РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЛАМИНАРНОМ СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПЛАСТИНЕ С ПРОДОЛЬНЫМИ УГЛУБЛЕНИЯМИ

Л.В. Афанасьев, В.И. Лысенко, Б.В. Смородский, **А.А. Яцких**
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, yatskikh@itam.nsc.ru

Управление ламинарно-турбулентным переходом в высокоскоростных пограничных слоях является одной и фундаментальных проблем механики жидкости и плазмы. Данная работа посвящена исследованию возможности управления турбулизацией течения с помощью пассивного метода, основанного на микропрофилировании (углубления различной ориентации, риблеты, шероховатости и т.д.) поверхности, при котором изменение глобальной картины обтекания незначительно, тогда как течение внутри пограничного слоя модифицируется. Возможность применения таких подходов активно исследуется как для случая дозвуковой скорости потока [1], так и при высоких скоростях [2, 3, 4, 5]. Для случая высоких скоростей потока большое внимание исследователей уделено возможности управления с помощью микропрофилирования нарастанием в пограничном слое возмущений второй акустической моды. В частности, исследования проводились для случая слотов (небольшие углубления в поверхности модели), в ряде работ показана возможность стабилизации нарастания возмущений второй моды, при этом первая мода дестабилизировалась. Следует выделить недавние работы, посвященные исследованиям возможности применения углублений малой высоты на поверхности стреловидного крыла для стабилизации роста возмущений неустойчивости поперечного течения [5, 6].

В экспериментах [7] в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН при числе Маха потока M=2 на пластине с продольно расположенными слотами (углублениями) малой глубины на поверхности обнаружено уменьшение роста естественных возмущений. Было получено, что максимальные скорости пространственного роста возмущений меньше максимальной скорости нарастания для гладкой поверхности. Для подробного изучения данного эффекта необходимы комплексные исследования с применением теоретических методов и численного моделирования.

В данной работе представляются результаты численного моделирования развития локализованных в пространстве и времени возмущений малой амплитуды в пограничном слое гладкой пластины и пластины с продольными слотами при числе Маха потока M=2.

Расчеты проводились в программном пакете FlowVision по условиям, близким к экспериментам. Аналогично экспериментам, пластина имела гладкий участок, а продольные углубления располагались на расстоянии 53 мм от начала пластины (рис. 1).

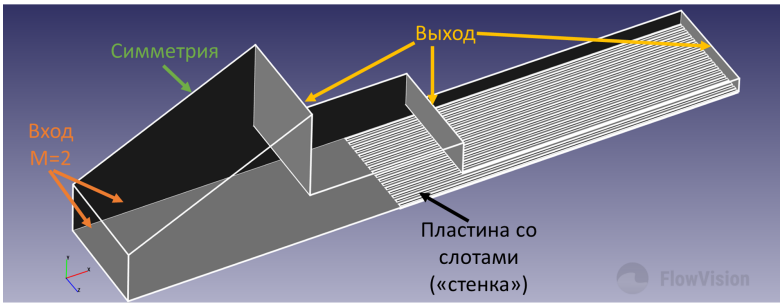

Рис. 1: Расчетная область

В установившееся течение вводилось возмущения от локализованного источника, располагающегося на гладкой части модели в 30 мм от передней кромки. В качестве источника использовалось ограниченное в пространстве и времени граничное условие на ненулевой тепловой поток от пластины. Для определения влияния продольных углублений на развитие локализованных возмущений в физическом пространстве для различных значений продольной координаты x суммировались квадраты пульсаций по всему времени расчета и по всей плоскости (y,z):

$$SMM(x) = \frac{\sum_{y,z,t} m'(x,y,z,t)^2}{\sum_{y,z,t} m'(x_0,y,z,t)^2} \qquad (1)$$

В случае гладкой пластины вводимое в пограничный слой возмущение монотонно нарастает вниз по потоку, а при наличии углублений, особенно в области начала слотов, нарастание возмущений значительно меньшее, по сравнению со случаем гладкой поверхности (рис. 2). В дальней области от начала углублений, нарастание возмущений близко ко случаю гладкой модели.

Для получения более подробной информации о нарастании возмущений проведен частотно-волновой анализ. В частности, это позволило определить, что наличие слотов приводит к стабилизации низких частот, а наиболее нарастающие возмущения смещаются в область более высоких частот. Результаты численного моделирования согласуются с расчетами в рамках линейной теории устойчивости и подтверждают результаты экспериментов.

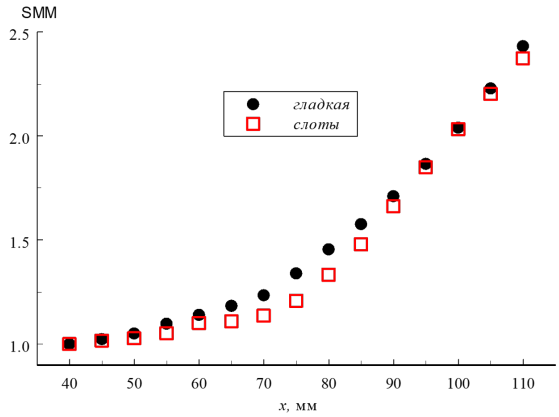

Рис. 2: Нарастание локализованных возмущений вниз по потоку в случае гладкой поверхности и пластины со слотами

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10167, https://rscf.ru/project/23-79-10167/. Работа выполнена на базе ЦКП «Механика» ИТПМ СО РАН. Численное моделирование проведено в программном комплексе FlowVision (ООО «ТЕСИС», https://flowvision.ru/).

Литература

1. Grek G.R., Kozlov V.V., Titarenko S.V. An experimental study on the influence of riblets on transition. J. Fluid Mech., 1996., v. 315, pp. 31-49.
2. Fedorov A.V., Novikov A.V., Semenov N.N. Toward optimal wavy surface shape for high-speed bounda-ry layer stabilization. Int J. Fluid Mech. Res., 2020, v.47(4), pp. 329-335.
3. Bountin D., Chimitov T., Maslov A., Novikov A., Egorov I., Fedorov A., Utyuzhnikov S. Stabilization of a hypersonic boundary layer using a wavy surface . AIAA J. 2013, v.51(5), pp. 1203-1210.
4. Lukashevich S.V., Morozov S.O., Shiplyuk A.N. Experiments on the development of natural disturbances in a hypersonic boundary layer on surfaces with microgrooves. Experiments in Fluids, 2021, v.62, art.155. 14 p.
5. Fedorov A., Novikov A. Stabilization of crossflow mode by grooves on a supersonic swept wing. Theor. Comput. Fluid Dyn. 2023, v.37, pp. 261–268

6. Новиков А.А., Погорелов И.О., Чувахов П.В. Численное моделирование неустойчивости поперечного течения на скользящем крылае с участком микропрофилирования. Уч. записки ЦАГИ, 2023, т.54(1), с. 12-19
7. Лысенко В.И., Смородский Б.В., Косинов А.Д., Яцких А.А. Влияние глубины слотов на стабилизацию сверхзвукового пограничного слоя. Теплофизика и аэромеханика, 2024, т.31(1), с. 77-85