

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

*Каприлевская Валерия Станиславовна*

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно – квалификационной работы  
(диссертации)

*«ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРО-  
ДОЛЬНЫХ ВОЗДУШЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ДВУМЕРНОГО ЭЛЕМЕНТА  
ШЕРОХОВАТОСТИ В ОБЛАСТИ БЛАГОПРИЯТНОГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕ-  
НИЯ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ»*

Направление подготовки:

01.06.01 — Математика и механика

Специальность подготовки: 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы;

Научный руководитель

*д. ф.-м. н., проф.*

*Козлов Виктор Владимирович*

Новосибирск 2021

## **Актуальность темы**

В настоящее время стреловидным крылом оснащается большое количество летательных аппаратов. Данный тип крыльев можно встретить на гражданских, военных и беспилотных летательных аппаратах. Беспилотная авиация широко используется как для нужд военных (разведка, перехват воздушных целей, создание радиопомех и т.д.), так и гражданских задач (наблюдение за объектами, доставка, воздушная фотография и т.д.). Интенсивное развитие малой и сверхмалой беспилотной авиации приводит к конкурентной борьбе за лётные характеристики летательных аппаратов. Малые полётные числа Рейнольдса большинства беспилотных самолетов являются одной из особенностей их эксплуатации. Для улучшения характеристик можно, например, снизить сопротивление с помощью ламинаризации течения над обтекаемыми плоскостями. При обтекании стреловидных (или скользящих) крыльев возникают некоторые особенности, например, из-за несовпадения направлений градиента давления и скорости набегающего потока линии тока над крылом принимают S-образную форму. В итоге формируется трехмерная структура пограничного слоя с точкой перегиба, которую связывают с неустойчивостью поперечного течения. Таким образом, стреловидность является причиной появления дополнительного механизма неустойчивости. Это, в свою очередь, способствует формированию продольных структур, на которых реализуются соответствующие условия для образования и развития вторичных возмущений. Такой физический механизм приводит к ламинарно-турбулентному переходу на крыле со стреловидной передней кромкой. С другой стороны, в области передней кромки, где происходит зарождение возмущений, как правило, присутствует ускорение потока и данное обстоятельство способствует подавлению высокочастотных возмущений. Поэтому, с позиций появления ламинарно-турбулентного перехода, область ускорения потока до недавнего времени не представляла интереса для исследователей. Настоящие исследования направлены на устранение данного пробела и показывают, что существуют режимы течения, при которых неоднородности поверхности вблизи передней кромки способны привести к раннему возникновению ламинарно-турбулентного перехода.

В работе также продемонстрирован один из способов управления развитием возмущений пограничного слоя – распределённый отсос через мелкоперфорированную поверхность, с помощью которого удалось уменьшить интенсивность возмущений за элементом шероховатости.

**Целью работы** является изучение влияния различных элементов шероховатости на течение, формирующееся на скользящих крыльях в области благоприятного градиента давления.

## **Задачи исследования**

1. Адаптировать методику жидкокристаллической термографии и методику определения области максимальной восприимчивости для исследований на модели трапецевидного летающего крыла.

2. С помощью термоанемометрии исследовать течение и внутреннее строение продольной структуры за трехмерным элементом шероховатости.

3. Изучить влияние распределенного отсоса пограничного слоя через мелкоперфорированную поверхность на течение, формирующееся за элементом шероховатости.

#### **Научная новизна и практическая значимость**

– Проведено подробное исследование влияния двумерного элемента шероховатости на течение за трехмерным элементом с помощью методики термоанемометрии.

– Впервые проведены исследования на наветренной стороне модели летающего крыла в диапазоне скоростей 7,2–20 м/с и числа Рейнольдса, рассчитанного по хорде крыла  $Re_c \approx 250000–650000$ , соответствующих полётным значениям для реальных аппаратов в области благоприятного градиента давления за элементами шероховатости, и изучены механизмы вторичной неустойчивости возмущений, приводящих к турбулентности.

– С помощью методики жидкокристаллической термографии показано, что за трехмерным элементом шероховатости формируется продольная структура, вниз по течению наблюдается изгиб траектории данной структуры и увеличение ее размеров.

– С помощью термоанемометрии изучена внутренняя структура продольного возмущения. Показано наличие двух стационарных возмущений различных размеров, что обусловлено наличием поперечного течения и вторичных возмущений, приводящих к переходу.

– Исследовано и количественно определено влияние распределенного отсоса через мелкоперфорированный вкладыш на пространственное развитие стационарного возмущения от трехмерного элемента шероховатости в пограничном слое прямого крыла. Показано, что отсос способен реламинизировать течение и устранить отрыв пограничного слоя.

– Адаптирована методика определения области максимальной восприимчивости к положению элемента шероховатости на передней кромке модели летающего крыла.

#### **Достоверность результатов**

Экспериментальные исследования проводились в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324, степень турбулентности набегающего потока которой не превышает 0,04%. Это позволило проводить исследования возмущений на линейной стадии развития.

Визуализация пристенных течений выполнялась с помощью методики жидкокристаллической термографии. Данная методика позволила получить панорамные снимки передней кромки крыла, не «загрязняя» их в сравнении с другими методами визуализации. Полученные результаты визуализации подтверждались термоанемометрическими измерениями. Данный метод, обладающий высокой чувствительностью к пульсациям скорости (до 10 кГц), позволил получить большой объем количественных данных.

С помощью методики контролируемых возмущений производилось возбуждение вторичных возмущений с помощью акустического поля.

Помимо использования надежных и апробированных методик визуализации и измерений, использовалось также высокоточное измерительное оборудование. Кроме этого, главные результаты диссертации неоднократно докладывались на различных всероссийских и международных научных конференциях.

### **Личный вклад автора**

Автор принимала непосредственное участие в подготовке и проведении экспериментов. Участвовала в обработке результатов визуализации и их оформлении к публикации. При её участии разработана методика определения области максимальной восприимчивости к положению элемента шероховатости на передней кромке модели летающего крыла. Автор принимала непосредственное участие в обработке, анализе и обсуждении с коллегами научных результатов и подготовке статей по результатам исследований. Полученные результаты были опубликованы автором в рецензируемых научных журналах и доложены лично на конференциях, в том числе и международного уровня.

### **На защиту выносятся:**

1. методика жидкокристаллической термографии как инструмент визуализации при исследовании продольных и вторичных возмущений;
2. методика определения области максимальной восприимчивости пограничного слоя к возмущениям, формирующимся за элементом шероховатости;
3. экспериментальные данные о зарождении и эволюции продольных структур, полученные за элементами шероховатости на различных типах крыльев;
4. результаты исследования влияния отсоса пограничного слоя на течение за трехмерным элементом шероховатости.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертации обсуждались на всероссийских и международных конференциях и семинарах:

- Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии (Новосибирск – Шерегеш, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021);
- International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018, Новосибирск, 2018); (ICMAR 2020, Novosibirsk, 2020);
- 15th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization (Italy, Naples, 2019);
- XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019);
- 15 Asian Symposium on Visualization (ASV-15), (Korea; Busan, 2019);
- IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition (UK, London, 2019);
- XXXVI Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, 2020).
- Virtual ICTAM 2020+ 1 Congress (Italy, Milan, 2021)

## Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех частей, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций по теме диссертации. Объем работы составил 112 машинописных страниц, 64 рисунка, поясняющих содержание диссертации. В работе содержится 47 ссылок на научные статьи.

## Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 35 статьях и докладах, из них 6 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** диссертации приводится обзор работ, посвященных исследованиям в области ламинарно-турбулентного перехода. Основной упор делается на исследования на скользящих крыльях, для которых является характерным механизм неустойчивости поперечного течения. Данный тип неустойчивости реализуется в области благоприятного градиента давления и является причиной появления продольных возмущений, которые формируются за различными шероховатостями поверхности.

Также приведен анализ работ, связанных с исследованиями по управлению переходом ламинарного течения в турбулентное. Одним из методов контроля является отсасывание пограничного слоя. Данный способ позволяет подавить волны Толлмина – Шлихтинга и сместить вниз по потоку область перехода. Эксперименты с отсосом показывают, что данный способ является наиболее эффективным для управления ламинарно-турбулентным переходом.

Описание методик, использованных в данной работе, приводится **во второй главе**. Изучение способов исследования течения проводилось на модели скользящего крыла. Требовалось изучить влияние элементов шероховатости, расположенных на передней кромке крыла на течение в области благоприятного градиента давления.

В качестве основной методики визуализации была выбрана жидкокристаллическая термография (ЖКТ). Данная методика позволяет получать данные о структуре течения без «загрязнения» исследуемой области, а также дает возможность получать панорамные и информативные снимки (рис. 1,а, б). Результаты, полученные с помощью ЖК термографии, дополнялись данными, снятыми с помощью термоанемометрии постоянного сопротивления.

Посредством этих двух методик в работе исследовано влияние двумерного элемента шероховатости на след, формирующийся за трехмерным элементом. Оба элемента шероховатости располагались на передней кромке крыла, при этом двумерный элемент находился на плоской части крыла (рис. 1,в). Влияние исследовалось за счет увеличения высоты двумерного элемента, и было установлено, что, начиная с высоты  $h_{2d} = 0,78$  мм, наблюдается видимое изменение картины течения (рис. 2,г), происходит увеличение следа за трехмерным элементом шероховатости и появление продольных структур за самим двумерным элементом шероховатости (рис. 2,д, е).

