

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33, № 4
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(4)

Научная статья
УДК 530.182, 532.516, 532.517, 517.928

DOI: 10.18500/0869-6632-003163
EDN: OZISPR

О структуре течения вязкой жидкости при периодических воздействиях, не имеющих выделенного направления в пространстве

В. Л. Сенников

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

Поступила в редакцию 27.09.2024, принята к публикации 30.01.2025,
опубликована онлайн 3.02.2025, опубликована 31.07.2025

Аннотация. Целью работы является обнаружение и изучение особенностей динамики вязкой жидкости, испытывающей периодические по времени воздействия, не имеющие выделенного направления в пространстве, в возможно более простых гидромеханических условиях (способных обеспечить нетривиальное поведение жидкости). **Методы.** Используются аналитические методы исследования краевых задач для уравнений Навье–Стокса и неразрывности — метод возмущений, метод Фурье. **Результаты.** Поставлена и решена новая задача о течении вязкой жидкости. Гидромеханическая система состоит из несжимаемой вязкой жидкости и движущейся абсолютно твердой стенки, оказывающей на жидкость периодические воздействия. Обнаружена новая особенность динамики вязкой жидкости, состоящая в том, что в простейших гидромеханических условиях жидкость на фоне колебаний (в среднем по времени) совершает движение нового типа — стационарное, затухающее с расстоянием от стенки движение, характеризующееся наличием слоистой структуры. **Заключение.** Полученные результаты могут использоваться, в частности, в научном поиске подходов к управлению гидромеханическими системами, при разработке методов организации заданных течений жидких сред.

Ключевые слова: вязкая жидкость, периодические по времени воздействия, выделенное направление в пространстве, структура течения.

Для цитирования: Сенников В. Л. О структуре течения вязкой жидкости при периодических воздействиях, не имеющих выделенного направления в пространстве // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 4. С. 531–544. DOI: 10.18500/0869-6632-003163. EDN: OZISPR

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

On the structure of a viscous liquid flow under periodic influences which have no predominant direction in space

V. L. Sennitskii

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: sennitskii@yandex.ru

Received 27.09.2024, accepted 30.01.2025, available online 3.02.2025,

published 31.07.2025

Abstract. Purpose of the work is the revealing and the researching of peculiarities of the dynamics of a viscous liquid which is undergoing by periodic in time influences possessing no predominant direction in space under possible simplest hydro-mechanical conditions (which are able to provide non-trivial behavior of the liquid). *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 Fourier. *Results.* A new problem on the flow of a viscous liquid is formulated and solved. The hydro-mechanical system consists of an incompressible viscous liquid and a moving absolutely solid wall which creates periodic influences to the liquid. A new peculiarity of the viscous liquid dynamics is revealed consisting in that in simplest hydro-mechanical conditions the liquid in the background of oscillations (in average of time) performs a motion of a new type — a stationary fading with the distance from the wall motion which is characterized by the presence of a laminate structure. A physical interpretation of the formulation of the problem under consideration is given. *Conclusion.* The obtained results can be used in particular in a scientific search of ways to control hydro-mechanical systems, under a developing methods of a creation of prescribed flows of liquid media.

Keywords: viscous liquid, periodic in time influences, predominant direction in space, structure of flow.

For citation: Sennitskii V.L. On the structure of a viscous liquid flow under periodic influences which have no predominant direction in space. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2025;33(4):531–544. DOI: 10.18500/0869-6632-003163

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

Введение

Периодические по времени воздействия, процессы чрезвычайно широко и разнообразно представлены в природе и технике. Периодическим (колебательным, вибрационным) воздействиям могут подвергаться, в частности, гидромеханические системы. Изучению динамики гидромеханических систем при периодических воздействиях посвящено значительное число работ (см., например, [1–30], а также [31–57]). К настоящему времени в данном научном направлении получен ряд содержательных результатов, выявлены новые гидромеханические эффекты, значительно повышен уровень понимания особенностей динамики гидромеханических систем. В частности, обнаружены эффекты парадоксального поведения твердого включения в вибрирующей жидкости [1, 2, 7, 21, 31–34, 42], «самопроизвольного» перехода твердого тела в колеблющейся вязкой жидкости в положение с заданной ориентацией в пространстве [19], преимущественно однонаправленного вращения твердого тела и вязкой жидкости [22]. Установлено наличие «разрешенных» и «запрещенных» состояний подвергающейся периодическим по времени воздействиям гидромеханической системы, для которых решение задачи о движении системы соответственно существует и не существует [15]. Обнаружен эффект «левитации» жидкости [29, 52]. Построена математическая модель гидромеханического аналога «маятника Капицы» [12, 58]. Введены основополагающие понятия однородных и неоднородных колебаний жидкости, определены количественные характеристики неоднородности колебаний жидкости [5, 7, 11, 21]. Доказано существование явления преимущественно однонаправленного движения сжимаемых включений в вибрирующей жидкости [3, 4, 7, 21, 36, 44]. Результаты, получаемые в рассматриваемом

научном направлении, могут представлять, в частности, существенный прикладной интерес (см. в связи с этим, например, [35, 53–57]).

В настоящей работе поставлена и решена новая задача о движении вязкой жидкости, порождаемом оказываемыми на жидкость периодическими воздействиями, не имеющими выделенного направления в пространстве. Установлено, что периодические по времени воздействия на жидкость могут приводить к среднему по времени движению жидкости, которое характеризуется наличием пространственной структуры периодического типа.

