

УДК 532.5; 536.25

## ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА НА ТЕПЛОВУЮ КОНВЕКЦИЮ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПЛОСКОМ СЛОЕ

Рысин К.Ю.

*ФГБОУ ВПО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет», г. Пермь, Россия (614990, Пермь, ул. Сибирская, 24), e-mail: rysin@pspu.ru*

Экспериментально исследуется структура конвективных течений в наклонном плоском слое с границами разной температуры, вращающемся вокруг оси, ориентированной перпендикулярно плоскости слоя. Толщина слоя, угол наклона, разность температур и скорость вращения варьируются. Проведено сравнение конвективных структур при различных углах наклона. Показано, что при отклонении слоя от горизонта на угол до  $45^\circ$  конвекция жидкости имеет гравитационную природу и определяется числом Рэлея, рассчитанным через нормальную слою компоненту поля силы тяжести, которая остается неизменной в системе отсчета полости. Результаты исследований представлены на плоскости безразмерных чисел, гравитационного модифицированного числа Рэлея и числа Нуссельта, они согласуются с результатами выполненных ранее исследований в предельном случае горизонтального расположения слоя.

Ключевые слова: эксперимент, тепловая конвекция, плоский слой, вращение.

## INFLUENCE OF ANGLE ON THE THERMAL CONVECTION IN A ROTATING PLANE LAYER

Rysin K.Y.

*Perm State Humanitarian Pedagogical University, Perm, Russia (614990, Perm, street Sibirskaya, 24), e-mail: rysin@pspu.ru*

The structure of convective flows in an inclined plane boundaries of different temperature, rotating about an axis oriented perpendicular to the plane of the layer is being experimentally investigated. The thickness of the layer, tilt angle, temperature difference and the rotational speed are varying. A comparison of convective structures with different inclinations is done. It is shows that at inclination of layer up to 45 degrees to the horizon the convection of liquid is of gravity nature and determined by the Rayleigh number calculated through the normal component of the gravity field, which remains unchanged in the cavity frame. The results are given in the plane of the dimensionless numbers, modified gravitational Rayleigh number and the Nusselt number, they are consistent with the results of previous studies in the limiting case of horizontal orientation of the layer.

Keywords: experiment, thermal convection, plane layer, rotation.

### Постановка задачи

Тепловая конвекция во вращающихся полостях является объектом пристального внимания, и это связано с проблемами изучения планетарных атмосфер. Существуют систематические исследования тепловой конвекции при действии осложняющих факторов [1]. Исследования влияния вращения на конвекцию было проведено в [2,3]. Было обнаружено, что с повышением скорости вращения (характеризующейся безразмерным параметром  $T = 4\omega^2$ , где  $\omega = \Omega h^2/\nu$ , а  $\Omega \equiv 2\pi f$  - скорость вращения) критическое значение числа Рэлея возрастает по закону  $\sim T^{2/3}$ . Целью настоящей работы является изучение тепловой конвекции во вращающемся слое, при расположении последнего не строго горизонтально, а под некоторым углом.

В работе исследуется влияние угла наклона на порог возбуждения конвекции и теплоперенос в слое. Слой толщиной  $h$  имеет цилиндрическую боковую границу. Боковая граница слоя теплоизолирована, широкие грани поддерживаются при температурах  $T_1$  и  $T_2$ . Температура нижней границы выше, чем верхней ( $T_2 > T_1$ ). Плоскость слоя отклоняется от

