

УДК 533.6.071.4

## **Особенности применения метода сажемазляной визуализации поверхностного течения в импульсных сверхзвуковых аэродинамических трубах\***

**В.А. Кисловский, Н.А. Рябченко, Д.А. Семченко**

*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: kislovsky\_v@mail.ru

Изложены результаты сравнения различных подходов к сажемазляной визуализации течения на поверхности цилиндра при сверхзвуковом поперечном обтекании в импульсной аэродинамической трубе. Рассмотрены два вида мелкодисперсных красящих пигментов —  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$ . Используются два способа нанесения пигмента: посыпка на предварительно покрытую масляной пленкой поверхность модели и нанесение на поверхность модели смеси из пигмента и масла. Массовая концентрация пигмента в смеси для сажемазляной визуализации варьировалась в диапазоне от 10 до 20 %. Представлена фотосъемка динамики изменения сажемазляного покрытия на поверхности модели: сразу после нанесения, в процессе эксперимента и по его завершении.

По результатам проделанной работы сформулированы рекомендации по использованию метода сажемазляной визуализации поверхностного течения с учетом особенностей его применения при проведении экспериментов в импульсных сверхзвуковых аэродинамических трубах.

**Ключевые слова:** сажемазляной метод визуализации, сверхзвуковая скорость, импульсные аэродинамические трубы, эксперимент.

### **Введение**

Метод сажемазляной визуализации поверхностных линий тока позволяет определять направление течения и его структуру вблизи поверхности моделей при обтекании как дозвуковым, так и сверхзвуковым потоком [1]. Для реализации метода применяют смеси из масла и мелкодисперсного красящего пигмента, иногда с добавлением керосина. Сажемазляной метод широко известен и используется для визуализации структуры течения на поверхности тел при различных характеристиках набегающего потока [2–14]. Существует необходимость оценивания возможности применения сажемазляной визуализации в условиях экспериментов, так как в исследованиях могут иметь место дозвуковые

---

\* Работа выполнена по теме государственного задания ИТПМ СО РАН.

течения с критически малыми скоростями или сверхзвуковые течения, где давления достигают критически малых значений.

Несмотря на известность метода сажемасяной визуализации, в литературе недостаточно подробно отражены особенности его применения в различных экспериментальных задачах, особенно это касается исследований в импульсных аэродинамических трубах.

Настоящая работа посвящена изучению особенностей применения метода сажемасяной визуализации поверхностного течения на примере поперечного обтекания цилиндра в сверхзвуковой импульсной аэродинамической трубе.

### Условия и методика эксперимента

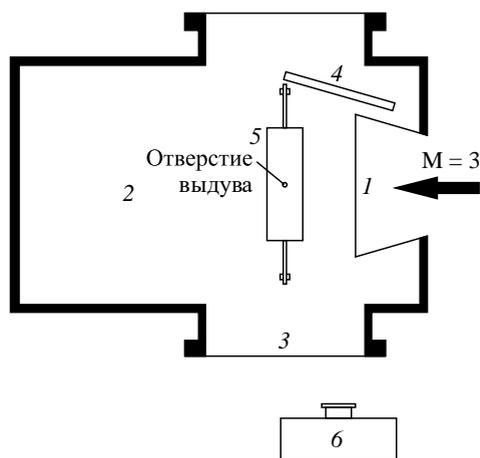
Исследование проводилось в импульсной аэродинамической трубе «Транзит-М». Рассматривалось обтекание модели сверхзвуковым потоком с числом Маха  $M = 3$  при значениях полного давления и полной температуры  $P_0 = 2$  МПа и  $T_0 = 298$  К соответственно. Продолжительность рабочего режима аэродинамической трубы в эксперименте составляла  $t = 0,7$  с. Диаметр среза сопла  $D = 100$  мм.

Исследование проводилось на модели цилиндрической формы с диаметром  $d = 25$  мм и длиной  $l = 80$  мм. Модель устанавливалась в рабочей части аэродинамической трубы поперек потока. На поверхности модели в плоскости симметрии находилось отверстие диаметром  $d_j = 2$  мм, через которое осуществлялся выдув струи газа с  $M_j = 1$  и значениями полного давления  $P_{0j} = 2,4$  МПа и полной температуры  $T_{0j} = 298$  К. Отверстие для выдува струи было ориентировано в пространстве таким образом, чтобы истечение газа из него происходило перпендикулярно набегающему потоку. Рассматриваемое течение выбрано для исследования ввиду того, что оно имеет сложную и хорошо изученную структуру, которая включает в себя отрывные зоны, скачки уплотнения и вихревые структуры. Это позволяет более полно оценить возможности методики сажемасяной визуализации и перспективы дальнейшего ее применения в аэродинамических экспериментах в сверхзвуковых импульсных трубах.