1. Постановка задачи

Имеется гидромеханическая система, состоящая из вязкой несжимаемой жидкости и абсолютно твердого тела (стенки) η (рис. 1). Тело η ограничено плоскостью Γ_η , перпендикулярной к оси X инерциальной прямоугольной системы координат X, Y, Z и пересекающейся с осью X в точке $X = A$. Жидкость заполняет область Ω : $A < X < \infty$, $-\infty < Y < \infty$, $-\infty < Z < \infty$. Стенка η совершает поступательное движение вдоль осей X, Y ; координата A и скорость U движения стенки η в направлении оси Y заданным образом периодически с периодом T изменяются со временем t ($A = \hat{A} \sin 2\pi t/T$; $U = \hat{U} \sin(2\pi t/T + \varphi)$; $\hat{A} > 0$, $\hat{U} > 0$ — постоянные; φ — параметр, который может иметь значения $\pi/4$, $-\pi/4$, $3\pi/4$, $-3\pi/4$).

Требуется определить периодическое по времени движение жидкости.

Пусть $\tau = t/T$; $x = X/(\hat{U}T)$; $y = Y/(\hat{U}T)$; $\varepsilon = \hat{A}/(\hat{U}T)$; $a = A/(\hat{U}T)$; $u = U/\hat{U}$; \mathbf{V} , ρ и ν — соответственно скорость, плотность и кинематический коэффициент вязкости жидкости; $\mathbf{v} = \mathbf{V}/\hat{U} = v_x(x, \tau)\mathbf{e}_x + v_y(x, \tau)\mathbf{e}_y$ (\mathbf{e}_x и \mathbf{e}_y — единичные векторы, направления которых совпадают с направлениями осей соответственно X и Y); P — давление в жидкости; $p = P/(\rho\hat{U}^2) = p(x, \tau)$; $Re = \hat{U}^2 T/\nu$ — число Рейнольдса.

Задачу о движении жидкости составляют уравнение Навье–Стокса, уравнение неразрывности и условия на границе Γ_η и на бесконечности

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

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

$$\mathbf{v} = \frac{da}{d\tau} \mathbf{e}_x + u \mathbf{e}_y \quad \text{на } \Gamma_\eta \quad (\text{при } x = a); \quad (3)$$

$$\mathbf{v} \rightarrow \frac{da}{d\tau} \mathbf{e}_x \quad \text{при } x \rightarrow \infty. \quad (4)$$

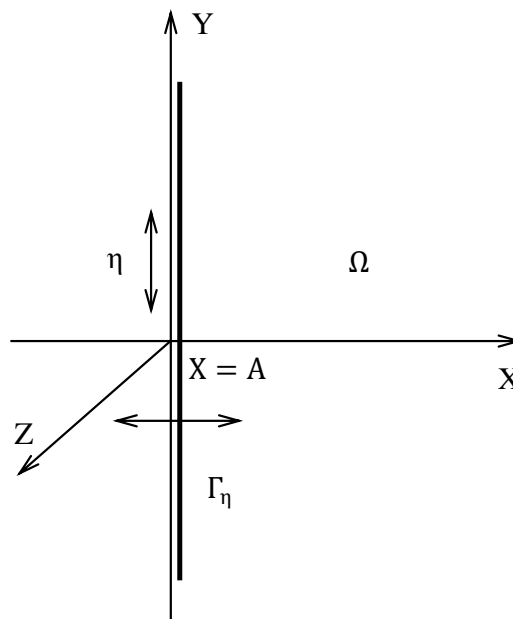


Рис. 1. Гидромеханическая система

Fig. 1. The hydro-mechanical system

2. Решение задачи

Уравнение (2) эквивалентно уравнению

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = 0; \quad (5)$$

Согласно (5) имеем

$$v_x = v_x(\tau). \quad (6)$$

Из (3), (4), (6) следует

$$v_x = 2\pi\varepsilon \cos 2\pi\tau. \quad (7)$$

Уравнение (1) эквивалентно уравнениям

$$\frac{dv_x}{d\tau} = -\frac{\partial p}{\partial x}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2}; \quad (9)$$

Из (7), (8) следует

$$p = 4\pi^2\varepsilon(\sin 2\pi\tau)x + c(\tau). \quad (10)$$

Отметим, что в задаче о движении жидкости (в задаче (1)–(4)) отсутствуют какие-либо граничные условия, которым должно удовлетворять (безразмерное) давление p .

Согласно (3), (4), (7), (9) имеем

$$\frac{\partial v_y}{\partial \tau} + 2\pi\varepsilon(\cos 2\pi\tau)\frac{\partial v_y}{\partial x} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} \quad \text{в } \Omega; \quad (11)$$

$$v_y = u \quad \text{при } x = a; \quad (12)$$

$$v_y \rightarrow 0 \quad \text{при } x \rightarrow \infty. \quad (13)$$

Будем рассматривать задачу (11)–(13) при малых по сравнению с единицей значениях ε . Применим метод разложения по степеням малого параметра [59, 60]. Предположим, что

$$v_y \sim v_0 + \varepsilon v_1 \quad \text{при } \varepsilon \rightarrow 0. \quad (14)$$

Используя (11)–(14), в ε^N -приближении ($N = 0, 1$) получим

$$\frac{\partial v_N}{\partial \tau} - \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 v_N}{\partial x^2} = -2N\pi(\cos 2\pi\tau)\frac{\partial v_0}{\partial x} \quad \text{в } \bar{\Omega}; \quad (15)$$

$$v_N = (1 - N)u - N(\sin 2\pi\tau)\frac{\partial v_0}{\partial x} \quad \text{при } x = 0; \quad (16)$$

$$v_N \rightarrow 0 \quad \text{при } x \rightarrow \infty, \quad (17)$$

где $\bar{\Omega}$ — область $0 < X < \infty$, $-\infty < Y < \infty$, $-\infty < Z < \infty$.

Пусть $N = 0$. Задача (15)–(17) имеет решение

$$v_0 = \text{Imag} (e^{i\varphi} e^{-qx} e^{2\pi i\tau}). \quad (18)$$

Здесь $q = (1 + i)\sqrt{\pi Re}$.

