

УДК 532.517.3  
PACS 44.25.+f, 44.15.+a

## Развитые нестационарные конвективные течения в вертикальном слое жидкости

А. В. Зюзгин<sup>a</sup>, Д. А. Брацун<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15  
email: zav@psu.ru

<sup>b</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
614990, Пермь, пр. Комсомольский, 29  
email: dmitribratsun@rambler.ru

Исследовались нестационарные надкритические режимы конвекции в вертикальном слое неоднородно нагретой жидкости в случае наиболее опасных тепловых колебательных возмущений. Известно, что такая задача очень требовательна к протяженности слоя, чтобы высоты полости хватало для развития до состояния взаимодействия тепловых волн во встречных потоках жидкости, удовлетворяя таким образом популярному приближению «бесконечности» слоя. В данном эксперименте относительная высота конвективной камеры почти в семь раз превышала минимально необходимую для начала взаимодействия подъемного и опускающего течений. В результате количественно и качественно подтверждены результаты предыдущей работы авторов в части трехмерного численного моделирования и экспериментов со слоем минимально необходимой длины. Помимо этого, показано, что в сверхдлинном слое при значительных надкритичностях реализуются сразу все нестационарные режимы, распределенные по высоте слоя жидкости. Обнаружен ранее не наблюдавшийся хаотический режим движения как результат поэтапного развития неустойчивости.

**Ключевые слова:** конвекция; ламинарный; турбулентный

*Поступила в редакцию 27.07.2016; принята к опубликованию 26.08.2016*

## Advanced nonstationary convective flow in vertical fluid layer

A. V. Zyuzgin<sup>a</sup>, D. A. Bratsun<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Perm State University  
Bukireva St. 15, 614990, Perm  
email: zav@psu.ru

<sup>b</sup> Perm National Research Polytechnic University  
Komsomolskiy St. 29, 614990, Perm  
email: dmitribratsun@rambler.ru

We investigate the nonstationary supercritical regimes of convection in the vertical layer of a non-uniformly heated fluid. It is known that such a problem is very demanding to a height of layer. The height of the cavity should be sufficient for the development of the flow up to the state of the interaction of heat waves in the counter streams. In this way one can fit to a popular approach of “infinite” layer. In this experiment, the relative height of the convective cavity is almost seven times higher than the minimum value required to start the interaction. The obtained results confirm both quantitatively and qualitatively the results of previous work of the authors that contain the three-dimensional numerical simulation and experiments with a layer of a minimum required length. We

demonstrate that in the ultra-long fluid layer one can observe simultaneously all the non-stationary modes developing along the layer at significant supercriticalities. In addition, we report a new regime of convection, previously not observed, which is chaotic and three-dimensional.

**Keywords:** convection; laminar; turbulent

Received 27.07.2016; accepted 26.08.2016

doi: 10.17072/1994-3598-2016-2-49-55

## 1. Введение

Классическая задача о тепловой конвекции жидкости в плоском вертикальном слое между изотермическими пластинами, нагретыми до разной температуры, привлекает внимание исследователей, начиная с пионерских работ Гершуни [1] и Бэтчелора [2]. Как известно, в такой системе возникает подъемно-опускное конвективное течение. В случае если слой имеет бесконечную протяженность, что часто предполагается в теоретических исследованиях как удобная идеализация, основное течение имеет плоскопараллельный характер.

