

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33, № 2
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(2)

Научная статья
УДК 532.516, 532.517, 517.928

DOI: 10.18500/0869-6632-003155
EDN: LMQFLO

Эффекты вращательного движения жидкости между криволинейными стенками

В. Л. Сенницкий

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: sennitskii@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.06.2024, принята к публикации 30.08.2024,
опубликована онлайн 10.12.2024, опубликована 31.03.2025

Аннотация. Целью работы является выявление и изучение особенностей среднего по времени вращательного движения вязкой жидкости, граничащей с твердыми телами (криволинейными стенками), при периодических по времени воздействиях на жидкость, характеризующихся наличием или отсутствием выделенного направления в пространстве. **Методы.** Используются аналитические методы исследования краевых задач для уравнений Навье–Стокса и неразрывности: метод возмущений (метод разложения по степеням малого параметра), метод Фурье, усреднение. **Результаты.** Поставлена и решена новая задача о движении вязкой жидкости. Обнаружены новые гидромеханические эффекты. **Заключение.** Проведенное исследование является продолжением предшествующих исследований нетривиальной динамики гидромеханических систем при периодических воздействиях. Работа направлена, в частности, на определение диапазона возможностей порождения периодическими воздействиями качественных изменений в динамике гидромеханических систем. Полученные результаты могут использоваться в научном поиске перспективных подходов к решению актуальных прикладных и фундаментальных проблем.

Ключевые слова: вязкая жидкость, периодические по времени воздействия, выделенное направление в пространстве, эффекты вращательного движения.

Для цитирования: Сенницкий В. Л. Эффекты вращательного движения жидкости между криволинейными стенками // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 2. С. 219–232. DOI: 10.18500/0869-6632-003155. EDN: LMQFLO

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Effects of a rotational motion of a liquid between curvilinear walls

V. L. Sennitskii

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: sennitskii@yandex.ru

Received 26.06.2024, accepted 30.08.2024, available online 10.12.2024, published 31.03.2025

Abstract. The *purpose* of the work is the revealing and the researching of peculiarities of an average in time rotational motion of a viscous liquid which is bordering with solid bodies (curvilinear walls) under periodic in time influences which are characterized by the presence or the absence of a predominant direction in space. *Methods.* The analytic investigational methods for boundary problems for Navier–Stokes and continuity equations are used that are the method of perturbations (the method of a decomposition by degrees of a small parameter), the method of Fourier, an averaging. *Results.* A new problem on the motion of a viscous liquid is formulated and solved. New hydro-mechanical effects are revealed. *Conclusion.* The fulfilled investigation is a continuation of previous investigations of non-trivial dynamics of hydro-mechanical systems under periodic influences. In particular the work is directed to the determination of the range of possibilities to create quality changes of a hydro-mechanical systems dynamics by periodic influences. The obtained results can be used in a scientific researching of perspective approaches to the solving actual applied and fundamental problems.

Keywords: viscous liquid, periodic in time influences, predominant direction in space, effects of rotational motion.

For citation: Sennitskii V.L. Effects of a rotational motion of a liquid between curvilinear walls. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(2):219–232. DOI: 10.18500/0869-6632-003155

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Данная работа выполнена в развитие перспективного научного направления — изучения динамики гидромеханических систем при периодических воздействиях. К настоящему времени в этом направлении получен ряд содержательных, нетривиальных результатов (см., например, [1–50]). В частности, установлено наличие «разрешенных» и «запрещенных» состояний подвергающейся периодическим воздействиям гидромеханической системы, для которых решение задачи о движении системы соответственно существует и не существует [33]; обнаружены эффекты парадоксального поведения твердого включения в вибрирующей жидкости [2, 4, 5, 18], «самопроизвольного» перехода твердого тела в колеблющейся вязкой жидкости в положение с заданной ориентацией в пространстве [38], преимущественно однонаправленного вращения твердого тела и вязкой жидкости [42]; построена и изучена математическая модель гидромеханического аналога «маятника Капицы» (см. [30, 51]); введены основополагающие понятия однородных и неоднородных колебаний жидкости, определены количественные характеристики неоднородности колебаний жидкости [10, 28]; обнаружены эффекты разделения включений в колеблющейся жидкости по плотностям [3, 22], преимущественно однонаправленного движения вязкой жидкости со свободной границей [50], парадоксального движения вязкой жидкости в поле силы тяжести при периодических воздействиях [47, 49]; доказано существование явления преимущественно однонаправленного движения сжимаемых включений в вибрирующей жидкости [6, 8, 9, 20]; обнаружен эффект «левитации» жидкости [49].

В данной работе рассмотрена задача о течении вязкой жидкости, заполняющей промежуток между двумя бесконечно длинными твердыми телами (криволинейными стенками). Тела, в частности, совершают заданное периодическое вращательное движение. Жидкость испытывает со стороны тел воздействия, характеризующиеся наличием или отсутствием выделенного

направления в пространстве. Обнаружены новые гидромеханические эффекты, установлено в том числе, что часть жидкости (на фоне колебаний) может совершать вращательное движение в направлении, противоположном направлению среднего вращения твердых тел.

1. Постановка задачи

Имеется гидромеханическая система, состоящая из бесконечно длинных твердых тел (криволинейных стенок) η , ξ и вязкой несжимаемой жидкости (рис. 1). Тело η ограничено извне цилиндрической поверхностью Γ_η радиуса R_η . Тело ξ ограничено изнутри цилиндрической поверхностью Γ_ξ радиуса $R_\xi > R_\eta$. Оси границ Γ_η , Γ_ξ тел η , ξ находятся на оси Z инерциальной прямоугольной системы координат X, Y, Z . Жидкость заполняет область Q : $R_\eta < R < R_\xi$, $0 \leq \theta < 2\pi$, $-\infty < Z < \infty$ ($R = \sqrt{X^2 + Y^2}$, θ, Z — цилиндрическая система координат). Тело η и тело ξ совершают вращательное движение вокруг оси Z с угловой скоростью Ω . Граница Γ_η тела η проницаема для жидкости. Радиус R_ξ и угловая скорость Ω периодически с периодом T изменяются со временем t ($R_\xi = \hat{R}[1 + \varepsilon \sin(2\pi t/T)]$, $\Omega = \hat{\Omega}[\sin(2\pi t/T + \varphi) + \varepsilon(\hat{r} - 1)w]$; $\hat{r} = \hat{R}/R_\eta$; $\hat{R} > 0$, $\hat{\Omega} > 0$, φ, w — постоянные; $0 < \varepsilon < 1$ — параметр; $(1 - \varepsilon)\hat{R} > R_\eta$, $4\varepsilon\hat{R}^2 < R_\eta^2$).

