

УДК 532.526.4+533.6.071

ПРОБЛЕМЫ СНИЖЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТРЕНИЯ АКТИВНЫМИ И ПАССИВНЫМИ МЕТОДАМИ (ОБЗОР)*

В.И. КОРНИЛОВ

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
Новосибирск*

Приведен аналитический обзор состояния исследований и тенденций развития проблемы снижения турбулентного трения, являющейся одной из ключевых в современной аэрогидродинамике. Рассмотрены наиболее перспективные и быстро прогрессирующие активные и пассивные способы управления течением, применяемые для уменьшения сопротивления трения, главным образом в несжимаемых турбулентных пограничных слоях. Особое внимание уделяется характеристике отечественного потенциала в данном направлении, анализу важнейших результатов и месту отечественных исследований в ретроспективе мировых тенденций.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в последние приблизительно два-три десятилетия с особой остротой встала проблема энергосбережения. Не вызывает сомнений, что в будущем этот процесс будет только усиливаться. В части, касающейся воздушного, водного и скоростного наземного транспорта, указанная проблема стимулирует исследования, направленные на изучение возможностей снижения сопротивления летательного аппарата и других движущихся объектов. Основными составляющими полного сопротивления при наборе высоты и крейсерском режиме полета, на преодоление которого расходуется до 90 % потребляемого топлива дозвукового транспортного самолета, являются сопротивления: трения, индуктивное, волновое, обусловленное интерференцией и вызванное неровностями (рис. 1). Нетрудно заметить, что вклад первых двух составляющих в диапазоне околосвуковых скоростей достигает соответственно порядка 48 и 37 % полного сопротивления современного дозвукового магистрального пассажирского самолета. Для подводных лодок и торпед вклад этой величины возрастает до 65–70 %. Отсюда ясно, что уменьшение сопротивления трения летательного аппарата и других движущихся тел представляет собой один из наиболее крупных резервов экономии энергоресурсов. Не удивительно, что поиск путей и методов воздействия на структуру пристенного течения с целью снижения поверхностного трения летательного аппарата и его элементов продолжает оставаться одной из основных задач прикладной аэродинамики. Согласно данным NASA, даже небольшое уменьшение сопротивления трения позволило бы существенно снизить затраты на топливо, что обеспечило бы экономию, исчисляемую сотнями миллионов долларов в год (Хефнер, 1988). Кроме того, это дало бы возможность повысить скорость и дальность полета самолетов без существенного увеличения их взлетной массы. Не случайно в настоящее время

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №03–01–07000).

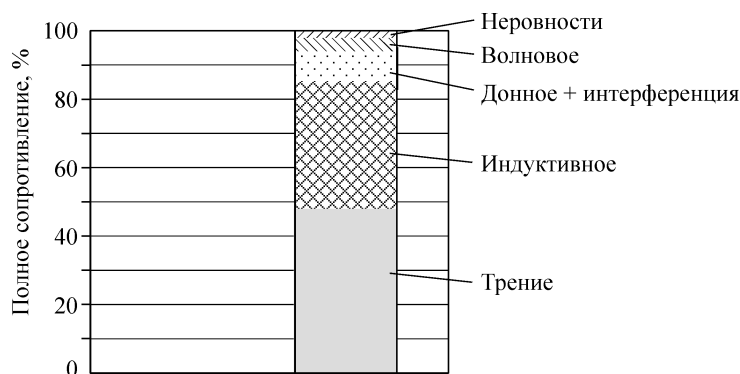


Рис. 1. Вклад различных составляющих сопротивления в общий баланс сопротивления магистрального дозвукового пассажирского самолета (Schmitt, 1988).

создана широкая сеть национальных и международных научных программ, проектов и даже сообществ, рассчитанных на то, чтобы ослабить остроту этой проблемы. Достаточно сослаться на известную Европейскую программу DragNet, которая осуществлялась в течение нескольких лет, программу DARPA ATO Friction Drag Reduction Program, Европейское исследовательское сообщество European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion (ERCOTAC) и др. Подобные проблемы стали предметом рассмотрения на международных тематических конференциях, симпозиумах, рабочих встречах и совещаниях, таких как IUTAM Symposium on Mechanics of Passive and Active Flow Control; IUTAM Symposium on Structure of Turbulence and Drag Reduction; European Drag Reduction Conference; European Drag Reduction Working Meeting; IUTAM Congress on Flow Control; Flow Control Workshop: Theory, Experiment, and Applications; International Conference on Drag Reduction; International Conference on Turbulent Drag Reduction by Passive Means; International Symposium on Ship Viscous Resistance; International Symposium on Turbulent Shear Flow; AIAA Shear Flow Control Conference; ONR-NSSC-AFOSR-NASA Symposium on Drag Reduction and Boundary Layer Control и др. Интенсивно занимаются этой проблемой в известных зарубежных научно-исследовательских центрах, таких как NASA Langley (США), ONERA (Франция), DLR (Германия), а также в ряде ведущих университетов США, Англии, Германии, Франции, Канады, Южной Кореи, Швеции, Швейцарии.

В дополнение к этому отметим, что изучение эффективности разрабатываемых методов снижения турбулентного трения имеет большое практическое значение не только для морских и воздушных судов, но и для магистральных газопроводов, нефтепроводов, продуктопроводов и водопроводов, где за счет применения таких методов и удачного технического решения можно сэкономить многие миллионы государственных средств.

Основная цель данной работы состоит в рассмотрении наиболее перспективных и быстро прогрессирующих способов управления турбулентным пограничным слоем, применяемых для уменьшения сопротивления трения, главным образом в несжимаемых сдвиговых потоках. Наибольшее внимание уделяется пассивным методам, которые не требуют внешней энергетике, хотя, где это возможно, некоторый анализ активных методов также сделан.

1. ОБЩИЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Концепция снижения сопротивления и методы управления потоком

Существуют два основных пути уменьшения составляющей сил трения. Один из них традиционно базируется на совершенствовании аэродинамических форм и улучшении качества отделки поверхности летательного аппарата. По существу

это направление имеет целью затягивание ламинарного режима течения вдоль обтекаемой поверхности. Однако при полете обычного транспортного самолета число Рейнольдса достигает величин порядка 10^8 и вряд ли при таких условиях удастся разработать экономичный режим поддержания ламинарной формы течения. Это означает, что, по крайней мере, все крупные резервы снижения сопротивления здесь практически исчерпаны. Второй путь основан на использовании искусственных методов управления структурой пристенной турбулентности. Остановимся на этом более подробно.