В работах разных авторов было показано, что в такой системе существует два механизма неустойчивости основного течения: монотонная гидродинамическая неустойчивость, проявляющая себя при значениях числа Прандтля  $Pr < 12.5$  [3] и приводящая к появлению стационарных вторичных движений [4, 5], и колебательная неустойчивость [6, 7], связанная с температурными возмущениями и приводящая при  $Pr > 12.5$  к бегущим тепловым волнам [8, 9]. Здесь число Прандтля  $Pr = \nu/\chi$ ;  $\nu$ ,  $\chi$  – коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности жидкости. Ограничимся рассмотрением неустойчивости второго типа. В такой задаче становится важным требование к достаточности высоты рабочей полости для развития встречных тепловых волн до состояния взаимодействия, что и определяет появляющиеся гидродинамические структуры. Оценки показывают, что минимально необходимая относительная высота слоя  $\Delta$ , выраженная в калибрах, имеет значение  $\Delta = 50$ . В работах [10–12] теоретически и экспериментально для слоев жидкости с  $\Delta = 50$  и  $\Delta = 75$  были получены критические значения критериев подобия Рэлея  $Ra$ , соответствующие потере устойчивости последовательно сначала подъемно-опускного течения, а потом и нестационарных надкритических режимов, сменяющих друг друга по мере наращивания перепада температур  $\Theta$  между границами полости. Здесь  $Ra = g_0\beta\Theta h^3/\nu\chi$ ;  $\beta$  – коэффициент теплового расширения;  $h$  – толщина слоя;  $g_0$  – ускорение поля тяжести Земли. Похожая динамика отмечалась и в других конвективных системах, например, [13]. Данная работа является продолжением исследования [12] и имеет целью рассмотреть эволюцию надкритических нестационарных режимов в протяженном ( $\Delta = 3.4 \cdot 10^2$ ) вертикальном слое жидкости. Для удобства сравнения конвективных режимов в слоях различной высоты приведем на рис. 1–4 фотоизображения и схемы структур движений из работы [12].

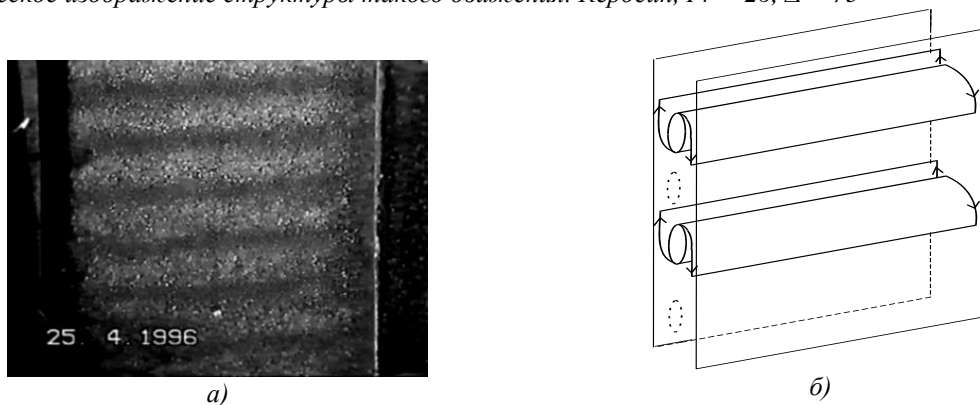
нарных режимов в протяженном ( $\Delta = 3.4 \cdot 10^2$ ) вертикальном слое жидкости. Для удобства сравнения конвективных режимов в слоях различной высоты приведем на рис. 1–4 фотоизображения и схемы структур движений из работы [12].

