

Влияние вдува газа с большой удельной теплоемкостью на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя к контролируемым возмущениям

**Владимир Иванович Лысенко¹,
Борис Владимирович Смородский²,
Александр Дмитриевич Косинов³**

¹⁻³Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия

¹vl@itam.nsc.ru

²smorodsk@itam.nsc.ru

³kosinov@itam.nsc.ru

Аннотация

Проведено исследование влияния распределенного вдува газа с большой теплоемкостью в сверхзвуковой пограничный слой на его устойчивость к искусственным возмущениям. Показано, что вдув газа с большой теплоемкостью C_p при некоторых значениях расхода может приводить к стабилизации сверхзвукового пограничного слоя.

Ключевые слова

сверхзвуковой пограничный слой, гидродинамическая устойчивость, контролируемые возмущения, теплоемкость

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ гос. регистрации 121030500161-0).

Для цитирования

Лысенко В. И., Смородский Б. В., Косинов А. Д. Влияние вдува газа с большой удельной теплоемкостью на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя к контролируемым возмущениям // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 41–47. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-41-47

Effect of injection of gas with high specific heat capacity on supersonic boundary-layer stability to controlled disturbances

**Vladimir I. Lysenko¹,
Boris V. Smorodsky²,
Alexander D. Kosinov³**

¹⁻³Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹vl@itam.nsc.ru

²smorodsk@itam.nsc.ru

³kosinov@itam.nsc.ru

Abstract

A study of the effect of distributed gas with high specific heat capacity blowing into the supersonic boundary layer on its stability to artificial disturbances was conducted. It is shown that the injection of gas with high heat capacity C_p at certain flow values can lead to the stabilization of the supersonic boundary layer.

Keywords

supersonic boundary layer, hydrodynamic stability, controlled disturbances, specific heat

Source of funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No.121030500161-0).

For citation

Lysenko V. I., Smorodsky B. V., Kosinov A. D. Effect of injection of gas with high specific heat capacity on supersonic boundary-layer stability to controlled disturbances. *Siberian Journal of Physics*. 2022. Vol. 17, no. 2, pp. 41–47. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-41-47

Введение

В ряде задач возникает вопрос об управлении пограничным слоем. Один из методов такого управления – отсасывание газа из пограничного слоя через проницаемую поверхность, с помощью которого можно замедлить процесс турбулизации пограничного слоя (стабилизирующая роль отсасывания объясняется уменьшением толщины пограничного слоя и формированием более устойчивого профиля скорости). Вопросу стабилизации течения (как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых скоростях) посвящены статьи [1; 2].

К сожалению, пористые покрытия являются шероховатыми по природе. Ввиду этого их влияние на переход связано как с проницаемостью (нестационарное течение газа внутри пористого покрытия), так и с воздействием шероховатости. В работах [3–6] при определении положения ламинарно-турбулентного перехода и исследовании устойчивости пограничного слоя как к естественным, так и искусственным возмущениям, получено, что пористое покрытие ускоряет переход и оказывает дестабилизирующее воздействие на первую моду возмущений.

В то же время, как показали расчеты и эксперименты [7–9] авторов данной работы, можно стабилизировать сверхзвуковой пограничный слой с помощью инжекции (вдува) тяжелого газа в пристеночный слой этого пограничного слоя, тем самым выгодно меняя (делая более устойчивым) течение за счет изменения профиля плотности поперек пограничного слоя.

Также представляет интерес исследование влияния инжекции газа с большой удельной теплоемкостью в сверхзвуковой пограничный слой на его устойчивость, однако подобные исследования (по крайней мере, экспериментальные) ранее не проводились.

Цель данной работы – экспериментальное исследование влияния распределенного вдува гелия в сверхзвуковой ($M = 2$) пограничный слой на его устойчивость.