С середины 70-х годов накоплен достаточно большой опыт по изучению возможности снижения турбулентного трения с помощью различных как пассивных, так и активных методов управления турбулентными сдвиговыми течениями, обзор которых приведен в работах (Bushnell, 1983, 1990; Coustols, 1992; Choi, 2000; Амфилохийев, 2000; частично Корнилов, 2000). Отметим предварительно, что основное достоинство методов управления турбулентностью (в отличие от тех способов, объектами которых является ламинаризация течения) состоит в том, что их применение во многих случаях не требует активного вмешательства и они могут быть реализованы на уже существующих летательных аппаратах без принципиального изменения их конструкции.

Иерархию управления турбулентным сдвиговым потоком можно увидеть на схеме (рис. 2), заимствованной из работы (Lofdahl, 1999). Из этой схемы, в частности, следует, что наибольшее развитие в настоящее время получили активные методы, в основе которых в большинстве случаев лежит или система, отвечающая на какие-либо действия, или — с обратной связью, или даже наиболее совершенная — самонастраивающаяся система. Однако и пассивные методы управления не потеряли своего значения в основном по той причине, что при их использовании не требуется вкладывать энергию для достижения эффекта уменьшения сопротивления. Подобные методы пассивны в том смысле, что в них не предусмотрена цепь обратной связи для обнаруживания и манипулирования теми структурами, которые являются объектом управления. Поэтому рабочая стоимость таких способов



Рис. 2. Схема, иллюстрирующая иерархию управления турбулентным потоком (Lofdahl, 1999).

управления много меньше, чем активных. Применение последних может обеспечить более существенное снижение сопротивления, но при соответствующем вкладе энергии, который в зависимости от конкретной задачи может быть значительным.

Стратегия уменьшения турбулентного сопротивления

Чтобы сформулировать основную концепцию уменьшения турбулентного трения, необходимо четко понимать фундаментальные свойства сдвигового потока и иметь корректную модель активности течения (генерации турбулентности) в пристенной части пограничного слоя. Следуя современным представлениям, главные признаки турбулентной активности в пограничном слое — квазипериодичность и самовосстановление как во времени, так и в пространстве. Поэтому любая существующая или вновь разрабатываемая концептуальная модель турбулентной активности должна учитывать эти свойства. В последнее время был предложен ряд моделей турбулентной активности (см., например, (Robinson, 1990)). Однако большинство моделей позволяют описать лишь часть цикла турбулентной активности или определенные особенности поведения структуры пристенной турбулентности.

Наиболее популярной считается концептуальная модель (Choi, 2001), которая включает практически все составляющие различных этапов (1, 2, 3) генерации турбулентности (рис. 3). Она в состоянии объяснить причинные связи турбулентных событий, наблюдаемых в пристенной части турбулентного пограничного слоя. Такая модель с наибольшей степенью полноты охватывает последовательность турбулентных событий в пограничном слое.

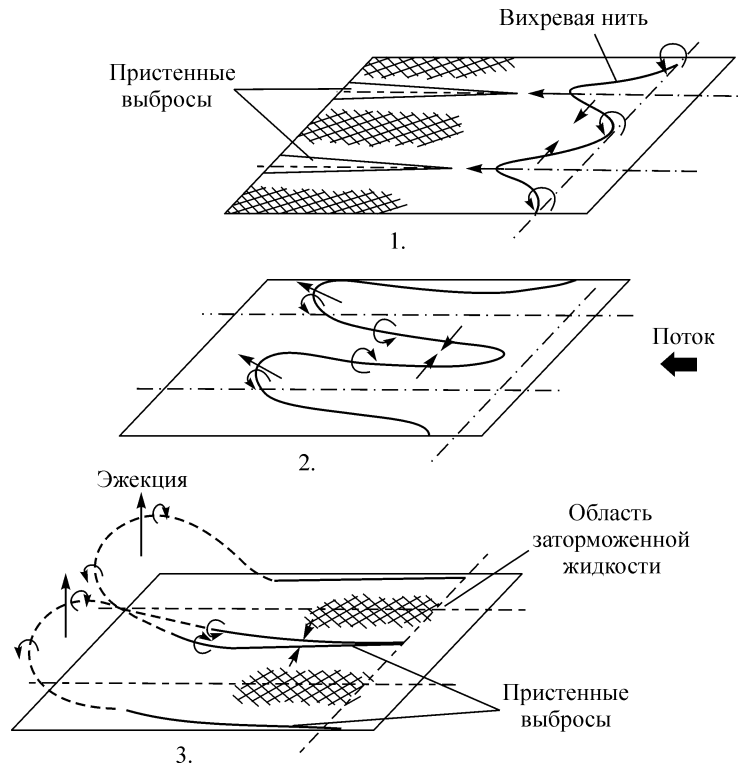


Рис. 3. Схематическое представление концептуальной модели (Choi, 2001).

Первая стадия этой модели описывает поведение поперечной вихревой нити в пристенной части слоя. В процессе эволюции она деформируется полем пульсаций скорости, порождаемым пристенными вспышками (выбросами). Деформированная вихревая нить вытягивается вниз по потоку (вторая стадия) частично вследствие механизма самоиндукции собственного вихревого поля и частично из-за сильного сдвига в пристенной области пограничного слоя. Вытянутая вихревая нить принимает вид подковообразной петли (третья стадия), интенсивно распространяясь прочь от стенки на этапе выброса. Во время этого процесса соседние ноги эжектируемой подковообразной петли формируют пары противоположно вращающихся продольных вихрей. Снаружи этой пары вращающихся вихрей, куда вихри переносят жидкость с низким импульсом от поверхности, наблюдается низкоскоростная область с зонами заторможенной жидкости. Формирующиеся на последней стадии концептуальной модели подковообразные вихри распространяются приблизительно под углом 45° к направлению потока.

В соответствии с основным смыслом этой модели турбулентные события в пограничном слое являются квазипериодическими, самовосстанавливающимися и взаимосвязанными. Отсюда ясно, что процесс порождения энергии турбулентности в пограничном слое может быть модифицирован только в том случае, если хотя бы часть цикла пристенной активности каким-либо способом изменить. Это означает, что для снижения турбулентного сопротивления необходимо уменьшить скорость порождения энергии турбулентности в пристенной части течения путем нарушения цепочки турбулентной активности, ответственной за указанный процесс порождения. Тем самым открывается путь к управлению структурой турбулентного пограничного слоя.

