

УДК 532.526.3

О РЕВЕРСЕ ПЕРЕХОДА ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ
В ТУРБУЛЕНТНЫЙ НА ОХЛАЖДАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

ЛЫСЕНКО В. И., МАСЛОВ А. А.

Обзор экспериментальных исследований по влиянию охлаждения поверхности на положение перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный содержится в [1] и более подробно в [2]. Для небольших чисел Маха охлаждение существенно затягивает переход, монотонно увеличивая числа Рейнольдса перехода Re_* при уменьшении температурного фактора T_w (отношения температуры поверхности модели к температуре восстановления). Для больших чисел Маха ($M > 7$) охлаждение не оказывает заметного влияния на положение перехода. В некоторых экспериментах при уменьшении T_w числа Рейнольдса перехода увеличивались, затем уменьшались и при очень низких температурах поверхности резко возрастали. Такая экспериментально наблюдаемая зависимость получила название реверса перехода.

Монотонное увеличение числа Re_* при уменьшении T_w хорошо согласуется с выводами линейной теории гидродинамической устойчивости для первой моды возмущений [1] и экспериментами [3]. Нечувствительность перехода к охлаждению для $M > 7$, вероятнее всего, связана с тем, что при больших числах Маха определяющую роль в устойчивости течения играют высокочастотные колебания (вторая мода, третья и т. д.) [4], на которые охлаждение поверхности стабилизирующего влияния не оказывает и даже может их дестабилизировать. Достаточно убедительное экспериментальное подтверждение этому приведено в [3, 5].

Теоретических работ, объясняющих реверс перехода, в настоящее время нет (выводы работы [6] оказались некорректными и были опровергнуты работой [7]). И лишь в экспериментальной работе [8] (частично в [9]) было показано, что реверс перехода в аэродинамических трубах наблюдается при выпадении инея на рабочей поверхности модели. Эксперименты велись при всех равных прочих условиях, за исключением влажности воздуха в рабочей части аэродинамической трубы. Было показано, что при уменьшении влажности воздуха (и тем самым при уменьшении температуры кристаллизации инея) затягивается начало реверса перехода. На основе корреляции изменения рассеяния лазерного луча от поверхности модели, покрытой инеем, и изменения чисел Рейнольдса перехода предполагалось, что уменьшение чисел Re_* вызывается шероховатостью, создаваемой инеем, а их резкое увеличение при низких значениях T_w на модели с инеем объясняется изменением структуры инея.

Так как количество инея на поверхности модели не контролировалось, то для подтверждения выводов работы [8] желательны были дополнительные исследования. Поэтому была проведена новая серия экспериментов, в которых исследовалось влияние наличия инея на поверхности модели на положение перехода пограничного слоя при одних и тех же концентрации водяных паров в рабочей части аэродинамической трубы, числе Маха и единичном числе Рейнольдса, но при разном количестве (массе) инея на исследуемом участке модели.

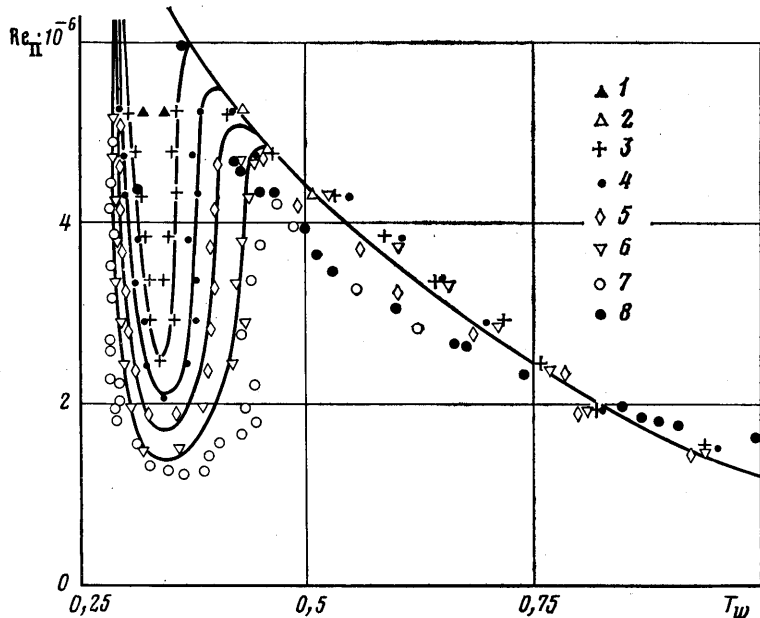
1. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе ИТПМ СО АН СССР Т-325 [10, 11]. Концентрация водяных паров была $C = 0,19 - 0,21$ г/кг (относительная влажность воздуха в форкамере $\chi = 0,3 - 0,4$), число Маха $M = 4,0$ и единичное число Рейнольдса $Re_1 = (36 - 37) \cdot 10^6$ 1/м. Исследуемая модель оставалась той же, что и в работе [8], и представляла собой плоскую пластину длиной 450, шириной 200 и толщиной 9 мм с притуплением передней кромки 0,1 мм, скошенной под углом 20° . Охлаждаемый участок поверхности составлял 140 мм.

