 5. С. 73–79.
21. *Иванова А.А., Козлов В.Г., Эвеск П.* Динамика цилиндрического тела в заполненном жидкостью секторе цилиндрического слоя при вращательных вибрациях // Изв. РАН. МЖГ. 1998, № 4. С. 29–39.
22. *Любимов Д.В., Перминов А.В., Черепанов А.А.* Генерация осреднённых течений в вибрационном поле вблизи поверхности раздела сред // Вибрац. эффекты в гидродинам. Сб. статей / Пермь: Перм. ун-т, 1998. С. 204–221.
23. *Сенницкий В.Л.* Движение шара в жидкости в присутствии стенки при колебательных воздействиях // Прикл. мех. техн. физ. 1999. Т. 40, № 4. С. 125–132.
24. *Lavrenteva O.M.* On the motion of particles in non-uniformly vibrating liquid // Eur. J. Appl. Math. 1999. V. 10, No 3. P. 251–263. <https://doi.org/10.1017/S0956792599003745>.
25. *Сенницкий В.Л.* О движении пульсирующего твердого тела в вязкой колеблющейся жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 2001. Т. 42, № 1. С. 82–86.
26. *Любимов Д.В., Любимова Т.П., Черепанов А.А.* Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях. М.: Физматлит, 2003. 216 с.

27. Иванова А.А., Козлов В.Г., Кузаев А.Ф. Вибрационная подъемная сила, действующая на тело в жидкости вблизи твердой поверхности // Докл. АН СССР. 2005. Т. 402, № 4. С. 488–491.
28. Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Shklyayev S.V. Behavior of a drop on an oscillating solid plate // Phys. Fluids. 2006. V. 18, No 1. Art. 012101. <https://doi.org/10.1063/1.2137358>.
29. Сенницкий В.Л. О колебательном движении неоднородного твердого шара в вибрирующей жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 2009. Т. 50, № 6. С. 27–35.
30. Иванова А.А., Козлов В.Г., Щипицын В.Д. Легкий цилиндр в полости с жидкостью при горизонтальных вибрациях // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 6. С. 63–73.
31. Kozlov V., Ivanova A., Schipitsyn V., Stambouli M. Lift force acting on the cylinder in viscous liquid under vibration // Acta Astronaut. 2012. V. 79. P. 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.04.013>.
32. Пятигорская О.С., Сенницкий В.Л. Пример движения цилиндрического твердого тела в вязкой жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 2013. Т. 54, № 2. С. 81–87.
33. Пятигорская О.С., Сенницкий В.Л. О движении твердых частиц в колеблющейся жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 2013. Т. 54, № 3. С. 74–78.
34. Vlasova O.A., Kozlov V.G. The repulsion of flat body from the wall of vibrating container filled with liquid // Microgravity Sci. Technol. 2015. V. 27, No 4. P. 297–303. <https://doi.org/10.1007/s12217-015-9460-y>.
35. Сенницкий В.Л. О заданной ориентации твердого включения в вязкой жидкости // Сиб. журн. индустр. матем. 2015. Т. 18, № 1. С. 123–128. <https://doi.org/10.17377/SIBJIM.2015.18.110>.
36. Kozlov N.V., Vlasova O.A. Behaviour of a heavy cylinder in a horizontal cylindrical liquid-filled cavity at modulated rotation // Fluid Dyn. Res. 2016. V. 48, No 5. Art. 055503. <https://doi.org/10.1088/0169-5983/48/5/055503>.
37. Сенницкий В.Л. Преимущественно однонаправленное вращение твердого тела и вязкой жидкости // Сиб. журн. индустр. матем. 2017. Т. 20, № 2. С. 93–97. <https://doi.org/10.17377/sibjim.2017.20.210>.
38. Власова О.А., Козлов В.Г., Козлов Н.В. Динамика тяжелого тела, находящегося во вращающейся кювете с жидкостью, при модуляции скорости вращения // Прикл. мех. техн. физ. 2018. Т. 59, № 2. С. 39–49. <https://doi.org/10.15372/PMTF20180105>.
39. Коновалов В.В., Любимова Т.П. Численное исследование влияния вибраций на взаимодействие в ансамбле газовых пузырьков и твердых частиц в жидкости // Вычисл. механ. сплошн. сред. 2019. Т. 12, № 1. С. 48–56. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.1.5>.
40. Сенницкий В.Л. О движении вязкой жидкости в отсутствие выделенного направления в пространстве // Междунар. журн. прикл. и фундам. иссл. 2021. № 2. С. 67–71. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13181>.
41. Сенницкий В.Л. Преимущественно однонаправленное течение вязкой жидкости // Сиб. журн. индустр. матем. 2021. Т. 24, № 2. С. 126–133. <https://doi.org/10.33048/SIBJIM.2021.24.210>.
42. Сенницкий В.Л. О течении вязкой жидкости в поле силы тяжести // Теплофиз. и аэромех. 2021. Т. 28, № 3. С. 373–377.