Отмеченное искусственное нарушение последовательности активности пристенной турбулентности с целью уменьшения турбулентного сопротивления может быть достигнуто как пассивными, так и активными методами, которые чрезвычайно разнообразны (Bushnell, 1983; Coustols, 1992). Перечислим кратко хотя бы некоторые примеры, характеризующие спектр применения таких методов управления. В качестве пассивных способов, которые могут обеспечить уменьшение сопротивления могут служить манипуляторы пограничного слоя типа устройств разрушения вихрей (УРВ) (Coustols, 1992) и риблет (Anders, 1990), а также податливые (упругие) покрытия (стенки) (Blick, 1968). При формировании облика перспективного летательного аппарата заслуживает также внимания рассмотренный в книге (Баранов, 2001) способ активного управления потоком с помощью так называемых вихревых ячеек на обтекаемой поверхности. Смысл его состоит в том, что путем воздействия на течение в малогабаритных вихревых ячейках можно принципиально перестроить крупномасштабную вихревую структуру за крыловым профилем, уменьшить лобовое сопротивление и значительно увеличить аэродинамическое качество при приемлемых энергетических затратах. Многочисленные исследования течения в окрестности углублений на поверхности (см., например, (Афанасьев, 1991)) показывают, что организация крупномасштабных вихревых структур в пристеночной области турбулентного пограничного слоя вблизи поверхности, покрытой сферическими лунками, позволяет не только интенсифицировать тепло- и массообменные процессы, но и уменьшить гидродинамические потери, связанные с движением жидкости, в частности, за счет снижения сопротивления трения. Установлено, что генераторы вихрей малого масштаба способны существенно изменить характер течения в пристенной области обтекаемого тела и уменьшить его сопротивление трения (Снижение ..., 1984). Значительного снижения сопротивления обтекаемого тела, которое в некоторых случаях может достигать 70 % и более, можно добиться за счет введения в поток газовых микропузырьков и полимерных добавок (Пограничные слои ..., 1984). Микроэлектромеха-

нические системы (МЭМС), интенсивно развивающиеся в последние годы (Lofdahl, 1999) и являющиеся наиболее ярким представителем активного способа управления течением, таят в себе крупный резерв уменьшения сопротивления, но их возможности еще до конца не раскрыты. Возрастающее значение приобретают методы прямого численного моделирования, основанные на теории оптимального управления (Kim, 1998).

С учетом всего вышесказанного основополагающие идеи и возможные механизмы воздействия на структуру пристенной турбулентности различными методами управления могут быть основаны, в частности, на:

- уменьшении продольного импульса вблизи стенки (реализация неблагоприятного градиента давления и т. д.);
- изменении граничных условий на обтекаемой поверхности (риблеты, податливые покрытия и т. д.);
- изменении граничных условий внутри пограничного слоя (вдув, отсос, УРВ и т. д.);
- подавлении турбулентных пульсаций скорости и давления (МЭМС-датчики).

Эффективное воздействие на структуру пристенной турбулентности невозможно без четкого понимания сущности современных методов управления пограничным слоем, их основных особенностей, возможных путей их развития в ближайшей перспективе и специфики использования в тех или иных аэрогидродинамических условиях. Спектр применения этих методов настолько широк и разнообразен, что, даже ограничиваясь чисто научными соображениями, невозможно охватить современное состояние проблемы в рамках одного обзора. Чтобы представить динамику и тенденции развития в этом направлении, рассмотрим лишь наиболее перспективные и быстро прогрессирующие, с нашей точки зрения, способы управления, применяемые главным образом в несжимаемых течениях и имеющие непосредственное отношение к снижению турбулентного трения. Сюда относятся полимерные добавки, газовые микропузырьки, ПАВы, градиент давления, вдув газа, риблеты, УРВ, податливые стенки, МЭМС-датчики и др. Этим, конечно, не ограничивается перечень методов и средств снижения турбулентного трения. Достаточно упомянуть возможность использования для этой цели выпуклых участков поверхности, введения в пограничный слой управляющих вихрей, применения импульсного вдува/отсоса и т. д.

Хотя акцент настоящего обзора в основном сконцентрирован на потребностях практической аэродинамики, представляется необходимым кратко осветить некоторые подходы, успешно используемые для снижения турбулентного трения в гидродинамических течениях.

Высокомолекулярные полимерные добавки

Турбулентное трение можно уменьшить путем введения в поток жидкости нескольких типов инородных субстанций. Судя по литературе, в основном три типа добавок активно используются для этой цели: растворы полимеров, микропузырьки газа и микрочастицы.

Введение растворов длинноцепных полимерных молекул в турбулентный пограничный слой водного потока — известный прием для снижения сопротивления трения, который успешно применяется для многих типов гидродинамических течений. Феномен снижения сопротивления в трубе путем введения небольшого количества полимеров был обнаружен более 50 лет назад. С тех пор появилось огромное количество публикаций, анализ которых — тема, возможно, не одного

обстоятельного обзора. Полученные в них результаты можно свести к следующему краткому выводу. Путем введения полимерных добавок очень малой концентрации (около 10^{-3} – 10^{-4} %), составляющей порядка нескольких весовых частей на миллион, можно при больших числах Рейнольдса (в трубах) добиться 90 % уменьшения сопротивления. Такие значения открывают фантастические возможности для использования полимерных добавок в трубопроводах, а также на судах морского флота (быстроходные суда, подводные лодки). В процессе многочисленных исследований выявлены оптимальные концентрации частиц, но ясно, что в любом случае они должны быть такими, чтобы изменение плотности основного потока было пренебрежимо малым. При этом для уменьшения касательных напряжений добавки должны вводиться в буферную область турбулентного пограничного слоя. Полученные экспериментальные результаты показывают, что молекулярный вес, как характеристика, влияющая на снижение сопротивления, играет важную роль. Поэтому в большинстве случаев для этой цели используются полимеры с большим молекулярным весом (например, polyethylene-oxide (Kulik, 2001)). Обнаружено также, что наибольший эффект достигается при введении полимеров через щель с малым углом наклона к вектору скорости потока. Вместе с тем в некоторых публикациях отмечается слабая зависимость этого процесса от геометрии щели.

Основной недостаток такого рода добавок состоит в том, что они могут изменять свои свойства в течение определенного временного периода. В литературе уделяется много внимания изучению различных факторов, влияющих на этот процесс. Установлено, что диаметр трубы, концентрация полимера, интенсивность касательных напряжений в пристенной области и повышенная температура среды являются критическими параметрами, воздействующими на механизм деградации полимера.

