

тальное исследование дробления сферических объемов упруговязких полимерных жидкостей при взрыве в центре с целью проверки второго соотношения (3.1).

Авторы признательны В. М. Ентову за полезное обсуждение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Де Женн П. Идеи скейлинга в физике полимеров.— М.: Мир, 1982.
2. Стебновский С. В. Развитие начальных возмущений внешней границы расширяющегося газожидкостного кольца // ПМТФ.— 1982.— № 5.
3. Стебновский С. В., Чернобаев Н. Н. Энергетический порог импульсного разрушения жидкого объема // ПМТФ.— 1986.— № 1.
4. Стебновский С. В., Чернобаев Н. Н. Влияние динамики нагружения жидкого объема на механизм его разрушения // ПМТФ.— 1987.— № 5.
5. Ентов В. М., Султанов Ф. М., Ярин А. Л. Распад жидких пленок под действием перепада давления окружающего газа // ДАН СССР.— 1985.— Т. 284, № 5.
6. Ентов В. М., Султанов Ф. М., Ярин А. Л. Распад жидких пленок под действием перепада давления окружающего газа // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1986.— № 3.
7. Султанов Ф. М., Ярин А. Л. О рэлей-тейлоровской неустойчивости раздуваемых полимерных пленок // ПМТФ.— 1988.— № 3.
8. Перегрин Д. Очарование гидромеханики // Современная гидродинамика. Успехи и проблемы.— М.: Мир, 1984.
9. Колмогоров А. Н. О дроблении капель в турбулентном потоке // ДАН СССР.— 1949.— Т. 66, № 5.
10. Stauffer D. Scaling theory of percolation clusters // Phys. Repts.— 1979.— V. 54, N 1.
11. Flammang A. Percolation cluster sizes and perimeters in three dimensions // Z. Physik. B.— 1977.— V. 28, N 1.
12. Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Новиков Б. В. и др. Распыливание жидкостей.— М.: Машиностроение, 1977.
13. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели.— М.: Наука, 1973.
14. Кузнецов В. М. Математические модели взрывного дела.— Новосибирск: Наука, 1977.
15. Лышевский А. С. Закономерности дробления жидкостей механическими форсунками давления.— Новочеркасск: Новочеркас. политехн. ин-т, 1961.
16. Stauffer D. Introduction to percolation theory.— London: Taylor & Francis, 1985.
17. Ентов В. М., Ярин А. Л. Динамика свободных струй и пленок вязких и реологически сложных жидкостей // Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа/ВИНИТИ.— 1984.— Т. 18.
18. Taylor G. The dynamics of thin sheets of fluid. II. Waves on fluid sheets. III. Disintegration of fluid sheets // Proc. Roy. Soc. London.— 1959.— V. A253, N 1274.
19. Clark C. J., Dombrowski N. On the formation of drops from the rims of fan spray sheets // J. Aerosol Sci.— 1972.— V. 3, N 3.
20. Ентов В. М., Рожков А. Н., Фейзханов У. Ф. и др. О динамике пленок жидкости. Плоские пленки со свободными ребрами // ПМТФ.— 1986.— № 1.
21. Ентов В. М., Рожков А. Н., Фейзханов У. Ф. и др. Распространение малых изгибных возмущений по плоским пленкам воды и растворов полимеров // ПМТФ.— 1986.— № 4.
22. Ярин А. Л. Изгибные возмущения свободных струй Максвелла и Дои — Эдвардса // ПМТФ.— 1986.— № 6.
23. Ентов В. М., Кордонский В. Н., Прохоров И. В. и др. Об интенсивном одноосном растяжении растворов полимеров умеренной концентрации.— Минск, 1987.— (Препр./ИТМО АН БССР и ИПМ АН СССР; № 7).

г. Москва

Поступила 20/V 1988 г.,  
в окончательном варианте — 13/IV 1989 г.