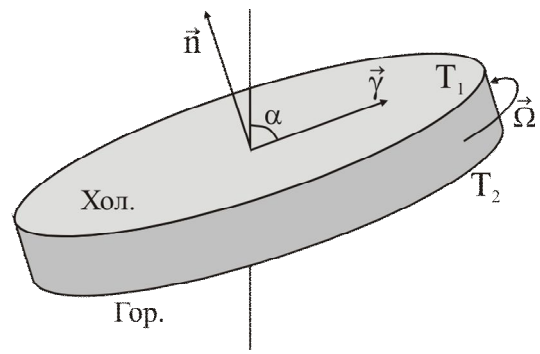


Рис.1. Постановка задачи

горизонтального положения. Наклон слоя характеризуется углом  $\alpha$  (горизонтальному положению соответствует  $\alpha = 90^\circ$ ) см. рис.1. Изучаются пороги возникновения конвекции в зависимости от скорости вращения слоя и разности температур границ слоя, а также структура конвективных потоков в надкритической области. Разность температур  $\Theta = T_2 - T_1$  варьируется в диапазоне  $\Theta = 0 - 20$  °С. Эксперименты проводятся на воде и водоглицериновых растворах. Скорость вращения изменяется в интервале от  $f = 0.1$  об/с, до  $f = 1.5$  об/с. Эксперименты проводятся на слоях толщиной  $h = (1.00 \pm 0.2)$  см и  $h = (1.50 \pm 0.2)$  см. Тепловой поток измеряется через слой с помощью датчика теплового потока.

### Экспериментальная установка и методика

Экспериментальная установка обеспечивает вращение столика с установленной на нем кюветой с заданной скоростью и определенной ориентацией в пространстве при одновременном подведении к теплообменникам кюветы жидкости от термостатов. Заполненный рабочей жидкостью слой образован теплообменниками, оборудованными датчиками теплового потока. Датчики термометров сопротивления регистрируют температуру границ слоя, которая в режиме реального времени отображается на экране компьютера в виде температурной зависимости. Шаговый двигатель сообщает вращение столику посредством конической передачи. Электрический коллектор служит для вывода сигналов от вращающегося вместе с кюветой измерительного модуля ТЕРМОДАТ на компьютер. Точность температурных измерений составляет 0.1 °С. Нестабильность скорости вращения не превышает 1%. Подробное описание экспериментальной установки приведено в [4].

Диаграмма (рис.2) отображает изменение температуры на датчиках термометров сопротивления  $T_1, T_2$  и датчике теплового потока  $T_3$  при пошаговом изменении скорости вращения. В приведенном случае температуры границ слоя составляют  $T_1 \sim 29^\circ\text{C}$  и  $T_2 \sim 48^\circ\text{C}$ . Разность температур границ слоя

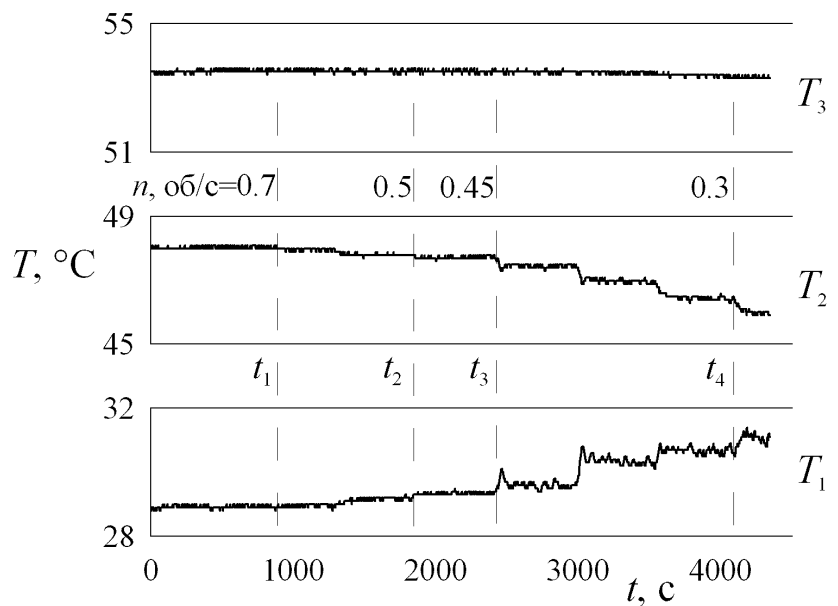


Рис.2. Температурная диаграмма

$\Theta = T_2 - T_1$ . Падение температуры на датчике теплового потока  $\Delta T = T_3 - T_2$  характеризует мощность теплового потока. Средняя температура жидкости в слое определяется  $T_{cp} = (T_1 + T_2)/2$ .