Пусть $N = 1$. Задача (15)–(17) имеет решение

$$v_1 = \bar{v} + \tilde{v}, \quad (19)$$

где

$$\bar{v} = \frac{1}{2} \operatorname{Real} (e^{i\varphi} q e^{-qx}), \quad \tilde{v} = -\frac{1}{2} \operatorname{Real} (e^{i\varphi} q e^{-qx} e^{4\pi i \tau}).$$

Формулами

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{e}_x + (v_0 + \varepsilon v_1) \mathbf{e}_y \quad (20)$$

и (7), (10), (18), (19) определяется приближенное решение задачи (1)–(4).

Обратимся к вопросу о среднем по времени движении жидкости. Используя (7), (18)–(20), получим

$$\langle \mathbf{v} \rangle = \varepsilon \bar{v} \mathbf{e}_y = \frac{\varepsilon \lambda}{\sqrt{2}} e^{-\lambda x} \cos(\lambda x - \varphi - \pi/4) \mathbf{e}_y \quad \text{в } \bar{\Omega}'. \quad (21)$$

Здесь

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

— оператор усреднения по (безразмерному) времени τ (действие данного оператора на периодическую функцию времени τ — безразмерную скорость \mathbf{v} — состоит в том, что он сохраняет среднее значение функции неизменным и «преобразует» в нуль все ее остальные «составные части»; результатом действия данного оператора на периодическую функцию τ — скорость \mathbf{v} — является средняя по времени τ безразмерная скорость жидкости); $\lambda = \sqrt{\pi Re}$; $\bar{\Omega}'$ — полупространство $0 \leq X < \infty$, $-\infty < Y < \infty$, $-\infty < Z < \infty$.

Формула (21), в частности, свидетельствует о наличии эффекта, состоящего в том, что в рассматриваемых гидромеханических условиях на фоне колебаний жидкость совершает стационарное движение.

Остановимся на описании свойств среднего по времени движения жидкости. Согласно (21) в полупространстве $\bar{\Omega}'$ на фоне колебаний имеет место следующее.

1. Если $\varphi = \pi/4$ (рис. 2, а), то на плоскостях $P_k : x = x_k = k\pi/\lambda$, $-\infty < Y < \infty$, $-\infty < Z < \infty$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) скорость жидкости равна нулю; плоскостями P_l ($l = 1, 2, \dots$) область, занимаемая жидкостью, разбивается на слои $L_l : x_{l-1} < x < x_l$ ($-\infty < Y < \infty$, $-\infty < Z < \infty$); толщина каждого слоя L_l составляет $x_l - x_{l-1} = \pi/\lambda$; направление скорости жидкости в каждом слое L_l совпадает с направлением вектора \mathbf{e}_y или противоположно направлению вектора \mathbf{e}_y ; в слое L_1 жидкость движется в направлении, совпадающем с направлением вектора \mathbf{e}_y ; направление скорости жидкости в каждом слое L_{l+1} противоположно направлению скорости жидкости в слое L_l ; в каждом слое L_l на плоскости $P_l^* : x = x_l^* = (l - 3/4)\pi/\lambda$ модуль скорости $|\langle \mathbf{v} \rangle|$ имеет максимум, составляющий $(\varepsilon\lambda/2) \exp(-\lambda x_l^*)$.

2. Если $\varphi = -\pi/4$ (рис. 2, б), то на плоскостях $P_l : x = x_l = (l - 1/2)\pi/\lambda$ ($l = 1, 2, \dots$) скорость жидкости равна нулю; плоскостями P_l область, занимаемая жидкостью, разбивается на слои $L_l : x_{l-1} < x < x_l$ ($x_0 = 0$); толщина слоя $L_1 : 0 < x < x_1$ составляет $x_1 = \pi/(2\lambda)$; толщина каждого слоя L_m ($m = 2, 3, \dots$) составляет $x_m - x_{m-1} = \pi/\lambda$; направление скорости жидкости в каждом слое L_l совпадает с направлением вектора \mathbf{e}_y или противоположно направлению вектора \mathbf{e}_y ; в слое L_1 жидкость движется в направлении, совпадающем с направлением вектора \mathbf{e}_y ; направление скорости жидкости в каждом слое L_{l+1} противоположно направлению скорости жидкости в слое L_l ; в каждом слое L_m ($m = 2, 3, \dots$) на плоскости $P_m^* : x = x_m^* = (m - 5/4)\pi/\lambda$ модуль скорости $|\langle \mathbf{v} \rangle|$ имеет максимум, составляющий $(\varepsilon\lambda/2) \exp(-\lambda x_m^*)$; в слое L_1 максимум $|\langle \mathbf{v} \rangle|$ отсутствует, наибольшее значение модуля скорости $|\langle \mathbf{v} \rangle|$ достигается на плоскости $P_0 : x = x_0 = 0$ и составляет $\varepsilon\lambda/\sqrt{2}$.