Хотя точка зрения на механизм уменьшения сопротивления остается неоднозначной, обычно ее связывают с различными механизмами реологической природы. Считается доказанным, что полимерные добавки так или иначе ослабляют процесс порождения турбулентности в пристенной области течения. Результаты экспериментов показывают, что конфигурация полимера становится более вытянутой, и сам механизм в значительной степени обусловлен способом взаимодействия таких добавок с турбулентными вихрями, концентрацией полимера, особенностями его введения в поток и числами Рейнольдса. Другие эксперименты показывают, что основное влияние полимеров состоит в демпфировании флуктуаций нормальной компоненты скорости, главным образом, в буферной области пограничного слоя.

Нельзя не упомянуть о двух моделях уменьшения сопротивления за счет введения полимерных добавок, отмеченных в работе (Coustols, 1992) и получивших наибольшее распространение в конце 70-х годов прошлого века, и, по-видимому, до сих пор остающихся базовыми. Первая из них обоснована (Lumley, 1977) и состоит в том, что вследствие флуктуаций скорости деформации, молекулы полимера растягиваются снаружи вязкого подслоя и, тем самым, вызывают увеличение эффективной вязкости, что, в свою очередь, приводит к демпфированию малых диссипативных вихрей. Вторая модель, исходящая от (Landhal, 1977), предполагает разделение поля скоростей на крупно- (основное) и мелкомасштабное (вторичное). Механизм уменьшения сопротивления состоит в том, что растяжение вводимых молекул полимера стабилизирует мелкомасштабное движение и поэтому тормозит процесс порождения турбулентности.

Поверхностно-активные вещества

Поверхностно-активные вещества (ПАВы) — химические соединения, молекулы которых способны из истинного объема или коллоидного раствора концентрироваться на границе раздела фаз (жидкость/газ, жидкость/жидкость или жидкость/твердое тело) с понижением свободной поверхностной энергии (поверхностного натяжения) (Абрамзон, 1984). В принципе, как и полимеры, они представляют собой добавки, только отличающиеся способом введения. Хотя первая публикация на эту тему также появилась более 50 лет назад, ПАВы не привлекли столь повышенного внимания, как полимеры. Однако сам механизм воздействия на течение в принципе аналогичен, также как и эффект снижения сопротивления. Считается, что основной эффект по снижению сопротивления обусловлен физико-химической природой ПАВов и взаимодействием электростатических сил между стержнеобразными мицеллами (раствор эфирных масел).

Основное преимущество такого рода добавок состоит в том, что они сохраняют свои свойства в течение длительного временного периода. Данный факт объясняется повышенной молекулярной массой и особенностью строения молекул, длина которых может на два порядка превышать диаметр. ПАВы нашли применение при добыче, транспортировке и переработке нефти и нефтепродуктов. Результаты недавних исследований (см., например, (European Drag ..., 2000; 12th European Drag ..., 2002)) свидетельствуют о больших возможностях ПАВов при их использовании на теплотрассах. Особенно большой интерес к ПАВАм проявляется в связи с возможностью их использования в рециркуляционных системах, таких как системы центрального отопления.

Газовые микропузырьки

Микропузырьки, т. е. маленькие пузырьки газа, эжектируемые в пограничный слой на твердой поверхности, — один из наиболее обнадеживающих методов снижения сопротивления трения прежде всего на крупных морских транспортных судах. Как и два предыдущих, данный метод применим только для тел, движущихся в жидкости, и заключается в создании газового слоя между поверхностью и жидкостью. Поскольку плотность и вязкость в таком газовом слое существенно меньше, то можно достичь значительного уменьшения локального сопротивления.

Сама концепция нашла свое преимущественное воплощение в виде очень маленьких пузырьков, вводимых в пограничный слой через проницаемую стенку. Основная трудность связана с неустойчивостью газовой прослойки, обусловленной не только размерами пузырьков, но и их плавучестью, т. к. граница воздух/вода (в общем случае — газ/жидкость) очень неустойчива. Чтобы стабилизировать эту границу пузырьки должны быть очень маленькими, но не настолько, чтобы вызвать эффект шероховатости, когда они покрывают поверхность неравномерно. В процессе экспериментов установлено также, что микропузырьки наиболее эффективны, когда располагаются в буферной области турбулентного пограничного слоя.

С помощью данного метода удалось добиться значительного уменьшения локального сопротивления в тех случаях, когда для образования пузырьков применялся электролиз воды. Потрясающие возможности этого метода продемонстрированы в работе (Kato, 1999), в которой приведены как его собственные результаты, так и впечатляющие экспериментальные данные (McCormick, 1973; Madavan, 1985) и ряд других результатов. В качестве примера на рис. 4 представлены результаты измерений полного сопротивления полностью погруженного тела при наличии эжектируемых водородных пузырьков и без них (McCormick, 1973). Экс-

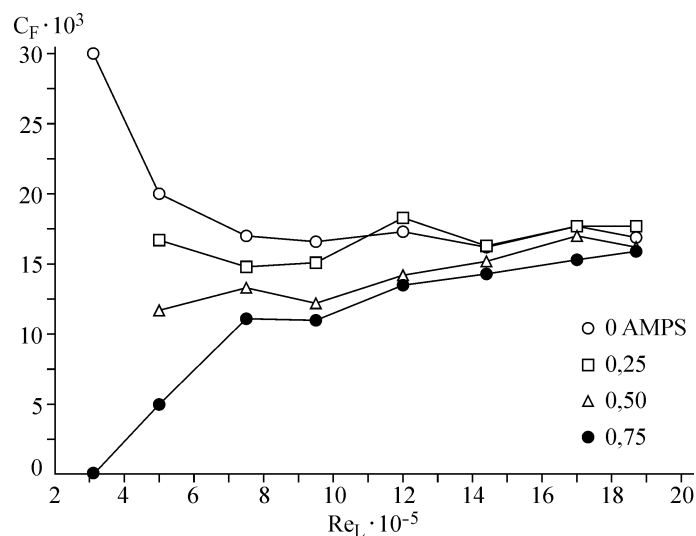


Рис. 4. Результаты измерений полного сопротивления полностью погруженного тела при наличии водородных пузырьков и без них (McCormick, 1973).

перименты проведены на модели подводной лодки длиной 3 фута при скорости водного потока 8,5 м/с. Эти, а также ряд других данных показывают, что ввод газовых микропузырьков в пристенную область водного течения, в том числе с использованием крупномасштабных моделей, позволяет снизить локальное турбулентное трение и полное сопротивление по крайней мере в несколько раз. Конечно, здесь (как и во многих других методах) возникает вопрос о необходимости оценки затрат на процесс электролиза и их учета при определении выигрыша в суммарном сопротивлении.