Требуется определить периодическое по времени (не зависящее от начальных условий) симметричное относительно оси Z плоское движение жидкости.

Пусть $\tau = t/T$; $r = R/R_\eta$; $r_\xi = R_\xi/R_\eta$; $\omega = \Omega T$; $\mathbf{V}$, ρ и ν — соответственно скорость, плотность и кинематический коэффициент вязкости жидкости; $\mathbf{v} = T\mathbf{V}/R_\eta = v_r(r, \tau)\mathbf{e}_r + v_\theta(r, \tau)\mathbf{e}_\theta$ ($\mathbf{e}_r$ и $\mathbf{e}_\theta$ — единичные базисные векторы, направления которых совпадают с направлениями возрастания соответственно r и θ); P — давление в жидкости; $p = T^2 P/(\rho R_\eta^2) = p(r, \tau)$; $Re = R_\eta^2/(\nu T)$ — число Рейнольдса.

Задачу о движении жидкости составляют уравнение Навье–Стокса, уравнение неразрывности и условия на границах Γ_η, Γ_ξ

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \tau} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{v} \quad \text{в } Q, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad \text{в } Q, \quad (2)$$

$$\mathbf{v} = r_\xi \frac{dr_\xi}{d\tau} \mathbf{e}_r + \omega \mathbf{e}_\theta \quad \text{на } \Gamma_\eta \quad (\text{при } r = 1), \quad (3)$$

$$\mathbf{v} = \frac{dr_\xi}{d\tau} \mathbf{e}_r + r_\xi \omega \mathbf{e}_\theta \quad \text{на } \Gamma_\xi \quad (\text{при } r = r_\xi). \quad (4)$$

Отметим, что в задаче (1)–(4) испытываемые жидкостью периодические по времени воздействия при $w \neq 0$ характеризуются наличием, а при $w = 0$ — отсутствием выделенного направления в пространстве (выделенным направлением является направление вектора $w[\mathbf{e}_r \times \mathbf{e}_\theta]$, совпадающее с направлением средней угловой скорости вращения тел η, ξ).

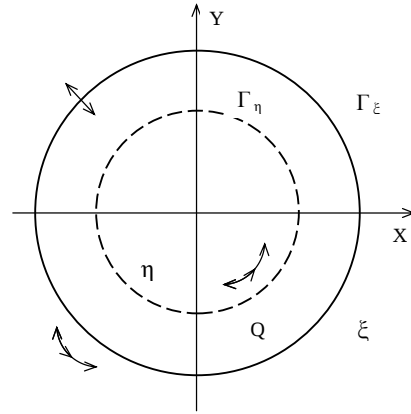


Рис. 1. Гидромеханическая система

Fig. 1. The hydromechanical system

2. Решение задачи

Согласно (2)–(4) имеем

$$v_r = \frac{h}{r}, \quad (5)$$

где

$$h = r_\xi \frac{dr_\xi}{d\tau}.$$

Из (1), (3)–(5) следует

$$p = -\frac{dh}{d\tau} \ln r - \frac{h^2}{2r^2} + \int_1^r \frac{v_\theta^2}{r'} dr' + c \quad (6)$$

(c — функция τ);

$$Re \, r^2 \frac{\partial v_\theta}{\partial \tau} - r^2 \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + (Re \, h - 1) r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + (Re \, h + 1) v_\theta = 0 \quad \text{в } Q, \quad (7)$$

$$v_\theta = \omega \quad \text{при } r = 1, \quad (8)$$

$$v_\theta = r_\xi \omega \quad \text{при } r = r_\xi. \quad (9)$$

Будем рассматривать задачу (7)–(9) при малых по сравнению с единицей значениях ε . Применим метод разложения по степеням малого параметра [52, 53]. Предположим, что

$$v_\theta \sim v_0 + \varepsilon v_1 \quad \text{при } \varepsilon \rightarrow 0. \quad (10)$$

Используя (7)–(10), в ε^N -приближении ($N = 0, 1$) получим

$$Re \, r^2 \frac{\partial v_N}{\partial \tau} - r^2 \frac{\partial^2 v_N}{\partial r^2} - r \frac{\partial v_N}{\partial r} + v_N = -N Re \, \hat{r} \frac{d\tilde{r}}{d\tau} \left(r \frac{\partial v_0}{\partial r} + v_0 \right) \quad \text{в } \bar{Q}, \quad (11)$$

$$v_N = (1 - N) \tilde{\omega} + N \hat{\omega} (\hat{r} - 1) w \quad \text{при } r = 1, \quad (12)$$

$$v_N = (1 - N) \hat{r} \tilde{\omega} + N [\hat{r} \hat{\omega} (\hat{r} - 1) w + \tilde{r} (\tilde{\omega} - \frac{\partial v_0}{\partial r})] \quad \text{при } r = \hat{r}. \quad (13)$$

Здесь $\bar{Q}$ — область $R_\eta < R < \hat{R}$ ($0 \leq \theta < 2\pi$, $-\infty < Z < \infty$); $\tilde{r} = \hat{r} \sin 2\pi\tau$; $\hat{\omega} = \hat{\Omega}T$; $\tilde{\omega} = \hat{\omega} \sin(2\pi\tau + \varphi)$.

Пусть $N = 0$. Задача (11)–(13) имеет решение

$$v_0 = \hat{\omega} \operatorname{Imag} \left\{ \frac{e^{i\varphi}}{G} [A_K I_1(qr) - A_I K_1(qr)] e^{2\pi i \tau} \right\}, \quad (14)$$

где $q = (1 + i)\sqrt{\pi Re}$; I_1, K_1 — модифицированные функции Бесселя;

$$A_I = I_1(q\hat{r}) - I_1(q)\hat{r}; \quad A_K = K_1(q\hat{r}) - K_1(q)\hat{r};$$

$$G = I_1(q)K_1(q\hat{r}) - K_1(q)I_1(q\hat{r}).$$

Пусть $N = 1$. Произведем усреднение (11)–(13) по безразмерному времени τ . В результате этого получим

$$r^2 \frac{d^2 \bar{v}}{dr^2} + r \frac{d\bar{v}}{dr} - \bar{v} = Re \, \hat{r} \left\langle \frac{d\tilde{r}}{d\tau} \left(r \frac{\partial v_0}{\partial r} + v_0 \right) \right\rangle \quad \text{в } \bar{Q}, \quad (15)$$

$$\bar{v} = \hat{\omega} (\hat{r} - 1) w \quad \text{при } r = 1, \quad (16)$$

$$\bar{v} = \hat{r} \hat{\omega} (\hat{r} - 1) w + \left\langle \tilde{r} \left(\tilde{\omega} - \frac{\partial v_0}{\partial r} \right) \right\rangle \quad \text{при } r = \hat{r}. \quad (17)$$

Здесь $\langle \dots \rangle = \int_{\tau}^{\tau+1} \dots d\tau'$; $\bar{v} = \langle v_1 \rangle$. Задача (11)–(13) имеет решение

$$v_1 = \bar{v} + \text{Real}(v' e^{4\pi i \tau}) \quad (18)$$

(v' – функция r).