В литературных источниках для реализации сажемасяного метода визуализации рекомендуется применять трансформаторное масло [1]. Кинематическая вязкость и плотность трансформаторного масла при температуре  $T = 293$  К составляют  $\nu = 22 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с и  $\rho = 880$  кг/м<sup>3</sup> соответственно. Масло с такой вязкостью хорошо подходит для исследования течений при малых скоростях потока на поверхности моделей, форма которых близка к плоской пластине или имеет достаточно большой радиус кривизны поверхности. Применение трансформаторного масла при сверхзвуковых скоростях обтекания осложняется уносом массы вещества с поверхности исследуемой модели. Ввиду того, что в рамках исследования рассматривалось поперечное обтекание цилиндра малого радиуса применение трансформаторного масла также было затруднительно. После нанесения на модель это масло быстро стекало к нижней части цилиндра, оставляя слишком тонкую масляную пленку на верхней части модели. В связи с этим в экспериментах использовалось моторное масло 5W-40, кинематическая вязкость и плотность которого при температуре  $T = 293$  К составляют  $\nu = 170 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с и  $\rho = 885$  кг/м<sup>3</sup>.

Масло (или смесь масла и красящего пигмента) наносилось равномерно по всей поверхности цилиндра при помощи кисти. Толщина масляной пленки  $h$  в экспериментах варьировалась в диапазоне  $0,1 \leq h \leq 0,5$  мм. Было установлено, что при толщине масляной пленки  $h > 0,2$  мм часть масла (масляной смеси) уносилась потоком, искажая картину

Рис. 1. Внешний вид модели при использовании разных методов нанесения покрытия для сажемасляной визуализации. 1 — сопло, 2 — рабочая часть аэродинамической установки, 3 — оптическое окно рабочей части, 4 — зеркало, 5 — модель, 6 — фотокамера.



течения. Поэтому в ходе исследования толщина масляной пленки (или смеси) на поверхности модели не превышала 0,2 мм.

В качестве красящего пигмента использовались мелкодисперсные порошки  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$ . Данные пигменты легкодоступны и просты в применении по сравнению с другими пигментами, рекомендуемыми в литературе для реализации сажемасляного метода визуализации (сажа, флуоресцентная краска и др.). Для каждого пигмента были рассмотрены два метода нанесения:

- нанесение смеси из масла и пигмента на модель;
- нанесение на модель, предварительно покрытую масляной пленкой.

Равномерное нанесение красящего пигмента на поверхность модели, покрытой масляной пленкой, обеспечивалось с помощью ситечка. В ходе исследования рассматривались три массовых концентрации пигмента в составе смеси с маслом: 10, 15 и 20 %. На рис. 1а, 1б в качестве примера соответственно представлены фотографии модели, покрытой смесью масла и порошка  $TiO_2$  с массовой концентрацией 15 %, и модели, на которую последовательно были нанесены масляная пленка и порошок  $TiO_2$ .

Для визуализации процесса обтекания модели в аэродинамической трубе велась непрерывная фотосъемка с частотой 60 кадров в секунду через установленное в рабочей части зеркало. На рис. 2 приведена схема проведения эксперимента, где, в том числе, отмечены элементы системы визуализации. Проводилась также обязательная фотосъемка модели с нанесенным на поверхность составом до и после эксперимента.