## 2. Описание экспериментальной установки

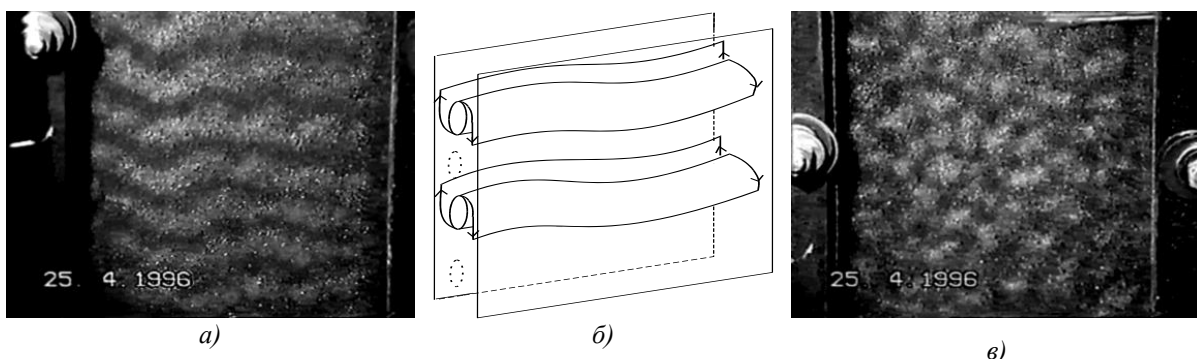
Для исследования сильно развитых режимов конвекции, организованных вдоль всего слоя, была создана конвективная камера с размерами рабочей полости  $1180 \times 150 \times 3.5$  мм<sup>3</sup>, при этом относительная высота слоя составляла  $\Delta = 3.4 \cdot 10^2$ , что почти в 7 раз превышает минимально необходимую относительную высоту слоя жидкости для начала взаимодействия развитых тепловых волн. В качестве рабочей среды использовался керосин  $Pr = 26$ . Один из теплообменников выполнялся из дюралиевой пластины размерами  $1230 \times 200 \times 20$  мм<sup>3</sup>, а другой – из прозрачного силикатного стекла размерами  $1210 \times 180 \times 5$  мм<sup>3</sup>. Разность температур  $\Theta$  между границами слоя жидкости задавалась с помощью цифровых струйных криотермостатов KRIO-VT-01, которые прокачивали термостатированную в диапазоне  $5 \div 60$  °С жидкость по каналам теплообменников. Для проведения визуальных наблюдений за структурами конвективных движений в рабочую жидкость добавлялись светорассеивающие частицы алюминиевой пудры. Такие частицы легко увлекаются потоком и, имея сильно зависящий от ориентации коэффициент отражения, позволяют наблюдать как картину движения в целом, так и траектории отдельных частиц. Наблюдения проводились при рассеянном освещении либо с использованием светового ножа. Визуализированные такими методами конвективные структуры фиксировались фото- или видеокамерой. Зона захвата изображения составляла всю полость или последовательные по высоте прямоугольные фрагменты. Для повышения контрастности изображения граничащая с рабочей полостью стенка второго, металлического теплообменника окрашивалась в черный цвет. Для определения разности температур  $\Theta$  на границах полости использовалась дифференциальная медь-константановая термопара со спаями диаметром 0.02 см, которые размещались в стенках теплообменников на половине высоты слоя.



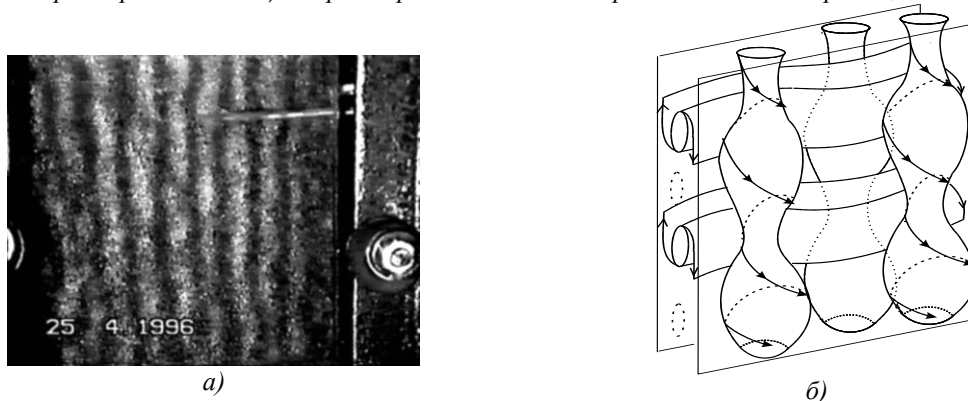
**Рис. 1.** Подъемно-опускное течение, существующее в диапазоне  $Ra < 5.1 \cdot 10^4$ : а – фотография; б – схематическое изображение структуры такого движения. Керосин,  $Pr = 26, \Delta = 75$