Из (14), (15), (17) следует

$$r^2 \frac{d^2 \bar{v}}{dr^2} + r \frac{d\bar{v}}{dr} - \bar{v} = \pi Re \hat{r}^2 \hat{\omega} r \text{Imag} \left\{ \frac{qe^{i\varphi}}{G} [A_K I_0(qr) + A_I K_0(qr)] \right\} \quad \text{в } \bar{Q}, \quad (19)$$

$$\bar{v} = \hat{r} \hat{\omega} [(\hat{r} - 1)w + \cos \varphi + \text{Real}(e^{i\varphi} \frac{q\hat{r}^2 H - 1}{2\hat{r}G})] \quad \text{при } r = \hat{r}, \quad (20)$$

где I_0, K_0 – модифицированные функции Бесселя;

$$H = I_1(q)K_0(q\hat{r}) + K_1(q)I_0(q\hat{r}).$$

Используя (16), (19), (20), найдем

$$\bar{v} = \alpha r + \frac{\beta}{r} + \frac{\pi}{2} Re \hat{r}^2 \hat{\omega} \text{Imag} \left\{ \frac{e^{i\varphi}}{G} [A_K (qr S_I - I_1(qr)) + A_I (qr S_K + K_1(qr))] \right\}. \quad (21)$$

Здесь

$$S_I = \int_1^r \frac{I_0(qr')}{r'} dr'; \quad S_K = \int_1^r \frac{K_0(qr')}{r'} dr';$$

$$\alpha = -\beta + \frac{\pi}{2} Re \hat{r}^2 \hat{\omega} \sin \varphi + \hat{\omega}(\hat{r} - 1)w;$$

$$\beta = \frac{\hat{r} \hat{\omega}}{1 - \hat{r}^2} \left\{ \hat{r} \cos \varphi + \frac{1}{2} \left[\text{Real} \left(e^{i\varphi} \frac{q\hat{r}^2 H - 1}{G} \right) - \pi Re \hat{r}^3 \text{Imag} \left(qe^{i\varphi} \frac{A_K \hat{S}_I + A_I \hat{S}_K}{G} \right) \right] \right\}$$

$$(\hat{S}_I = S_I|_{r=\hat{r}}; \hat{S}_K = S_K|_{r=\hat{r}}).$$

Формулами

$$v_\theta = v_0 + \varepsilon v_1 \quad (22)$$

и (5), (6), (14), (18), (21) определяется приближенное решение задачи (1)–(4). Согласно данному решению имеет место эффект, состоящий в том, что (и при $w \neq 0$, и при $w = 0$) жидкость на фоне колебаний совершает стационарное вращательное движение.

Обратимся к вопросу о среднем по времени движении жидкости при малых по сравнению с единицей значениях $\hat{r} - 1$ (значения $\hat{r} - 1$ велики по сравнению с значениями ε). Используя (5), (14), (18), (21), (22), получим

$$\langle \mathbf{v} \rangle \sim \varepsilon \hat{\omega} [w + k Re(\sin \varphi) \chi] (\hat{r} - 1) \mathbf{e}_\theta \quad \text{при } \hat{r} - 1 \rightarrow 0. \quad (23)$$

Здесь $k = (5/2)\pi$; $\chi = (r - 1)/(\hat{r} - 1)$.

Отметим, что в рассматриваемом приближении безразмерная скорость $\langle \mathbf{v} \rangle \cdot \mathbf{e}_\theta$ совпадает со средней по времени безразмерной угловой скоростью $\langle v_\theta/r \rangle$ вращения жидкости вокруг оси Z .

Согласно (23) на фоне колебаний имеет место следующее.

1. Если $w \neq 0$, то при $\chi \sin \varphi = 0$ (то есть при $r = 1$, $-1 \leq \sin \varphi \leq 1$ и при $\sin \varphi = 0$, $1 < r \leq \hat{r}$) средняя (по времени) угловая скорость вращения жидкости равна (отличной от нуля) средней угловой скорости вращения тел (стенок) η, ξ .

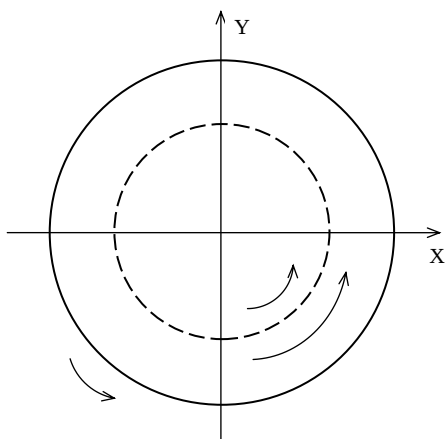


Рис. 2. Жидкость обгоняет стенки

Fig. 2. The liquid moves faster than walls

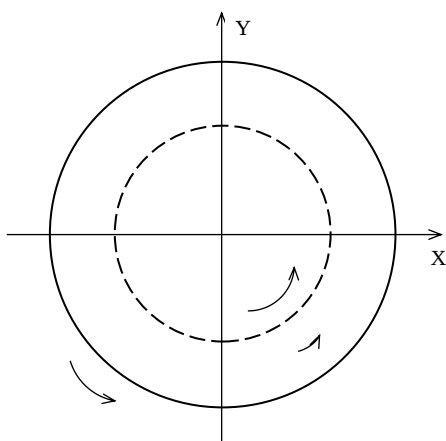


Рис. 3. Жидкость отстает от стенок

Fig. 3. The liquid moves slower than walls

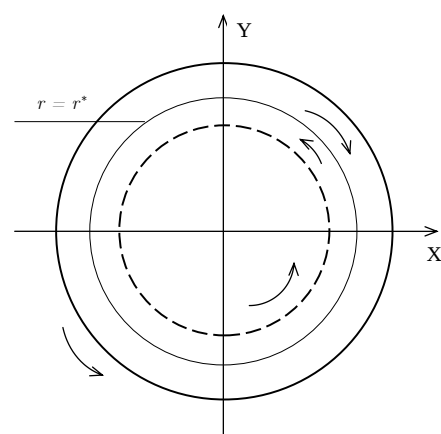


Рис. 4. Жидкость совершает парадоксальное вращательное движение

Fig. 4. The liquid performs the paradoxical rotational motion

2. Если $w \sin \varphi > 0$, то при $1 \leq r \leq \hat{r}$ жидкость вращается в направлении, совпадающем с направлением среднего вращения тел η, ξ , при том что для $1 < r \leq \hat{r}$ жидкость обгоняет стенки (для $w > 0$ см. рис. 2).