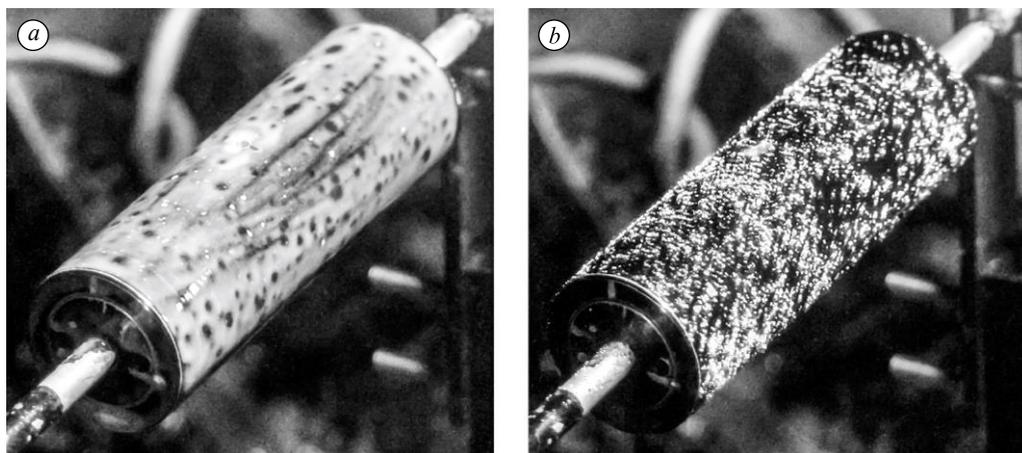


Рис. 2. Схема проведения эксперимента.

а — модель в процессе эксперимента, б — модель по завершению эксперимента.

### Результаты

С момента запуска аэродинамической трубы начинается формирование картины течения на поверхности обтекаемого цилиндра. В среднем на установление картины течения на поверхности модели требовалось  $\sim 0,4$  с, после чего она сохранялась неизменной до окончания работы аэродинамической трубы. Таким образом, очевидно, что саже-масляный метод визуализации течения с выбранными материалами не может быть применен в импульсных аэродинамических трубах с рабочим режимом меньше 0,4 с. По завершении рабочего режима трубы полученная в ходе эксперимента картина течения на поверхности постепенно размывается, границы отрывных зон и скачков становятся менее четкими. Этот эффект наглядно представлен на рис. 3, где приведены картины течения, снятые во время эксперимента (рис. 3а) и сразу после его завершения (рис. 3б). Аналогичная деградация картины течения по окончании эксперимента наблюдалась во всех рассмотренных случаях. На рис. 3 и последующих рисунках большой стрелкой в нижнем правом углу обозначено направление течения набегающего потока.

Визуализация течения в ходе эксперимента получается более четкой и точной. Так, на рис. 3а отчетливо видно границу перехода ламинарного течения к турбулентному на поверхности модели (1), зону турбулентного течения (4), место отрыва потока с поверхности цилиндра (3), след от скачка, возникающего при взаимодействии набегающего потока со струей (2), след распространения подковообразного вихря (6) и зону разрежения за струей (5). Перечисленные структуры, пусть и с менее четкими границами, видны на картине течения, зафиксированной сразу после эксперимента (рис. 3б).

Сравнение различных массовых концентраций красящего пигмента (10, 15 и 20 %) проводилось в экспериментах при нанесении смеси масла и красящего пигмента для визуализации поверхностного течения на модели. Были установлены существенные качественные изменения визуализации течения в зависимости от концентрации пигмента. На рис. 4 приведены картины визуализации течения с использованием составов с различной массовой концентрацией  $Al_2O_3$  в смеси с маслом. При массовой концентрации красящего пигмента 10 % в смеси (рис. 4а) на картине течения видны ровные тонкие линии, соответствующие положению отрыва потока с поверхности модели, границе перехода течения из ламинарного в турбулентное и границе скачка уплотнения, возникшего вследствие взаимодействия набегающего потока с выдуваемой струей. Однако

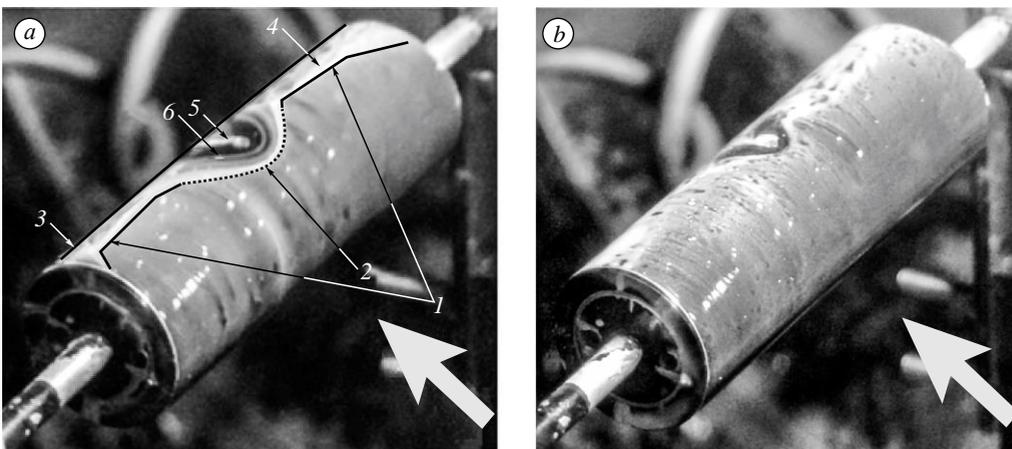


Рис. 3. Картины течения на поверхности модели при использовании смеси масла и  $TiO_2$  (15 масс. %), полученное в процессе эксперимента (а) и по завершении эксперимента (б).