1. Постановка эксперимента

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН [10] при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 2$, температуре торможения потока $T_0 \approx 290$ К и значении единичного числа Рейнольдса $Re_{1\infty} = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Экспериментальная модель располагалась в рабочей части установки в потоке воздуха, а в качестве инжектируемого в пограничный слой газа использовался гелий – газ с большой удельной теплоемкостью $C_p = 5296$ Дж/(кг К) (т.е. в 5,3 раза большей, чем у воздуха), плотностью $\rho = 0,178$ кг/м³ и температурой кипения $t_{\text{кип}}^\circ = -269$ °С. Эксперименты проводились при вдуве гелия в пристенную область пограничного слоя с разным расходом газа.

Моделью являлась теплоизолированная плоская пластина, изготовленная из нержавеющей стали Х18Н9Т, длиной 440, толщиной 10 и шириной 200 мм с носиком, скошенным под углом 14°, и радиусом притупления передней кромки около 0,05 мм (та же, что и в [6; 8]). Начало отсчета используемой в дальнейшем продольной (вдоль направления внешнего течения) координаты x находится на передней кромке модели. На участке $x = 50 \div 170$ мм рабочей поверхности (на всю ширину пластины) в модели был сформирован паз, куда вставлялась заподлицо с основной поверхностью модели пористая вставка-пластинка с пористостью 39 %, с чистотой фильтрации (аналог размера пор) 10 мкм и толщиной 2,5 мм (с шероховатостью по-

верхности $R_z \approx 11\text{--}12$ мкм). Эта вставка выполнена из пористой нержавеющей стали ПНС-8, производимой Выксунским металлургическим заводом (спеченной из порошка, размер зерен около 70 мкм). В силу конструкции модели, проникаемая часть пористой вставки располагалась на участке $x = 65 \div 155$ мм и $z = \pm 85$ мм (от оси модели). Пластина жестко крепилась к боковым стенкам рабочей части трубы и устанавливалась под нулевым углом атаки.

Измерения устойчивости пограничного слоя к искусственным возмущениям выполнялись с помощью термоанемометра постоянного сопротивления с одноточечным датчиком из вольфрамовой нити диаметром 10 мкм и длиной 1,5 мм. Величина перегрева нити датчика составляла 0,8, вследствие этого можно утверждать, что фиксировались преимущественно пульсации массового расхода.

Искусственные (контролируемые) возмущения вводились в пограничный слой модели с помощью точечного источника на основе высокочастотного тлеющего разряда [11]. Исследования искусственных возмущений в пограничном слое модели проводились вблизи максимума пульсаций при $E = \text{const}$ (E – среднее напряжение в диагонали моста термоанемометра), что соответствовало линии равного массового расхода.

Пульсационные и средние характеристики потока измерялись с помощью автоматизированной системы сбора данных, которой оборудована аэродинамическая труба Т-325. Пульсационное напряжение с термоанемометра записывалось в персональный компьютер с помощью двенадцатиразрядного амплитудно-цифрового преобразователя с частотой отсчетов 750 кГц. Длина реализаций составляла 65536 точек. В каждой точке для контроля повторяемости результатов выполнялось по четыре измерения. Среднее напряжение термоанемометра фиксировалось вольтметром Agilent 34401А и записывалось в компьютер через последовательный порт. Показания средних и пульсационных характеристик поля потока снимались в основном через каждые 2 мм по продольной координате x . Амплитудно-частотный спектр $A(f, x)$ рассчитывался как результат осреднения спектров мощности.

2. Результаты

Воздух и гелий сильно отличаются двумя параметрами – гелий существенно легче воздуха (молекулярный вес меньше), но у гелия в 5,3 раза больше удельная теплоемкость. И на результаты исследования воздействия вдува гелия (по сравнению с воздухом) на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя влияют одновременно два противоположно действующих фактора – происходит дестабилизация пограничного слоя за счет уменьшения плотности (меньшего молекулярного веса) газа [7–9] и одновременно стабилизация за счет роста удельной теплоемкости (см. рис. 1, здесь приведены результаты расчетов (на основе уравнений Навье-Стокса и прямого численного моделирования) авторов работы [12] для гелия; видно значительное падение температуры возле стенки, что должно привести к существенной стабилизации пограничного слоя [13]). Поэтому заранее (до эксперимента) не было известно, что будет в итоге – дестабилизация или стабилизация (причем в каком-то диапазоне расхода вдува гелия).