3. Если $w \sin \varphi < 0$ и $|w| > kRe|\sin \varphi|$, то при $1 \leq r \leq \hat{r}$ жидкость вращается в направлении, совпадающем с направлением среднего вращения тел η, ξ , при том что для $1 < r \leq \hat{r}$ жидкость отстает от стенок (для $w > 0$ см. рис. 3).

4. Если $w \sin \varphi < 0$ и $|w| < kRe|\sin \varphi|$, то при $r = r^* = 1 - w(\hat{r} - 1)/(kRe \sin \varphi)$ угловая скорость вращения жидкости равна нулю; при $1 \leq r < r^*$ жидкость вращается в направлении, совпадающем с направлением среднего вращения тел η, ξ , при том что для $1 < r < r^*$ жидкость отстает от тел η, ξ ; при $r^* < r \leq \hat{r}$ жидкость вращается в направлении, противоположном направлению среднего вращения тел η, ξ (жидкость совершает парадоксальное вращательное движение; для $w > 0$ см. рис. 4). В частности, «толщина» $r^* - 1$ области, в которой жидкость совершает вращательное движение в «правильном» направлении, может быть мала по сравнению с «толщиной» $\hat{r} - r^*$ области, в которой жидкость совершает вращательное движение в «неправильном» направлении; необходимым и достаточным условием наличия такой картины течения жидкости между твердыми телами является условие малости по сравнению с единицей отношения $|w|/(kRe|\sin \varphi|)$.

5. Если $w \sin \varphi < 0$ и $|w| = kRe|\sin \varphi|$, то $r^* = \hat{r}$, и угловая скорость вращения жидкости равна нулю при $r = \hat{r}$.

6. Если $w = 0$, $\sin \varphi \neq 0$, то при $1 < r \leq \hat{r}$ направление вращения жидкости определяется знаком $\sin \varphi$ (при $\sin \varphi > 0$ жидкость вращается в направлении, совпадающем с направлением вектора e_θ , при $\sin \varphi < 0$ жидкость вращается в направлении, противоположном направлению вектора e_θ); при $r = 1$ угловая скорость вращения жидкости равна нулю.

Отметим, что согласно (23) все типы вращательного движения жидкости, описанные в пунктах 1–6, при выполнении сформулированных выше условий имеют место для любого значения $Re > 0$ (а также для любого значения $k > 0$).

Остановимся на вопросе о переносе массы жидкости, обусловленном ее средним по времени движением. Пусть Ψ — замкнутая область $R_\eta \leq R \leq \hat{R}$, $0 \leq \theta < 2\pi$, $Z^* \leq Z \leq Z^* + L$ (Z^* , $L > 0$ — постоянные); D — сечение области Ψ полуплоскостью $0 \leq R < \infty$, $\theta = 0$, $-\infty < Z < \infty$ (прямоугольник $R_\eta \leq R \leq \hat{R}$, $\theta = 0$, $Z^* \leq Z \leq Z^* + L$). Найдем массу жидкости

$$\delta M = \rho R_\eta^2 L \frac{\delta t}{T} \int_1^{\hat{r}} \langle \mathbf{v} \rangle \cdot \mathbf{e}_\theta dr, \quad (24)$$

которая за промежуток времени δt протекает через сечение D в направлении, совпадающем с направлением вектора $\mathbf{e}_\theta$, в условиях, сформулированных в пунктах 1–4. Без умаления общности может быть принято, что $w > 0$. Согласно (23), (24)

– если $\sin \varphi = 0$ (средняя по времени угловая скорость вращения жидкости равна средней угловой скорости вращения стенок), то имеет место соотношение

$$\delta M = \varepsilon \rho R_\eta^2 L \frac{\delta t}{T} \hat{\omega} w (\hat{r} - 1)^2;$$

– если $\sin \varphi > 0$ (жидкость обгоняет стенки), то имеет место соотношение

$$\delta M = \varepsilon \rho R_\eta^2 L \frac{\delta t}{T} \hat{\omega} w \left(1 + \frac{kRe \sin \varphi}{2w}\right) (\hat{r} - 1)^2;$$

– если $\sin \varphi < 0$, $w > kRe |\sin \varphi|$ (жидкость отстает от стенок), то имеет место соотношение

$$\delta M = \varepsilon \rho R_\eta^2 L \frac{\delta t}{T} \hat{\omega} w \left(1 - \frac{kRe |\sin \varphi|}{2w}\right) (\hat{r} - 1)^2, \quad (25)$$

– если

$$\sin \varphi < 0, \quad w < kRe |\sin \varphi| \quad (26)$$

(жидкость совершает парадоксальное вращательное движение), то имеет место соотношение (25). Из (25), (26) следует, что

$$\delta M > 0 \quad \text{для} \quad \frac{1}{2} kRe |\sin \varphi| < w < kRe |\sin \varphi|, \quad (27)$$

$$\delta M = 0 \quad \text{для} \quad w = \frac{1}{2} kRe |\sin \varphi|, \quad (28)$$

$$\delta M < 0 \quad \text{для} \quad w < \frac{1}{2} kRe |\sin \varphi|. \quad (29)$$

Формулы (27)–(29) свидетельствуют о том, что при парадоксальном вращательном движении жидкости, в частности, возможно осуществление качественно различных процессов переноса массы жидкости.