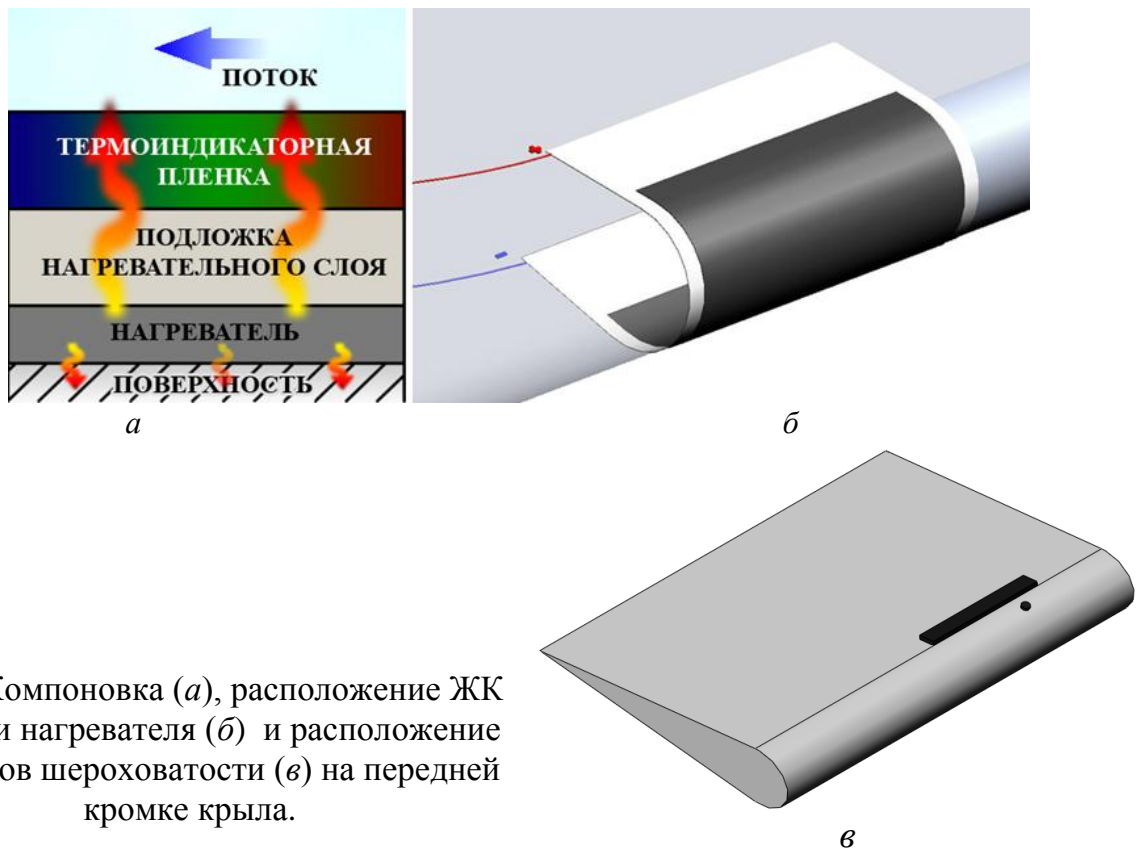


Рис. 1. Компоновка (а), расположение ЖК пленки и нагревателя (б) и расположение элементов шероховатости (в) на передней кромке крыла.

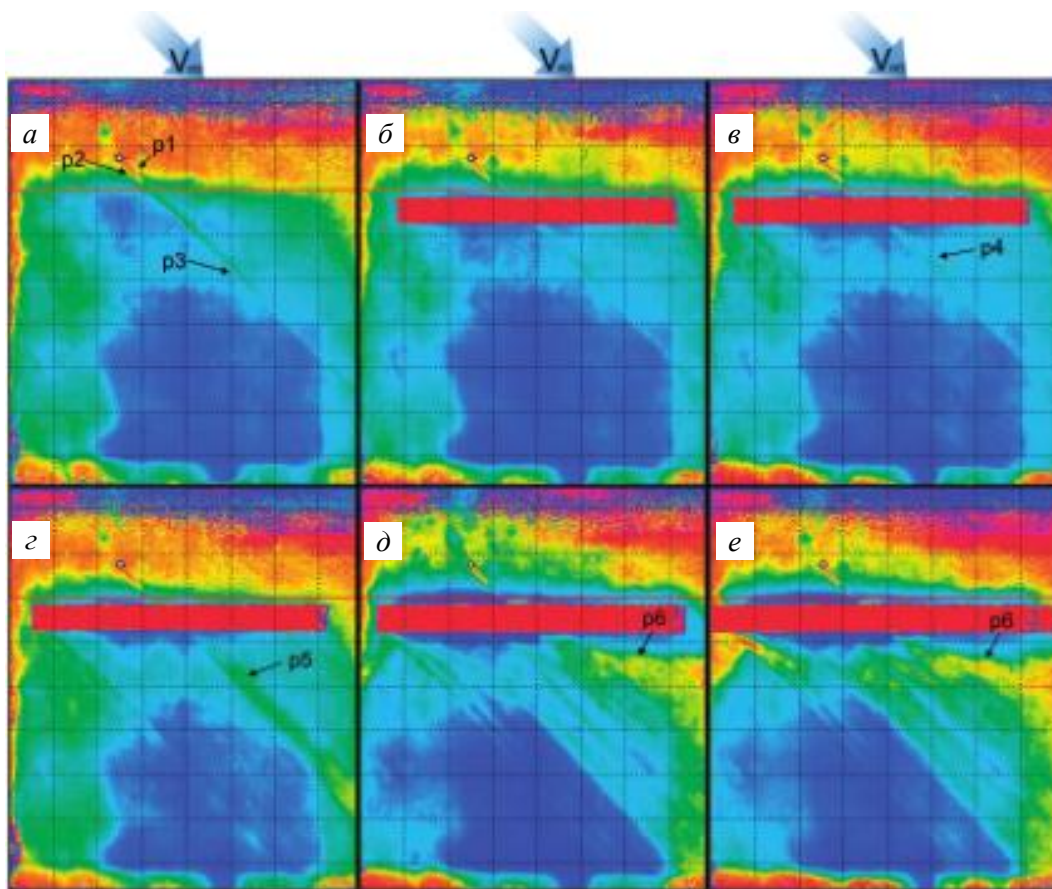


Рис. 2. Визуализация с помощью ЖКТ для различных высот двумерного элемента шероховатости.

$h_{2d} = 0$  (а); 0,26 (б); 0,52 (в); 0,78 (г); 1,56 (д); 1,82 (е) мм.

Таким образом, при работе с жидкокристаллической пленкой удалось увидеть наличие продольных структур, формирующихся на трехмерном и двумерном элементах шероховатости, а также вторичные структуры, развивающиеся под действием наложения акустического поля.

Измерения с помощью термоанемометрии проводились как за трех- и двумерными элементами, так и непосредственно над поверхностью двумерного элемента шероховатости. На рис. 3 представлены результаты измерений, проведенных с помощью термоанемометрии над двумерным элементом шероховатости. Видно, что продольные структуры начинают формироваться на переднем крае двумерного элемента и трансверсальный масштаб этих возмущений составляет 4–8 мм. Наложение акустического поля частотой 700 Гц приводит к появлению сигнала с амплитудой до 0,015 %. Более того, достижение максимальных значений происходит в точках перегиба в трансверсальном распределении скорости.

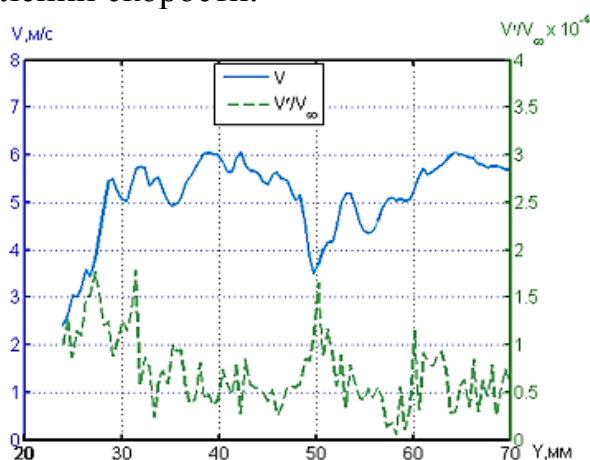


Рис. 3. Распределение средней скорости и амплитуды возбужденной моды частотой 700 Гц над двумерным элементом шероховатости.

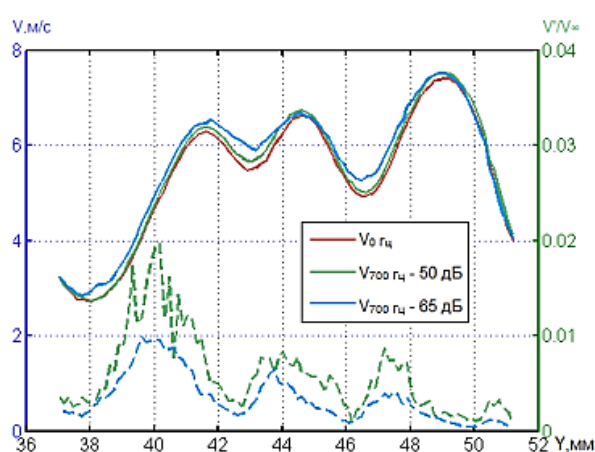


Рис. 4. Распределение средней скорости (сплошные линии) и амплитуды 700 Гц моды (штриховые линии) за двумерной шероховатостью на расстоянии  $X_w = 39$  мм.