В ходе отдельного опыта (при заданных температурах  $T_1, T_3$ ) частота вращения  $f$  пошагово понижается, начиная с достаточно высокой. При быстром вращении, при понижении  $f$  наблюдаются лишь незначительные изменения температуры ( $t_1, t_2$ ), конвекция в слое отсутствует. С дальнейшим понижением  $f$  при некотором пороговом ее значении наблюдается критическое возрастание теплопереноса ( $t_3$ ), что свидетельствует о повышении теплового потока (при этом  $T_3$  остается постоянной,  $T_2$  понижается,  $\Delta T$  увеличивается). В силу особенностей нашего эксперимента суммарная разность температур остается постоянной, падение на датчике теплового потока сопровождается повышением  $T_1$ , следовательно,  $\Theta$  понижается.

В качестве характеристики теплопереноса вводится число Нуссельта  $Nu = (\Delta T / \Delta T_0)|_{\Theta_0}$ , определяемое как отношение теплового потока через слой к теплому потоку в отсутствие конвекции, при данной  $\Theta$ . В отсутствие конвекции  $\Delta T$  близко к  $\Delta T_0$ . Падение температуры  $\Delta T_0$  определяется при горизонтальном расположении слоя, когда горячий теплообменник находится сверху. Резкое возрастание числа  $Nu$  свидетельствует об изменении конвективных структур и возникновении конвекции в слое.

### Горизонтальный слой ( $\alpha = 90^\circ$ )

Рассматривается классический случай возбуждения конвекции во вращающемся слое жидкости, подогреваемом снизу. На рис.3 приведены кривые теплопереноса в зависимости от скорости вращения. При большой скорости вращения число  $Nu$  близко к единице, т.е. конвекция отсутствует. При понижении  $f$ , при некоторой критической скорости вращения число  $Nu$  возрастает (рис.3 а, символ 1,  $f = 0.5$  об/с). С увеличением разности температур границ слоя порог (критическое значение скорости вращения) смещается в область более высоких значений  $f$ .

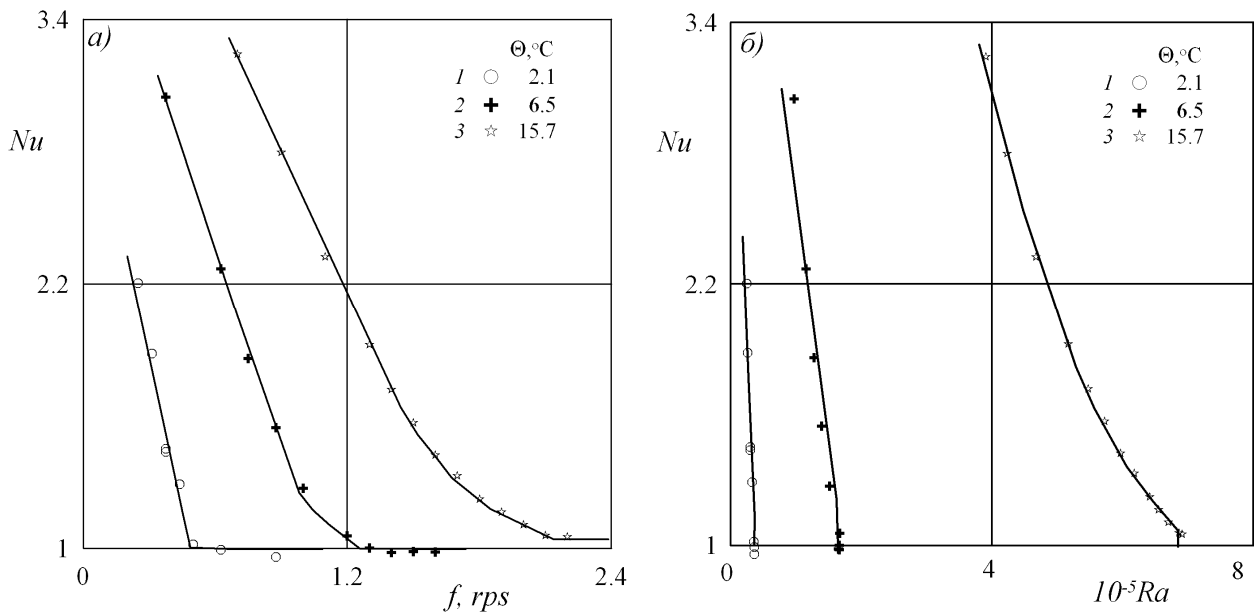


Рис. 3. Теплоперенос в зависимости от скорости вращения (а), от числа  $Ra$  (б)

Для описания конвекции введем гравитационное число Рэлея  $Ra = g\beta\theta h^3/\nu\chi$  [1] (где  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  - толщина слоя,  $\Theta$  - разность температур границ слоя,  $\beta, \nu, \chi$  - коэффициенты объемного расширения, кинематической вязкости и температуропроводности жидкости), а также безразмерную скорость вращения  $\omega = \Omega h^2/\nu$  (где  $\Omega \equiv 2\pi f$  - скорость вращения) в соответствии с [5].