Существенного эффекта снижения сопротивления при помощи микропузырьков можно также достичь за счет использования проницаемых поверхностей с высокой равномерностью пор (т. н. микропористые поверхности). Наиболее значительное продвижение в этом направлении осуществлено в последние три десятилетия, и как отмечено (Merkle, 1990), основная заслуга в этом принадлежит российским (в том числе сибирским (Прим. автора)) ученым (см., например, Bogdevich, 1977; Семенов, 1999).

Градиент давления

Испытанным способом снижения турбулентного трения является управление градиентом давления. Если на поверхности тела создать положительный градиент давления в продольном направлении, то поток вблизи стенки тормозится и поверхностное трение уменьшается. Предельной ситуацией для использования данного метода является реализация так называемого распределения Стрэтфорда, когда пограничный слой на большом участке поверхности близок к отрыву. Метод положительного градиента давления в принципе применим к любому телу, однако при попытке приблизиться к состоянию, соответствующему отрыву потока, возникают существенные трудности. Тем не менее, если удастся обеспечить условия, близкие к срыву, в частности на несущей поверхности, то использование данного подхода может дать примерно 10%-й выигрыш в сопротивлении (Bushnell, 1983). Вместе с тем совершенно очевидно, что изменение распределения давления на поверхности летательного аппарата потребовало бы решительного изменения его обводов, что чаще всего невозможно или нежелательно, а в ряде случаев просто недопустимо.

Вдув

Этот метод основан на том, что в процессе вдува масс газа или жидкости, например через щель по касательной к поверхности, скорость исходного потока у стенки на некотором участке вниз по течению можно уменьшить и тем самым снизить поверхностное трение (Hwang, 1998). В частности, регулируя соотношение между скоростью набегающего потока и скоростью вдува, можно приблизиться к срывному режиму течения с малым поверхностным трением или предотвратить срыв потока. Основной проблемой при применении этого метода является выбор источника, обладающего низкими потерями на входе. Например, если отбор воздуха, например из набегающего потока, производится с большими потерями, то возможность уменьшения суммарного сопротивления весьма проблематична. Тем не менее существуют несколько источников, характеризующихся низкими потерями, например отсос пограничного слоя на крыльях и хвостовом оперении для ламинаризации обтекания, пассивный слив воздуха при управлении отрывом и др. Как видно, данный метод связан с активным перераспределением вещества, которое либо отбирается из набегающего потока, либо хранится на борту самолета. Ясно, что это требует соответствующего изменения конструкции летательного аппарата, что дорого и далеко не всегда оправдано.

Риблеты

Механизм снижения сопротивления за счет присутствия на обтекаемой поверхности продольных канавок (бороздок — riblets — в английской терминологии) связан с обусловленным ими усилением сил вязкости, действующих в поперечном (не путать с трансверсальным) направлении. Эти силы порождают сравнительно спокойное течение во впадинах между ребрами, которое выталкивает турбулентное течение, обуславливающее поверхностное трение, вверх, оттесняя его от поверхности (Гуг, 1998). Тем самым изменяется процесс генерации и роста вытянутых пристеночных турбулентных образований, о которых речь шла выше. Кроме того, при наличии риблет возможно изменение поля давления в поперечном направлении, а также создание квазидвумерного течения в непосредственной близости от стенки.

Экспериментальные исследования влияния оребренных поверхностей на турбулентное трение впервые начаты в конце 60-х – начале 70-х гг. прошлого века (Lin, 1966; Kennedy, 1973). В то время удалось установить, что при определенных значениях высоты треугольных ребер сопротивление оребренной поверхности снижается, тогда как ребра прямоугольной формы приводят к возрастанию силы трения. Позднее это направление интенсивно развивалось в NASA Langley главным образом усилиями (Walsh, 1969, 1980, 1984, 1990), которыми в общей сложности испытано около пятидесяти вариантов поверхностей с различным профилем ребра (рис. 5). Приведенный рисунок четко определяет область значений h^+ и s^+ , где h^+ и s^+ — безразмерные геометрические параметры риблет в координатах закона стенки турбулентного пограничного слоя, в которой следует ожидать снижения турбулентного трения (отрицательные значения). Цифра в кружке означает номер исследованной авторами риблетной поверхности. Видно, что треугольные ребра действительно являются более эффективными.

На основе этих, а также более поздних результатов (Bruse, 1998) удалось показать, что:

а) можно достичь максимального уменьшения суммарного сопротивления, если глубина h^+ и шаг s^+ канавок того же порядка, что и размеры вытянутых пристеночных турбулентных образований (примерно 15–30 единиц);

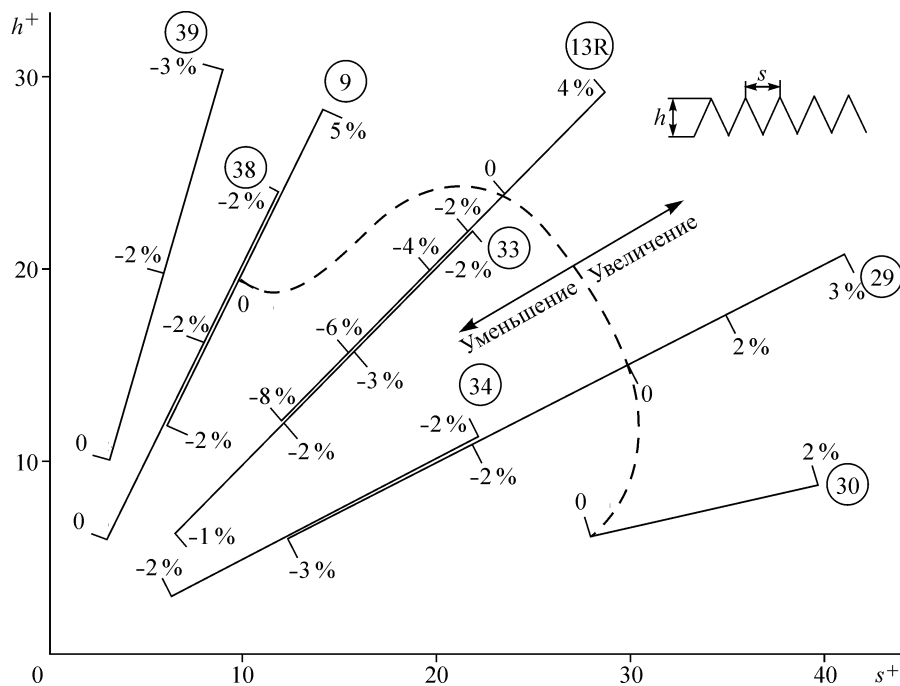


Рис. 5. Область значений h^+ и s^+ , характеризующих эффект снижения (увеличения) турбулентного трения для риблета треугольной формы (Walsh, 1980).