На рис. 4 представлено распределение осредненной по времени скорости и амплитуды частотой 700 Гц за двумерным элементом шероховатости. Измерение проводилось на расстоянии  $X_w = 39$  мм, акустическое поле здесь было разных уровней громкости. На графике видно, возбуждение вторичных возмущений происходит вблизи точек перегиба в трансверсальном направлении средней скорости. Для удобства отображения и сравнения результатов амплитуда возмущений, возбужденных акустикой 65 дБА, была уменьшена в 10 раз.

**Третья глава** данной диссертации посвящена более детальным исследованиям влияния двумерного элемента шероховатости на стационарную структуру, формирующуюся за трехмерным элементом, и на течение в целом с помощью термоанемометрии. Приводятся также результаты, полученные на модели трапециевидного летающего крыла при натуральных числах Рейнольдса.

Исследования проводились в аэродинамической трубе закрытого типа Т-324 Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН. Поперечное сечение рабочей части трубы  $1000 \times 1000 \times 4000$  мм. Контроль скорости набегающего потока  $U_0$  осуществлялся с помощью трубки Пито – Прандтля, соединенной с электронным манометром. Эксперимент проводился при  $U_0 = 9,2$  м/с. Степень турбулентности набегающего потока не превышала 0,03 %.

Модель скользящего крыла, задействованная в данном эксперименте, была выполнена из органического стекла (полиметилметакрилат) с углом скольжения  $\chi = 45^\circ$ . Крыловой профиль образован цилиндром радиусом 40 мм и двумя сходящимися плоскостями. Размах крыла 980 мм, хорда 400 мм. Нежелательные возмущения, формирующиеся на стенках трубы, отсекались концевыми шайбами, расположенными на модели крыла (рис. 5), установленной под углом атаки  $\alpha = -11,1 \pm 0,2^\circ$  для формирования благоприятного градиента давления над верхней плоскостью крыла.

Формирование стационарных возмущений на передней кромке крыла осуществлялось с помощью цилиндрического элемента шероховатости высотой 0,78 мм и диаметром 1,6 мм. Шероховатость располагалась на расстоянии 68,7° от линии симметрии профиля крыла (см. рис. 1). На плоской части крыла была установлена двумерная шероховатость шириной 15 мм и длиной 270 мм. Данный вид шероховатости был многослойным, и его толщина варьировалась от 0 до 1,04 мм с шагом 0,13 мм.

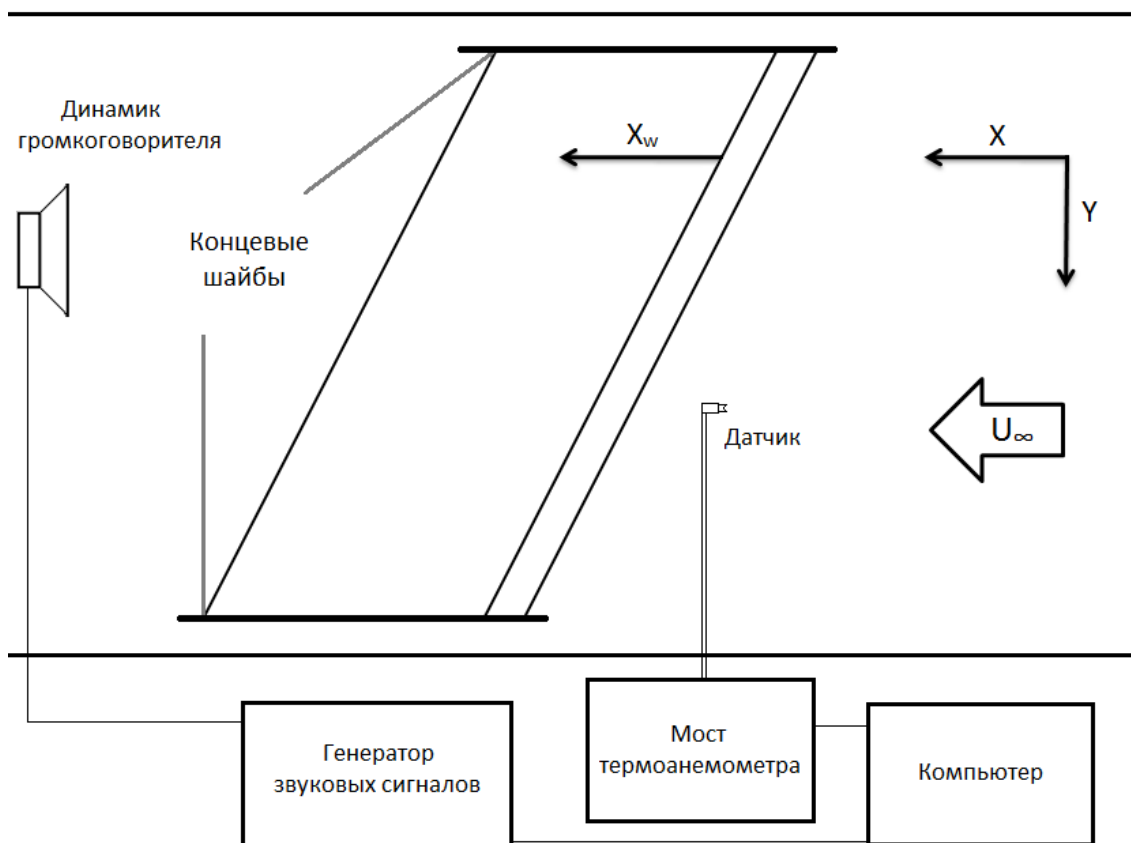


Рис. 5. Схема эксперимента.



Предварительные термоанемометрические измерения показали наличие благоприятного градиента давления на исследуемой поверхности крыла, что удовлетворяет изначальным поставленным условиям.

На модели крыла был размещен цилиндрический элемент шероховатости. В структуре течения отчетливо наблюдалась стационарная структура, состоящая из одной области дефекта и одной области превышения скорости (рис. 6,  $h_{2D} = 0$  мм). В дополнение к цилиндрическому элементу шероховатости на плоской части крыла устанавливалась двумерная шероховатость. Проведены термоанемометрические измерения, по результатам которых получено распределение стационарного возмущения скорости для различных высот двумерных шероховатостей (см. рис. 6). Ее заметное влияние на течение наблюдается, начиная с высоты  $h_{2D} = 0,52$  мм, – возникают дополнительные продольные структуры. Дальнейшее увеличение высоты двумерной шероховатости усиливает этот процесс, амплитуда дополнительных продольных структур становится больше, а амплитуда основного возмущения становится меньше ниже по течению.

Дополнительную информацию после обработки приносит представление данных в виде изолиний равной амплитуды, расположенных с логарифмическим шагом (рис. 7). В представлении цвет изолинии зависит от величины скорости. В качестве нулевого значения выбран зеленый цвет. Области превышения скорости показаны изолиниями с диапазоном цветов от зеленого к красному. Области дефекта скорости соответствует диапазон цветов от зеленого к синему. Видно, что продольные структуры формируются не только за цилиндрическим элементом шероховатости, но также и за самой двумерной шероховатостью. Процессы, которые при этом имеют место, аналогичны – происходит мультипликация продольной структуры. Несмотря на то, что амплитуда продольных структур, генерируемых двумерной шероховатостью, гораздо меньше

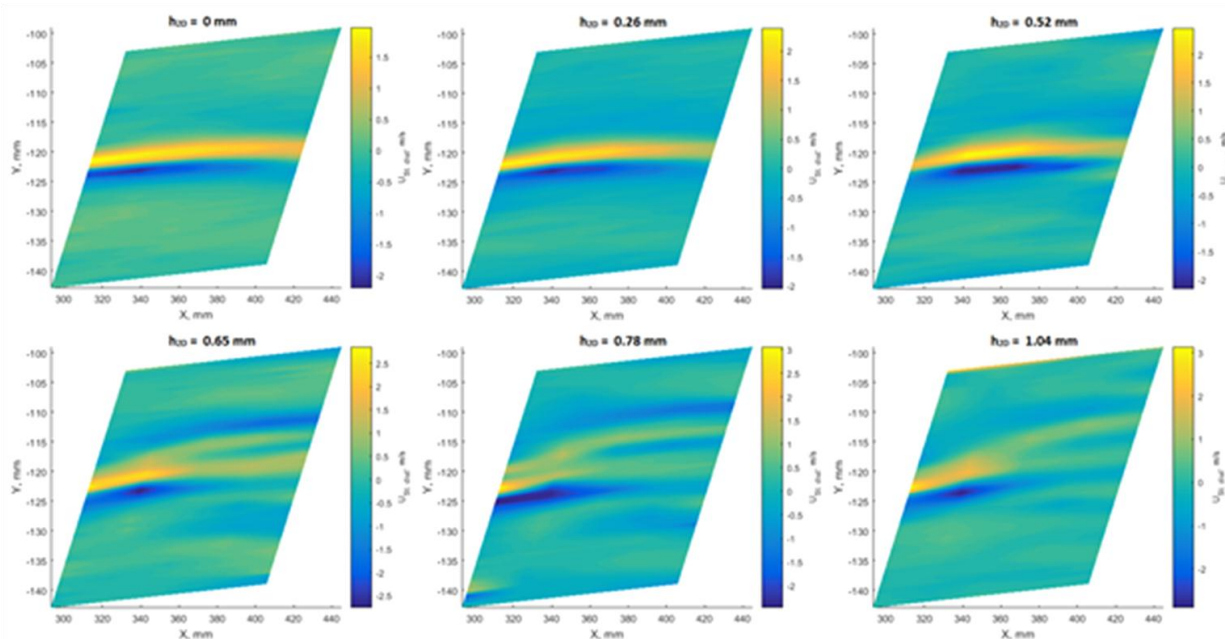


Рис. 6. Влияние высоты двумерного элемента шероховатости на распределение скорости стационарного возмущения.

