

**В. Н. Горев<sup>1,2</sup>, М. М. Катасонов<sup>1,2</sup>, В. А. Щербаков<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН  
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: gorev\_vasily@ngs.ru

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ-ПРЕДВЕСТНИКОВ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ**

Приведено экспериментальное исследование волновых пакетов-предвестников, предшествующих фронтам продольных структур в пограничных слоях плоской пластины, прямого и скользящего крыльев. Изучен характер нестационарного течения в области фронтов продольных структур. Показано, что процесс образования и развития исследуемых возмущений малой амплитуды амплитудно независим. Предложены общие закономерности развития волновых пакетов-предвестников.

*Ключевые слова:* аэрофизика, пограничный слой, продольные структуры, волновые пакеты, ламинарно-турбулентный переход.

### **Введение**

Среди объектов исследования в аэрофизике процесс перехода течения от ламинарного состояния к турбулентному является, пожалуй, одним из интереснейших и сложных явлений. Ламинарно-турбулентный переход имеет место в различных сдвиговых течениях, таких как пограничные слои, струи, течения в каналах [1]. Интерес исследователей к процессу перехода объясняется как желанием получить новые фундаментальные знания, которые позволят дополнить известную на сегодняшний день физическую картину явления, так и технической стороной вопроса, в частности снижением аэродинамического сопротивления и шумности летательных аппаратов.

Потенциальная возможность существенного снижения сопротивления путем затягивания ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое обтекаемых тел методами активного управления пристенным течением хорошо известна. Такие методы, в частности

с использованием MEMS-технологий, предполагают локальное импульсное воздействие на вихревые возмущения, присутствующие в слое сдвига, на ранних этапах их развития [2; 3]. Однако в случае импульсного воздействия в пограничный слой вводится возмущение с широким спектром частот, часть из которых попадает в область неустойчивости течения (если таковая имеется), в результате в пограничном слое возникнет волновой пакет, который будет нарастать ниже по потоку и может привести к образованию турбулентного пятна. Таким образом, затягивание перехода к турбулентности не будет достигнуто. Возникновение волновых пакетов неоднократно наблюдалось в экспериментах по исследованию нестационарных продольных структур в пограничных слоях плоской пластины [4; 5] и прямого крыла [6–8], возбуждаемых с помощью мембраны или методом вдува (отсоса). Явление получило название «предвестник», поскольку предшествует фронту продольной структуры.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-01-00034), президента РФ по поддержке ведущих научных школ РФ (НШ – 964.2003.1) и молодых российских ученых (МК – 1655.2005.1), Рособразования (РНП.2.1.2.3370).

Данная работа посвящена изучению волновых пакетов (предвестников), возникающих в пограничных слоях в областях, предшествующих резкому изменению скорости потока внутри пограничного слоя (фронты продольного возмущения), как объектов, которые наряду с вторичной неустойчивостью продольных структур являются звеном процесса ламинарно-турбулентного перехода при повышенной степени турбулентности набегающего потока.

### Исследование предвестников в пограничном слое Блазиуса

Преимущество пограничного слоя плоской пластины в том, что он является наиболее простым и хорошо изученным примером пристенного течения. Кроме того, в случае пограничного слоя Блазиуса сравнить экспериментальные данные с теорией существенно проще, чем в случае пограничного слоя на крыле.

Эксперимент проводился в условиях малых значений локального числа Рейнольдса, и пограничный слой в области измерений оставался устойчивым относительно возмущений малых амплитуд ( $Re_{\delta^*} < 500$ ). Импульсы вдува (отсоса) воздуха приводили к возник-

новению в пограничном слое продольных локализованных возмущений. Амплитуда возмущений в окрестности источника достигала 10 % от скорости на верхней границе пограничного слоя ( $U_0$ ). В своей центральной части генерируемые возмущения на начальном этапе развития (при значениях координаты  $x$  порядка длины щели) близки к двумерным, ниже по потоку двумерность нарушается. Перед фронтом продольной структуры наблюдается волновой пакет-предвестник, который, как и фронт продольной структуры, первоначально является двумерным. По мере развития пакета вниз по потоку его амплитуда постепенно затухает.