На плоскости  $Ra, Nu$  конвекция и теплоперенос наблюдается при числах  $Ra$  ниже критического, возникновение конвекции в данном случае связано с понижением безразмерной скорости вращения. Как отмечалось во введении, с понижением скорости вращения критическое значение числа  $Ra$  понижается. Заданное нами число Рэлея оказывается в надкритической области.

Возникновение конвекции в горизонтальном вращающемся слое рассматривалось ранее, были получены теоретические [2] и экспериментальные [3] результаты (рис.4, сплошная кривая). Полученные в работе экспериментальные точки (рис.4, символы), находятся в хорошем согласии с теоретической кривой. Экспериментальные точки получены на слоях различной толщины, это обеспечивало изменение скорости вращения в широком диапазоне.

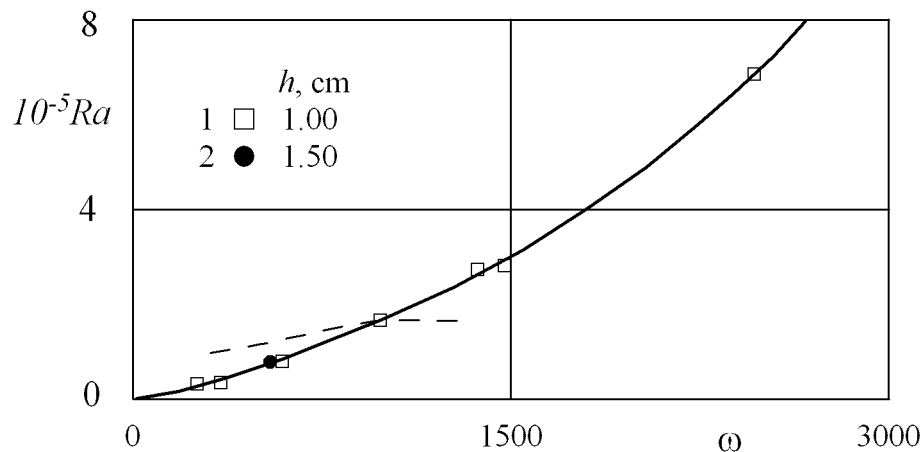


Рис. 4. Монотонная неустойчивость. Зависимость числа  $Ra$  от скорости вращения

Критические точки порога возникновения конвекции на плоскости  $\omega, Ra$  приведены на рис.4., штриховой кривой показано изменение параметров в ходе эксперимента. В эксперименте безразмерная скорость вращения  $\omega$  уменьшается, при некотором критическом значении  $\omega$  возникает конвекция, это связано с тем, что кривая теплопереноса пересекает пороговую кривую показанную сплошной линией. Порог возникновения конвекции в рассмотренном случае хорошо согласуется с теоретическим значением. Обратим внимание, что в надкритической области при дальнейшем понижении скорости вращения, число  $Ra$  несколько понижается. Это связано с тем, что уменьшается перепад температур на границах слоя в результате повышения падения температуры на датчике теплового сопротивления (см. рис.2).