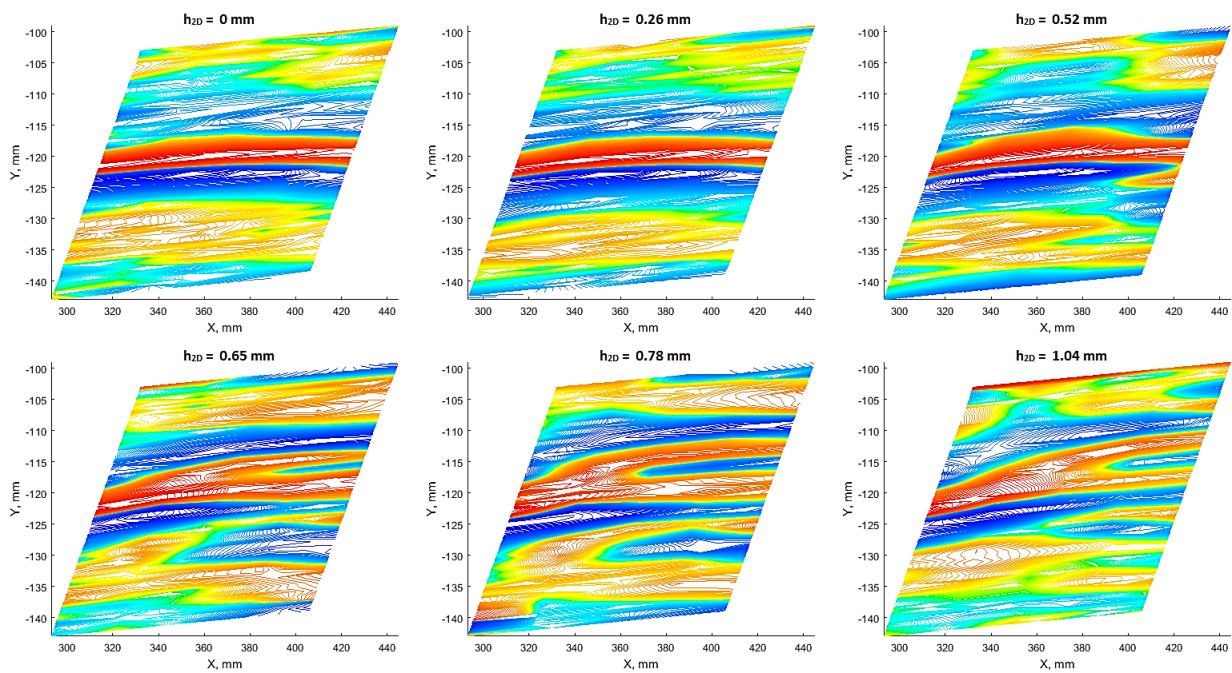


Рис. 7. Влияние высоты двумерного элемента шероховатости на стационарные возмущения за ним.

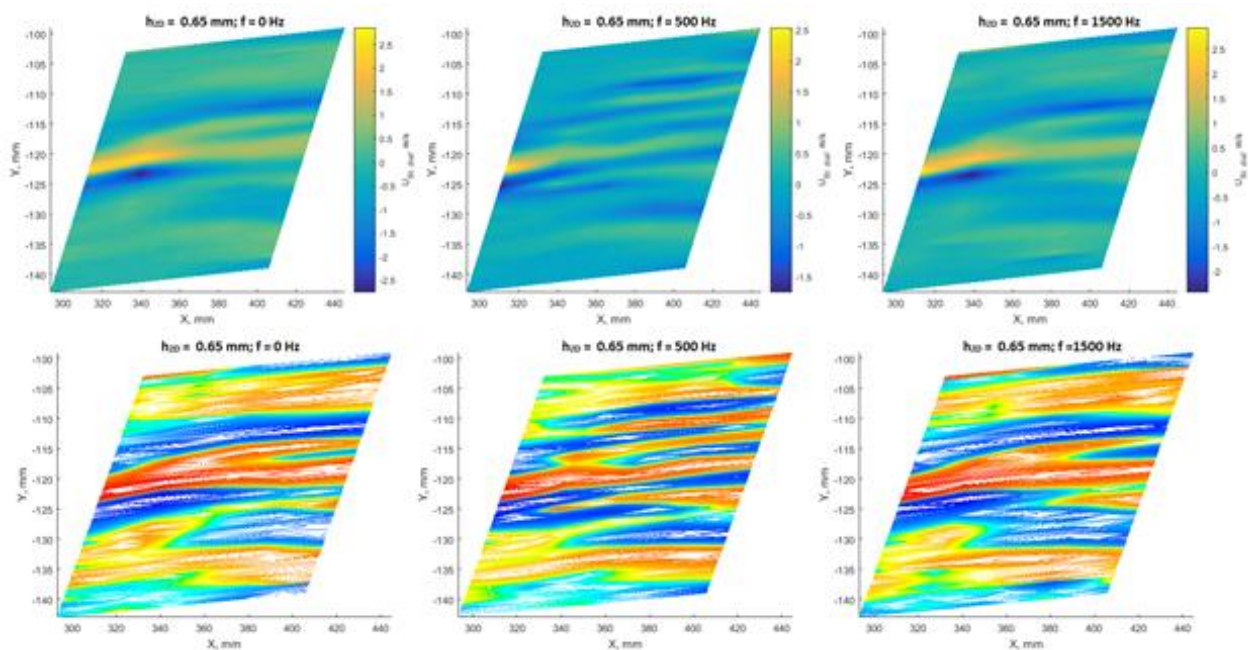


Рис. 8. Влияние акустического поля на распределение стационарного возмущения скорости за двумерным элементом шероховатости  $h_{2D} = 0,65$  мм.

генерируемых цилиндрическим элементом шероховатости, местоположение мультипликации продольных структур примерно одинаковое.

Проводились исследования при наложении акустического поля при высоте двумерного элемента шероховатости  $h_{2D} = 0,65$  мм (рис. 8). Видно, что частота звука  $f = 500$  Гц приводит к сильному перестроению течения и возникновению новых продольных структур. Используя логарифмическое представление данных (см. рис. 8, нижний ряд), можно выделить, что конечные попереч-

ные масштабы возмущений в режимах с наложением акустики и без наложения совпадают. Поэтому данное воздействие можно охарактеризовать как ускорение естественного процесса мультипликации. Следует подчеркнуть, что акустическое воздействие с частотой 1500 Гц не привело к заметному перестроению течения (см. рис. 8).

В результате данного исследования удалось установить, что двумерная шероховатость локально дестабилизирует вторичные возмущения, зарождающиеся в набегающем стационарном возмущении. Двумерная шероховатость высотой с толщину вытеснения пограничного слоя и более приводит к снижению устойчивости пограничного слоя к возмущениям (в данных экспериментальных условиях это были частоты около 500 Гц). Вдоль по течению наблюдается перестроение трансверсального масштаба продольных структур. Наложение акустического поля с частотой 500 Гц приводит к интенсификации процессов перестроения масштаба продольных структур и к увеличению области с турбулентным режимом течения.

Следующей частью исследования является переход к турбулентности на модели трапециевидного летающего крыла. Выбор данной модели обусловлен возможностью проводить эксперименты на модели беспилотного летающего аппарата (БПЛА) или дрона при натуральных числах Рейнольдса и реальных скоростях потока, при которых и летают реально существующие БПЛА. При проведении экспериментов на модели трапециевидного крыла требовалось адаптировать ранее изученные при работе со скользящим крылом методики и с их помощью исследовать процессы, протекающие за элементами шероховатости, расположенными на поверхности летающего крыла.