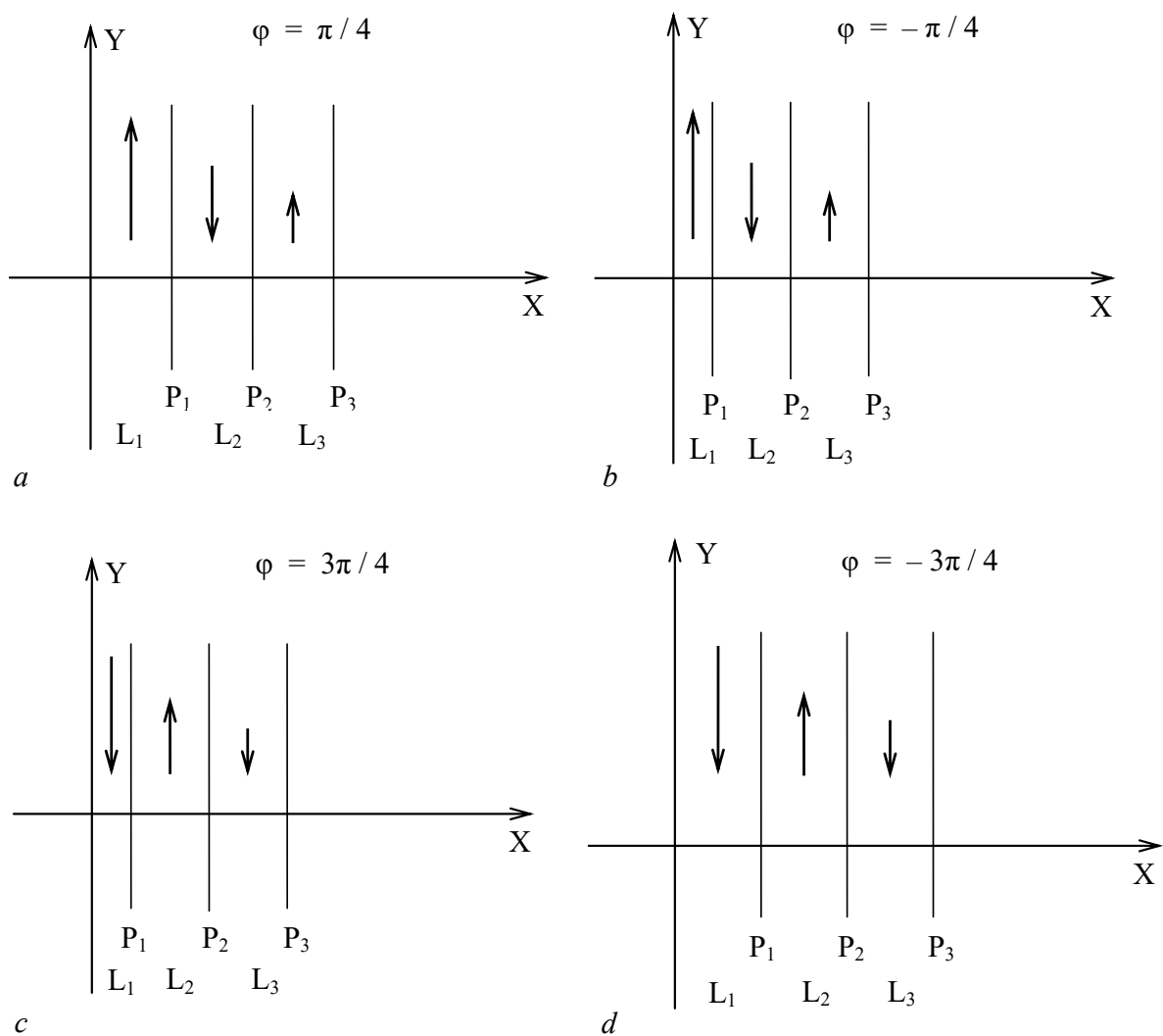


Рис. 2. Фрагменты качественной картины среднего по времени движения жидкости при различных значениях параметра φ

Fig. 2. Fragments of the qualitative picture of the average in time liquid motion under various values of the parameter φ

3. Если $\varphi = 3\pi/4$ (рис. 2, c), то на плоскостях $P_l : x = x_l = (l - 1/2)\pi/\lambda$ ($l = 1, 2, \dots$) скорость жидкости равна нулю; плоскостями P_l область, занимаемая жидкостью, разбивается на слои $L_l : x_{l-1} < x < x_l$ ($x_0 = 0$); толщина слоя $L_1 : 0 < x < x_1$ составляет $x_1 = \pi/(2\lambda)$; толщина каждого слоя L_m ($m = 2, 3, \dots$) составляет $x_m - x_{m-1} = \pi/\lambda$; направление скорости жидкости в каждом слое L_l совпадает с направлением вектора \mathbf{e}_y или противоположно направлению вектора \mathbf{e}_y ; в слое L_1 жидкость движется в направлении, противоположном направлению вектора \mathbf{e}_y ; направление скорости жидкости в каждом слое L_{l+1} противоположно направлению скорости жидкости в слое L_l ; в каждом слое L_m ($m = 2, 3, \dots$) на плоскости $P_m^* : x = x_m^* = (m - 5/4)\pi/\lambda$ модуль скорости $|\langle \mathbf{v} \rangle|$ имеет максимум, составляющий $(\varepsilon\lambda/2) \exp(-\lambda x_m^*)$; в слое L_1 максимум $|\langle \mathbf{v} \rangle|$ отсутствует, наибольшее значение модуля скорости $|\langle \mathbf{v} \rangle|$ достигается на плоскости $P_0 : x = x_0 = 0$ и составляет $\varepsilon\lambda/\sqrt{2}$.

4. Если $\varphi = -3\pi/4$ (рис. 2, d), то на плоскостях $P_k : x = x_k = k\pi/\lambda$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) скорость жидкости равна нулю; плоскостями P_l ($l = 1, 2, \dots$) область, занимаемая жидкостью,

разбивается на слои $L_l : x_{l-1} < x < x_l$; толщина каждого слоя L_l составляет $x_l - x_{l-1} = \pi/\lambda$; направление скорости жидкости в каждом слое L_l совпадает с направлением вектора \mathbf{e}_y или противоположно направлению вектора \mathbf{e}_y ; в слое L_1 жидкость движется в направлении, противоположном направлению вектора \mathbf{e}_y ; направление скорости жидкости в каждом слое L_{l+1} противоположно направлению скорости жидкости в слое L_l ; в каждом слое L_l на плоскости $P_l^* : x = x_l^* = (l - 3/4)\pi/\lambda$ модуль скорости $|\langle \mathbf{v} \rangle|$ имеет максимум, составляющий $(\varepsilon\lambda/2) \exp(-\lambda x_l^*)$.