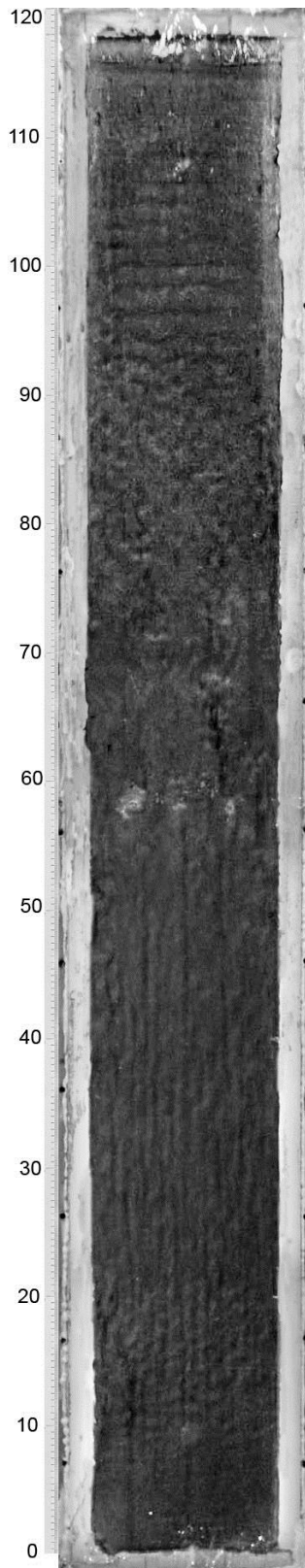
**Рис. 2.** Двумерный нестационарный режим конвекции, существующий в диапазоне  $5.1 \cdot 10^4 < Ra < 5.7 \cdot 10^4$ : а – фотография; б – схематическое изображение его структуры в виде системы пульсирующих в противофазе горизонтальных вихрей.. Керосин,  $Pr = 26, \Delta = 75$



**Рис. 3.** Трехмерный нестационарный режим конвекции, существующий в диапазоне  $5.7 \cdot 10^4 < Ra < 6.9 \cdot 10^4$ : а – фотография; б – схематическое изображение структуры; в – изображение развитого трехмерного нестационарного режима течения при  $Ra = 6.7 \cdot 10^4$ . Керосин,  $Pr = 26, \Delta = 75$



**Рис. 4.** Трехмерный нестационарный режим конвекции с вертикальными спиральными структурами, существующий в диапазоне  $Ra > 6.9 \cdot 10^4$ : а – фотография; б – схематическое изображение структуры такого режима. Керосин,  $Pr = 26, \Delta = 75$

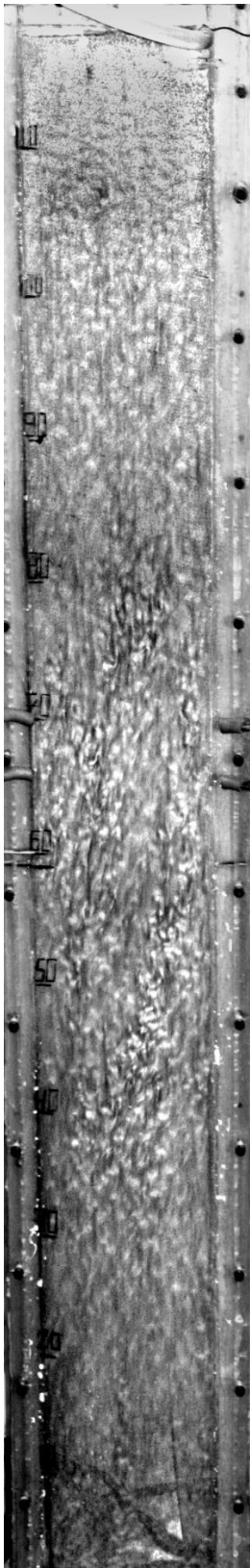


**Рис. 5.** Фотографическое изображение вертикального слоя жидкости с нестационарными развитыми режимами конвекции, расположенными последовательно вдоль полости. Керосин,  $Pr = 26$ ,  $\Delta = 3.4 \cdot 10^2$ ,  $Ra = 7.9 \cdot 10^4$