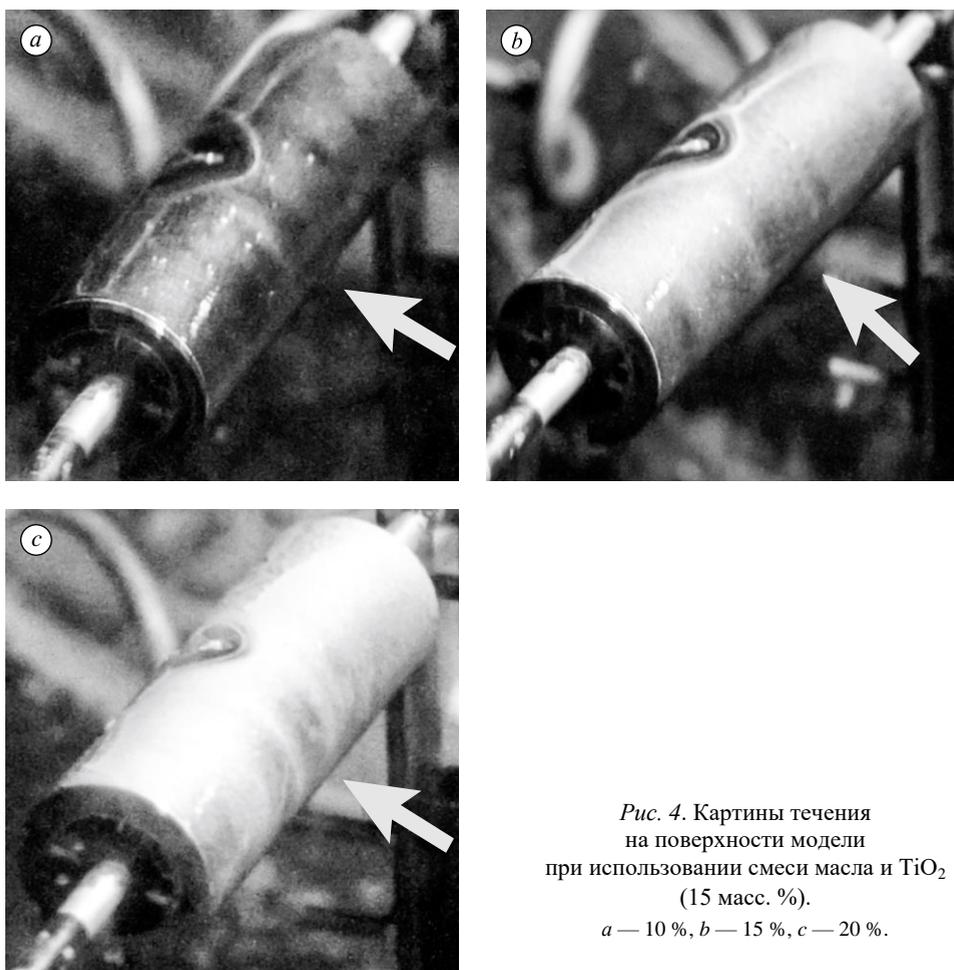


Рис. 4. Картины течения на поверхности модели при использовании смеси масла и  $\text{TiO}_2$  (15 масс. %).  
*a* — 10 %, *b* — 15 %, *c* — 20 %.

указанные тонкие линии в областях с малыми градиентами скорости и давления слабо заметны. Так, например, низкая концентрация красящего пигмента не позволяет визуализировать область распространения подковообразного вихря, который является характерным для моделируемого течения.

Увеличение массовой концентрации пигмента до 20 % (рис. 4*c*) позволяет визуализировать след от распространения подковообразного вихря за скачком уплотнения, однако высокая концентрация частиц в смеси приводит к размытию границ скачка уплотнения и отрывных зон.

