

3. *Seay G. E., Seely L. B., Fowler R. G.* Production of high ion densities in helium by means of high explosives. *J. Appl. Phys.*, 1961, vol. 32, No. 11, pp. 2439–2447.
4. *Freiwald D. A.* Strong shock propagation through decreasing density. *J. Fluid Mech.*, 1972, vol. 54, No. 2, p. 297.
5. *Станюкович К. П.* Неуставившиеся движения сплошной среды. М., «Наука», 1971.
6. *Jones H., Miller A. R.* The detonation of solid explosives. *Proc. Roy. Soc. (London)*, 1948, Ser. A, vol. 194, p. 480.
7. *Deal W. E.* Measurement of the reflected shock hughoniot and isentrope for explosive reaction products. *Phys. fluids*, 1958, vol. 1, No. 6, p. 523.
8. *Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Телегин Г. С.* Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ. ПМТФ, 1969, № 4, стр. 127–132.
9. *Кузнецов Н. М., Шведов К. К.* Уравнение состояния продуктов детонации гексогена. *Физика горения и взрыва*, 1966, № 4, стр. 85–96.
10. *Кузнецов Н. М., Шведов К. К.* Изэнтропическое расширение продуктов детонации гексогена. *Физика горения и взрыва*, 1967, № 2.
11. *Курант Г., Фридрихс К.* Сверхзвуковое течение и ударные волны. М., Изд-во иностр. лит., 1950.
12. *Козлов Г., Стуницкий Е. Л.* Расчет состояния аргона за падающей ударной волной в диапазоне чисел Маха от 20 до 50 с учетом возбуждения, многократной ионизации и кулоновского взаимодействия. ПМТФ, 1968, № 3.

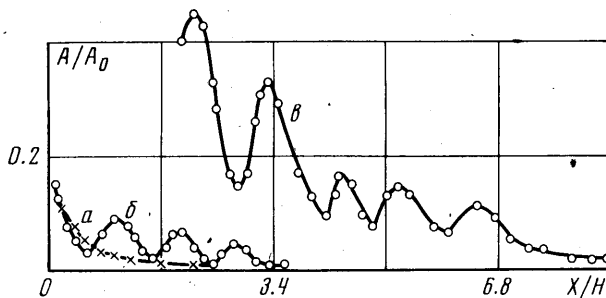
УДК 536.25:532.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКОНВЕКТИВНЫХ ВОЛН

Ю. И. БАРКОВ, Б. М. БЕРКОВСКИЙ, В. Е. ФЕРТМАН

(Минск)

При периодическом процессе теплообмена на границах твердых тел, жидкостей и газов в них распространяются обусловленные теплопроводностью температурные колебания. Эти колебания в изотермической вязкой жидкости быстро затухают: на одной длине волны их амплитуда уменьшается в $e^{2\pi} \approx 540$ раз [1]. В реальных условиях при существовании температурного и гравитационного полей возникающее конвективное движение должно существенно влиять на процесс распространения тем-

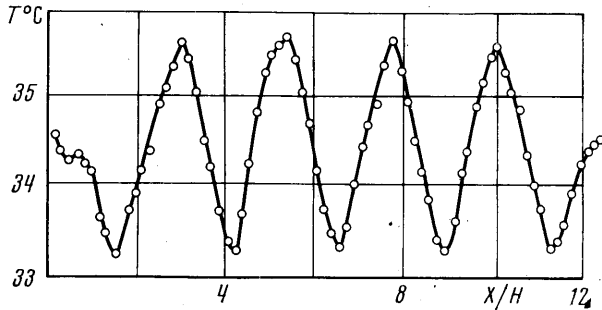


Фиг. 1

пературных колебаний. В работах [2, 3] исследовалась обратная задача: влияние на конвективную устойчивость слоя температурных колебаний, распространяющихся в глубь жидкости от границы, на которой периодически меняется температура. Задача о распространении слабозатухающих термоконвективных волн в вязкой теплопроводящей несжимаемой жидкости впервые была рассмотрена в [4]. Распространение термоконвективных волн в горизонтальном слое жидкости со свободными границами до и после потери устойчивости равновесия анализируется в [5].

В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментального исследования распространения температурных возмущений при естественной развитой конвекции в горизонтальном слое воздуха, равномерно подогреваемом снизу.

Эксперименты проводились на горизонтальном слое воздуха ($150 \times 50 \times 11.7 \text{ мм}^3$), ограниченном твердыми стенками. Периодическая модуляция температуры одной из вертикальных границ создавалась прокачиванием термостатированной воды через плоский канал в стенке. Температура воды изменялась по приближенно-синусоидальному закону вследствие подключения электронагревателя термостата к сети по специально разработанной схеме. Система измерений включала одновременное использование 15 температурных датчиков (медь-константановые термопары) и фотосъемку структуры конвективного движения через верхнюю стенку из плексигласа.



Фиг. 2

Изучен диапазон частот модуляции температуры боковой поверхности $\omega = 10^{-2} \div 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$. Температурный режим горизонтального слоя воздуха изменялся от изотермического до соответствующего критерию Рэлея $Ra = 3.4 \cdot 10^3$.