Серия экспериментов проводилась в рабочей части дозвуковой аэродинамической трубы Т-324 Института теоретической и прикладной механики СО РАН. Степень турбулентности набегающего потока составляла менее 0,04 %. Скорость набегающего потока варьировалась в диапазоне от 7,2 до 20 м/с. Использовалась модель стреловидного крыла с гладкой поверхностью, изготовленная из дерева и покрытая лаком. Форма модели и ее размеры представлены на рис. 9, а. Исследования проводились на наветренной стороне модели. Для формирования благоприятного градиента давления крыло устанавли-

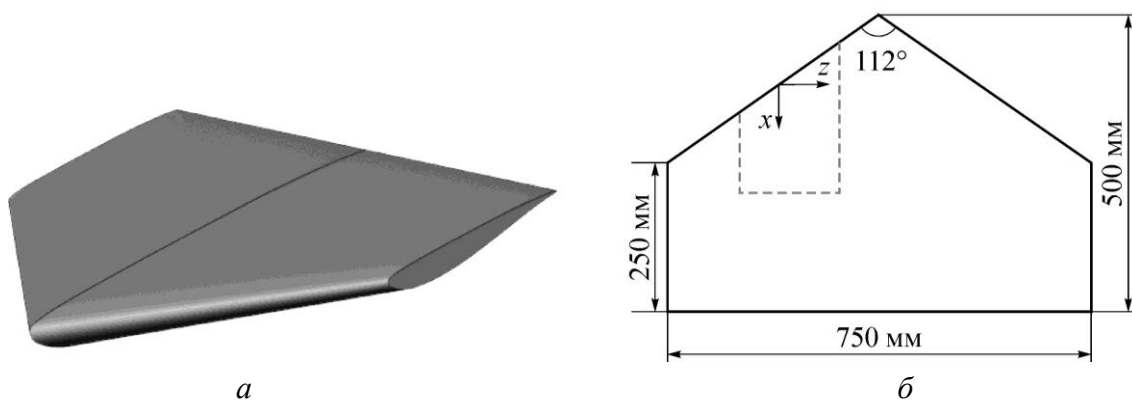


Рис. 9. Модель (а) и размеры трапециевидного летающего крыла (б).

Штриховая линия – область измерений.

ливалось в рабочей части трубы под отрицательным углом атаки  $\alpha = -5^\circ$ , и в дальнейшем это значение не менялось во всех измерительных сериях. Это позволило реализовать благоприятные условия для развития возмущений неустойчивости поперечного течения и подавить волны Толлмина – Шлихтинга.

С помощью методики жидкокристаллической термографии были получены картины визуализации течения в отсутствие (рис. 10, *а*) и при наличии (рис. 10, *б*) трехмерного элемента шероховатости. Видно, что даже в отсутствие элементов шероховатости на передней кромке крыла происходит формирование продольных структур. При установке трехмерного элемента шероховатости высотой  $h_{2D} = 0,98$  мм на расстоянии 6 мм от передней кромки (область максимальной восприимчивости для данной конфигурации) происходит формирование стационарной продольной структуры, которая вниз по течению увеличивается в размерах, а также слегка отклоняется от нормали.

С помощью термоанемометрии при скорости набегающего потока  $U_0 = 10$  м/с было получено распределение пульсаций скорости в виде изоконтуров в плоскости  $yz$  в зависимости от координаты  $x$  (рис. 11). Видно, что за трехмерным элементом шероховатости формируются два стационарных возмущения внутри продольной структуры (рис. 11, *а*). Эти вихри вращаются в направлении друг к другу. Различие их геометрических размеров между собой обусловлено наличием и, соответственно, влиянием поперечного течения на крыле, которое усиливает сонаправленное возмущение и подавляет противоположно направленное. Двигаясь ниже по течению, эти вихри постепенно увеличиваются в размерах по координате  $y$  и по координате  $z$  (рис. 11, *б, в, г*). Это приводит к увеличению самой продольной структуры, что также наблюдалось во время проведения визуализации методом жидкокристаллической термографии.

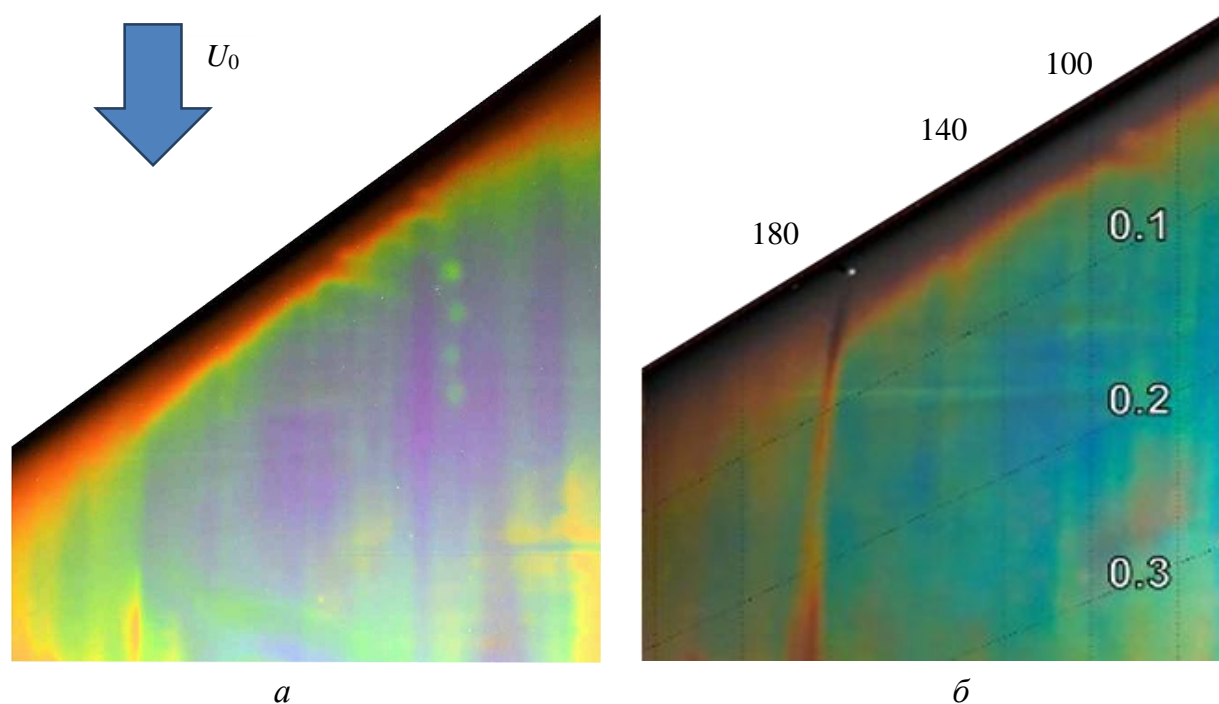


Рис. 10. Визуализация пристенного течения на гладкой поверхности БПЛА (*а*) и за элементом шероховатости (*б*).

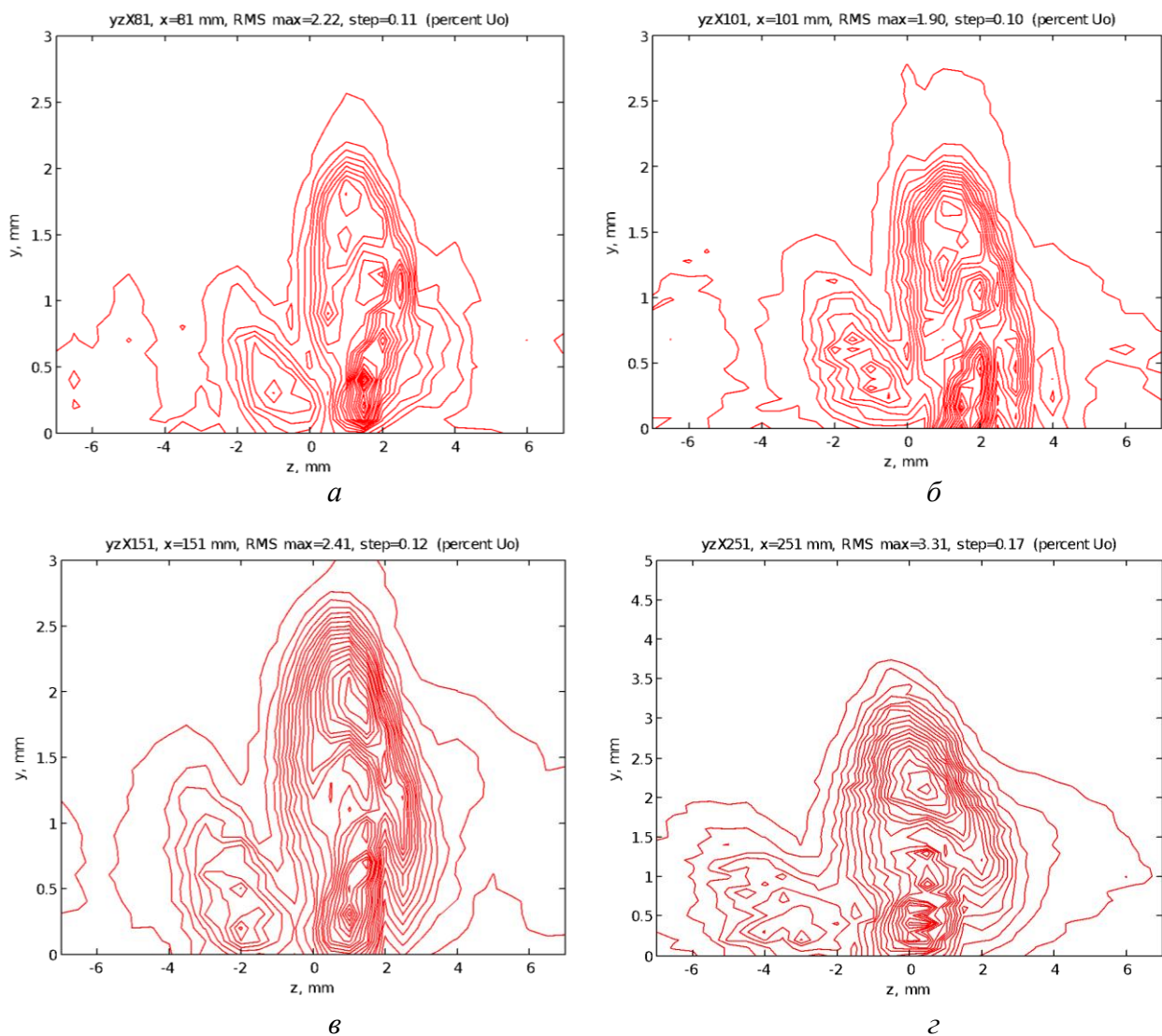


Рис. 11. Изолинии пульсаций скорости в плоскости  $yz$  за элементом шероховатости при  $x = 81$  (а), 101 (б), 151 (в) и 251 (г) мм.