Ниже приводятся результаты проведенных экспериментов для контролируемых возмущений (с частотой возбуждения 14 кГц) при $M_\infty = 2$ и $Re_1 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$.

На рис. 2 показаны β -спектры, измеренные на частоте возбуждения $f = 14$ кГц в экспериментах на модели для гладкой вставки (a) и для проникаемой вставки с различным расходом вдува He $Q = 0; 0.25; 5.5$ литр/мин ($b\text{--}r$) при $Re_1 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$. Нормализованные (на величину максимума на первом по x участке) амплитуды среднеквадратичных флуктуаций A_β при разных значениях продольной координаты приведены в зависимости от размерного трансверсального волнового числа β рад/мм.

Рисунок 2 демонстрирует, что вдув гелия стабилизирует возмущения на частоте возбуждения $f = 14$ кГц.

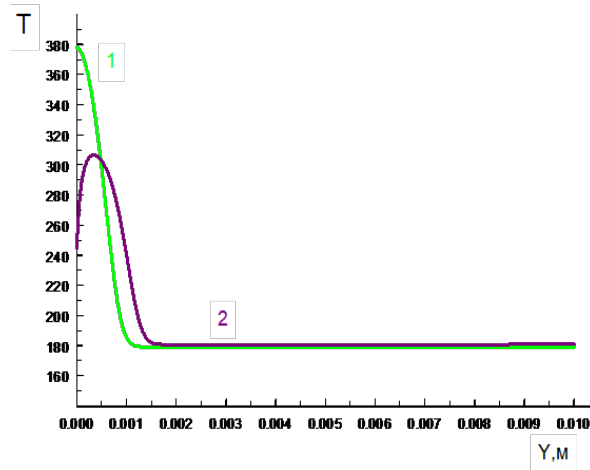


Рис. 1. Профили температуры в сверхзвуковом пограничном слое: без вдува (1) и со вдувом гелия (2); $M = 2.5$, концентрация гелия 12% на поверхности пластины, $P_0 = 3000$ Па, $Re_{1\infty} = 5,5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, $x = 60$ мм. Результаты расчетов предоставлены авторами работы [12]