43. Сенницкий В.Л. Эффекты парадоксального движения вязкой жидкости в поле силы тяжести // Аэрокосм. техн., высокие технолог. и инновации-2021. Матер. Всероссийск. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 18–20 ноября 2021 г.). В 2-х т. Пермь: ПНИПУ, 2021. 440 с. Т. 1. С. 138–142. ISBN 978-5-398-02670-2.
44. Коновалов В.В., Любимова Т.П. Влияние акустических вибраций на взаимодействие газового пузыря и твердой частицы в жидкости // Перм. гидродинам. науч. чтен. Сб. статей по матер. VIII Всероссийск. конф., посвящ. памяти проф. Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова. Отв. ред. Т.П. Любимова. Пермь: ПГНИУ, 2022. С. 254–261.
45. Сенницкий В.Л. Движение включения в вибрирующей жидкости // Аэрокосм. техн., высокие технолог. и инновации-2022. Матер. Всероссийск. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 16–18 ноября 2022 г.). Пермь: ПНИПУ, 2022. 279 с. С. 207–209.
46. Сенницкий В.Л. Вынужденные вращательные колебания гидромеханической системы // Сб. статей Междунар. науч.-техн. конф. “Минские научные чтения-2022” (г. Минск, 07–09 декабря 2022 г.). В 3-х т. Минск: БГТУ, 2022. 1115 с. Т. 3. С. 181–186. ISBN 978-985-897-058-1.
47. Сенницкий В.Л. О диагностике гидромеханической системы // Аэрокосм. техн., высокие технолог. и инновации-2023. Матер. Всероссийск. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 15–17 ноября 2023 г.). Пермь: ПНИПУ, 2023. 243 с. С. 205–207. ISBN 978-5-398-03043-3.
48. Сенницкий В.Л. О движении включения в жидкой среде // Гидропроц. в катализе. V Науч.-техн. симпоз. (г. Сочи, 3–6 октября 2024 г.). Новосибирск: Ин-т катализа СО РАН, 2024. 215 с. С. 180–182. ISBN 978-5-906376-57-2.
49. Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н. Введение в нелинейную механику. М. – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2004. 352 с.
50. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: ГИФМЛ, 1958. 408 с.
51. Сенницкий В.Л. О силовом взаимодействии шара и вязкой жидкости в присутствии стенки // Прикл. мех. техн. физ. 2000. Т. 41, № 1. С. 57–62.

References

1. Chelomey V.N. Paradoxes in mechanics caused by vibrations. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1983, vol. 270, no. 1, pp. 62–67 (In Russian)
2. Sennitskii V.L. Motion of a circular cylinder in a vibrating liquid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1985, vol. 26, no. 5, pp. 620–623. <https://doi.org/10.1007/BF00915307>.
3. Sennitskii V.L. Predominantly unidirectional motion of a gas bubble in a vibrating liquid. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1991, vol. 319, no. 1, pp. 117–119 (In Russian)
4. Lyubimov D.V. New approach in the vibrational convection theory. *Proc. 14 IMACs Congr. on Computational and Applied Mathematics*. Atlanta, GA, Ga. Inst. Technol., 1994, pp. 59–68.
5. Sennitskii V.L. Motion of an inclusion in uniformly and nonuniformly vibrating liquids. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2007, vol. 48, no. 1, pp. 65–70. <https://doi.org/10.1007/s10808-007-0009-8>.
6. Ivanova A.A., Kozlov V.G., Shchipitsyn V.D. Lift force acting on a cylindrical body in a fluid near the boundary of a cavity performing translational vibrations. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2014, vol. 55, no. 5, pp. 773–780. <https://doi.org/10.1134/S002189441405006X>.