б) можно добиться 8–10%-го уменьшения суммарного сопротивления на поверхностях с V-образными канавками. Другие конфигурации риблет менее эффективны;

в) уменьшается интенсивность среднеквадратичных турбулентных пульсаций вблизи поверхности, однако частота генерируемых выбросов (вспышек) не уменьшается.

Установлено, что риблеты должны быть ориентированы по направлению локального вектора скорости потока. Поверхностное трение возрастает при увеличении угла рассогласования, и при величинах порядка 30° никакого эффекта от применения риблет достичь не удастся (Gaudet, 1987). Экспериментально подтверждено (Bechert, Bruse, 1997; Bruse, 1993; Bechert, 1992, 1997), что путем оптимизации формы риблет можно добиться еще большего снижения сопротивления. При этом оригинальными исследованиями (Walsh, 1979) удалось установить, что при уменьшении поверхностного трения увеличивается теплоотдача. Результаты (Choi, 1993; Choi, Orchard, 1997), полученные при изучении риблет треугольной формы, также обнаруживают увеличение коэффициента теплоотдачи.

Непосредственные наблюдения показали, что чешуя некоторых быстроплавающих акул имеет маленькие продольные ребра высотой около 25 мкм, расположенные параллельно направлению движения животного. В этой связи в работах Dinkelacker с соавторами (Neumann, 1991; Schneider, 1993) форма риблет подбиралась таким образом, чтобы в условиях эксперимента на теле вращения в водной среде смоделировать фрагмент чешуи акулы. При испытаниях достигнуто уменьшение сопротивления трения порядка 8–10 %.

Проблемы, возникающие при эксплуатации риблетных поверхностей, известны. Они состоят, прежде всего, в возможности загрязнения таких поверхностей пылью, мелкими частицами, а также за счет прилипания мелких насекомых.

В начале 80-х годов в США на основе результатов испытаний NASA изготовлена клейкая пленка с отформованными на ней канавками требуемых размеров с целью нанесения ее на обтекаемую поверхность. Последующие испытания такой пленки сначала в аэродинамической трубе, затем в летных условиях, а также на быстроходных яхтах и автомобилях показали, что при малых скоростях сопротивление действительно падает. Установлена практическая и экономическая целесообразность использования клейкой пленки в случаях, если глубина канавок не превышает 25,4 мкм (Хефнер, 1988).

Податливые поверхности

Идея уменьшения сил сопротивления путем использования податливых покрытий исходит от Крамера (Kramer, 1957, 1960, 1961, 1962, 1965), который отмечал, что дельфин может плавать при исключительно высокой скорости, подтверждая тем самым, что его тело имеет очень низкий коэффициент сопротивления. Моделируя кожу дельфина с помощью упругих материалов, Крамеру удалось добиться в лабораторных экспериментах 50%-го уменьшения сопротивления. Впоследствии ряд экспериментов с использованием такого типа поверхностей (Blick, 1968, 1969; Looney, 1966; Lucey, 1992; Carpenter, 1993; Dixon, 1994; Davis, 1997) в большей или меньшей степени подтвердили его выводы, но сводились главным образом к изучению эффекта задержки перехода пограничного слоя. Выявились также другие достоинства податливых покрытий, заключающиеся в возможности поглощения звука, снижении уровня вибраций и шума.

Что касается механизма снижения трения за счет использования податливых стенок, то ясно, что такая стенка должна взаимодействовать с пограничным слоем и влиять на его развитие, т. е. она должна обеспечивать поглощение всех возмущений. Если это так, то длина волны упругого покрытия должна быть того же порядка величины, что и толщина пограничного слоя, в то время как амплитуда — порядка толщины вязкого подслоя. Большинство проведенных до настоящего времени экспериментов так или иначе базировалось на этом принципе.

Вместе с тем вопрос о применении упругих стенок для уменьшения турбулентного сопротивления остается не вполне ясным. Основная причина состоит в том, что эта задача требует одновременных усилий в различных областях науки и техники: в гидродинамике, механике деформируемого твердого тела, физике, химии и технологии полимеров (Мальцев и др., 2000). До последнего времени, по крайней мере для случаев обтекания тел воздушным потоком, практически отсутствуют результаты воспроизводимых экспериментов, которые свидетельствовали бы о возможности значительного (превышающего 5 %) уменьшения суммарного сопротивления посредством применения упругих поверхностей, на которых формируются турбулентные пограничные слои. Основная трудность состоит в том, что вследствие низкой плотности воздуха практически невозможно подобрать пригодный для этой цели упругий слой стенки, который обладал бы универсальными свойствами в широком диапазоне скоростей. Поэтому исследования с податливыми покрытиями в ближайшей перспективе, по-видимому, будут ограничены преимущественно случаем движения тел в воде. Как следствие, научные и практически значимые результаты следует ожидать при разработке морских аппаратов (например, торпед) и судов.

Устройства разрушения вихрей

Одно из важнейших направлений исследований, которое остается актуальным и на сегодняшний день, состоит в необходимости изучения эффективности использования в турбулентном сдвиговом потоке внешних манипуляторов, таких как

устройства разрушения вихрей (УРВ) и, в частности, устройства разрушения крупных вихрей УРКВ (LEBU — Large Eddy BreakUp Devices), относящихся к классу пассивных методов управления течением. Отметим, что термин УРКВ в определенной мере условный, поскольку, как показывают последние эксперименты, основополагающие механизмы уменьшения сопротивления значительно более сложные, чем простое разрушение крупных вихрей, поэтому в дальнейшем мы будем использовать аббревиатуру УРВ.