Известно, что при подъемно-опускном течении существует линейный профиль температуры поперек слоя. За развитие неустойчивости отвечают тепловые возмущения волнового типа. Пульсации температуры внизу, посередине и вверху слоя жидкости измерялись гребёнкой из трех дифференциальных медь-константовых термопар с диаметром и длиной спаев 0.01 см, выставленных на четверть толщины слоя, с общим спаем, располагающимся в дюралюминиевой пластине, в центральной её части, на глубине 1 см. Нижний и верхний измерительные спаи находились на расстоянии 10 см от нижней и верхней границы слоя соответственно и на расстоянии 98 см друг от друга. Это давало возможность измерять неоднородность температуры слоя жидкости в вертикальном направлении, возникающую в силу замкнутости полости. Во всех экспериментальных реализациях горизонтальный градиент температуры на три и более порядка превышал вертикальный. Средний спай термопары располагался на пересечении центральных вертикального и горизонтального сечений кюветы. В качестве устройства сбора данных использовался прибор «Термодат»–ТЗ8Б1. Максимально использовавшаяся чувствительность измерительного комплекса составляла 0.003 К, а максимальная частота измерений – 18 Гц. Уровень шума измерительного тракта не превышал  $10^{-4}$  К.

### 3. Результаты

Рассмотрим теперь эволюцию конвективных режимов в слое с относительной длиной  $\Delta = 3.4 \cdot 10^2$ . После потери устойчивости подъемно-опускным течением в полости реализовывались режимы конвекции, подобные по структуре (см. рис. 1–4) и пространственно-временным характеристикам вышеописанным. Наиболее интересные результаты получены в области высоких надкритических значений числа Рэлея. Поскольку длина слоя почти в 7 раз превышала минимально необходимую для развития возмущений во встречных потоках до состояния взаимодействия, то вдоль слоя можно было наблюдать сразу всю последовательность описанных выше режимов. На рис. 5 представлено фотографическое изображение конвективных режимов при  $Ra = 7.9 \cdot 10^4$ . Рассмотрим эволюцию структуры течения в зависимости от вертикальной координаты  $L$ , отсчитываемой от дна слоя, учитывая, что нисходящий поток ближе к наблюдателю. В диапазоне высот от 120 до 110 см видно невозмущенное плоскопараллельное течение (см. рис. 1), поскольку в опускном потоке возмущения еще не развиты. В диапазоне  $L = (110 \div 95)$  см существует двумерный колебательный режим (см. рис. 2).



**Рис. 6.** Фотографическое изображение вертикального слоя жидкости с нестационарными развитыми режимами конвекции, расположенными последовательно вдоль полости. Керосин,  $Pr = 26$ ,  $\Delta = 3.4 \cdot 10^2$ ,  $Ra = 1.1 \cdot 10^5$

На высотах от 95 до 60 см в структуре нарастает трехмерная зигзаговая неустойчивость подобно режимам, изображенным на рис. 3. Вертикальные струи (см. рис. 4) развиваются при  $L = (60 \div 20)$  см. На участке высот слоя от 20 до 0 см структура проходит обратную эволюцию, поскольку вблизи дна в горячем восходящем потоке возмущения слабо развиты. Рассмотрим теперь новый режим конвекции (рис. 6), существующий в средней области высот слоя ( $70 \div 30$ ) см при увеличении числа Рэлея до  $Ra = 1.1 \cdot 10^5$ . На рис. 7 приведено изображение срединного фрагмента вертикального слоя с таким режимом. Из рисунка видно, что упорядоченная структура из вертикальных струй разрушается, и далее течение представляет собой хаотически перемещающиеся по нисходящему потоку выплески жидкости из глубины слоя (светлые пятна на снимке). Заметим, что спектр сигнала центрального спая измерительной термопары содержит выделенную частоту  $\sim 1.1$  Гц, хотя течение не упорядочено. По-видимому, это связано с бегущей в потоке тепловой волной.