Был проведен спектральный анализ (рис. 12) в точках, соответствующих максимуму по амплитуде пульсаций по координате  $z$ , и в максимуме по координате  $y$  при  $x = 81, 101, 151, 251$  мм. Эти точки как раз приходились на возмущение внутри продольной структуры, которое усиливалось поперечным течением. Спектральный анализ пульсаций скорости течения за элементом шероховатости показал наличие волновых пакетов в области высоких частот (рис. 12, а, б). При  $x = 81$  мм отчетливо наблюдаются два пика в области 1,7 и 2,4 кГц. При смещении вниз по течению видно нарастание амплитуды и при  $x = 151$  мм происходит формирование пакета на частоте 1 кГц. Дальнейшее смещение вдоль потока показывает, что для  $x = 251$  мм спектр переходит в область низких частот. Таким образом, можно отметить, что на начальном этапе наблюдается преобладание высоких частот, но со смещением вниз по течению основной вклад начинают давать низкие частоты.

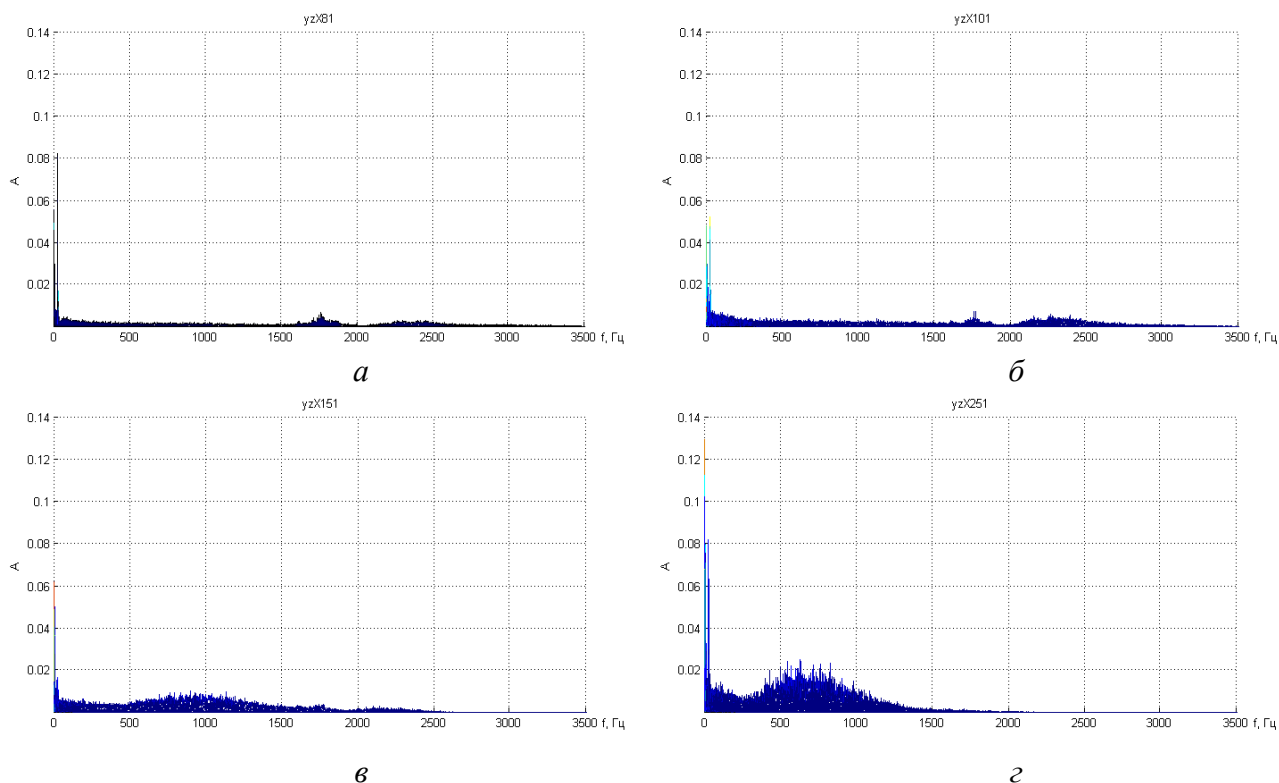


Рис. 12. Спектр в точке максимума пульсаций по  $z$  и по  $y$  за элементом шероховатости при  $x = 81$  (а), 101 (б), 151 (в), 251 (г) мм.

В результате данного исследования были получены картины визуализации обтекания гладкой поверхности модели и течения за элементом шероховатости. Зафиксировано образование продольных структур вблизи передней кромки при благоприятном градиенте давления. Было показано, что за шероховатостью на расстоянии 46 калибров относительно диаметра цилиндра формируется продольная структура, внутри которой существуют два стационарных возмущения. Эти вихри имеют разные геометрические размеры относительно друг друга вследствие влияния поперечного течения. При движении вниз по потоку размеры вихрей увеличиваются и происходит незначительная деформация их формы. Частотный состав пульсаций при этом смещается в область низких частот.

**В четвертой главе** акцент смещается на исследование возможности управления течением с помощью отсоса пограничного слоя. Моделируется ситуация, когда на наветренной стороне, по центру беспилотного летательного аппарата находится видео камера.

Использованная в эксперименте модель крыла представляла собой прямоугольное крыло, с симметричным профилем NACA 0012. Хорда  $c = 501$  мм, размах  $L = 950$  мм, максимальная толщина  $t = 60$  мм. Схема модели крыла представлена на рис. 13,а. Крыло располагалось в рабочей части под отрицательным углом атаки  $\alpha = -6,5^\circ$  и под нулевым углом скольжения.

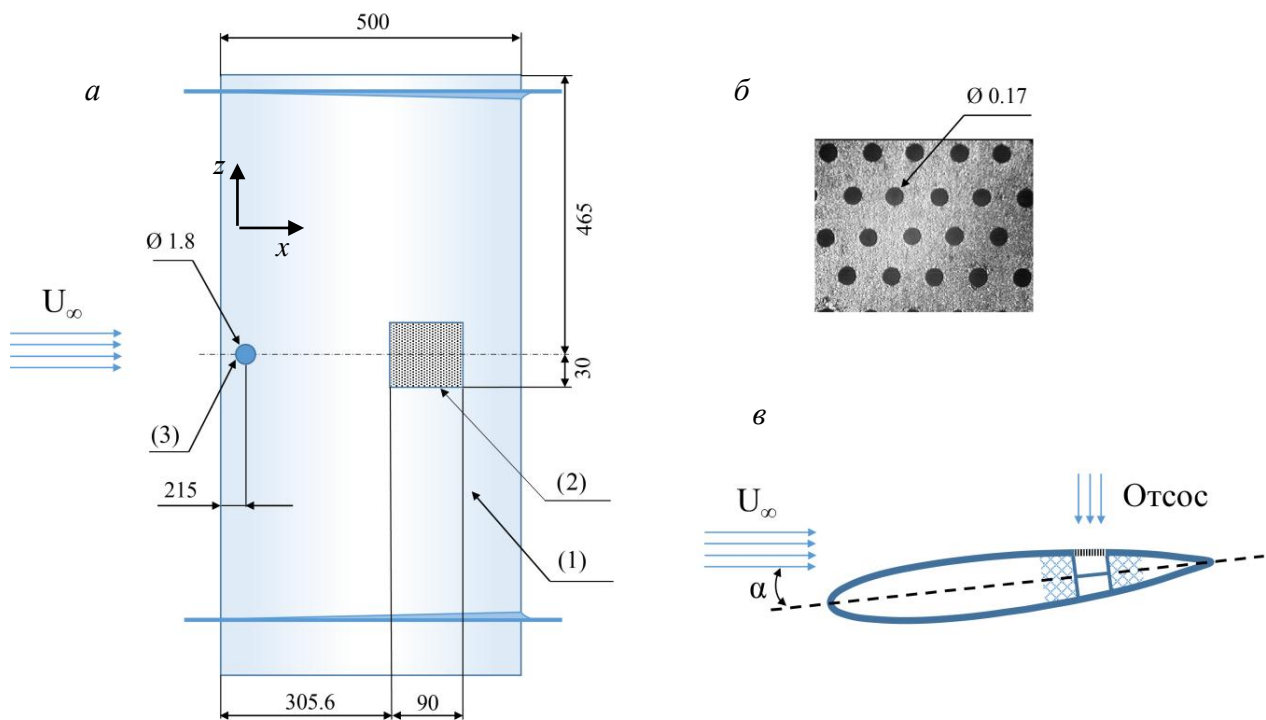


Рис. 13. Модель прямого крыла (а), увеличенный участок мелкоперфорированной вставки (б) и схема отсоса пограничного слоя (в).