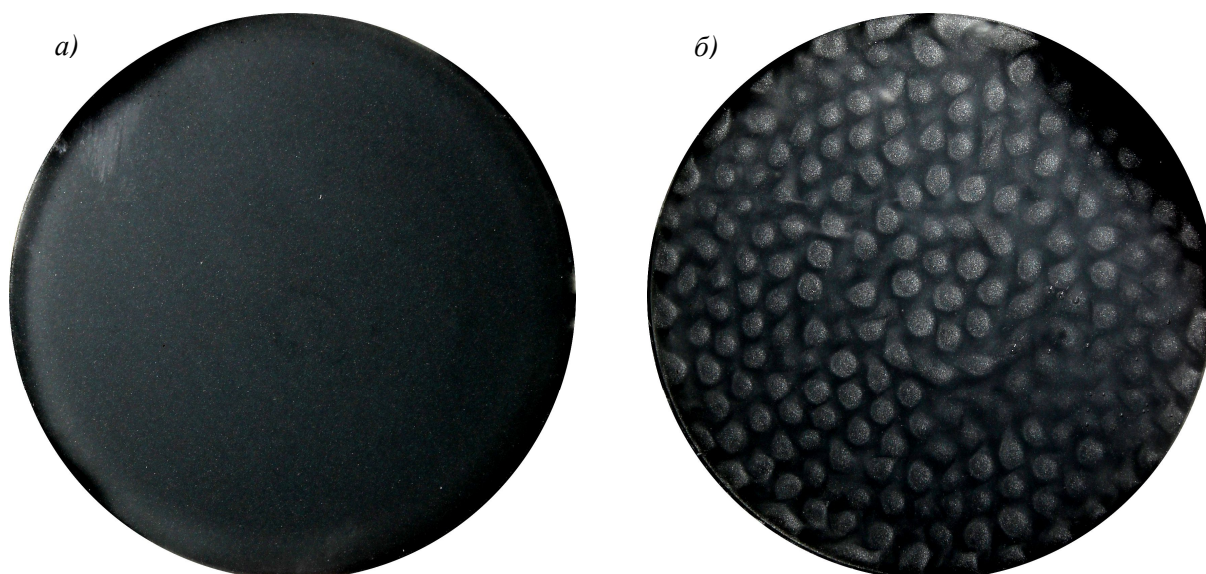


Рис. 5. Конвективные структуры при  $\alpha = 90^\circ$  в докритической  $Ra = 7.8 \cdot 10^4$ ,  $\omega = 900$  (а) и надкритической (б) областях  $Ra = 7.8 \cdot 10^4$ ,  $\omega = 545$

Структуры, возникающие при вращении горизонтального слоя жидкости вокруг вертикальной оси, представлены на рис.5. В допороговой области теплоперенос отсутствует, жидкость находится в состоянии покоя (рис.5 а). За порогом возникновения конвекции на смену равносному состоянию приходит конвекция в виде регулярной ячеистой структуры, конвективные ячейки располагаются в гексагональном порядке (рис.5 б), что согласуется с [2, 3].

#### **Наклонный слой ( $\alpha = 40^\circ$ )**

Отличие методики проведения эксперимента от случая горизонтального расположения слоя является то, что в ходе эксперимента пошагово повышается разность температур границ слоя  $\Theta$ , а скорость вращения, угол наклона и разность температур между двумя теплообменниками поддерживаются неизменными. На рис.6 а представлен размерный график зависимости теплопереноса от разности температур границ слоя. До некоторого значения  $\Theta$  конвекция в слое отсутствует, число  $Nu$  близко к единице. При дальнейшем повышении пороговым образом число  $Nu$  возрастает, что свидетельствует о развитии конвекции в слое. При изменении угла наклона со значения  $\alpha = 90^\circ$  до значения  $\alpha = 40^\circ$  характер теплопереноса не изменяется, меняется лишь критическая разность температур, при которой возникает конвекция. Порог смещается в область больших значений  $\Theta$ .