**Рис. 7.** Фотографическое изображение центрального по высоте фрагмента слоя с хаотизированным конвективным режимом при  $Ra = 1.1 \cdot 10^5$ . Керосин,  $Pr = 26$ ,  $\Delta = 3.4 \cdot 10^2$

#### 4. Заключение

Исследованы надкритические движения, возникающие в результате потери устойчивости подъемно-опускного течения в плоском вертикальном слое жидкости, обогреваемом с широкой боковой стороны. Увеличением относительной высоты слоя реализована ситуация, когда температурные волны, бегущие во встречных потоках, развиваются до состояния взаимодействия, образуя при этом стоячую волну, состоящую из системы пульсирующих в противофазе продольных горизонтальных вихрей, и имеют значительный запас по высоте полости для продолжения движения и развития взаимодействия. Воспроизведены ранее наблюдавшиеся в слое жидкости минимально необходимой высоты нестационарные режимы в виде зигзаговой неустойчивости таких вихрей и распада их на слабо упорядоченную «шахматную» структуру, объединение элементов такой структуры с ростом надкритичности и их выстраивание подъемно-опускным течением в вертикальные вихревые струи. С дальнейшим ростом надкритичности обнаружено разрушение этих струй, связанное с хаотизацией течения. Значительная высота слоя позволяла регистрировать все надкритические режимы конвекции, последовательно расположенные вдоль рабочей полости.

Таким образом, получен поэтапный переход к хаосу вдоль слоя жидкости через последовательность колебательных неустойчивостей при сильном взаимодействии встречных потоков с тепловыми волнами.

Часть работы выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Пермского края С-26/004.04.

#### Список литературы

1. Гершуни Г. З. Об устойчивости плоского конвективного течения жидкости // Журнал технической физики. 1953. Т. 23. № 10. С. 1838–1844.
2. Batchelor G. K. Heat transfer by free convection across a closed cavity between vertical boundaries at different temperatures // Quarterly of Applied Mathematics. 1954. Vol. 12. № 3. P. 209–233.
3. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Непомнящий А. А. Устойчивость конвективных течений. М.: Наука, 1989. 320 с.
4. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Тарунин Е. Л. Вторичные стационарные конвективные движения в плоском вертикальном слое жидкости // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1968. № 5. С. 130–136.
5. Тарунин Е. Л. О вторичных стационарных конвективных течениях в вертикальном слое //

Гидродинамика. Пермь: Изд-во Перм. пед. ин-та, 1972. Вып. 4. С. 3–13.

6. Бирих Р. В., Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Рудаков Р. Н. О колебательной неустойчивости плоскопараллельного конвективного движения в вертикальном канале // Прикладная математика и механика. 1972. Т. 36. Вып. 4. С. 745–748.
7. Korpela S. A., Gozum D., Vaxi C. B. On the stability of the conduction regime of natural convection in a vertical slot // International Journal Heat and Mass Transfer. 1973. № 16. P. 1683–1690.
8. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Сорокин Л. Е., Тарунин Е. Л. Вторичные колебательные конвективные движения в плоском вертикальном слое жидкости // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1974. № 1. С. 94–101.
9. Сорокин Л. Е. О нелинейном конвективном движении в плоском вертикальном слое жидкости в области колебательной неустойчивости // Гидродинамика. Пермь: Изд-во Перм. пед. ин-та, 1974. Вып. 5. С. 127–137.
10. Зюзгин А. В., Брауун Д. А., Путин Г. Ф. Надкритические нестационарные движения в плоском вертикальном слое жидкости // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 1997. Вып. 2. С. 59–76.
11. Брауун Д. А., Зюзгин А. В. Метод восстановления фазового портрета при экспериментальном исследовании тепловой конвекции в плоском вертикальном слое // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 1998. Вып. 4. С. 148–152.
12. Bratsun D. A., Zyuzgin A. V., Putin G. F. Nonlinear dynamics and pattern formation in a vertical fluid layer heated from the side // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2003. Vol. 24. № 6. P. 835–852.
13. Бабушкин И. А., Демин В. А. Экспериментальное и теоретическое исследование переходных конвективных режимов в ячейке Хеле-Шоу // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2006. № 3. С. 3–10.