Заключение

В настоящей работе представлены новые результаты в изучении динамики вязкой жидкости при периодических по времени воздействиях на жидкость. Дана постановка и получено решение задачи (1)–(4) о движении вязкой жидкости, граничащей с твердыми телами, оказывающими на жидкость воздействия, характеризующиеся наличием (при $w \neq 0$) или отсутствием (при $w = 0$) выделенного направления в пространстве. Выявлены новые особенности (эффекты) среднего движения жидкости. Обнаружен эффект, состоящий в том, что в рассмотренных гидромеханических условиях жидкость (и при наличии, и в отсутствие выделенного направления в пространстве)

на фоне колебаний совершает стационарное вращательное движение (см. (21)). Установлено, что жидкость (на фоне колебаний) может совершать вращательное движение с угловой скоростью, совпадающей по направлению со средней угловой скоростью вращения твердых тел, но при этом угловая скорость жидкости может как совпадать, так и не совпадать со средней угловой скоростью вращения твердых тел по абсолютной величине — жидкость может совершать вращательное движение вместе со стенками «как одно целое», может обгонять стенки или отставать от них (см. (23)). Обнаружен эффект, состоящий в том, что часть жидкости (на фоне колебаний) совершает вращательное движение в направлении, противоположном направлению среднего вращения твердых тел (см. (23)). Для представленных гидромеханических условий подтверждено, что периодические по времени воздействия, не имеющие выделенного направления в пространстве, могут порождать качественные изменения в движении жидкости, по достигаемому влиянию на динамику гидромеханических систем способны эффективно конкурировать со стационарными воздействиями на системы (см. [2, 47, 49]). Гидромеханическая система, испытывающая те из оказываемых на нее периодических по времени воздействий, которые не имеют выделенного направления в пространстве, производит отклики (реакции на воздействия), которые характеризуются наличием выделенного направления в пространстве и выражаются в том, что свободные части системы (части системы, движение которых не задано) — например, жидкие слои — на фоне колебаний стремятся совершать «свое» среднее движение, усиливая или ослабляя результативность оказываемых на систему воздействий, имеющих выделенное направление в пространстве, или же совершают «свое» среднее движение — даже вопреки оказываемым на систему воздействиям, имеющим выделенное направление в пространстве. Причиной обнаруженных особенностей среднего движения жидкости является согласованность (друг с другом) испытываемых жидкостью воздействий, что находится в непосредственной связи с принципом среднего движения (см. [50], а также [13, 41, 46, 54]).

Полученные результаты могут использоваться в дальнейшем изучении нетривиальной динамики гидромеханических систем при периодических воздействиях, в частности, при подготовке и проведении направленных экспериментальных исследований, а также при разработке перспективных методов управления гидромеханическими системами, при создании гидромеханических систем, обладающих предписанными свойствами, например, систем, заданным образом реагирующих на периодические по времени воздействия.

Список литературы

1. Челомей В. Н. Парадоксы в механике, вызываемые вибрациями // Доклады АН СССР. 1983. Т. 270, № 1. С. 62–67.
2. Сенницкий В. Л. О движении кругового цилиндра в вибрирующей жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 1985. Т. 25, № 5. С. 19–23.
3. Сенницкий В. Л. Движение шара в жидкости, вызываемое колебаниями другого шара // Прикладная механика и техническая физика. 1986. Т. 27, № 4. С. 31–36.
4. Луговцов Б. А., Сенницкий В. Л. О движении тела в вибрирующей жидкости // Доклады АН СССР. 1986. Т. 289, № 2. С. 314–317.
5. Любимов Д. В., Любимова Т. П., Черепанов А. А. О движении твердого тела в вибрирующей жидкости // В кн.: Конвективные течения: Сб. науч. тр. Пермь: Издательство Пермского педагогического института, 1987. С. 61–71.
6. Сенницкий В. Л. О движении газового пузыря в вязкой вибрирующей жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 1988. Т. 29, № 6. С. 107–113.
7. Челомей В. Н. Избранные труды. М.: Машиностроение, 1989. 336 с.
8. Сенницкий В. Л. Преимущественно однонаправленное движение газового пузыря в вибрирующей жидкости // Доклады АН СССР. 1991. Т. 319, № 1. С. 117–119.

9. Сенницкий В. Л. Преимущественно однонаправленное движение сжимаемого твердого тела в вибрирующей жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 1993. Т. 34, № 1. С. 100–101.
10. Sennitskii V. L. On motion of inclusions in uniformly and non-uniformly vibrating liquid // Proceedings of the International workshop on G-jitter. Potsdam (USA): Clarkson University, 1993. P. 178–186.
11. Lyubimov D. V. New approach in the vibrational convection theory // Proc. 14 IMACs Congress on Computational and Applied Mathematics. Atlanta, Georgia, USA: Georgia Institute of Technology, 1994. P. 59–68.
12. Lyubimov D. V. Thermovibrational flows in nonuniform systems // Microgravity Quarterly. 1994. Vol. 4, no. 1. P. 221–225.
13. Сенницкий В. Л. Движение включений в колеблющейся жидкости // Сибирский физический журнал. 1995. № 4. С. 18–26.
14. Kozlov V. G. Solid body dynamics in cavity with liquid under high-frequency rotational vibration // Europhysics Letters. 1996. Vol. 36, no. 9. P. 651–656. DOI: 10.1209/epl/i1996-00282-0.
15. Lyubimov D. V., Lyubimova T. P., Meradji S., Roux B. Vibrational control of crystal growth from liquid phase // J. Crystal Growth. 1997. Vol. 180. P. 648–659. DOI: 10.1016/S0022-0248(97)00294-7.
16. Иванова А. А., Козлов В. Г., Эвекс П. Динамика цилиндрического тела в заполненном жидкостью секторе цилиндрического слоя при вращательных вибрациях // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1998. № 4. С. 29–39.
17. Любимов Д. В., Перминов А. В., Черепанов А. А. Генерация осреднённых течений в вибрационном поле вблизи поверхности раздела сред // В кн.: Вибрационные эффекты в гидродинамике. Пермь: изд. Перм. гос. университета, 1998. С. 204–221.
18. Сенницкий В. Л. Движение шара в жидкости в присутствии стенки при колебательных воздействиях // Прикладная механика и техническая физика. 1999. Т. 40, № 4. С. 125–132.
19. Lavrenteva O. M. On the motion of particles in non-uniformly vibrating liquid // Europ. J. Appl. Math. 1999. Vol. 10, no. 3. P. 251–263. DOI: 10.1017/S0956792599003745.
20. Сенницкий В. Л. Движение пульсирующего твердого тела в вязкой колеблющейся жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, № 1. С. 82–86.
21. Любимов Д. В., Любимова Т. П., Черепанов А. А. Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях. М.: Физматлит, 2003. 216 с.
22. Пятигорская О. С., Сенницкий В. Л. Движение шара в жидкости, вызываемое колебаниями другого шара // Прикладная механика и техническая физика. 2004. Т. 45, № 4. С. 102–106.
23. Иванова А. А., Козлов В. Г., Кузаев А. Ф. Вибрационная подъемная сила, действующая на тело в жидкости вблизи твердой поверхности // Доклады Академии Наук. 2005. Т. 402, № 4. С. 488–491.
24. Lyubimov D., Lyubimova T., Vorobev A., Mojtabi A., Zappoli B. Thermal vibrational convection in near-critical fluids. Part I: Non-uniform heating // Journal of Fluid Mechanics. 2006. Vol. 564. P. 159–183. DOI: 10.1017/S0022112006001418.
25. Hassan S., Lyubimova T. P., Lyubimov D. V., Kawaji M. Motion of a sphere suspended in a vibrating liquid-filled container // J. Appl. Mech. 2006. Vol. 73, no. 1. P. 72–78. DOI: 10.1115/1.1992516.
26. Lyubimov D. V., Lyubimova T. P., Shklyaev S. V. Behavior of a drop on an oscillating solid plate // Phys. Fluids. 2006. Vol. 18. P. 012101. DOI: 10.1063/1.2137358.
27. Shevtsova V., Melnikov D., Legros J. C., Yan Y., Saghir Z., Lyubimova T., Sedelnikov G., Roux B. Influence of vibrations on thermodiffusion in binary mixture: A benchmark of numerical solutions // Phys. Fluids. 2007. Vol. 19, no. 1. P. 017111. DOI: 10.1063/1.2409622.