Как известно [4], исследуемые продольные структуры распространяются в пограничном слое с локальной скоростью среднего течения (рис. 1). Иначе говоря, вблизи стенки возмущение движется сравнительно медленно, а в области верхней границы пограничного слоя – практически со скоростью внешнего течения. Таким образом, в каждый момент времени положение фронта относительно оси  $x$  зависит от координаты  $y$ . В то же время скорость распространения волновых возмущений не зависит от координаты  $y$ . В результате, волновой пакет и фронт продольной структуры накладываются друг на друга (см. рис. 1). Вблизи поверхности предвестник опережает фронт, тогда как выше в пограничном слое он движется вместе с фронтом продольной структуры в локально нестационарной зоне течения. С другой стороны, предвестник, возникающий на заднем фронте, находится в пограничном слое, возмущенном продольной структурой. Поскольку размер источника возмущений (длина щели в поверхности модели) существенно больше толщины пограничного слоя, можно считать, что в пределах продольной структуры течение представляет собой пограничный слой с несколько отличными от невозмущенного течения характеристиками. В случае генерации структуры отсосом воздуха профиль скорости в ней становится более наполненным, соответственно устойчивость течения возрастает, и в области заднего фронта возмущения предвестник не возникает. Напротив, при вдуве воздуха устойчивость течения уменьшается и появляется предвестник (см. рис. 1).

Сравним продольные возмущения, полученные отсосом пограничного слоя различной интенсивности. При распространении

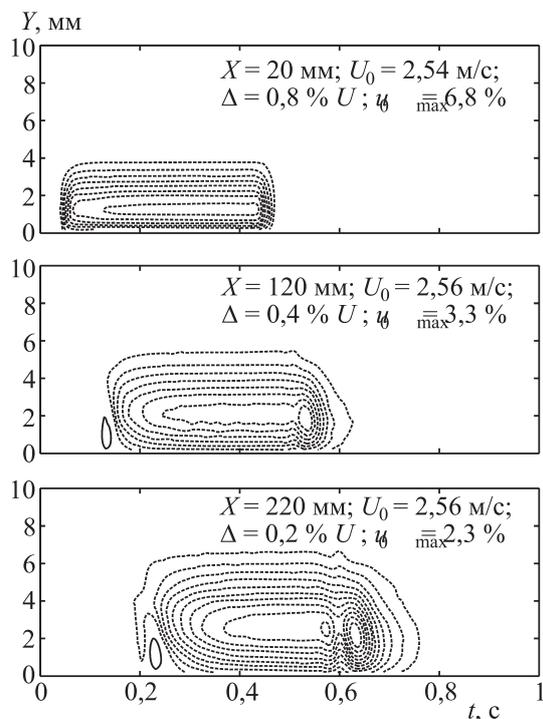


Рис. 1. Изолинии пульсационной составляющей скорости течения, образующей продольную структуру (вдув), и предвестники на ее переднем и заднем фронтах на различных расстояниях от источника возмущений

нии вдоль потока подверженные дисперсии возмущения трансформируются, их фронты сглаживаются и выделяются волновые пакеты (рис. 2, а). Амплитуда пакета на переднем фронте увеличивается с ростом интенсивности продольной структуры.

На поведении волнового пакета вблизи заднего фронта сказывается устойчивость течения внутри продольной структуры, зависящая от ее амплитуды, с увеличением которой устойчивость возрастает и амплитуда предвестника соответственно уменьшается. Вместе с тем при стремлении к нулю интенсивности продольной структуры амплитуда волнового пакета также должна уменьшаться.

При нормировке осциллограмм на их максимум продольного возмущения (рис. 2, б–г) часть кривых совпадает. Остающиеся отличия особенно велики между осциллограммами продольных структур наименьшей (1) и наибольшей (4) амплитуд (рис. 2, в). С уменьшением интенсивности структур соответствующие им кривые сближаются (рис. 2, г).

Нормированные осциллограммы возмущений с наименьшими амплитудами (1, 2) отличаются лишь в пределах незначительных флуктуаций скорости, притом, что возмущение 2 вдвое интенсивнее возмущения 1. Данный факт свидетельствует о линейности поведения продольных структур и их предвестников по амплитуде при ее малой величине.