#### References

1. Gershuni G. Z. Ob ustoichivosti ploskogo konvektivnogo techeniia zhidkosti (On stability of flat convective flow). *Technical Physics*, 1953, Vol. 23, no. 10, pp. 1838–1844 (In Russian).
2. Batchelor G. K. Heat transfer by free convection across a closed cavity between vertical boundaries at different temperatures. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1954, Vol. 12, no. 3, pp. 209–233.

3. Gershuni G. Z., Zhukhovitskii E. M., Nepomniashchii A. A. *Ustoichivost' konvektivnykh techenii* (Stability of convective flows). M.: Nauka, 1989, 320 p (In Russian).
4. Gershuni G. Z., Zhukhovitskii E. M., Tarunin E. L. Secondary stationary convective motions in a plane vertical fluid layer. *Fluid Dynamics*, 1968, vol. 3, no. 5, pp. 86–90.
5. Tarunin E. L. O vtorichnykh statsionarnykh konvektivnykh techeniiakh v vertikal'nom sloe (On secondary stationary convective flows in vertical layer). *Gidrodinamika*, Perm': Perm. ped. in-t, 1972, no. 4, pp. 3–13 (In Russian).
6. Birikh R. V., Gershuni G. Z., Zhukhovitskii E. M., Rudakov R. N. On oscillatory instability of plane-parallel convective motion in a vertical channel. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1972, Vol. 36, no. 4, pp. 707–710.
7. Korpela S. A., Gozum D., Baxi C. B. On the stability of the conduction regime of natural convection in a vertical slot. *International Journal Heat and Mass Transfer*, 1973, no. 16, pp. 1683–1690.
8. Gershuni G. Z., Zhukhovitskii E. M., Sorokin L. E., Tarunin E. L. Secondary vibrational convective motions in a flat vertical layer of liquid. *Fluid Dynamics*, 1974, vol. 9, no. 1, pp. 72–77.
9. Sorokin L. E. O nelineinom konvektivnom dvizhenii v ploskom vertikal'nom sloe zhidkosti v oblasti kolebatel'noi neustoichivosti (On nonlinear convective motion in plane vertical fluid layer in oscillatory instability area). *Gidrodinamika*, Perm': Perm. ped. in-t, 1974, no. 5, pp. 127–137 (In Russian).
10. Zyuzgin A. V., Bratsun D. A., Putin G. F. Nadkriticheskie nestatsionarnye dvizheniia v ploskom vertikal'nom sloe zhidkosti (Supercritical nonstationary motions in a plane vertical fluid layer). *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 1997, no. 2, pp. 59–76 (In Russian).
11. Bratsun D. A., Zyuzgin A. V. Method of phase portrait reconstruction and the experimental study of the thermal convection in a plane vertical layer. *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 1998, no. 4, pp. 148–152 (In Russian).
12. Bratsun D. A., Zyuzgin A. V., Putin G. F. Nonlinear dynamics and pattern formation in a vertical fluid layer heated from the side. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2003, Vol. 24, no 6, pp. 835–852.
13. Babushkin I. A., Demin V. A. Experimental and theoretical investigation of transient convective regimes in a Hele-Shaw cell. *Fluid Dynamics*, 2006, Vol. 41, no. 3, pp. 323–329.

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Зюзгин А. В., Брацун Д. А. Развитые нестационарные конвективные течения в вертикальном слое жидкости // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2016. № 2 (33). С. 49–55. doi: 10.17072/1994-3598-2016-2-49-55

**Please cite this article in English as:**

Zyuzgin A. V., Bratsun D. A. Advanced nonstationary convective flow in vertical fluid layer. *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 2016, no. 2 (33), pp. 49–55. doi: 10.17072/1994-3598-2016-2-49-55