УДК 532.536

Ю. Б. Лебедев, В. М. Фомичёв

### УСТОЙЧИВОСТЬ ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ГАЗА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ НАГРЕВАНИИ И ОХЛАЖДЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ

Исследование проблемы управления переходом ламинарного пограничного слоя в турбулентный представляет значительный научный и практический интерес [1]. До недавнего времени считалось, что для газов охлаждение поверхности вызывает

© 1990 Лебедев Ю. Б., Фомичёв В. М.

повышение устойчивости пограничного слоя и затягивание перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный. Нагревание же поверхности всегда приводило к противоположному эффекту (см., например, [2]). Однако, как показано в [3, 5], эти выводы справедливы только для постоянной температуры поверхности. При неравномерном ее распределении нагревание с отрицательным градиентом температуры может приводить к резкому повышению устойчивости, сужению области неустойчивых частот, а охлаждение поверхности с положительным градиентом температуры оказывает противоположное влияние на характеристики устойчивости. «Аномальный» эффект нагревания поверхности на устойчивость пограничного слоя подтвержден экспериментально [6]. Наряду с давно известными способами ламинаризации — отсосом пограничного слоя и охлаждением поверхности — показана принципиальная возможность нового способа — неравномерного нагрева поверхности. Кроме того, даже тогда, когда «аномальное» влияние температуры поверхности не обнаруживалось, ее градиент всегда существенно влиял на характеристики устойчивости [7].

В настоящей работе рассматривается влияние одновременного нагрева — охлаждения поверхности на устойчивость пограничного слоя газа. Такой случай ранее не исследовался, но, как показал предварительный анализ, а также приведенные ниже результаты численных расчетов, он является эффективным способом повышения устойчивости, если участок обогрева предшествует участку охлаждения, а градиент температуры поверхности отрицательный. Этот комбинированный способ ламинаризации может оказаться перспективным и экономически более выгодным, чем описанные ранее, в частности, потому, что осуществление нагрева — охлаждения реализуется за счет организации термодинамического цикла, подобно тому как это имеет место в холодильных установках.

Исследуется устойчивость дозвукового ламинарного пограничного слоя газа на плоской пластине, температура поверхности которой — заданная функция продольной координаты  $\psi_w = 1 + A(a + \xi^n)$  ( $\xi = x/L$ ,  $L$  — длина пластины,  $\psi_w = T_w/T_e$ , индекс  $w$  отвечает поверхности,  $e$  — внешнему потоку). Исследование сводится к нахождению спектра линейной краевой задачи

$$(1) \quad (L_1 + L_2)\varphi = 0; \quad \varphi = 0, \quad d\varphi/d\eta = 0, \quad \eta = 0; \\ \varphi = 0, \quad d\varphi/d\eta = 0, \quad \eta = \infty.$$

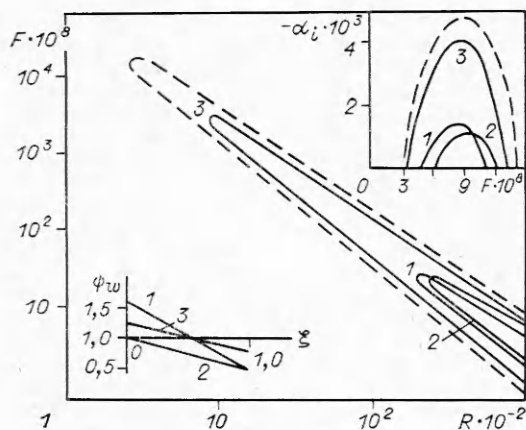
Здесь  $\varphi(\eta)$  — амплитуда функции тока;  $L_1, L_2$  — дифференциальные операторы (см. [3, 5]); дифференцирование производится по безразмерной

координате  $\eta = \left(\frac{u_e}{xv_e}\right)^{1/2} \int_0^y \frac{\rho}{\rho_e} dy$ ;  $u_e$  — скорость потока;  $\rho$  — плотность;  $\nu$  —

кинематическая вязкость. Оператор  $L_1$  имеет качественный вид оператора Орра — Зоммерфельда, с тем лишь отличием, что при ряде членов есть текущий температурный фактор и безразмерный коэффициент вязкости. У оператора  $L_2$  более громоздкий вид, он содержит в качестве коэффициентов выражения, в которые входят распределения скорости, температуры и физических свойств газа. Для нахождения коэффициентов необходимо знать решение неавтономного стационарного температурного пограничного слоя с соответствующими краевыми условиями (см. [5]). Для численного решения уравнений использовался метод Келлера, краевая задача (1) решалась методом ортогонализации.