Сущность идеи применения УРВ состоит в использовании чаще всего горизонтальных тонких пластин (либо других элементов), расположенных в турбулентном пограничном слое в направлении потока или под небольшим углом атаки и предназначенных для разрушения больших вихревых (когерентных) структур, масштаб которых соизмерим с толщиной пограничного слоя. Известно, что крупномасштабные когерентные структуры преобладают в пристенной части слоя и обуславливают до 80 % порождения турбулентных пульсаций. Хотя до настоящего времени нет однозначного представления о механизме работы УРВ, упрощенная схема воздействия таких устройств на структуру течения выглядит следующим образом. Уменьшая характерный масштаб турбулентности, они изменяют механизм передачи количества движения из внешней области течения к стенке, за счет чего может уменьшиться число генерируемых вблизи стенки турбулентных выбросов и, как следствие, снизиться поверхностное трение. В целом же уменьшение трения вниз по потоку от УРВ можно объяснить совокупностью воздействия ряда факторов, таких как:

- уменьшение импульса в следе за элементом (тонкая пластина или крыловый профиль);
- искажение поля скоростей турбулентного сдвигового потока за счет перестройки осредненного течения;
- ослабление интенсивности вихрей в результате их взаимодействия с вихрями противоположного направления вращения;
- распространяющееся вниз по потоку влияние вихрей, сбегающих с задней кромки элемента;
- крупномасштабный перенос импульса от стенки, обусловленный циркуляцией потока около элемента.

Основная трудность состоит в том, что, по крайней мере, при больших числах Рейнольдса, невозможно создать миниатюрные УРВ, размеры которых были бы сравнимы с характерными масштабами турбулентности. Поэтому большинство указанных устройств, создавая полезный эффект, сами являются источником дополнительного аэродинамического сопротивления. Вместе с тем опыты, выполненные в более чем 40 организаций мира (Хефнер, 1984; Корке, 1984; Hefner, 1984; Anders, 1984, 1985; Bertelrud, 1989; Lemay, 1985; Plesniak, 1985; Гезеннек, 1990; Bertelrud, 1982; Wark, 1990; Nguyen, 1989; Guezennec, 1990; Гудилин, 1989, 1995, 1996; Кузенков, 1996; Горшков, 2003; Kornilov, 2004; Gorshkov, 2004; и др.), дают основание полагать, что снижение сопротивления за счет применения УРВ может составлять десятки процентов. Ранние исследования в основном ограничивались номинально безградиентными течениями и низкими числами Рейнольдса. Позднее в ряде работ были проведены достаточно подробные параметрические исследования, их анализ можно найти в работе (Coustols, 1992), которые, однако, выявили существенные расхождения и даже противоречия в полученных результатах. Хотя условия экспериментов отличались друг от друга, тем не менее, даже в сходных условиях разброс значений C_f/C_{f0} , характеризующих относительную величину снижения коэффициента поверхностного трения, составляет несколько десятков процентов. В ряде опытов продемонстрирована исключительно высокая эффек-

тивность таких устройств, использование которых в зависимости от конкретных условий (Plesniak, 1985; Гезеннек, 1990; Bertelrud, 1982) позволяет уменьшить сопротивление трения до 10–40 %. Более того, снижение поверхностного трения, достигающее в отдельных случаях 50 % (Schmitt, 1988), вызывает некоторое сомнение в корректности этой цифры. Тем не менее, на основании совокупности результатов исследований (Plesniak, 1985; Bushnell, 1990; Coustols, 1992; и др.) можно рекомендовать применительно к обтеканию пластины следующие оптимальные параметры таких устройств (в калибрах толщины пограничного слоя δ в месте установки УРВ):

- длина хорды $1\delta < l < 2\delta$;
- высота расположения элемента в пограничном слое $0,5\delta < h < 0,75\delta$;
- толщина элемента $t < 0,1$ мм;
- расстояние между элементами (тандемная схема) $s = (10 - 12)\delta$;
- количество элементов – не более двух.

При этом элемент должен иметь достаточное натяжение, чтобы избежать вибраций, гидравлически гладкую поверхность и закругленную переднюю кромку, чтобы уменьшить собственное сопротивление и острую заднюю кромку, чтобы исключить возникновение отрыва потока.

Вместе с тем при оценке эффективности используемого УРВ следует различать его способность к снижению не только поверхностного трения, но и полного сопротивления, что, безусловно, является более важной задачей. Известно, что эта величина складывается из двух составляющих: разности сил трения, обусловленной влиянием устройства, и собственного сопротивления такого устройства. Из анализа литературных источников следует, что в этом случае разброс экспериментальных значений ΔC_F , характеризующих относительную величину снижения полного сопротивления по данным разных работ, еще более очевиден (рис. 6, где $\Delta x/\delta$ — безразмерное расстояние вниз по потоку от задней кромки УРВ). Несомненно, что причины такого расхождения обусловлены как сложностью и несовершенством методик измерения сопротивления, так и сильным влиянием на ΔC_F отличий в геометрии УРВ, в частности, возможного формирования на них переходного режима течения, отрыва пограничного слоя и т. п. Однако главная причина, по-видимому, состоит в том, что основные механизмы, управляющие течением в пограничном слое при размещении в нем УРВ, до настоящего времени остаются не вполне ясными. Более того, некоторые из них носят гипотетический характер.

По-видимому, наибольшее снижение полного сопротивления получено (Hefner, 1984) и несколько позднее (Plesniak, 1985) (см. рис. 6). В первой работе приведены результаты испытаний УРВ, состоящего из двух пластин с длиной хорды $l = 0,8\delta$, расположенных на высоте $h = 0,8\delta$ и расстоянии между ними $s = 8\delta$. Уменьшение толщины потери импульса, характеризующего эффект снижения суммарного сопротивления, составило 20 % на расстоянии $87,5\delta$ вниз по потоку от УРВ. Во второй из отмеченных работ сходный эффект достигнут для УРВ, состоящего также из двух пластин с длиной хорды $l = 1,1\delta$, расположенных на высоте $h = 0,5\delta$ и расстоянии между ними $s = 11\delta$, где δ — толщина пограничного слоя в месте расположения второго элемента. Во многих публикациях, появившихся после выхода этих работ, данных о столь существенном уменьшении полного сопротивления не содержится. Более того, трудности обеспечения малого сопротивления самого УРВ приводят к тому, что в большинстве исследований эффект от использования таких устройств с точки зрения снижения полного сопротивления редко превышает 7–8 % (Wark, 1990; Guezennec, 1990), а в ряде случаев никакого