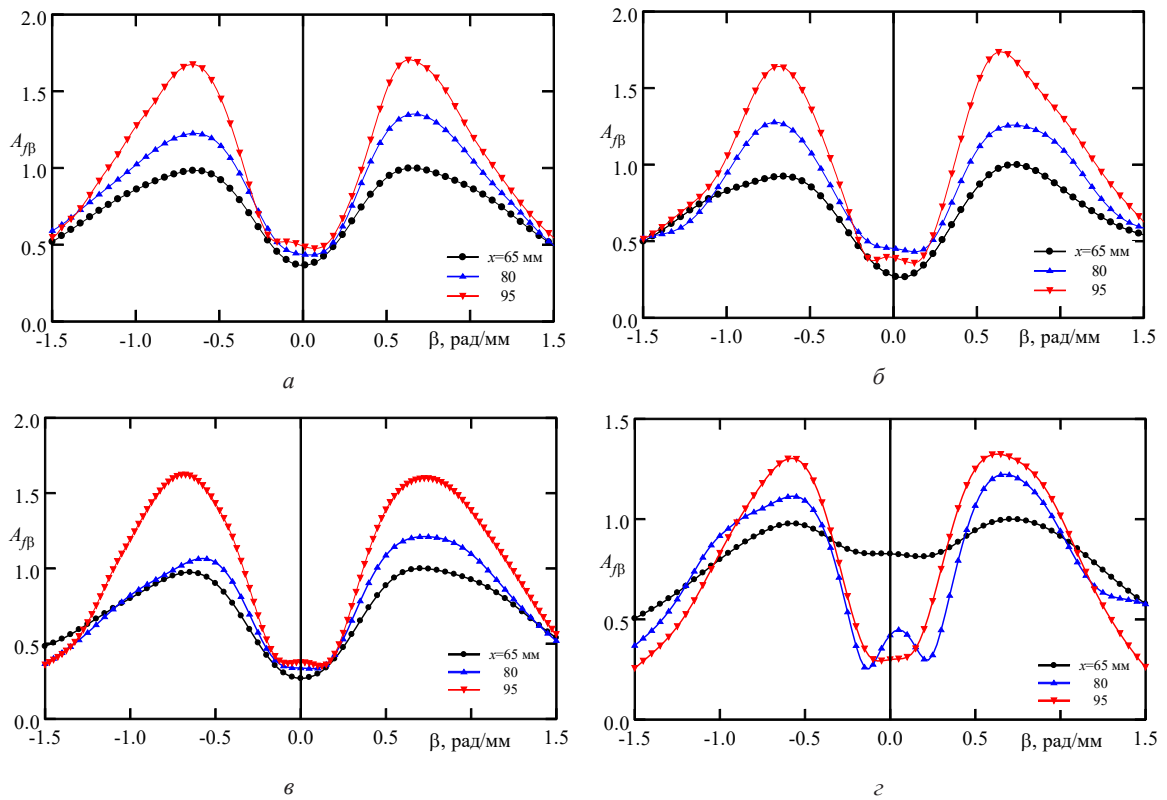


Рис. 2. Измеренные спектры возмущений: нормированная среднеквадратичная амплитуда возмущений A_{β} в зависимости от трансверсального волнового числа β в диапазоне значений продольной координаты $65 \leq x \leq 95$ мм для: (а) сплошной вставки; (б–г) проницаемой вставки; (б) без инжекции газа (расход инжектируемого газа $Q = 0$); (в) при инжекции газа с расходом $Q = 0,25$ л/мин; (г) с расходом вдуваемого газа $Q = 5,5$ л/мин; $Re_1 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, $f = 14$ кГц.

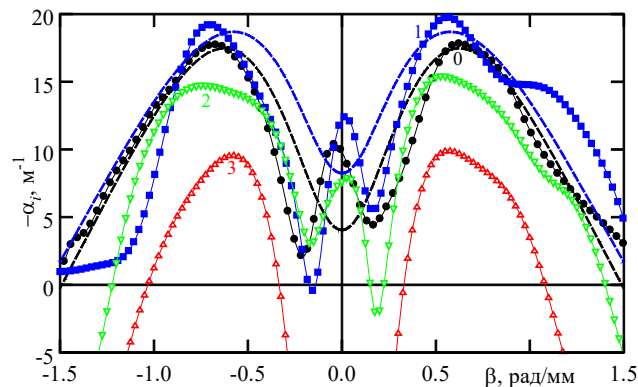


Рис. 3. Скорости пространственного усиления возмущений $-\alpha_i$ в зависимости от трансверсального волнового числа β для: (0) сплошной вставки; (1–3) проницаемой вставки; (1) без инжекции газа (расход инжектируемого газа $Q = 0$); (2) при инжекции газа с расходом $Q = 0,25$ л/мин; (3) с расходом вдуваемого газа $Q = 5,5$ л/мин; $Re_1 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, $x = 85$ мм, $f = 14$ кГц.

На рис. 3 показаны локальные скорости пространственного усиления $-\alpha_i = -\alpha_i(\beta)$ для проницаемой вставки при $x = 85$ мм. Экспериментальные скорости роста были определены с помощью полиномиальной регрессии измеренных данных для кривых роста $\ln A(x)$ возмущений с различными β . Затем определялись степени нарастания возмущений по формуле $-\alpha_i = \partial \ln A(x) / \partial x$. Размерные значения скорости усиления показаны на рис. 3 в зависимости от трансверсального волнового числа.

Рис. 3 демонстрирует стабилизацию возмущений на частоте возбуждения $f = 14$ кГц при инжекции гелия в некотором диапазоне значений его расхода.

Таким образом, несмотря на дестабилизирующее [7–9] влияние малой (по сравнению с воздухом) плотности, вдув газа со значительно большей (чем у воздуха) удельной теплоемкостью C_p при некоторых значениях расхода этого газа может вести к стабилизации сверхзвукового пограничного слоя.