Результаты расчетов приведены на рисунке, где изображены кривые нейтральной устойчивости на плоскости параметров: безразмерной частоты  $F = \omega v_e / u_e^2$  и модифицированного числа Рейнольдса  $R = (u_e x / \nu_e)^{1/2}$ , а также коэффициенты пространственного нарастания собственных возмущений  $-\alpha_i$  для фиксированного  $R = 7 \cdot 10^4$ . Кривые 1, 3 отвечают неравномерному нагреву — охлаждению поверхности при  $a = -1, n = 1$  для различной глубины нагрева — охлаждения:  $A = -0,5$  (1);  $-0,2$  (3), кривые 2 — неравномерному охлаждению поверхности при  $A = -0,5, a = 0, n = 1$ ; штриховые линии — изотермические условия. В целях наглядности в левом нижнем углу приведен графический вид распределений температуры поверхности. Нумерация соответствует принятой для характеристик устойчивости.

Сопоставляя кривые 1, 3 с изотермическим случаем, видим, что одновременный нагрев — охлаждение поверхности приводит к резкому повы-



менее интенсивном нагреве — охлаждении  $A = -0,2$  (кривые 2), естественно, стабилизация не столь велика, но все же очень значительна ( $Re_{\min}$  возрастает приблизительно в 8 раз).

Интересно сопоставление первого случая с третьим, отвечающим охлаждению всей поверхности при  $x = L$ . Видно, что характеристики устойчивости почти одинаковы.

Таким образом, показано, что одновременный нагрев — охлаждение поверхности является эффективным способом повышения устойчивости ламинарного пограничного слоя. Ее степень в значительной мере зависит от глубины нагрева — охлаждения, в чем можно убедиться, сопоставляя результаты расчетов для первого и второго случаев.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Laminar-turbulent transition: IUTAM Symp., Novosibirsk, USSR, 1984.— Berlin: Springer, 1984.
2. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое.— Новосибирск: Наука, 1982.
3. Струминский В. В., Лебедев Ю. Б., Фомичев В. М. Влияние градиента температуры вдоль поверхности на протяженность ламинарного пограничного слоя газа // ДАН СССР.— 1986.— Т. 289, № 4.
4. Казаков А. В., Коган М. Н., Купарев В. А. О повышении устойчивости дозвукового пограничного слоя при нагреве поверхности вблизи передней кромки // ДАН СССР.— 1985.— Т. 283, № 2.
5. Лебедев Ю. Б., Фомичев В. М. Влияние протяженности обогреваемого участка поверхности на характеристики устойчивости ламинарного пограничного слоя газа // Изв. СО АН СССР.— 1988.— № 21. Сер. техн. наук.— Вып. 6.
6. Струминский В. В., Довгаль А. В., Лебедев Ю. Б. и др. Теоретическое и экспериментальное исследование устойчивости пограничного слоя при неравномерном нагревании поверхности.— Новосибирск, 1987.— (Препр./АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т теорет. и прикл. механики; № 3—87).
7. Лебедев Ю. Б., Фомичев В. М. Влияние неравномерности распределения температуры поверхности на устойчивость ламинарного пограничного слоя // ПМТФ.— 1987.— № 2.

г. Москва

Поступила 24/IV 1987 г.,  
в окончательном варианте — 23/I 1989 г.

УДК 532.516:532.526

А. Б. Езерский

### ОТРЫВНОЕ ОБТЕКАНИЕ НАГРЕТОГО ЦИЛИНДРА ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ МАХА

Обтекание нагретых тел потоками жидкости и газа интенсивно исследуется в связи с проблемами теплообмена. К настоящему времени подробно изучен вопрос о том, как влияет вынужденная конвекция на теплоперенос. Воздействие теплопередачи на характеристики самих гидродинамических течений рассматривалось в основном