28. Сенницкий В. Л. О движении включения в однородно и неоднородно колеблющейся жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2007. Т. 48, № 1. С. 79–85.
29. Иванова А. А., Козлов В. Г., Кузаев А. Ф. Вибрационное гидродинамическое взаимодействие сферы с границами полости // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2008. № 2. С. 31–40.
30. Сенницкий В. Л. О колебательном движении неоднородного твердого шара в вибрирующей жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50, № 6. С. 27–35.
31. Иванова А. А., Козлов В. Г., Щипицын В. Д. Легкий цилиндр в полости с жидкостью при горизонтальных вибрациях // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 6. С. 63–73.
32. Kozlov V. G., Ivanova A. A., Schipitsyn V. D., Stambouli M. Lift Force on the cylinder in viscous liquid under vibration. *Acta Astronaut.* 2012. Vol. 79. P. 44–51. DOI: 10.1016/j.actaastro.2012.04.013.
33. Пятигорская О. С., Сенницкий В. Л. Пример движения цилиндрического твердого тела в вязкой жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54, № 2. С. 81–87.
34. Пятигорская О. С., Сенницкий В. Л. О движении твердых частиц в колеблющейся жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54, № 3. С. 74–78.
35. Lyubimov D. V., Baydin A. Y., Lyubimova T. P. Particle dynamics in a fluid under high frequency vibrations of linear polarization // *Microgravity Sci. Technology.* 2013. Vol. 25. P. 121–126. DOI: 10.1007/s12217-012-9336-3.
36. Иванова А. А., Козлов В. Г., Щипицын В. Д. Подъемная сила, действующая на цилиндрическое тело в жидкости вблизи границы полости, совершающей поступательные колебания // Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т. 55, № 5. С. 55–63.
37. Алабужев А. А. Поведение цилиндрического пузырька под действием вибраций // *Вычисл. механика сплошных сред.* 2014. Т. 7, № 2. С. 151–161. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.16.
38. Сенницкий В. Л. О заданной ориентации твердого включения в вязкой жидкости // *Сибирский журнал индустриальной математики.* 2015. Т. 18, № 1. С. 123–128. DOI: 10.17377/SIBJIM.2015.18.110.
39. Vlasova O. A., Kozlov V. G. The repulsion of flat body from the wall of vibrating container filled with liquid // *Microgravity sci. Technology.* 2015. Vol. 27. P. 297–303. DOI: 10.1007/s12217-015-9460-y.
40. Kozlov N. V., Vlasova O. A. Behaviour of a heavy cylinder in a horizontal cylindrical liquidfilled cavity at modulated rotation // *Fluid dyn. res.* 2016. Vol. 48, no. 5. 055503. DOI:10.1088/0169-5983/48/5/055503.
41. Сенницкий В. Л. Парадоксальное движение жидкости // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2017. № 8–1. С. 28–33. DOI: 10.17513/mjpf.11753.
42. Сенницкий В. Л. Преимущественно однонаправленное вращение твердого тела и вязкой жидкости // *Сибирский журнал индустриальной математики.* 2017. Т. 20, № 2. С. 93–97.
43. Власова О. А., Козлов В. Г., Козлов Н. В. Динамика тяжелого тела, находящегося во вращающейся кювете с жидкостью, при модуляции скорости вращения // *Прикладная механика и техническая физика.* 2018. Т. 59, № 2. С. 39–49.
44. Коновалов В. В., Любимова Т. П. Численное исследование влияния вибраций на взаимодействие в ансамбле газовых пузырьков и твердых частиц в жидкости // *Вычислительная механика сплошных сред.* 2019. Т. 12, № 1. С. 48–56. DOI: 10.7242/1999-6691/2019.12.1.5.
45. Щипицын В. Д. Колебания неосесимметричного цилиндра в заполненной жидкостью полости, совершающей вращательные осцилляции // *Письма в Журнал технической физики.* 2020. Т. 46, вып. 15. С. 43–46. DOI: 10.21883/PJTF.2020.15.49749.18349.
46. Сенницкий В. Л. Преимущественно однонаправленное течение вязкой жидкости // *Сибирский журнал индустриальной математики.* 2021. Т. 24, № 2. С. 126–133. DOI: 10.33048/SIBJIM.2021.24.210.

47. Сенницкий В. Л. О течении вязкой жидкости в поле силы тяжести // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 3. С. 373–377.
48. Коновалов В. В., Любимова Т. П. Влияние акустических вибраций на взаимодействие газового пузыря и твердой частицы в жидкости // Пермские гидродинамические научные чтения: Сборник статей по материалам VIII Всероссийской конференции, посвященной памяти профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова. Отв. редактор Т. П. Любимова. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. С. 254–261.
49. Сенницкий В. Л. Об особенностях течения жидкости в поле силы тяжести // Сибирские электронные математические известия. 2022. Т. 19, № 1. С. 241–247. DOI: 10.33048/semi.2022.19.018.
50. Сенницкий В. Л. Особенности динамики вязкой жидкости со свободной границей при периодических воздействиях // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2024. Т. 32, № 2. С. 197–208. DOI: 10.18500/0869-6632-003091.
51. Капица П. Л. Маятник с вибрирующим подвесом // Успехи физических наук. 1951. Т. 44, вып. 1. С. 7–20. .
52. Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н. Введение в нелинейную механику. М.-Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2004. 352 с.
53. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: ГИФ-МЛ, 1958. 408 с.
54. Сенницкий В. Л. О силовом взаимодействии шара и вязкой жидкости в присутствии стенки // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41, № 1. С. 57–62.