Формула (21) и все описанные в пунктах 1–4 свойства среднего по времени движения жидкости имеют место для любого значения числа Рейнольдса $Re > 0$.

Отметим, что несмотря на различия (толщина первого слоя, направление движения жидкости в слое), все рассмотренные течения жидкости (в каждый промежуток времени, вновь и вновь) порождаются и поддерживаются воздействиями, периодическими во времени, и при этом — вследствие этого — имеют стационарную структуру, стационарное «почти» периодическое строение в пространстве. Содержание данного положения (основанного на формуле (21)) может быть кратко выражено следующим образом: периодическая структура во времени способна порождать и сохранять (поддерживать) стационарную структуру в пространстве. Наряду с данным моментом существенный интерес представляет также то, что обнаруженная стационарная пространственная структура движения жидкости является «почти» периодической (периодической с точностью до наличия затухания движения жидкости с возрастанием расстояния от источника воздействий — движущейся стенки). Согласно (21) (и изложенному в пунктах 1–4) затухание движения жидкости с возрастанием расстояния от стенки тем слабее, и при этом толщины слоев однонаправленного среднего по времени движения жидкости тем больше, чем меньше значение числа Рейнольдса $Re > 0$.

Заключение

В настоящей работе содержатся новые результаты в изучении динамики вязкой жидкости при периодических по времени воздействиях, характеризующихся отсутствием выделенного направления в пространстве. Рассмотрена задача о движении вязкой жидкости, граничащей с твердым телом, оказывающим на жидкость периодические воздействия. Выявлены новые особенности среднего движения жидкости.

Присутствующие в данной работе и в ряде других исследований (см., например, [25–27, 29, 30]) периодические по времени воздействия, характеризующиеся отсутствием выделенного направления в пространстве, представляют интерес, в частности, ввиду того, что при таких воздействиях на гидромеханические системы (в среднем по времени) каждое частичное периодическое воздействие (например, воздействие на жидкость, связанное с движением стенки η вдоль оси X (или вдоль оси Y) в задаче (1)–(4)) является нулевым, «отсутствует»; в среднем по времени «ничего не происходит» (например, стенка η «стоит на месте»), но свободные части гидромеханических систем (части систем, движение которых не задано) совершают среднее движение. Причиной эффектов среднего движения свободных частей систем является согласованность (друг с другом) воздействий, оказываемых на системы, что находится в непосредственной связи с принципом среднего движения [7, 21, 25, 26, 30, 61].

Полученные результаты, в частности, могут использоваться в качестве теоретической основы при организации направленных экспериментальных исследований нетривиальной динамики жидкости при периодических воздействиях. Результаты работы указывают на наличие принципиальной возможности эффективного использования периодических воздействий, не имеющих выделенного направления в пространстве, для создания заданных течений жидкости и управления движением жидких сред.

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 // Прикл. мех. техн. физ. 1985. Т. 26, № 5. С. 19–23.
3. Сенницкий В. Л. О движении газового пузыря в вязкой вибрирующей жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 1988. Т. 29, № 6. С. 107–113.
4. Сенницкий В. Л. Преимущественно однонаправленное движение газового пузыря в вибрирующей жидкости // Доклады АН СССР. 1991. Т. 319, № 1. С. 117–119.
5. Sennitskii V. L. On motion of inclusions in uniformly and non-uniformly vibrating liquid // In: Proceedings of the International workshop on G-jitter. 13–19 June, 1993, Potsdam, USA. Potsdam: Clarkson University, 1993. P. 178–186.
6. Lyubimov D. V. New approach in the vibrational convection theory // In: Proc. 14 IMACs Congress on Computational and Applied Mathematics. Atlanta, Georgia, USA. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1994. P. 59–68.
7. Сенницкий В. Л. Движение включений в колеблющейся жидкости // Сибирский физический журнал. 1995. № 4. С. 18–26.
8. Иванова А. А., Козлов В. Г., Эвеск П. Динамика цилиндрического тела в заполненной жидкостью секторе цилиндрического слоя при вращательных вибрациях // Изв. РАН. МЖГ. 1998. № 4. С. 29–39.
9. Любимов Д. В., Любимова Т. П., Черепанов А. А. Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях. М.: Физматлит, 2003. 216 с.
10. Иванова А. А., Козлов В. Г., Кузаев А. Ф. Вибрационная подъемная сила, действующая на тело в жидкости вблизи твердой поверхности // Доклады АН СССР. 2005. Т. 402, № 4. С. 488–491.
11. Сенницкий В. Л. О движении включения в однородно и неоднородно колеблющейся жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 2007. Т. 48, № 1. С. 79–85.
12. Сенницкий В. Л. О колебательном движении неоднородного твердого шара в вибрирующей жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 2009. Т. 50, № 6. С. 27–35.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Пятигорская О. С., Сенницкий В. Л. О движении твердых частиц в колеблющейся жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 2013. Т. 54, № 3. С. 74–78.
17. 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.
18. 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. P. 297–303. DOI: 10.1007/s12217-015-9460-y.
19. Сенницкий В. Л. О заданной ориентации твердого включения в вязкой жидкости // Сиб. журн. индустр. матем. 2015. Т. 18, № 1. С. 123–128. DOI: 10.17377/SIBJIM.2015.18.110.
20. 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. P. 055503. DOI: 10.1088/0169-5983/48/5/055503.
21. Сенников В. Л. Парадоксальное движение жидкости // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2017. № 8. С. 28–33. DOI: 10.17513/mjpf.11753.
 22. Сенников В. Л. Преимущественно однонаправленное вращение твердого тела и вязкой жидкости // *Сиб. журн. индустр. матем.* 2017. Т. 20, № 2. С. 93–97. DOI: 10.17377/sibjim.2017.20.210.
 23. 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. DOI: 10.15372/PMTF20180105.
 24. 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.
 25. Сенников В. Л. О движении вязкой жидкости в отсутствие выделенного направления в пространстве // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2021. № 2. С. 67–71. DOI: 10.17513/mjpf.13181.
 26. Сенников 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.
 27. Сенников В. Л. О течении вязкой жидкости в поле силы тяжести // *Теплофизика и аэромеханика.* 2021. Т. 28, № 3. С. 373–377.
 28. Коновалов В. В., Любимова Т. П. Влияние акустических вибраций на взаимодействие газового пузыря и твердой частицы в жидкости // В сб.: *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.
 29. Сенников В. Л. Об особенностях течения жидкости в поле силы тяжести // *Сиб. электрон. матем. изв.* 2022. Т. 19, № 1. С. 241–247. DOI: 10.33048/semi.2022.19.018.
 30. Сенников В. Л. Особенности динамики вязкой жидкости со свободной границей при периодических воздействиях // *Известия вузов. ПНД.* 2024. Т. 32, № 2. С. 197–208. DOI: 10.18500/0869-6632-003091.
 31. Сенников В. Л. Движение шара в жидкости, вызываемое колебаниями другого шара // *Прикл. мех. техн. физ.* 1986. Т. 27, № 4. С. 31–36.
 32. Луговцов Б. А., Сенников В. Л. О движении тела в вибрирующей жидкости // *Доклады АН СССР.* 1986. Т. 289, № 2. С. 314–317.
 33. Любимов Д. В., Любимова Т. П., Черепанов А. А. О движении твердого тела в вибрирующей жидкости // В кн.: *Конвективные течения.* Пермь: Издательство Пермского педагогического института, 1987. С. 61–71.
 34. Челомей В. Н. Избранные труды. М.: Машиностроение, 1989. 336 с.
 35. Сенников В. Л. О движении газового пузыря в вязкой вибрирующей жидкости // В кн.: *Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации 1988 г.* М: Наука, 1989. С. 267.
 36. Сенников В. Л. Преимущественно однонаправленное движение сжимаемого твердого тела в вибрирующей жидкости // *Прикл. мех. и техн. физ.* 1993. Т. 34, № 1. С. 100–101.
 37. Lyubimov D. V. Thermovibrational flows in nonuniform systems // *Microgravity Quarterly.* 1994. Vol. 4, no. 1. P. 221–225.
 38. Kozlov V. G. Solid body dynamics in cavity with liquid under high-frequency rotational vibration // *Europhysics Letters.* 1996. Vol. 36, iss. 9. P. 651–656. DOI: 10.1209/epl/i1996-00282-0.