7. Sennitskii V.L. A paradoxical liquid motion. *Mezhdunar. Zh. Prikl. Fundam. Issled.*, 2017, no. 8 (pt. 1), pp. 28–33. <https://doi.org/10.17513/mjpf.11753>. (In Russian)
8. Sennitskii V.L. On peculiarities of a liquid flow in a gravity field. *Sib. Elektron. Mat. Izv.*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 241–247. <https://doi.org/10.33048/semi.2022.19.018>. (In Russian)
9. Sennitskii V.L. On the motion of a viscous liquid with a free boundary. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2024, vol. 166, no. 1, pp. 99–110. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2024.1.99-110>. (In Russian)
10. Sennitskii V.L. Motion of a sphere in fluid caused by vibrations of another sphere. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1986, vol. 27, no. 4, pp. 501–505. <https://doi.org/10.1007/BF00910190>.
11. Lugovtsov B.A., Sennitskii V.L. Motion of a body in a vibrating liquid. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1986, vol. 289, no. 2, pp. 314–317. (In Russian)
12. Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Cherpanov A.A. On the motion of a rigid body in a vibrating liquid. In: *Konvektivnye techeniya* [Convective Flows]. Perm, Permsk. Pedagog. Inst., 1987, pp. 61–71. (In Russian)
13. Chelomey V.N. *Izbrannye trudy* [Selected Works]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 336 p. (In Russian)
14. Sennitskii V.L. On the motion of a gas bubble in a viscous vibrating liquid. *Gagarinsk. nauch. chten. po kosmonavt. i aviats.*, 1988 [Proc. Gagarin Sci. Lect. on Cosmonautics and Aviation, 1998]. Moscow, Nauka, 1989. p. 276. (In Russian)
15. Sennitskii V.L. Predominantly unidirectional motion of a compressible solid body in a vibrating liquid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1993, vol. 34, no. 1, pp. 96–97. <https://doi.org/10.1007/BF00851812>.
16. Sennitskii V.L. On motion of inclusions in uniformly and non-uniformly vibrating liquid. *Proc. Int. Workshop on G-jitter*. Potsdam, NY, Clarkson Univ., 1993, pp. 178–186.
17. Lyubimov D.V. Thermovibrational flows in nonuniform systems. *Microgravity Q.* 1994, vol. 4, no. 1, pp. 221–225.
18. Sennitskii V.L. The motion of inclusions in an oscillating liquid. *Sib. Fiz. Zh.*, 1995, no. 4, pp. 18–26. (In Russian)
19. Kozlov V.G. Solid-body dynamics in cavity with liquid under high-frequency rotational vibration. *Europhys. Lett.*, 1996, vol. 36, no. 9, pp. 651–656. <https://doi.org/10.1209/epl/i1996-00282-0>.
20. Sennitskii V.L. Behavior of a gas bubble in a viscous oscillating liquid in the presence of gravity. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1997, vol. 38, no. 5, pp. 718–723. <https://doi.org/10.1007/BF02467883>.
21. Ivanova A.A., Kozlov V.G., Evesque P. Dynamics of a cylindrical body in a liquid-filled sector of a cylindrical layer under rotational vibration. *Fluid Dyn.*, 1998, vol. 33, no. 4, pp. 488–496. <https://doi.org/10.1007/BF02698213>.
22. Luybimov D.V., Perminov A.V., Cherepanov A.A. Generation of averaged flows in a vibrational field at the fluid interface. In: *Vibrats. efekty v gidrodinam.: Sb. statei* [Vibration Effects in Hydrodynamics: A Collection of Articles]. Perm, Permsk. Univ., 1998, pp. 204–221. (In Russian)
23. Sennitskii V.L. Motion of a sphere in a vibrating liquid in the presence of a wall. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1999, vol. 40, no. 4, pp. 662–668. <https://doi.org/10.1007/BF02468441>.
24. Lavrenteva O.M. On the motion of particles in non-uniformly vibrating liquid. *Eur. J. Appl. Math.*, 1999, vol. 10, no. 3, pp. 251–263. <https://doi.org/10.1017/S0956792599003745>.