1 – крыло, 2 – мелкоперфорированная вставка, 3 – трехмерный элемент шероховатости.

Трехмерный цилиндрический элемент шероховатости играл роль источника возбуждения стационарных возмущений. Высота элемента составила 1,7 мм, диаметр 1,8 мм. Элемент шероховатости располагался на расстоянии 215 мм от передней кромки крыла. Расстояние между элементом шероховатости и началом вставки составляло 75 мм.

Исследования проводились как с естественными, так и искусственными возмущениями, генерируемыми с помощью акустики на частоте 120 Гц с интенсивностью звука 90 дБ.

Как в случае естественных, так и при искусственных возмущениях, удалось снизить интенсивность интегральных пульсаций скорости в следе за шероховатостью для «естественных возмущений» малых амплитуд в 5 раз (рис. 14) и в 90 раз для усиленных звуковым воздействием возмущений (рис. 15).

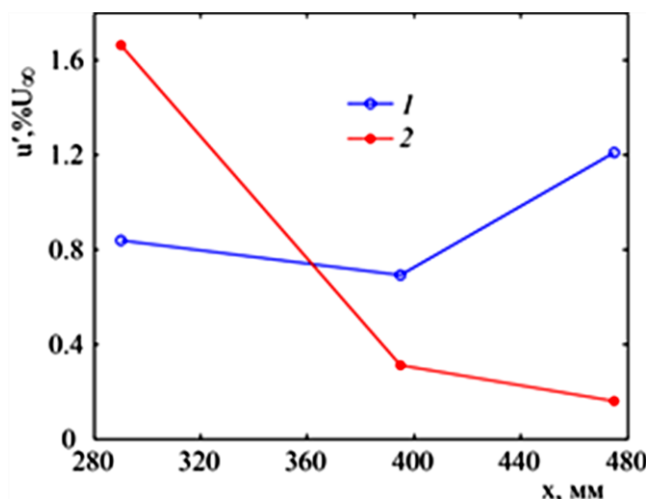


Рис. 14. Распределение пульсаций скорости естественных возмущений за элементом шероховатости вдоль хорды крыла в широком диапазоне частот ( $0 < f < 2$  кГц).

1 – без отсоса, 2 – с отсосом.

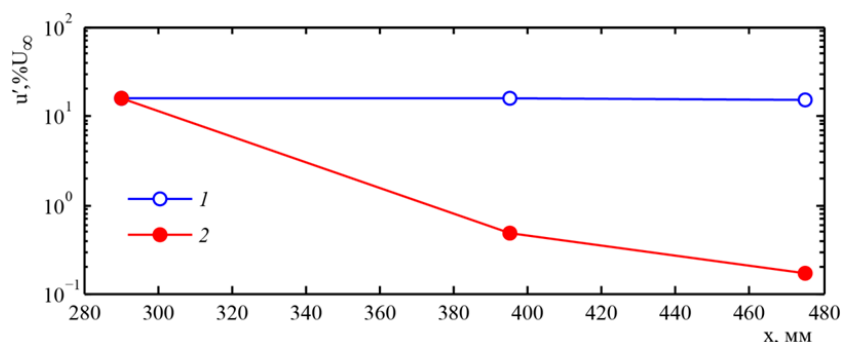


Рис. 15. Распределение пульсаций скорости для возмущений с наложенным акустическим полем в следе за шероховатостью вдоль хорды крыла в широком диапазоне частот ( $0 < f < 2$  кГц).

1 – без отсоса, 2 – с отсосом.

Кроме того, было установлено, что распределенный отсос в области неблагоприятного градиента давления воздействует на среднее течение, устраняя отрыв потока у задней кромки крыла. Воздействие распределённого по поверхности отсоса на течение внутри пограничного слоя за элементом шероховатости приводит к полному устранению неоднородности течения – стационарной продольной структуры.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Адаптирована методика жидкокристаллической термографии для исследования процесса ламинарно-турбулентного перехода на скользящем крыле и модели трапециевидного летающего крыла (при натуральных скоростях полёта и числах Рейнольдса).

2. Отработана методика обнаружения области максимальной восприимчивости продольных структур к шероховатости на передней кромке скользящего крыла и модели трапециевидного летающего крыла (при натуральных скоростях полёта и числах Рейнольдса).

3. Показано, что двумерная ступенька приводит к появлению периодических продольных структур на модели скользящего крыла.

4. Исследование течения на наветренной стороне модели летающего крыла с установленным на поверхности трехмерным элементом шероховатости высотой  $h_{3D} = 0,98$  мм (сравнимой с толщиной пограничного слоя в месте расположения) при скорости набегающего потока 10 м/с показало:

- а) продольная структура состоит из двух стационарных возмущений;
- б) стационарные возмущения имеет разный размер, обусловленный наличием поперечного течения;
- в) при движении вниз по течению размеры возмущений увеличиваются, а частотный состав пульсаций смещается в область низких частот, что хорошо согласуется результатами прежних работ.



5. Показано, что распределенный отсоса через гидравлически гладкую проницаемую поверхность как при «естественных возмущениях» малых интенсивностей, так и на возмущениях, усиленных внешним акустическим полем, снижает в 5 раз интенсивность пульсаций скорости в следе за шероховатостью в случае «естественных возмущений» малых амплитуд и в 90 раз для усиленных внешним звуковым воздействием возмущений.

6. Воздействие распределённого по поверхности отсоса на течение внутри пограничного слоя за элементом шероховатости приводит к полному устранению неоднородности течения – стационарной продольной структуры. При этом ниже области отсоса пограничный слой становится ламинарным и однородным (двумерным) по размаху крыла, происходит реламинаризация начального турбулентного течения.

В работе используются ссылки на 47 источников литературы.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК*

1. **Tolkachev S.N., Kozlov V.V., Kaprilevskaya V.S.** *Influence of two-dimensional roughness element on boundary layer structure in the favourable pressure gradient region of the swept wing* // Journal of Aerospace Engineering: Part G. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: 7 European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS), (Italy, Milan, 03–06 July 2017). Vol. 2017. – 2020. – Vol. 234, No. 1. – P. 20–27. DOI: 10.1177/0954410019841776.
2. **Каприлевская В.С., Павленко А.М., Козлов В.В., Крюков А.В.** *Течение за трехмерным элементом шероховатости на модели стреловидного крыла* // Теплофизика и аэромеханика. – 2020. – Т. 27, № 3. – С. 337–346.
3. **Павленко А.М., Каприлевская В.С., Катасонов М.М., Козлов В.В.** *Исследование течения за элементом шероховатости на поверхности БПЛА при благоприятном градиенте давления* // Сибирский физический журнал. – 2020. – Т. 15, № 2. – С. 61–72. DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-61-72.
4. **Каприлевская В.С., Толкачев С.Н., Козлов В.В.** *Исследование структуры течения за двумерной шероховатостью на скользящем крыле в области благоприятного градиента давления* // Сибирский физический журнал. – 2017. – Т. 12, No. 3. – С. 24–34. DOI: 10.25205/2541-9447-2017-12-3-24-34.
5. **Толкачев С.Н., Каприлевская В.С., Козлов В.В.** *Роль двумерной шероховатости в процессе ламинарно-турбулентного перехода в области благоприятного градиента давления на скользящем крыле* // Вестник НГУ. Сер. Физика. – 2014. – Т. 9, No. 4. – С.65–73.
6. **Kaprilevskaya V.S., Kozlov V.V.** *The investigation of influence of two-dimensional roughness element on the swept wing flow structure in favourable gradient region* // AIP Conference Proceedings: XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018). (Novosibirsk, Russia, 13–19 Aug., 2018. – S.l.: AIP Publishing, 2018. – Vol. 2027, No. 1. – Art. 040064 (6 p.) DOI: 10.1063/1.5065338.

### *Другие статьи*

1. **Tolkachev S.N., Kozlov V.V., Kaprilevskaya V.S.** *The influence of two-dimensional roughness element on boundary flow structure in the favorable pressure gradient region of the swept wing* // 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2017), (Italy, Milan, 3–6 July, 2017): Proceedings. – S.l.: 2017. – P. 1–10. DOI: 10.13009/EUCASS2017-163.
2. **Tolkachev S.N., Kozlov V V., Kaprilevskaya V.S.** *The investigation of laminar-turbulent transition behind the localized roughness on the swept wing in the favorable pressure gradient region* // 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2017), (Italy, Milan, 3–6 July, 2017): Proceedings. – S.l.: 2017. – P. 1–9. DOI: 10.13009/eucass2017-161.