Модель охлаждалась до температуры кипения жидкого азота (77 К), а затем (после того как подача азота в модель прекращалась) нагревалась потоком воздуха до температуры восстановления. До начала съема информации модель была накрыта плотно прижатой к рабочей поверхности модели пластинкой, с большой эффективностью предохранявшей поверхность пластины от выпадения на ней инея. В необходимый момент времени защитная пластинка сдвигалась с рабочего участка модели.

Различие в количестве инея на поверхности модели достигалось тем, что варьировалось время τ между моментами удаления защитной пластинки и прекра-

щения подачи азота в модель, т. е. время, в течение которого предельно холодная модель покрывалась слоем инея. Это происходило до того, как модель начинала нагреваться потоком воздуха после прекращения подачи в нее азота. Чем больше было τ , тем больше инея было на поверхности пластины (при $\tau=0$ в начальный момент нагрева на модели практически не было инея).

Положение начала перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный определялось по изменению коэффициента теплоотдачи в нестационарном тепловом режиме (как это делал автор работы [12]). При нагреве поверхности модели скорость роста температуры была различной на разных участках пограничного слоя — в частности, на ламинарном участке она была меньше, чем на переходном, что позволяло фиксировать начало перехода по излому графика зависимости



температуры поверхности пластины от времени, представленной в логарифмическом масштабе. Температура поверхности определялась с помощью термпар, смонтированных в модель заподлицо с ее поверхностью, и регистрировалась многоканальным самописцем DACQ-2BB. Заметим, что температура непосредственно на поверхности инея, как и во всех аналогичных экспериментах, точно не была известна. Оценки показывают, что различие между температурами поверхности модели и поверхности инея для высоты инея 0,1 мм при теплопроводности инея, равной теплопроводности выпавшего снега, не выше 10 К. Это соответствует изменению температурного фактора менее чем на 0,04, к тому же эта величина уменьшается с уменьшением τ . Поэтому на качественный вид полученных зависимостей Re_* от T_w различие между температурами поверхности модели и инея повлиять не могло.

2. Полученные результаты представлены на фигуре. На ней приведены зависимости Re_* от T_w при $\tau=0''$ (1, 2), 15'', 30'', 1' и 2' (цифры 3–6 соответственно), а также данные работы [8] при $\tau \geq 2'$ и двух значениях влажности воздуха $\chi = 0,33-0,40$ и $0,21-0,22$ (цифры 7 и 8 соответственно). Данные работы [8] получены с помощью трубки полного напора. Число Рейнольдса Re_* рассчитано по расстоянию вдоль продольной оси модели от носика пластины до координаты начала перехода. Видно, что при всех τ (кроме $\tau=0''$) наблюдается четкий реверс перехода. Экспериментальные точки для $\tau=2'$ и $\chi=0,3-0,4$ очень близки к точкам для $\tau \geq 2'$ и $\chi=0,33-0,40$ в работе [8], а точки для $\tau=15''$ и $\chi=0,3-0,4$ и для $\tau \geq 2'$ и $\chi=0,21-0,22$ практически совпадают друг с другом. При $\tau=0''$, т. е. когда инея на модели практически не было, наблюдается монотонная зависимость Re_* от T_w (по крайней мере при $T_w \geq 0,4$). При числе Рейнольдса $Re=5,2 \cdot 10^6$, соответствующем самой дальней от носика модели термпаре, и $T_w=0,29-0,43$ пограничный слой оставался ламинарным (см. на фигуре значки 1).

При увеличении τ размеры «петли» и температурный диапазон «ям» реверса увеличивались (однако значительно — лишь в небольшом временном интервале порядка 1 или 2 мин). Возможно, чем больше было инея на поверхности модели, тем больше были линейные размеры «шероховатости» инея. В результате этого больше была температура поверхности модели, при которой отношение линейного размера «шероховатости» инея к толщине пограничного слоя достигало определенной критической величины, после чего иней уже не влиял на положение перехода, т. е.