39. 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.
40. Lyubimov D. V., Lyubimova T. P., Meradji S., Roux B. Vibrational control of crystal growth from liquid phase // J. Crystal Growth. 1997. Vol. 180, iss. 3–4. P. 648–659. DOI: 10.1016/S0022-0248(97)00294-7.
41. 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.
42. Сенницкий В. Л. Движение шара в жидкости в присутствии стенки при колебательных воздействиях // Прикл. мех. техн. физ. 1999. Т. 40, № 4. С. 125–132.
43. 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.
44. Сенницкий В. Л. Движение пульсирующего твердого тела в вязкой колеблющейся жидкости // Прикл. мех. техн. физ. 2001. Т. 42, № 1. С. 82–86.
45. Пятигорская О. С., Сенницкий В. Л. Движение шара в жидкости, вызываемое колебаниями другого шара // Прикл. мех. техн. физ. 2004. Т. 45, № 4. С. 102–106.
46. Lyubimov D., Lyubimova T., Vorobev A., Moitabi A., Zappoli B. Thermal vibrational convection in near-critical fluids. Part I: Non-uniform heating // J. Fluid Mech. 2006. Vol. 564. P. 159–183. DOI: 10.1017/S0022112006001418.
47. 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.
48. 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.
49. 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. P. 017111. DOI: 10.1063/1.2409622.
50. Иванова А. А., Козлов В. Г., Кузаев А. Ф. Вибрационное взаимодействие сферического тела с границами полости // Известия РАН. МЖГ. 2008. № 2. С. 31–40.
51. 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.
52. Сенницкий В. Л. О «левитации» жидкости // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 6. С. 87–90. DOI: 10.17513/mjprfi.13236.
53. Сенницкий В. Л. Эффекты парадоксального движения вязкой жидкости в поле силы тяжести // В кн.: Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации - 2021: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 18–20 ноября 2021 года, Пермь, Россия. Пермь: ПНИПУ, 2021. Т. 1. С. 138–142.
54. Сенницкий В. Л. Движение включения в вибрирующей жидкости // В кн.: Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации - 2022: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 16–18 ноября 2022 года, Пермь, Россия. Пермь: ПНИПУ, 2022. С. 207–209.
55. Сенницкий В. Л. Вынужденные вращательные колебания гидромеханической системы // В кн.: Сборник статей Международной научно-технической конференции Минские научные чтения - 2022. 07–09 декабря 2022 года, Минск, Беларусь. Минск: БГТУ, 2022. Т. 3. С. 181–186.
56. Сенницкий В. Л. О диагностике гидромеханической системы // В кн.: Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации - 2023: Материалы Всероссийской научно-

технической конференции, 15–17 ноября 2023 года, Пермь, Россия. Пермь: ПНИПУ, 2023. С. 205–207.