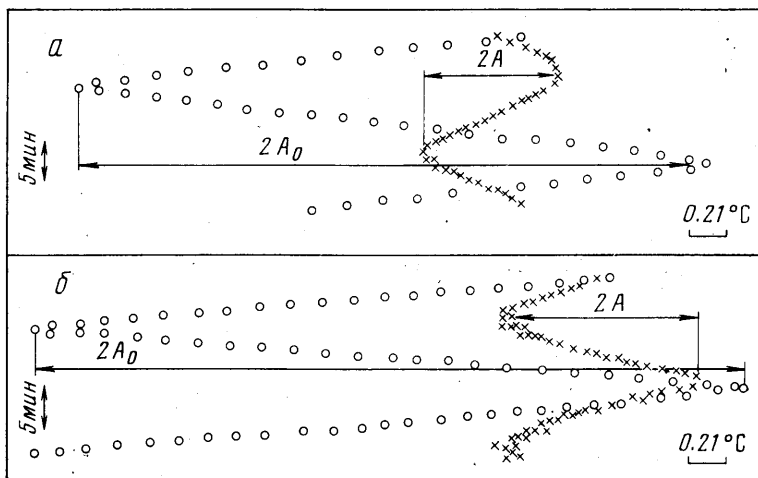
На фиг. 1 представлены результаты измерений амплитуды температурных колебаний по длине слоя A , отнесенной к амплитуде колебаний температуры на боковой границе A_0 , для $\omega = 1.26 \cdot 10^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Кривая a характеризует экспоненциальное затухание колебаний температуры по длине изотермического слоя. Нагрев нижней границы слоя приводит к изменению формы амплитудной кривой. В зависимости от величины вертикального градиента температуры по длине слоя регистрировалось определенное число максимумов и минимумов амплитуд температурных колебаний. При критерии Рэлея $Ra = 1200$ возникает одна пара экстремальных значений амплитуд колебаний, при $Ra = 1500$ на амплитудной кривой наблюдается два максимума и два минимума. Кривая b на фиг. 1 характеризует распределение амплитуд температурных колебаний для $Ra = 1680$.

Анализ визуальных наблюдений за структурой конвективного движения позволил объяснить отклонения от экспоненциального характера затухания возмущений температуры в неизотермическом слое. При периодической модуляции температуры на вертикальной границе вдоль последней формируется валообразное течение. По мере увеличения числа Рэлея число конвективных валиков увеличивается до трех ($Ra = 1680$). Направление вращения в валиках изменяется с частотой, равной частоте модуляции температуры. Максимумам на амплитудной кривой соответствуют наибольшие изменения вертикальной составляющей скорости валикообразного движения. Таким образом, максимальные амплитуды температурных колебаний локализуются на границе соседних конвективных валиков.

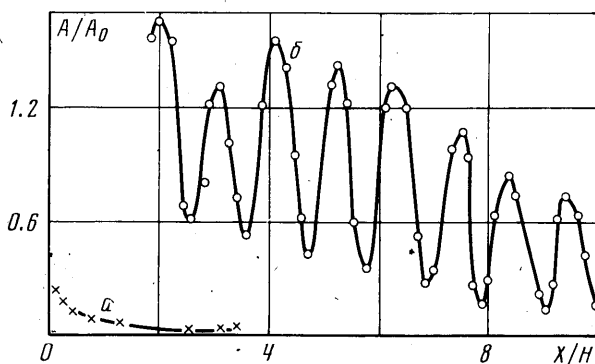
Кривая c на фиг. 1 описывает наиболее характерный результат экспериментов по обнаружению термоконвективных волн: увеличение вертикального перепада температуры до образования валиковой структуры конвективного движения приводит к порогаобразному возрастанию глубины проникновения. Указанный эффект обусловлен тем, что синхронно с колебаниями температуры на стенке периодически изменяется количество валиков в слое, что приводит к колебательному движению в направлении, перпендикулярном их осям.

Перемещение конвективных структур сопровождается деформацией стационарного распределения температуры. На фиг. 2 представлено типичное распределение температуры по длине слоя. В результате взаимодействия температурных и поперечных колебаний наблюдается слабое затухание распространяющейся термоконвективной волны. Амплитудная характеристика термоконвективной волны представляет собой попеременное чередование максимумов и минимумов. На фиг. 3 представлен пример одновременной записи модулируемой температуры стенки на половине высоты и температурных колебаний в двух характерных точках слоя, фазы которых отличаются на π ($a - x = 64 \text{ мм}$, $b - x = 76 \text{ мм}$).

Многочисленные эксперименты позволили не только уточнить характерные условия распространения, но и установить возможность усиления термоконвективных



Фиг. 3



Фиг. 4

волн. Обнаружено, что уменьшение частоты колебаний при фиксированном перепаде температур в слое существенно увеличивает максимальные амплитуды термоконвективной волны. При $\omega = 8 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ ближайшие к вертикальной границе максимумы амплитудной характеристики A_{\max} достигали величины амплитуды температурных колебаний на стенке A_0 , а при $\omega = 2 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ наблюдалось $A_{\max}/A_0 \approx 1.6$ (фиг. 4, кривая б). Кривая а на фиг. 4 соответствует затуханию колебаний температуры в изотермическом слое.

Проведенные измерения показали, что частота $\omega = 2 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ является предельной, т. е. дальнейшее ее уменьшение не влияет на характеристики термоконвективной волны. Скорость распространения термоконвективных волн в изученных условиях составляла $\approx 1 \text{ см/мин}$.

Поступила 17 I 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967.
2. Сальников И. Е. К вопросу о протекании конвекции при распространении температурных волн в жидкостях. Тр. Горьковск. ин-та инж. водн. транспорта, 1958, № 15.
3. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. О конвективной неустойчивости теплового скин-слоя. ПМТФ, 1965, № 6.
4. Лыков А. В., Берковский Б. М. Слабозатухающие поперечные и тепловые волны в жидкости. Докл. АН БССР, 1969, т. 13, № 4.
5. Берковский Б. М., Синицын А. К. Термоконвективные волны в слое со свободными границами. Инж.-физ. ж., 1974, т. 26, № 1.