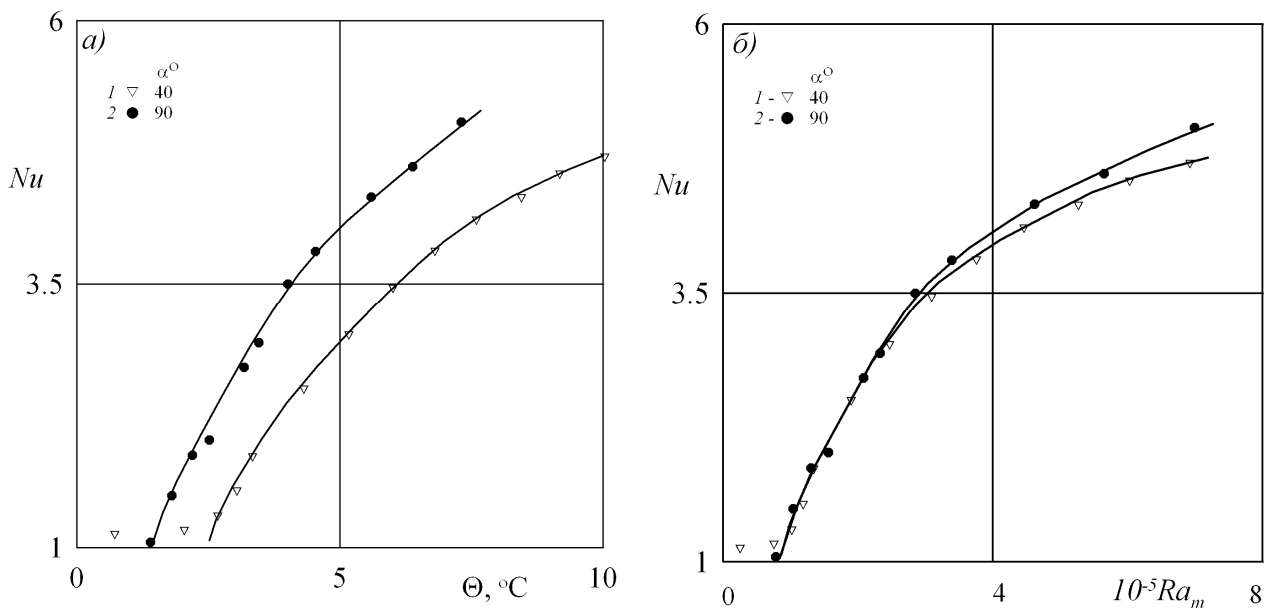


Рис. 6. Теплоперенос в зависимости от разности температур на границе слоя (а) и от числа  $Ra$  (б)

Поле силы тяжести в системе координат связанных с наклонным слоем имеет две компоненты, тангенциальную  $g \cos \alpha$  – которая совершает вращение в системе отсчета полости и нормальную  $g \sin \alpha$  – которая сохраняет постоянное значение. Отметим, что вращающаяся компонента силового поля также может привести к возникновению конвекции за счет «термовибрационного механизма» [5,6]. Введем число Рэлея  $Ra_m = g \beta \theta h^3 / \nu \chi \cdot g \sin \alpha$ , рассчитанное через нормальную компоненту ускорения свободного падения.

На плоскости параметров  $Ra_m, Nu$  (рис.6 б) кривые теплопереноса согласуются, порог остается при одном значении  $Ra_m$ . Это означает, что осциллирующая компонента в этой конвекции не играет никакой роли. Вид структур в надкритичной области остается практически тем же самым (рис.7). Обнаружено, что при отклонении слоя от горизонта на угол  $\alpha$ , конвекция во вращающемся слое, подогреваемом снизу, определяется параметром  $Ra_m$ , рассчитанным через нормальную компоненту.



Рис. 7. Конвективные структуры при  $\alpha = 40^\circ, Ra_m = 18.9 \cdot 10^4, \omega = 580$

### Список литературы

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
2. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Oxford University Press, 1961. 656 p.
3. Rossby Н.Т. A study of Benard convection with and without rotation // J. Fluid Mech. 1969. V.36, No 2. P. 309–335.
4. Козлов В.Г., Рысин К.Ю. Экспериментальное изучение тепловой конвекции во вращающемся наклонном плоском слое // Конвективные течения. Пермь. ПГГПУ. 2013. №.6. С. 32-48.
5. Иванова А.А., Козлов В.Г., Рылова В.В. Тепловая конвекция в плоском слое, вращающемся вокруг горизонтальной оси // Изв. РАН МЖГ. 2003. № 1. С. 12–21.
6. Козлов В.Г. Вибрационная тепловая конвекция во вращающихся полостях // Изв. РАН МЖГ. 2004. № 1. С. 5–14.

#### **Рецензенты:**

Козлов В.Г., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики, ФГБОУ ВПО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет», г. Пермь.

Иванова А.А., д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник Лаборатории Вибрационной Гидромеханики, ФГБОУ ВПО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет», г. Пермь.