25. Sennitskii V.L. Motion of a pulsating rigid body in an oscillating viscous fluid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2001, vol. 42, no. 1, pp. 72–76. <https://doi.org/10.1023/A:1018808628235>.
26. Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Cherepanov A.A. *Dinamika poverkhnostei razdela v vibratsionnykh polyakh* [Dynamics of Interfaces in Vibrational Fields]. Moscow, Fizmatlit, 2003. 216 p. (In Russian)
27. Ivanova A.A., Kozlov V.G., Kuzaev A.F. Vibrational lift force acting on a body in a fluid near a solid surface. *Dokl. Phys.*, 2005, vol. 50, no. 6, pp. 311–314. <https://doi.org/10.1134/1.1958123>.
28. Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Shklyaev S.V. Behavior of a drop on an oscillating solid plate. *Phys. Fluids*, 2006, vol. 18, no. 1, art. 012101. <https://doi.org/10.1063/1.2137358>.
29. Sennitskii V.L. Pulsating motion of an inhomogeneous solid sphere in a vibrating liquid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2009, vol. 50, no. 6, pp. 936–943. <https://doi.org/10.1007/s10808-009-0127-6>.
30. Ivanova A.A., Kozlov V.G., Shchipitsyn V.D. A light cylinder under horizontal vibration in a cavity filled with a fluid. *Fluid Dyn.*, 2010, vol. 45, no. 6, pp. 889–897. <https://doi.org/10.1134/S0015462810060062>.
31. Kozlov V., Ivanova A., Schipitsyn V., Stambouli M. Lift force acting on the cylinder in viscous liquid under vibration. *Acta Astronaut.*, 2012, vol. 79, pp. 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.04.013>.
32. Pyatigorskaya O.S., Sennitskii V.L. Example of motion of a cylindrical solid in a viscous liquid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 237–242. <https://doi.org/10.1134/S0021894413020089>.
33. Pyatigorskaya O.S., Sennitskii V.L. Motion of solid particles in an oscillating liquid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2013, vol. 54, no. 3, pp. 404–407. <https://doi.org/10.1134/S0021894413030085>.
34. Vlasova O.A., Kozlov V.G. The repulsion of flat body from the wall of vibrating container filled with liquid. *Microgravity Sci. Technol.*, 2015, vol. 27, no. 4, pp. 297–303. <https://doi.org/10.1007/s12217-015-9460-y>.
35. Sennitskii V.L. On the prescribed orientation of a solid inclusion in a viscous fluid. *Sib. Zh. Ind. Mat.*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 123–128. <https://doi.org/10.17377/SIBJIM.2015.18.110>. (In Russian)
36. Kozlov N.V., Vlasova O.A. Behaviour of a heavy cylinder in a horizontal cylindrical liquid-filled cavity at modulated rotation. *Fluid Dyn. Res.*, 2016, vol. 48, no. 5, art. 055503. <https://doi.org/10.1088/0169-5983/48/5/055503>.
37. Sennitskii V.L. Predominantly unidirectional rotation of a solid body and a viscous liquid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 284–288. <https://doi.org/10.1134/S1990478917020144>.
38. Vlasova O.A., Kozlov V.G., Kozlov N.V. Lift force acting on a heavy solid in a rotating liquid-filled cavity with a time-varying rotation rate. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2018, vol. 59, no. 2, pp. 219–228. <https://doi.org/10.1134/S0021894418020050>.
39. Konovalov V.V., Lyubimova T.P. Numerical study of the effect of vibrations on the interaction in an ensemble of gas bubbles and solid particles in a liquid. *Vychisl. Mekh. Sploshnykh Sred*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 48–56. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.1.5>. (In Russian)
40. Sennitskii V.L. On the motion of a viscous liquid in the absence of a predominant direction in space. *Mezhdunar. Zh. Prikl. Fundam. Issled.*, 2021, no. 2, pp. 67–71. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13181>. (In Russian)