Из рассмотренных составов с различной массовой концентрацией красящего пигмента наиболее оптимальным для визуализации течения оказалась смесь с 15 % (рис. 4*b*), что согласуется с приведенными в литературе рекомендациями по применению метода саже-масляной визуализации. Массовая концентрация красящего пигмента 15 % позволила визуализировать все известные для рассматриваемого случая обтекания элементы картины течения на поверхности модели, отчетливо отразив границы зон отрыва течения, скачков уплотнения и положение ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое. Помимо этого, при данной концентрации красящего пигмента структура течения на поверхности тела оставалась узнаваемой в течение более длительного времени по завершении эксперимента.

Аналогичные результаты были получены при исследовании составов с различной концентрацией  $TiO_2$  в смеси с маслом. Однако необходимо подчеркнуть более высокую контрастность картины течения при использовании порошка  $TiO_2$  в качестве красящего вещества в сравнении с  $Al_2O_3$ . Это отличие хорошо видно при сравнении фотографий, приведенных на рис. 3а и 4b. При этом структуры течения отображаются идентичными вне зависимости от применяемого красящего пигмента.

При нанесении красящего пигмента на модель, предварительно покрытую масляной пленкой, в экспериментах были получены картины течения, представленные на рис. 5. Их анализ подтверждает результаты, полученные при использовании для визуализации смеси масла и красящих частиц. Выбор любого из красящих пигментов не влияет на картину течения. Однако с применением  $TiO_2$  результат визуализации становится более контрастным, наглядно отображает границы зон и характерные структуры, формирующиеся при обтекании тела с выдувом струи.

Применение подхода к визуализации течения путем нанесения красящего пигмента на масляную пленку вместо замешивания его в масло позволило получить визуализацию границы раздела набегающего потока (1 на рис. 5а) при взаимодействии с обтекаемым цилиндром. Также стали видны линии тока, распространяющиеся от границы раздела набегающего потока вдоль поверхности модели. Как и в случае использования для визуализации течения смеси масла и красящего пигмента, при данном подходе виден скачок уплотнения (2 на рис. 5а), возникающий вследствие взаимодействия набегающего потока с выдуваемой струей. Кроме того, здесь хорошо различимы место отрыва потока (3 на рис. 5а), след от распространения подковообразного вихря (4 на рис. 5а) и зоны разрежения за струей (5 на рис. 5а). При этом подход к визуализации течения путем нанесения красящего пигмента на масляную пленку не позволяет визуализировать границу перехода течения из ламинарного режима в турбулентное и область турбулентного течения.

В связи со сложностью контроля количества красящего пигмента при его нанесении на масляную пленку объективная оценка влияния количества пигмента на картину визуализации не проводилась. Однако в ходе исследования было замечено, что частиц пигмента может быть как недостаточно для качественной визуализации течения, так и чрезмерно много.

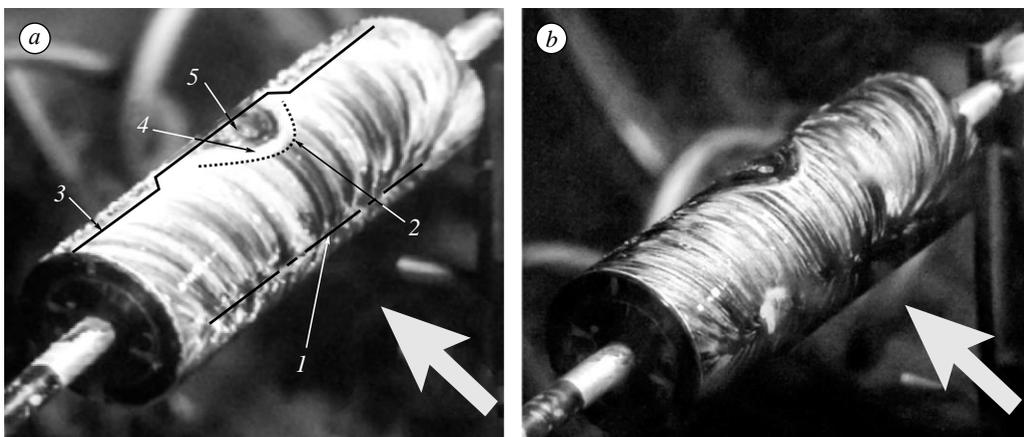


Рис. 5. Картины течения в эксперименте при последовательном нанесении на модель масляной пленки и красящих пигментов  $TiO_2$  (а) и  $Al_2O_3$  (b).

## Заключение

1. Проведено исследование особенностей применения сажемазляного метода визуализации поверхностного течения в сверхзвуковой импульсной трубе «Транзит-М». Выполнено физическое моделирование сверхзвукового поперечного обтекания цилиндра с выдувом сверхзвуковой газовой струи с поверхности обтекаемого цилиндра. Полученные, входе исследования картины течения качественно согласуются, например, с работой [15].