### Предвестники в пограничном слое прямого крыла

Если рассматривать волновой пакет как часть фронта продольной структуры, которая выделилась в результате дисперсии, то в момент начала вдува или отсоса эта частотная составляющая имеет геометрию источника возмущений, т. е. фронты волн, составляющих пакет, изначально прямые, или квазидвумерные. Эволюция геометрии предвестников в процессе развития вниз по потоку несколько различается в зависимости от метода генерации (вдув или отсос). В процессе развития предвестника волновые фронты искривляются, и пакет теряет двумерность (рис. 3). Далее искривленные волновые фронты трансформируются в  $\Lambda$ -структуры. В случае генерации продольного возмущения отсосом, переход предвестника в трехмерное состояние происходит

несколько медленнее, чем в случае вдува. Пространственная структура предвестника на поздней стадии развития может быть довольно сложна и включать в себя не только  $\Lambda$ -структуры, но и некоторые продольные образования (см. рис. 3).

Предвестник в области заднего фронта продольного возмущения на термоанемометрических визуализациях наблюдается в виде перетяжек продольной структуры (рис. 4), что напоминает варикозную моду вторичной неустойчивости [9; 10]. Поведение предвестников сильно зависит от параметров породившей их продольной структуры, однако кроме этого на динамику развития волновых пакетов влияют величина и знак градиента давления внешнего течения (рис. 5).

Неблагоприятный градиент давления способствует нарастанию волновых паке-

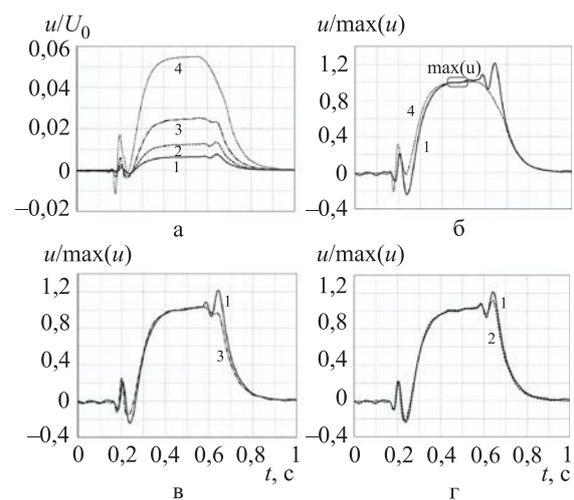


Рис. 2. Осциллограммы продольных возмущений, полученных в пограничном слое Блазиуса методом отсоса вдали от источника возмущений (а). Приведенные к единице осциллограммы продольных возмущений: амплитуды 1 и 4 (б), амплитуды 1 и 3 (в), амплитуды 1 и 2 (г)

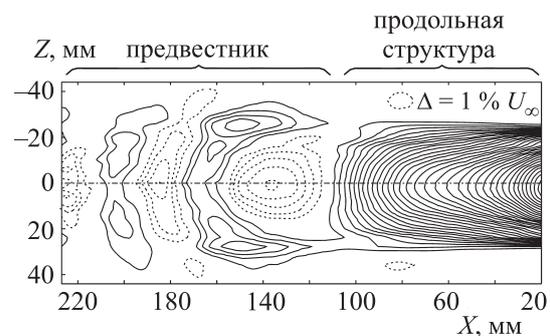


Рис. 3. Изолинии мгновенного поля пульсаций продольной составляющей скорости полосчатой структуры (метод отсоса) и предвестника на ее переднем фронте в двумерной области, огибающей поверхность модели на уровне максимума пульсаций скорости

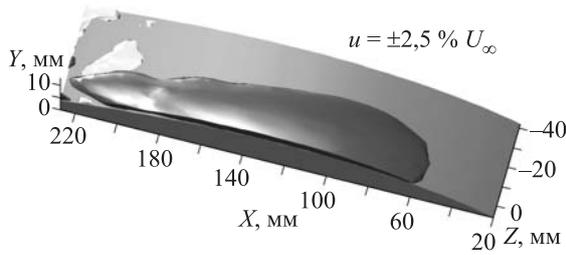


Рис. 4. Задний фронт продольной структуры (вдув), светлые области – превышение скорости ( $u = 2,5 \% U_\infty$ ), темные области – дефект скорости ( $u = -2,5 \% U_\infty$ ), серым цветом обозначена поверхность модели крыла.