наравне с качественными изменениями структуры инея (изменениями формы кристаллов льда и их взаимного расположения) в зависимости от температуры происходит и изменение поверхностной структуры инея со временем, имеющее, скорее всего, в данной серии экспериментов в основном количественный характер (рост размеров кристаллов льда).

Нужно подчеркнуть, что минимум зависимостей Re_* от T_w для $\tau \geq 15$ соответствует $T_w \approx 0,35$, который близок к температурному фактору ($\sim 0,4$), соответствующему максимальной интенсивности рассеяния светового луча от поверхности модели в [8]. Видимо, в данной работе, как и в работе [8], происходят какие-то качественные изменения структуры инея при $T_w \sim 0,4$. Здесь допустимы разные варианты гипотез. Возможно, это оплавление поверхности инея или изменения структуры, аналогичные изменениям структуры инея со временем [13], или изменения под воздействием на иней каких-то физико-химических превращений (например, сублимации «сухого» льда, т. е. переход его в пар углекислоты). Также нужно учитывать, что форма кристаллов льда и структура их поверхностей существенно зависят от температуры (см., например, [14–15]). От температуры зависит и волнистость поверхности образующегося льда (при уменьшении температуры увеличивается число циклов утолщения и утоньшения слоя льда) [16], что может привести к образованию вихрей. Однако изменению рассеяния светового луча и появлению реверса перехода могут способствовать и другие обстоятельства, например поглощение или выделение энергии; дисперсность среды, которая, возможно, образуется при скалывании частичек инея с его поверхностного слоя, и т. д.

Таким образом, из результатов [8] и данной работы вытекает, что реверс перехода в аэродинамических трубах наблюдается при наличии на поверхности модели инея и определяется процессом образования инея и изменения его структуры. В отсутствие на модели инея числа Рейнольдса перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный монотонно увеличиваются при уменьшении температурного фактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гапонов С. А., Маслов А. А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980. 144 с.
2. Лысенко В. И. Устойчивость и переход сверхзвукового пограничного слоя при теплообмене: Дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1981.
3. Лысенко В. И., Маслов А. А. Влияние охлаждения на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя. — Докл. АН СССР, 1982, т. 264, № 6, с. 1318–1321.
4. Мэк. Линейная теория устойчивости и проблемы перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный при сверхзвуковом течении. — Ракетная техника и космонавтика, 1975, т. 13, № 3, с. 31–47.
5. Demetriades A. New experiments on hypersonic boundary layer stability including wall temperature effects. — Proc. Heat Transfer and Fluid Mech. Inst. Pullman, Wash., 1978. Stanford, Calif., 1978, p. 39–55.
6. Reshotko E. Transition reversal and Tollmine – Schlichting instability. — Phys. Fluids, 1963, v. 6, № 3, p. 335–342.
7. Гапонов С. А., Маслов А. А. О численном и асимптотическом методах решения задачи о полной стабилизации пограничного слоя. — ПМТФ, 1972, № 3, с. 60–64.
8. Lysenko V. I., Maslov A. A. Transition reversal and one of its causes. — AIAA Journal, 1981, v. 19, № 6, p. 705–708.
9. Лысенко В. И., Маслов А. А. Влияние глубокого охлаждения на переход в сверхзвуковом пограничном слое. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 2, с. 43–49.
10. Багаев Г. И., Лебига В. А., Приданов В. Г., Черных В. В. Сверхзвуковая аэродинамическая труба Т-325 с пониженной степенью турбулентности. — В кн.: Аэрофизические исследования. Новосибирск: Ин-т теорет. и прикл. механ. СО АН СССР, 1972, с. 11–13.
11. Багаев Г. И., Лебига В. А., Харитонов А. М. Излучение звука сверхзвуковым турбулентным пограничным слоем. — В кн.: Симпозиум по физике акустико-гидродинамических явлений. М.: Наука, 1975, с. 276–281.
12. Кузьминский В. А. Влияние охлаждения поверхности крыла на переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный при сверхзвуковых скоростях потока. — Уч. зап. ЦАГИ, 1981, т. 12, № 1, с. 139–144.
13. Хаяси, Аоки, Адачи, Хори. Исследование свойств инея и их связи с типами процесса его образования. — Теплопередача, 1977, т. 99, № 2, с. 85–92.
14. Nakaya U. Snow crystals. Cambridge, 1954. 510 p.
15. Физика облаков. Л.: Гидрометеосводат, 1961. 459 с.
16. Гиллин. Образование льда в трубе при переходном и турбулентном режимах течения жидкости. — Теплопередача, 1981, т. 103, № 2, с. 213–220.

Новосибирск

Поступила в редакцию
7.XII.1982