References

1. Chelomei VN. Paradoxes in mechanics caused by vibrations. Doklady Akad. Nauk SSSR. 1983;270(1):62–67 (in Russian).
2. Sennitskii VL. Motion of a circular cylinder in a vibrating liquid. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1985;(5):19–23 (in Russian).
3. Sennitskii VL. The motion of a sphere in a liquid caused by vibrations of another sphere. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1986;(4):31–36 (in Russian).
4. Lugovtsov BA, Sennitskii VL. Motion of a Body in a vibrating Liquid. Doklady Acad. Nauk SSSR. 1986;289(2):314–317 (in Russian).
5. Lyubimov DV, Lyubimova TP, Cherepanov AA. On the motion of a solid body in a vibrating fluid. In: Convective Flows. Perm: Perm. Pedagogical Institute Publishing; 1987. P. 61–71 (in Russian).
6. Sennitskii VL. On the motion of a gas bubble in a viscous vibrating liquid. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1988;(6):107–113 (in Russian).
7. Chelomei VN. Selected works. M.: Mashinostroenie; 1989. 336 p. (in Russian).
8. Sennitskii VL. Predominantly unidirectional motion of a gas bubble in a vibrating liquid. Doklady Akad. Nauk SSSR. 1991;319(1):117–119 (in Russian).
9. Sennitskii VL. Predominantly unidirectional motion of a compressible solid body in a vibrating liquid. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1993;(1):100–101 (in Russian).
10. Sennitskii VL. On motion of inclusions in uniformly and non-uniformly vibrating liquid. Proceedings of the International workshop on G-jitter. Potsdam (USA): Clarkson University; 1993. P. 178–186.
11. Lyubimov DV. New approach in the vibrational convection theory. Proc. 14 IMACs Congress on Computational and Applied Mathematics. Atlanta, Georgia, USA: Georgia Institute of Technology; 1994. P. 59–68.
12. Lyubimov DV. Thermovibrational flows in nonuniform systems. Microgravity Quarterly. 1994;4(1): 221–225.

13. Sennitskii VL. The motion of inclusions in an oscillating liquid. *Siberian Physical Journal*. 1995;(4):18–26 (in Russian).
14. Kozlov VG. Solid body dynamics in cavity with liquid under high-frequency rotational vibration. *Europhysics Letters*. 1996;36(9):651–656. DOI: 10.1209/epl/i1996-00282-0.
15. Lyubimov DV, Lyubimova TP, Meradji S, Roux B. Vibrational control of crystal growth from liquid phase. *J. Crystal Growth*. 1997;180:648–659. DOI: 10.1016/S0022-0248(97)00294-7.
16. Ivanova AA, Kozlov VG, Evesque P. Dynamics of a cylindrical body in a liquid-filled sector of a cylindrical layer under rotational vibration. *Fluid Dynamics*. 1998;33:488–496. DOI: 10.1007/BF02698213.
17. Lyubimov DV, Perminov AV, Cherepanov AA. Generation of averaged flows in a vibrational field close to the interface of mediums. In: *Vibrational Effects in Hydrodynamics*. Perm: Perm University Publishing; 1998. P. 204–221 (in Russian).
18. Sennitskii VL. The motion of a ball in a liquid in the presence of a wall under oscillational influences. *Applied Mechanics and Technical Physics*. 1999;40(4):125–132 (in Russian).
19. Lavrenteva OM. On the motion of particles in non-uniformly vibrating liquid. *Europ. J. Appl. Math.* 1999;10(3):251–263. DOI: 10.1017/S0956792599003745.
20. Sennitskii VL. The motion of a pulsating rigid body in an oscillating viscous liquid. *Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001;42(1):72–76 (in Russian).
21. Lyubimov DV, Lyubimova TP, Cherepanov AA. *Dynamics of Interfaces in Vibrational Fields*. M.: Fizmatlit; 2003. 216 p. (in Russian).
22. Pyatigorskaya OS, Sennitskii VL. Motion of a sphere in a liquid caused by vibrations of another sphere. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2004;45:542–545. DOI: 10.1023/B:JAMT.0000030331.35411.2e.
23. Ivanova AA, Kozlov VG, Kuzaev AF. Vibrational lift force acting on a body in a fluid near a solid surface. *Doklady Physics*. 2005;50(6):311–314. DOI: 10.1134/1.1958123.
24. Lyubimov D, Lyubimova T, Vorobev A, Mojtabi A, Zappoli B. Thermal vibrational convection in near-critical fluids. Part I: Non-uniform heating. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006;564:159–183. DOI: 10.1017/S0022112006001418.
25. Hassan S, Lyubimova TP, Lyubimov DV, Kawaji M. Motion of a sphere suspended in a vibrating liquid-filled container. *Journal of Applied Mechanics*. 2006;73(1):72–78. DOI: 10.1115/1.1992516.
26. Lyubimov DV, Lyubimova TP, Shklyaev SV. Behavior of a drop on an oscillating solid plate. *Physics of Fluids*. 2006;18:012101. DOI: 10.1063/1.2137358.
27. Shevtsova V, Melnikov D, Legros JC, Yan Y, Saghir Z, Lyubimova T, Sedelnikov G, Roux B. Influence of vibrations on thermodiffusion in binary mixture: A benchmark of numerical solutions. *Physics of Fluids*. 2007;19(1):017111. DOI: 10.1063/1.2409622.
28. Sennitskii VL. Motion of an inclusion in uniformly and nonuniformly vibrating liquids. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2007;48(1):65–70. DOI: 10.1007/s10808-007-0009-8.
29. Ivanova AA, Kozlov VG, Kuzaev AF. Vibrational hydrodynamic interaction between a sphere and the boundaries of a cavity. *Fluid Dynamics*. 2008;43:194–202. DOI: 10.1134/S001546280802004X.
30. Sennitskii VL. Pulsating motion of an inhomogeneous solid sphere in a vibrating liquid. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2009;50(6):936–943. DOI: 10.1007/s10808-009-0127-6.
31. Ivanova AA, Kozlov VG, Shchipitsyn VD. A light cylinder under horizontal vibration in a cavity filled with a fluid. *Fluid Dynamics*. 2010;45:889–897. DOI: 10.1134/S0015462810060062.
32. Kozlov VG, Ivanova AA, Schipitsyn VD, Stambouli M. Lift Force on the cylinder in viscous liquid under vibration. *Acta Astronaut.* 2012;79:44–51. DOI: 10.1016/j.actaastro.2012.04.013.
33. Pyatigorskaya OS, Sennitskii VL. Example of motion of a cylindrical solid in a viscous liquid.

- Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2013;54:237–242. DOI: 10.1134/S0021894413020089.
34. Pyatigorskaya OS, Sennitskii VL. Motion of solid particles in an oscillating liquid. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2013;54:404–407. DOI: 10.1134/S0021894413030085.
 35. Lyubimov DV, Baydin AY, Lyubimova TP. Particle dynamics in a fluid under high frequency vibrations of linear polarization. Microgravity Science Technology. 2013;25:121–126. DOI: 10.1007/s12217-012-9336-3.
 36. Ivanova AA, Kozlov VG, Shchipitsyn VD. Lift force acting on a cylindrical body in a fluid near the boundary of a cavity performing translational vibrations. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2014;55:773–780. DOI: 10.1134/S002189441405006X.
 37. Alabujev AA. Behavior of a cylindrical bubble under vibrations. Computational Continuum Mechanics. 2014;7(2):151–161. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.16.
 38. Sennitskii VL. On the prescribed orientation of a solid inclusion in a viscous liquid. Siberian Journal of Industrial Mathematics. 2015;18(1):123–128. DOI: 10.17377/SIBJIM.2015.18.110 (in Russian).
 39. Vlasova OA, Kozlov VG. The repulsion of flat body from the wall of vibrating container filled with liquid. Microgravity Sci. Technology. 2015;27:297–303. DOI: 10.1007/s12217-015-9460-y.
 40. Kozlov NV, Vlasova OA. Behaviour of a heavy cylinder in a horizontal cylindrical liquid-filled cavity at modulated rotation. Fluid Dyn. Res. 2016;48(5):055503. DOI: 10.1088/0169-5983/48/5/055503.
 41. Sennitskii VL. Paradoxical motion of a liquid. International Journal of Applied and Fundamental Research. 2017;(8–1):28–33 (in Russian). DOI: 10.17513/mjpf.11753.
 42. Sennitskii VL. The predominantly unidirectional rotation of a solid body and a viscous liquid. Siberian Journal of Industrial Mathematics. 2017;20(2):93–97 (in Russian).
 43. Vlasova OA, Kozlov VG, Kozlov NV. Lift force acting on a heavy solid in a rotating liquid-filled cavity with a time-varying rotation rate. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2018;59:219–228. DOI: 10.1134/S0021894418020050.
 44. Konovalov VV, Lyubimova TP. Numerical study of the influence of vibrations on the interaction in an ensemble of gas bubbles and solid particles in a liquid. Computational Continuum Mechanics. 2019;12(1):48–56 (in Russian). DOI: 10.7242/1999-6691/2019.12.1.5.
 45. Shchipitsyn VD. Vibrations of a nonaxisymmetric cylinder in a cavity filled with liquid and performing rotational oscillations. Tech. Phys. Lett. 2020;46:771–774. DOI: 10.1134/S1063785020080143.
 46. Sennitskii VL. The predominantly unidirectional flow of a viscous liquid. Siberian Journal of Industrial Mathematics. 2021;24(2):126–133 (in Russian). DOI: 10.33048/SIBJIM.2021.24.210.
 47. Sennitskii VL. On the flow of a viscous liquid in a gravity field. Thermophysics and Aeromechanics. 2021;28(3):347–351. DOI: 10.1134/S0869864321030057.
 48. Konovalov VV, Lyubimova TP. Influence of acoustic vibrations on the interaction of a gas bubble and a solid particle in a liquid. In: TP Lyubimova (ed.). Perm Hydrodynamical Scientific Readings. Digest of articles by the materials of VIII all-Russian conference dedicated for the memory of professors G. Z. Gershuny, E. M. Juhovitskii, D. V. Lyubimov. Perm: Perm University Publishing; 2022. P. 254–261.
 49. Sennitskii VL. On peculiarities of a liquid flow in a gravity field. Siberian Electronic Mathematical Reports. 2022;19(1):241–247 (in Russian). DOI: 10.33048/semi.2022.19.018.
 50. Sennitskii VL. Peculiarities of the dynamics of a viscous liquid with a free boundary under periodic influences. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2024;32(2):197–208. DOI: 10.18500/0869-6632-003091.

51. Kapitsa PL. Pendulum with a vibrating suspension. Sov. Phys. Usp. 1951;44(1):7–20 (in Russian).
52. Krilov NM, Bogolyubov NN. Introduction in Non-Linear Mechanics. Moscow-Ijevsk: NITs Reguliarnaya i haoticheskaya dinamika; 2004. 352 p. (in Russian).
53. Bogolyubov NN, Mitropolskii YuA. Asimptotic Methods in the Theory of Non-Linear Oscillations. M.: GIF-ML; 1958. 408 p. (in Russian).
54. Sennitskii VL. Force interaction of a sphere and a viscous liquid in the presence of a wall. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2000;41:50–54. DOI: 10.1007/BF02465236.



Сенницкий Владимир Леонидович — родился в 1950 году. Окончил физический факультет (ФФ) Новосибирского государственного университета (НГУ, 1972) и аспирантуру ФФ НГУ (1975). С 1975 года работает в Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН, в настоящее время в должности старшего научного сотрудника. Доктор физико-математических наук (1995). Имеет ученые звания старшего научного сотрудника (механика жидкости, газа и плазмы, 1992) и доцента (общая физика, 1994). Награжден дипломом Министерства образования и науки РФ «За научное руководство студенческой работой, отмеченной медалью «За лучшую научную студенческую работу» по итогам открытого конкурса на лучшую работу студентов по естественным, техническим и гуманитарным наукам в вузах Российской Федерации» (2009). Область научных интересов: самодвижение тел в жидкости; нетривиальная динамика гидромеханических систем.

Россия, 630090 Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 15
 Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН
 E-mail: sennitskii@yandex.ru
 ORCID: 0009-0006-5131-2858
 AuthorID (eLibrary.Ru): 2024