2. Анализ характеристик масел для реализации сажемазляного метода визуализации показал возможность использования моторного масла W5-40 для получения картин течения хорошего качества. Толщина нанесения масляной пленки или смеси масла и красящего пигмента не должна превышать 0,2 мм. При такой толщине слоя масло хорошо удерживается на поверхности модели, не стекая даже при малом радиусе кривизны, а обтекание происходит без уноса излишков масла высокоскоростным набегающим потоком.

3. С использованием красящих пигментов  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$  показана возможность реализации сажемазляной визуализации с получением картин течения хорошего качества. Применение в качестве красящего вещества порошка  $TiO_2$  позволяет получить более контрастные картины течения, что дает возможность точнее определять границы формирующихся структур. Поэтому применение  $TiO_2$  для сажемазляной визуализации является предпочтительным.

4. Анализ влияния массовой концентрации красящего пигмента в смеси с маслом на качество визуализации показал, что оптимальным является содержание 15 % пигмента по массе. Данный результат совпадает с рекомендациями других литературных источников. При этом применение смеси масла и красящего пигмента дает возможность визуализировать все структуры течения на поверхности обтекаемой модели, но не позволяет визуализировать линии тока. Применение подхода с нанесением частиц порошка красящего пигмента на модель, предварительно покрытую масляной пленкой, позволяет визуализировать линии тока, но не дает возможности визуализировать зону турбулентного течения на поверхности.

5. Применение сажемазляного метода визуализации в сверхзвуковых импульсных трубах должно сопровождаться фото- или видеорегистрацией процесса обтекания с достаточной частотой съемки. Это позволит получить наиболее точную картину течения и ее динамику. По завершению эксперимента, в отсутствии набегающего потока, картина визуализации сильно изменяется.

## Список литературы

1. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента. Ч.2. Методы и средства аэрофизических измерений: учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 456 с.
2. Settles G.S. Modern developments in flow visualization // AIAA J. 1986. Vol. 24, No. 8. P. 1313–1323.
3. Трубицына Л.П., Литов Д.Д. Высоконапорный слой в сверхзвуковом отрывном течении на теле с иглой // XXV Туполевские чтения. Казань, 2021. Т. 1. С. 204–209.
4. Зверков И.Д., Козлов В.В., Крюков А.В. Особенности обтекания прямого и скользящего крыла конечного размаха с гладкой и волнистой поверхностью в области критических углов атаки // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2012. Т. 7, вып. 4. С. 57–67.
5. Franke T. Unsteady transonic flow around double wedge profiles // Exper. in Fluids. 1989. Vol. 8. P. 192–198.
6. Ristić S. Flow visualisation techniques in wind tunnels. Part I. Non optical methods // Scientific Technical Review. 2007. Vol. LVII, No. 1. P. 39–49.
7. Mosharov V., Orlov A., Radchenko V. New approach to surface oil-flow visualization // IEEE ICIAF. 2005. P. 176–180.

8. 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. 337–347.
9. Зверков И.Д., Козлов В.В., Крюков А.В. Улучшение аэродинамических характеристик крыла малоразмерного летательного аппарата // Доклады академии наук. 2011. Т. 440, № 4. С. 472–475.
10. Зверков И.Д., Козлов В.В., Крюков А.В. Влияние степени турбулентности набегающего потока в аэродинамической трубе на отрыв пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 2. С. 213–225.
11. Назаров Д.В., Павленко А.М., Занин Б.Ю. Визуализация обтекания модели экраноплана // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 5–10.
12. Гныря А.И., Коробков С.В., Кошин А.А., Мокшин Д.И., Терехов В.И. Комплексные экспериментальные исследования аэродинамики и теплообмена моделей зданий и сооружений // Вестн. ТГАСУ. 2011. № 4. С. 113–127.
13. Постников Б.В., Ломанович К.А., Пономаренко Р.А. Воздействие газопроницаемых материалов с изменяемой пористостью на отрывное течение при сверхзвуковом обтекании прямого уступа // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 2. С. 199–206.
14. Зайковский В.Н., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Меламед Б.М., Трубачев Г.В. Управление формой пятна напыления при ХГН. Часть 1. Газодинамические аспекты // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 20, № 1. С. 107–115.

*Статья поступила в редакцию 19 января 2024 г.,  
после доработки — 25 февраля 2024 г.,  
принята к публикации 13 июня 2024 г.*