57. Сенницкий В. Л. О движении включения в жидкой среде // В кн.: Гидропроцессы в катализе. V Научно-технологический симпозиум, 3–6 октября 2024 года, Сочи, Россия. Новосибирск: Институт катализа СО РАН, 2024. С. 180–182.
58. Капица П. Л. Маятник с вибрирующим подвесом // Успехи физических наук. 1951. Т. 44, № 1. С. 7–20. DOI: 10.3367/UFNr.0044.195105b.0007.
59. Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н. Введение в нелинейную механику. Москва-Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2004. 352 с.
60. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М: ГИФ-МЛ, 1958. 408 с.
61. Сенницкий В. Л. О силовом взаимодействии шара и вязкой жидкости в присутствии стенки // Прикл. мех. техн. физ. физика. 2000. Т. 41, № 1. С. 57–62.

References

1. Chelomei VN. Paradoxes in mechanics caused by vibrations. Sov. Phys. Doklady. 1983;270(1): 62–67 (in Russian).
2. Sennitskii VL. Motion of a circular cylinder in a vibrating liquid. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1985;26(5):620–623. DOI: 10.1007/BF00915307.
3. Sennitskii VL. Motion of a gas bubble in a viscous vibrating liquid. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1988;29(6):865–870. DOI: 10.1007/BF00858387.
4. Sennitskii VL. The predominantly unidirectional motion of a gas bubble in a vibrating liquid. Sov. Phys. Doklady. 1991;319(1):117–119 (in Russian).
5. Sennitskii VL. On motion of inclusions in uniformly and non-uniformly vibrating liquid. In: Proceedings of the International workshop on G-jitter. Potsdam (USA): Clarkson University; 1993. P. 178–186.
6. Lyubimov DV. New approach in the vibrational convection theory. In: Proc. 14 IMACs Congress on Computational and Applied Mathematics. Atlanta, Georgia, USA. Atlanta: Georgia Institute of Technology; 1994. P. 59–68.
7. Sennitskii VL. The motion of inclusions in an oscillating liquid. Siberian Physical Journal. 1995;(4):18–26 (in Russian).
8. Ivanova AA, Kozlov VG, Evesque P. Dynamics of a cylindrical body in a liquid-filled sector of a cylindrical layer under rotational vibration. Fluid Dyn. 1998;33:488–496. DOI: 10.1007/BF02698213.
9. Lyubimov DV, Lyubimova TP, Cherepanov AA. Dynamics of Interfaces in Vibrational Fields. M.: Fizmatlit; 2003. 216 p. (in Russian).
10. Ivanova AA, Kuzaev AF, Kozlov VG. 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.
11. Sennitskii VL. Motion of an inclusion in uniformly and nonuniformly vibrating liquids. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2007;48:65–70. DOI: 10.1007/s10808-007-0009-8.
12. Sennitskii VL. Pulsating motion of an inhomogeneous solid sphere in a vibrating liquid. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2009;50:936–943. <https://doi.org/10.1007/s10808-009-0127-6>
13. Ivanova AA, Kozlov VG, Shchipitsyn VD. A light cylinder under horizontal vibration in a cavity filled with a fluid. Fluid Dyn. 2010;45(6):889–897. DOI: 10.1134/S0015462810060062.
14. 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.

15. Pyatigorskaya OS, Sennitskii VL. Example of motion of a cylindrical solid in a viscous liquid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2013;54(2):237–242. DOI: 10.1134/S0021894413020089.
16. Pyatigorskaya OS, Sennitskii VL. Motion of solid particles in an oscillating liquid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2013;54(3):404–407. DOI: 10.1134/S0021894413030085.
17. 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. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2014;55(5):773–780. DOI: 10.1134/S002189441405006X.
18. Vlasova OA, Kozlov VG. The repulsion of flat body from the wall of vibrating container filled with liquid. *Microgravity Sci. Technol.* 2015;27:297–303. DOI: 10.1007/s12217-015-9460-y.
19. Sennitskii VL. On the prescribed orientation of a solid inclusion in a viscous liquid. *Siberian Journal of Industrial Mathematics.* 2015;18(1):123–128 (in Russian). DOI: 10.17377/SIBJIM.2015.18.110.
20. 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.
21. Sennitskii VL. Paradoxical motion of a liquid. *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2017;(8):28–33 (in Russian). DOI: 10.17513/mjpf.11753.
22. Sennitskii VL. Predominantly unidirectional rotation of a solid body and a viscous liquid. *J. Appl. Ind. Math.* 2017;11:284–288. DOI: 10.1134/S1990478917020144
23. 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. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2018;59:219–228. DOI: 10.1134/S0021894418020050.
24. 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. *Fluid Dyn.* 2019;12(1):48–56 (in Russian). DOI: 10.7242/1999-6691/2019.12.1.5.
25. Sennitskii VL. On the motion of a viscous liquid in the absence of a predominant direction in space. *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2021;(2):67–71 (in Russian). DOI: 10.17513/mjpf.13181.
26. Sennitskii VL. Predominantly unidirectional flow of a viscous fluid. *J. Appl. Ind. Math.* 2021;15:326–330. DOI: 10.1134/S1990478921020149.
27. Sennitskii VL. On the flow of a viscous liquid in a gravity field. *Thermophys. Aeromech.* 2021;28:347–351. DOI: 10.1134/S0869864321030057.
28. Konovalov VV, Lyubimova TP. Influence of acoustic vibrations on the interaction of a gas bubble and a solid particle in a liquid. In: Lyubimova TP, editor. *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 and D. V. Lyubimov.* Perm: Perm state national research university; 2022. P. 254–261 (in Russian).
29. 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.
30. 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 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-003091.
31. Sennitskii VL. Motion of a sphere in fluid caused by vibrations of another sphere. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1986;27:501–505. DOI: 10.1007/BF00910190.
32. Lugovtsov BA, Sennitskii VL. Motion of a body in a vibrating liquid. *Sov. Phys. Doklady.* 1986;289(2):314–317 (in Russian).
33. Lyubimov DV, Lyubimova TP, Cherepanov AA. On the motion of a solid body in a vibrating fluid. In: *Convective Flows.* Perm: Perm. Ped. Institute Publishing; 1987. P. 61–71 (in Russian).