В области  $140 \text{ мм} < X < 230 \text{ мм}$  наблюдаются перетяжки продольной структуры, а также локализованные области превышения скорости, что соответствует волновому пакету (предвестнику), за ним следует задний фронт продольной структуры

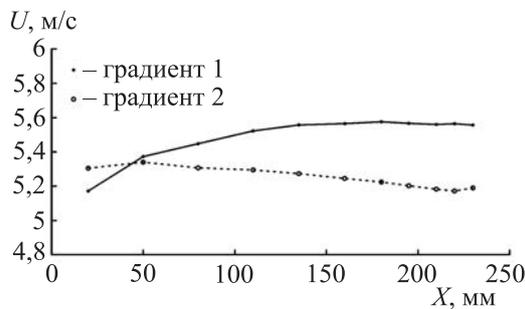


Рис. 5. Распределение скорости на внешней границе пограничного слоя вдоль координаты  $X$ . Сплошная линия соответствует давлению внешнего течения: 1 – благоприятный градиент давления; 2 – неблагоприятный градиент давления

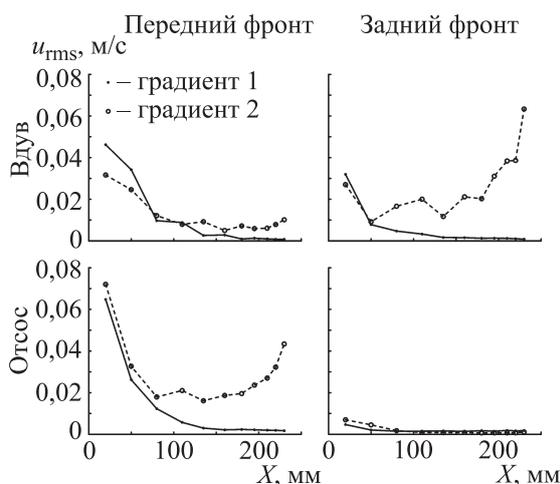


Рис. 6. Изменение среднеквадратичного отклонения пульсационной составляющей скорости волновых пакетов (предвестников) вниз по потоку в зависимости от их локализации (передний / задний фронт продольной структуры), метода генерации продольной структуры (вдув / отсос) и градиента давления внешнего течения

тов. В случае вдува интенсивно растет предвестник на заднем фронте. Это обусловлено тем, что в случае вдува продольная структура образована областью с дефектом скорости. В таком течении профили пограничного слоя менее наполнены, чем в невозмущенном течении, и соответственно течение менее устойчиво.

На заднем фронте в случае генерации продольного возмущения методом отсоса предвестник затухает, поскольку в этом случае профили течения, в котором распространяется волновой пакет, более наполнены и соответственно более устойчивы. С другой стороны, на переднем фронте волновой пакет распространяется по невозмущенному пограничному слою и не должен зависеть от профилей скорости течения внутри продольной структуры, а следовательно, и от метода ее генерации (вдув или отсос). Однако динамика развития пакета на переднем фронте продольной структуры, полученной методом вдува, заметно отличается от того же в случае отсоса. Это объясняется различным характером течения на переднем фронте продольных структур при вдуве и при отсосе (рис. 6). В условиях благоприятного градиента давления волновые пакеты затухают независимо от метода генерации продольной структуры или параметров фронта, на котором возник волновой пакет. Таким образом, градиент давления является обязательным условием для нарастания предвестников.

### Волновые пакеты-предвестники в пограничном слое скользящего крыла

Измерения в пограничном слое скользящего крыла также показали присутствие подобных предвестников, поэтому далее эксперимент проводился по той же методике, что и на прямом крыле, с поправкой на угол скольжения.