3. Выводы

Проведено исследование влияния распределенного вдува газа с большой теплоемкостью (гелия) в сверхзвуковой пограничный слой на его устойчивость к контролируемым возмущениям.

Показано, что вдув газа с большой теплоемкостью C_p при некоторых значениях расхода этого газа может приводить к стабилизации сверхзвукового пограничного слоя.

Список литературы / References

1. **Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В.** Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях. М – Ижевск: НИЦ РХД, Ин-т компьютер. исслед., 2006. 304 с.
2. **Гапонов С. А., Маслов А. А.** Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980. 144 с.
3. **Гапонов С. А., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Лысенко В. И., Семенов Н. В., Смородский Б. В.** Теоретическое и экспериментальное исследование развития первой моды неустойчивости в сверхзвуковых пограничных слоях на пористых поверхностях // Вестник НГУ. Серия «Физика». 2014. Т. 9, выпуск 2. С. 65–74.

4. **Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Лысенко В. И., Семенов Н. В., Смородский Б. В.** Совместное влияние проницаемости и шероховатости поверхности на устойчивость и переход сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 5. С. 52–59.
5. **Лысенко В. И., Гапонов С. А., Смородский Б. В., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В.** О влиянии толщины пористого покрытия на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя // Вестник НГУ. Серия «Физика». 2015. Т. 10, выпуск 3. С. 41–47.
6. **Lysenko V. I., Gaponov S. A., Smorodsky B. V., Yermolaev Yu. G., Kosinov A. D., Semionov N. V.** Combined Influence of Coating Permeability and Roughness on Supersonic Boundary Layer Stability and Transition // *J. Fluid Mech*, 2016, vol. 798, p. 751–773.
7. **Лысенко В. И., Смородский Б. В., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д.** Экспериментальное исследование влияния инъекции тяжелого газа в сверхзвуковой пограничный слой на его устойчивость // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 2. С. 191–198.
8. **Lysenko V. I., Gaponov S. A., Smorodsky B. V., Yermolaev Yu. G., Kosinov A. D.** Influence of Distributed Heavy-Gas Injection on Stability and Transition of Supersonic Boundary-Layer Flow // *Physics of Fluids*, 2019, vol. 31, p.104103. DOI 10.1063/1.5112145.
9. **Лысенко В. И., Гапонов С. А., Зубков Н. Н., Смородский Б. В., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д.** Влияние распределенного тангенциального вдува тяжелого газа в сверхзвуковой пограничный слой на его устойчивость // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 25–32.
10. **Багаев Г. И., Лебига В. А., Приданов В. Г., Черных В. В.** Сверхзвуковая аэродинамическая труба Т-325 с пониженной степенью турбулентности // Аэрофизические исследования. Новосибирск: Ин-т теорет. и прикл. механики СО АН СССР, 1972. С. 11–13.
11. **Kosinov A. D., Semionov N. V., Shevelkov S. G.** Investigation of supersonic boundary layer stability and transition using controlled disturbances. In: Proc. Intern. Conf. Meth. Aerophys. Research, ITAM, USSR Acad. Sci., Siberian Branch, Novosibirsk, 1994, pt. 2, p. 159–166.
12. **Гапонов С. А., Семенов А. Н.** Влияние направления вдува газа через пористую поверхность на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя // Вестник НГУ. Серия «Физика». 2015. Т. 10, выпуск 2. С. 18–26.
13. **Lysenko V. I., Maslov A. A.** The effect of cooling on the supersonic boundary layer stability // *J. Fluid Mech*, 1984, vol. 147, p. 39–52.

Сведения об авторах

Лысенко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича (Новосибирск, Россия)

Смородский Борис Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича (Новосибирск, Россия)

Косинов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича (Новосибирск, Россия)

Information about the Authors

Vladimir I. Lysenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Boris V. Smorodsky, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Alexander D. Kosinov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), head of laboratory of Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

*Статья поступила в редакцию 25.01.2022;
одобрена после рецензирования 25.03.2022; принята к публикации 22.06.2022
The article was submitted 25.01.2022;
approved after reviewing 25.03.2022; accepted for publication 22.06.2022*