34. Chelomei VN. Selected Works. M.: Mashinostroenie; 1989. 336 p. (in Russian).
35. Sennitskii VL. On the motion of a gas bubble in a viscous vibrating liquid. In: Gagarin's Scientific Readings on Cosmonautics and Aviation 1988. M.: Nauka; 1989. P. 267 (in Russian).
36. Sennitskii VL. Predominantly unidirectional motion of a compressible solid body in a vibrating liquid. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1993;34:96–97. DOI: 10.1007/BF00851812.
37. Lyubimov DV. Thermovibrational flows in nonuniform systems. Microgravity Quarterly. 1994;4(1): 221–225.
38. 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.
39. Sennitskii VL. Behavior of a gas bubble in a viscous oscillating liquid in the presence of gravity. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1997;38:718–723. DOI: 10.1007/BF02467883.
40. Lyubimov DV, Lyubimova TP, Meradji S, Roux B. Vibrational control of crystal growth from liquid phase. J. Crystal Growth. 1997;180(3–4):648–659. DOI: 10.1016/S0022-0248(97)00294-7.
41. Lyubimov DV, Perminov AV, Cherepanov AA. Generation of averaged flows in a vibrational field close to the interface of mediums. In: Vibration Effects in Hydrodynamics. Perm: Perm University Publishing; 1998. P. 204–221 (in Russian).
42. Sennitskii VL. Motion of a sphere in a vibrating liquid in the presence of a wall. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1999;40:662–668. DOI: 10.1007/BF02468441.
43. 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.
44. Sennitskii VL. The motion of a pulsating rigid body in an oscillating viscous liquid. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2001;42(1):72–76. DOI: 10.1023/A:1018808628235.
45. Pyatigorskaya OS, Sennitskii VL. Motion of a sphere in a liquid caused by vibrations of another sphere. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2004;45:542–545. DOI: 10.1023/B:JAMT.0000030331.35411.2e.
46. Lyubimov D, Lyubimova T, Vorobev A, Moitabi 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.
47. Hassan S, Lyubimova TP, Lyubimov DV, Kawaji M. Motion of a sphere suspended in a vibrating liquid-filled container. J. Appl. Mech. 2006;73(1):72–78. DOI: 10.1115/1.1992516.
48. 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.
49. 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;19:017111. DOI: 10.1063/1.2409622.
50. Ivanova AA, Kozlov VG, Kuzaev AF. Vibrational hydrodynamic interaction between a sphere and the boundaries of a cavity. Fluid Dyn. 2008;43:194–202. DOI: 10.1134/S001546280802004X.
51. Lyubimov DV, Baydin AY, Lyubimova TP. Particle dynamics in a fluid under high frequency vibrations of linear polarization // Microgravity Science Technology. 2013. Vol. 25. P. 121–126. DOI: 10.1007/s12217-012-9336-3.
52. Sennitskii VL. On the “levitation” of a liquid. International Journal of Applied and Fundamental Research. 2021;(6):87–90 (in Russian). DOI: 10.17513/mjpf.13236.
53. Sennitskii VL. Effects of a paradoxical motion of a viscous liquid in a gravity field. In: Aero-cosmic Technique, High Technologies and Innovations - 2021. Materials of All-Russian Scientific-Technical Conference, 18–20 November, 2021, Perm, Russia. Perm: PNIPU; 2021. Vol. 1. P. 138–142 (in Russian).
54. Sennitskii VL. The motion of an inclusion in a vibrating liquid. In: Aero-cosmic Technique, High Technologies and Innovations - 2022. Materials of All-Russian Scientific-Technical Conference, 16–18 November, 2022, Perm, Russia. Perm: PNIPU; 2022. P. 207–209 (in Russian).
55. Sennitskii VL. Forced rotatory oscillations of a hydro-mechanical system. In: The Collection

- of Articles of International Scientific-Technical Conference Minsk Scientific Readings - 2022 (Minsk, 07–09 December 2022). Minsk: BGTU; 2022. Vol. 3. P. 181–186 (in Russian).
56. Sennitskii VL. On the diagnostics of a hydro-mechanical system. In: Aero-Cosmic Technique, High Technologies and Innovations-2023. Materials of All-Russia Scientific-Technical Conference (Perm, 15–17 November, 2023). Perm: PNIPU; 2023. P. 205–207 (in Russian).
 57. Sennitskii VL. On the motion of an inclusion in a liquid medium. In: Hydro-Processes in Catalysis. V Scientific-Technology Symposium, 3–6 October 2024, Sochi, Russia. Novosibirsk: Institute of Catalysis SB RAS; 2024. P. 180–182 (in Russian).
 58. Kapitsa PL. Pendulum with a vibrating suspension. *Sov. Phys. Usp.* 1951;44(1):7–20 (in Russian). DOI: 10.3367/UFNr.0044.195105b.0007
 59. Krilov NM, Bogolyubov NN. Introduction in Non-Linear Mechanics. Moscow-Ijevsk: NITs RKhD; 2004. 352 p. (in Russian).
 60. Bogolyubov NN, Mitropolskii YuA. Asymptotic Methods in the Theory of Non-Linear Oscillations. M.: GIF-ML; 1958. 408 p. (in Russian).
 61. Sennitskii VL. Force interaction of a sphere and a viscous liquid in the presence of a wall. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2000;41:50–54. DOI: 10.1007/BF02465236.



Сенницкий Владимир Леонидович — родился в 1950 году. Окончил физический факультет Новосибирского государственного университета (НГУ, 1972) и аспирантуру 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 Российской Федерации «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