Компьютерные визуализации исследуемых возмущений, выполненные на основе измеренных полей скорости, показали, что в отличие от возмущений на прямом крыле предвестники и продольные структуры в пограничном слое скользящего крыла за счет трехмерности течения становятся асимметричными. Происходит закрутка продольной структуры. Поскольку в пограничном слое скользящего крыла, на различных расстояниях от поверхности, течение имеет различные направления, то вдув (отсос) меняют не только наполненность про-

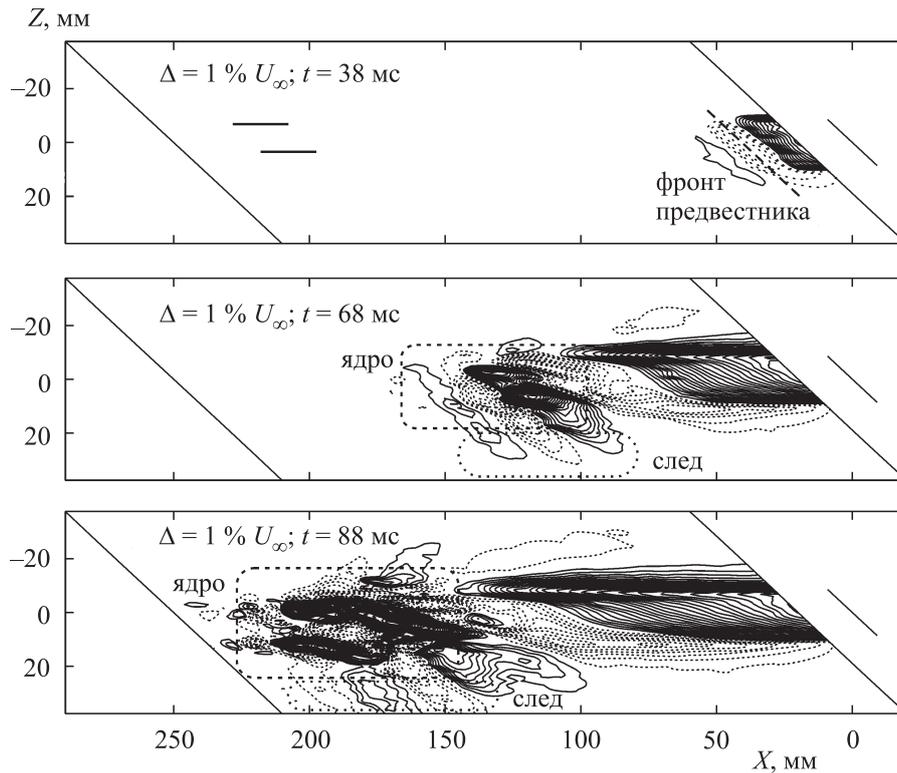


Рис. 7. Изолинии мгновенных полей пульсационной составляющей продольной компоненты скорости для полосчатой структуры, полученной методом отсоса, и предвестника на ее переднем фронте

филя продольной компоненты скорости, но и направление локального вектора скорости в области потока за щелью.

На начальном этапе развития фронт продольного возмущения параллелен передней кромке крыла, что определяется ориентацией щели. В области потока непосредственно перед фронтом возникает квазидвумерный волновой пакет, также параллельный передней кромке крыла (рис. 7). Далее происходит нарушение двумерности, предвестник разделяется на сугубо трехмерное «ядро» и на практически нейтральный пакет волн, ориентированных вдоль передней кромки крыла, – «след». Измерения поля скорости в трехмерной области потока после удаления низкочастотной составляющей, соответствующей продольному возмущению, позволили обнаружить в составе ядра предвестника  $\Lambda$ -структуру (рис. 8).

Таким образом, амплитуда ядра быстро растет, что приводит к формированию  $\Lambda$ -структур ниже по потоку (см. рис. 8). Затем ядро, представляющее собой пакет  $\Lambda$ -структур, превращается в турбулентное пятно.