### *Материалы конференций*

1. **Каприлевская В.С., Павленко А.М.** *Изучение развития течения за трехмерным элементом шероховатости на модели летающего крыла* // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XIV Всероссийской

конференции молодых ученых (Новосибирск – Шерегеш, 28 февраля – 6 марта 2020 г.). – Новосибирск, 2020. – С. 82–83.

2. **Павленко А.М., Каприлевская В.С., Козлов В.В.** *Изучение влияния трехмерного элемента шероховатости на течение на трапецевидном крыле // XXXVI Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, 5–7 октября 2020 г.), посв. 70-летию академика РАН Алексеенко С. В.: тезисы докладов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых. – Новосибирск, 2020. – С. 36.*
3. **Kaprivlevskaya V.S., Pavlenko A.M., Kozlov V.V.** *Investigation of the flow over flying wing surface with three-dimensional roughness placed on the leading edge // XX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2020). (Novosibirsk, Russia, 2–6 Nov., 2020) : abstracts. – Pt. I. – Novosibirsk, 2020 – P. 89–90.*
4. **Pavlenko A.M., Kaprivlevskaya V.S., Kozlov V.V., Katasonov M.M.** *Influence of the boundary layer suction on the flow behind three-dimensional roughness on the straight wing model // XX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2020), (Novosibirsk, Russia, 2–6 Nov., 2020) : abstracts. –Pt. I. – Novosibirsk, 2020. – P. 153–154.*
5. **Pavlenko A.M., Kaprivlevskaya V.S., Tolkachev S.N., Katasonov M.M.** *Visualization of laminar-turbulent transition behind localized and two-dimensional roughness element on the leading edge of flying wing model // 15th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization (Italy, Naples, 27–30 May, 2019) : Proceedings. – 2019. – No. 139. – P. 1–2.*
6. **Pavlenko A.M., Kaprivlevskaya V.S., Tolkachev S.N., Kozlov V.V.** *Visualization of the flow behind a two-dimensional roughness element and its role in the laminar-turbulent transition on the swept wing model // 15th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization (Naples, Italy, 27–30 May, 2019) : Proceedings. – 2019. – No. 148. – P. 1–2.*
7. **Каприлевская В.С., Козлов В.В.** *Исследование течения за двумерным элементом шероховатости и его влияние на ламинарно-турбулентный переход на скользящем крыле // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 19–24 авг. 2019 г.): аннот. докл. –Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. – С. 116.*
8. **Каприлевская В.С., Козлов В.В.** *Исследование течения за двумерным элементом шероховатости и его влияние на ламинарно-турбулентный переход на скользящем крыле // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 19–24 авг. 2019 г.): сб. тр. в 4 т. Т. 2. Механика жидкости и газа. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. – С. 559–561.*
9. **Каприлевская В.С., Павленко А.М., Жаркова Г.М.** *Исследование структуры течения за локализованным трехмерным элементом шероховатости на модели летающего крыла // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XIII Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск – Шерегеш, 15–22 марта 2019 г.). – Новосибирск, 2019. – С. 71–72.*
10. **Павленко А.М., Каприлевская В.С., Катасонов М.М.** *Визуализация течения и ламинарно-турбулентного перехода за трехмерным и двумерным элементами шероховатости на передней кромке модели летающего крыла // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 19–24 авг. 2019 г.): аннот. докл. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. – С. 124.*

11. Павленко А.М., Каприлевская В.С., Катасонов М.М. *Визуализация течения и ламинарно-турбулентного перехода за трехмерным и двумерным элементами шероховатости на передней кромке модели летающего крыла* // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 19–24 авг. 2019 г.: сб. тр. в 4 т. Т. 2. Механика жидкости и газа. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. – С. 661–662.
12. Kaprilevskaya V.S., Tolkachev S.N., Kozlov V.V. *The investigation of influence of two-dimensional roughness element on the swept wing flow structure in favourable gradient region* // XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018). (Novosibirsk, Russia, 13–19 Aug., 2018): abstracts. – Pt. I. – Novosibirsk: 2018. – P. 117.
13. Каприлевская В.С., Толкачев С.Н., Козлов В.В. *Влияние двумерного элемента шероховатости на процесс ламинарно-турбулентного перехода вблизи передней кромки скользящего крыла* // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск – Шерегеш, 16–22 марта 2018 г.) / под ред. В.В. Козлова. – Новосибирск, 2018. – С.75–76.
14. Tolkachev S.N., Kozlov V.V., Kaprilevskaya V.S. *The investigation of laminar-turbulent transition behind the localized roughness on the swept wing leading edge* // The 14th Asian symposium on visualization (China, Beijing, 22–26 May 2017): Abstract book. – 2017. – P. 26–27.
15. Tolkachev S.N., Kozlov V.V., Kaprilevskaya V.S. *The role of two-dimensional roughness element in laminar-turbulent transition near the swept wing leading edge* // The 14th Asian symposium on visualization (China, Beijing, 22–26 May 2017): Abstract book. – 2017. – P. 10–11.
16. Толкачев С.Н., Каприлевская В.С., Козлов В.В. *Влияние локализованной шероховатости на ламинарно-турбулентный переход в области передней кромки скользящего крыла* // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XI Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск – Шерегеш, 20–23 марта 2017 г.) / под ред. В.В. Козлова. – Новосибирск: Параллель, 2017. – С. 121–122.
17. Толкачев С.Н., Каприлевская В.С., Козлов В.В. *Исследование роли двумерного элемента шероховатости в ламинарно-турбулентном переходе вблизи передней кромки скользящего крыла* // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XI Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск – Шерегеш, 20–23 марта 2017 г. / под ред. В.В. Козлова. – Новосибирск: Параллель, 2017. – С. 123–124.
18. Толкачев С.Н., Козлов В.В., Каприлевская В.С. *Исследование ламинарно-турбулентного перехода за локализованной шероховатостью на передней кромке скользящего крыла* // XXXIII Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, 6–8 июня 2017 г., посв. 60-летию Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН: тезисы докладов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых. – Новосибирск, 2017. – С. 86.
19. Толкачев С.Н., Козлов В.В., Каприлевская В.С. *Роль двумерного элемента шероховатости в ламинарно-турбулентном переходе вблизи передней кромки скользящего крыла* // XXXIII Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, 6–8 июня 2017 г., посвященный 60-летию Института теплофизики им. С.С. Кута-

теладзе СО РАН: тезисы докладов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых. – Новосибирск, 2017. – С. 87.

20. **Tolkachev S.N., Kaprilevskaya V.S., Kovrizhina V.N., Zharkova G.M.** *Liquid crystal thermography technique for the investigation of stationary disturbances on the swept wing leading edge // XVIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2016), (Russia, Perm, 27 Jun. – 3 Jul. 2016: abstracts. Pt. I. – Perm, 2016. – P. 200–201.*
21. **Tolkachev S.N., Kaprilevskaya V.S., Kozlov V.V.** *The investigation of the role of two-dimensional and localized roughness element on laminar-turbulent transition on the swept wing leading edge // XVIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2016). (Russia, Perm, 27 Jun. – 3 Jul. 2016: abstracts. Pt. I. – Perm: 2016. – P. 198–199.*
22. **Tolkachev S.N., Kozlov V.V., Kaprilevskaya V.S.** *The investigation of the localized roughness influence on the laminar-turbulent transition on the swept wing in the favorable pressure gradient region // Dynamics of Concentrated Vortices: Euromech colloquium, (Russia, Novosibirsk, 30 May – 1 June 2016): book of abstracts. – Novosibirsk, 2016. – P. 87–88.*
23. **Tolkachev S.N., Kozlov V.V., Kaprilevskaya V.S.** *The role of two-dimensional roughness element in laminar-turbulent transition in the favorable pressure gradient region of the swept wing // Dynamics of Concentrated Vortices: Euromech colloquium, (Russia, Novosibirsk, 30 May – 1 June 2016): book of abstracts. – Novosibirsk, 2016. – P. 89–90.*
24. **Каприлевская В.С., Толкачев С.Н.** *Влияние двумерной шероховатости на процесс развития возмущений в области благоприятного градиента давления на скользящем крыле // Физика сплошных сред: Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции (МНСК-2016), (Россия, Новосибирск, 16–20 апр. 2016 г.) [Solid State Physics: Proceedings of the 54th International Students Scientific Conference]. – Новосибирск: 2016. – С. 40.*
25. **Каприлевская В.С., Толкачев С.Н.** *Роль двумерной шероховатости в процессе ламинарно-турбулентного перехода в области благоприятного градиента давления на скользящем крыле // Физика сплошных сред: Материалы 53-й Международной научной студенческой конференции (МНСК-2015), (Россия, Новосибирск, 11–17 апр. 2015 г.) [Solid State Physics: Proceedings of the 53rd International Students Scientific Conference]. – Новосибирск, 2015. – С. 32.*
26. **Толкачев С.Н., Каприлевская В.С.** *Исследование роли двумерной и локализованной шероховатости на ламинарно-турбулентный переход на передней кромке скользящего крыла // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 20 – 24 авг. 2015 г.): [сборник трудов]. – Казань, 2015. – С. 3756–3758. – CD-ROM.*