41. Sennitskii V.L. Predominantly unidirectional flow of a viscous fluid. *J. Appl. Ind. Math.*, 2021, vol. 15, no. 2, pp. 326–330. <https://doi.org/10.1134/S1990478921020149>.
42. Sennitskii V.L. On the flow of a viscous liquid in a gravity field. *Thermophys. Aeromech.*, 2021, vol. 28, no. 3, pp. 347–351. <https://doi.org/10.1134/S0869864321030057>.
43. Sennitskii V.L. The effects of paradoxical motion of a viscous liquid in a gravity field. *Aerokosm. tekhn., vysokie tekhnolog. i innovatsii-2021. Mater. Vserossiisk. nauch.-tekhn. konf. (g. Perm', 18–20 noyabrya 2021 g.)* [Aerospace Engineering, High Technologies, and Innovations-2021. Proc. All-Russ. Sci.-Tech. Conf. (Perm, November 18–20, 2021)]. Vol. 1. Perm, PNIPU, 2021, pp. 138–142. (In Russian)
44. Konovalov V.V., Lyubimova T.P. Influence of acoustic vibrations on the interaction of a gas bubble and a solid particle in a liquid. *Perm. Gidrodinam. nauch. chten. Sb. statei po mater. VIII Vserossiisk. konf., posvyashch. pamyati prof. G.Z. Gershuni, E.M. Zhukhovitskogo i D.V. Lyubimova* [Perm Hydrodynamic Scientific Lectures. Proc. VIII All-Russ. Conf. in Memory of Professors G.Z. Gershuni, E.M. Zhukhovitskii, and D.V. Lyubimov]. Lyubimova T.P. (Ed.). Perm, PGNIU, 2022, pp. 254–261. (In Russian)
45. Sennitskii V.L. The motion of an inclusion in a vibrating liquid. *Aerokosm. tekhn., vysokie tekhnolog. i innovatsii-2022. Mater. Vserossiisk. nauch.-tekhn. konf. (g. Perm', 16–18 noyabrya 2022 g.)* [Aerospace Engineering, High Technologies, and Innovations-2022. Proc. All-Russ. Sci.-Tech. Conf. (Perm, November 16–18, 2022)]. Perm, PNIPU, 2022, pp. 207–209. (In Russian)
46. Sennitskii V.L. Forced rotational oscillations of a hydro-mechanical system. *Sb. statei Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Minskieskie nauchnye chteniya-2022" (g. Minsk, 07–09 dekabrya 2022 g.)* [Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. "Minsk Scientific Lectures-2022" (g. Minsk, December 7–9, 2022)]. Vol. 3. Minsk, BGUTU, 2022, pp. 181–186. (In Russian)
47. Sennitskii V.L. On the diagnostics of a hydro-mechanical system. *Aerokosm. tekhn., vysokie tekhnolog. i innovatsii-2023. Mater. Vserossiisk. nauch.-tekhn. konf. (g. Perm', 15–17 noyabrya 2023 g.)* [Aerospace Engineering, High Technologies, and Innovations-2023. Proc. All-Russ. Sci.-Tech. Conf. (Perm, November 15–17, 2023)]. Perm, PNIPU, 2023, pp. 205–207. (In Russian)
48. Sennitskii V.L. On the motion of an inclusion in a liquid medium. *Gidroprots. v katalize. V Nauch.-tekhn. simpoz. (g. Sochi, 3–6 oktyabrya 2024 g.)* [Hydroprocesses in Catalysis. Proc. V Sci.-Tech. Symp. (Sochi, October 3–6, 2024)]. Novosibirsk, Inst. Katal. Sib. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2024, pp. 180–182. (In Russian)
49. Kryloff N.M., Bogoliubov N.N. *Vvedenie v nelineinuyu mekhaniku* [Introduction to Non-Linear Mechanics]. Moscow, Izhevsk, NITs "Regul. Khaot. Din.", 2004. 352 p. (In Russian)
50. Bogoliubov N.N., Mitropolsky Yu.A. *Asimptoticheskie metody v teorii nelineinykh kolebaniy* [Asymptotic Methods in the Theory of Non-Linear Oscillations]. Moscow, GIFML, 1958. 408 p. (In Russian)
51. Sennitskii V.L. Force interaction of a sphere and a viscous liquid in the presence of a wall. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2000, vol. 41, no. 1, pp. 50–54. <https://doi.org/10.1007/BF02465236>.

Информация об авторах

Владимир Леонидович Сенницкий, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук; профессор механико-математического факультета, Новосибирский государственный университет

E-mail: *sennitskii@yandex.ru*

Author Information

Vladimir L. Sennitskii, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Hydrodynamics SB RAS; Professor, Department of mechanics and mathematics, Novosibirsk State University

E-mail: *sennitskii@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20.12.2024

Принята к публикации 2.03.2025

Received December 20, 2024

Accepted March 2, 2025