Если пакет на переднем фронте фактически бежит по невозмущенному пограничному

слою, то развитие волновых пакетов на заднем фронте продольной структуры происходит в условиях течения, искаженного продольным возмущением. Динамика развития предвестников в этом случае существенно

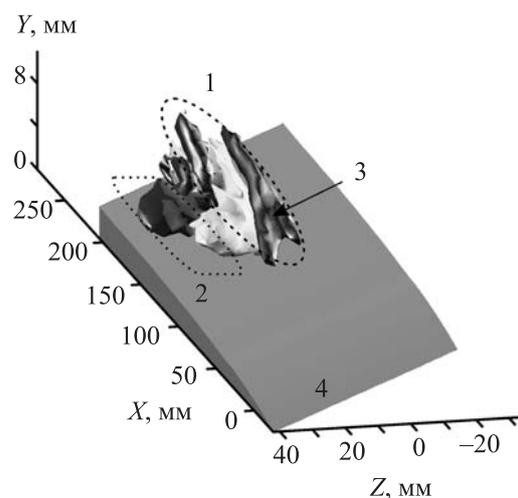


Рис. 8. Компьютерная визуализация поздней стадии развития предвестника на переднем фронте продольной структуры (отсос). Низкочастотная составляющая удалена из массива данных. Светлые области соответствуют пульсациям скорости  $u = 3,5 \% U_\infty$ ; темные –  $u = -3,5 \% U_\infty$ ; 1 – ядро предвестника; 2 – квазидвумерный след; 3 –  $\Lambda$ -структуры; 4 – поверхность крыла

зависит от условий генерации продольного возмущения, в частности сильно отличаются случаи вдува и отсоса.

### Заключение

Обнаружено, что в пограничном слое Блазиуса предвестники могут возникать и в условиях устойчивого пограничного слоя вне кривой нейтральной устойчивости. Однако в этом случае нарастания волновых пакетов не наблюдается. Более того, процесс образования и развития исследуемых возмущений малой амплитуды амплитудно независим.

Изучен характер нестационарного течения в области фронтов продольных возмущений, полученных методом вдува / отсоса в пограничных слоях плоской пластины и прямого крыла. Найдено, что градиент давления внешнего течения является важным и определяющим фактором, влияющим на возникновение и развитие предвестников.

В пограничном слое скользящего крыла получены волновые пакеты-предвестники фронтов продольных структур. Изучена их пространственная геометрия, зафиксирована трансформация предвестника в турбулентное пятно. Предложены общие закономерности развития волновых пакетов-предвестников в условиях скользящего крыла.

### Список литературы

1. Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В. Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях. М.; Ижевск, 2006. 304 с.
2. Gad-el-Hak M. Flow control: Passive, Active, and Reactive Flow Management. Cambridge: Univ. Press, 2000. 448 p.
3. Haasl S., Mucha D., Chernoray V. et al. Hybrid-mounted micromachined aluminum

hotwires for wall shear-stress measurements // J. Microelectromech. Syst. 2005. Vol. 14. No. 2. P. 254–260.

4. Альфредссон П. Х., Катасонов М. М., Козлов В. В. Генерация и развитие «пассивных» возмущений в пограничном слое Блазиуса // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 3. С. 363–370.

5. Katasonov M. M., Park S.-H., Sung H. J., Kozlov V. V. Instability of streaky structures in a Blasius boundary layer // Exper. Fluids. 2005. Vol. 38. No. 3. P. 363–371.

6. Чернорай В. Г., Спиридонов А. Н., Катасонов М. М., Козлов В. В. Генерация возмущений локализованным вибратором в пограничном слое прямого крыла // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 5. С. 37–45.

7. Горев В. Н., Катасонов М. М., Козлов В. В. Волновые предвестники продольных структур на прямом и скользящем крыле // Докл. РАН. 2006. Т. 410, № 1. С. 53–56.

8. Горев В. Н., Катасонов М. М. Возникновение и развитие предвестников на фронтах продольных структур в пограничном слое прямого крыла // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11, № 3. С. 403–415.

9. Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В. и др. Экспериментальное исследование варикозной неустойчивости полосчатой структуры в пограничном слое скользящего крыла // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11, № 1. С. 1–10.

10. Литвиненко Ю. А., Чернорай В. Г., Козлов В. В. и др. О нелинейной синусоидальной и варикозной неустойчивости в пограничном слое (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11, № 3. С. 339–365.

Материал поступил в редакцию 09.10.2007