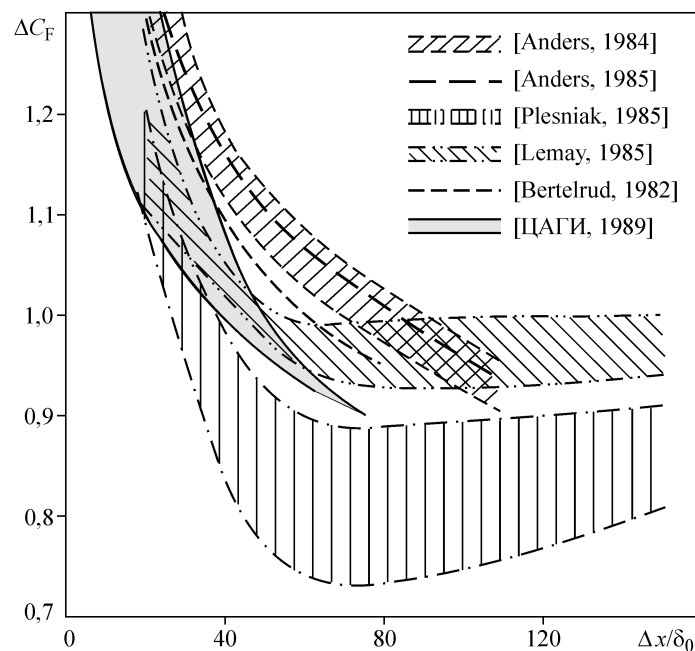


Рис. 6. Эффект снижения полного сопротивления для тандемного УРВ, установленного на плоской пластине.

эффекта вообще не было обнаружено (Sahlin, 1986). Другая трудность, которая практически всегда имеет место при проведении такого рода экспериментов, — проблема выполнения точных измерений сил трения и суммарного сопротивления. Так или иначе все это наводит на мысль о неоднозначной эффективности таких устройств с точки зрения снижения полного сопротивления.

В 1988 году впервые предпринята попытка оценить эффективность УРВ в летных условиях. Исследования проводились на летающей лаборатории, созданной на базе самолета Боинг 737 (Long, 1992), однако по непонятной причине эти испытания закончились не совсем удачно.

Микроэлектромеханические системы

Микроэлектромеханические системы (МЭМСы) – устройства будущего и в то же время реалии сегодняшнего дня. Их основными элементами являются сенсоры (микродатчики), микроактюаторы (исполнительные механизмы) и микропроцессоры. Указанные элементы собираются в одном компьютерном чипе, размеры которого меняются от нескольких микрон до нескольких миллиметров, причем с минимальным энергопотреблением (Lofdahl, 1999; Ho Ch.-M., 1994, 1998; Ho Ch.-M., Tai Yu-Ch., 1994, 1996, 1998). Создание таких миниатюрных элементов стало возможным благодаря разработке совокупности технологических процессов, вобравших в себя “ноу-хау” микроэлектроники, точной механики и ряда других специфических технологий. Выполненные по высочайшим технологическим нормам МЭМСы могут быть использованы в виде автоматизированных микроблоков, например, с целью активного управления параметрами течения на обтекаемой конфигурации (в частности, пограничным слоем) в реальном масштабе времени и в любой точке пространства. Инерционные характеристики микродатчиков и микроактюаторов, вследствие небольшой массы и низкой теплопроводности, очень малы. Поэтому удовлетворяется одно из главных требований к этим элементам —

способность откликаться на высокие частоты. Следовательно такие системы могут с успехом использоваться для диагностики и управления важнейших турбулентных величин, коими являются мгновенная скорость, касательное напряжение, давление и др. Например, для определения пульсаций давления в турбулентном пограничном слое можно использовать МЭМС-датчик давления, пространственное разрешение которого на порядок меньше, чем у обычного микрофонного датчика (Lofdahl, 1999). Важно подчеркнуть, что на базе МЭМС можно достичь интерактивного распределенного управления за счет соединения на единой поверхности микродатчиков, микроактюаторов и микропроцессоров (нейронная сеть) и тем самым создать единую интегрированную систему управления.

Простейшая схема управления таким процессом выглядит следующим образом. Поступающие с датчиков сигналы о характере возмущений обрабатываются в соответствии с алгоритмами распознавания образов, каталог которых хранится на микропроцессоре или в базе данных компьютера. После опознания вида возмущения выдаются управляющие сигналы на актюаторы, являющиеся исполнительными механизмами, предназначенными для внесения требуемых изменений в микроструктуру потока. Появляется возможность глобального слежения за состоянием течения в пространстве и времени и мгновенного реагирования на те или иные негативные процессы. Это означает, что в принципе можно создать “думающую”, активную поверхность. К примеру типичная активная поверхность может состоять из микродатчиков напряжения сдвига, улавливающих локализованные вихревые возмущения в нелинейной области пограничного слоя, встроенной нейронной сети для обработки сигналов в соответствии с алгоритмом распознавания образов и набора магнитных (или других) закрылков для управления вихрями.

Одна из главных целей управления потоком заключается в снижении сопротивления летательных аппаратов, повышения их устойчивости и управляемости, предотвращения отрыва пограничного слоя. Хотя использование для этой цели МЭМС-датчиков выглядит впечатляющим, тем не менее — это реалии сегодняшнего дня. В подтверждение сошлемся на работу (Ho Ch.-M., 1998), в которой приведены конкретные примеры успешной реализации МЭМС для некоторых газодинамических течений.

Таким образом, микроэлектромеханические системы с интегрированными датчиками “сенсор-актюатор” на кремниевых чипах открывают обнадеживающие перспективы для управления потоком с целью снижения турбулентного сопротивления. Применение таких датчиков делает возможным развитие адаптивного управления, имеющего дело с индивидуальными возмущениями, формирующимися в пристенной части пограничного слоя. В традиционных же методах управления невозможно идентифицировать структуры и осуществить выборочное управление ими в реальном масштабе времени. Кроме того, данный способ, несомненно, будет перспективным при изучении возможности снижения турбулентного трения на больших участках обтекаемой поверхности.

Подводя итог этого раздела, можно заключить, что основными объектами и проблемами исследований в области управления турбулентным пограничным слоем с целью снижения сопротивления трения обтекаемого тела в настоящее время являются:

1) физический и численный анализ механизмов управления течением с помощью современных эффективных методов, к коим можно отнести высокомолекулярные полимерные добавки, газовые микропузырьки, ПАВы, риблеты, УРВ, МЭМС и др.;

2) изучение влияния определяющих параметров на структуру управляемого турбулентного сдвигового течения и установление на этой основе универсальных связей и обобщающих зависимостей в приближении к обтеканию тел классической конфигурации, а также тел реальной геометрии;

3) анализ эффективности перспективных способов управления турбулентным течением, в том числе комбинированных методов управления, таких, например, как высокомолекулярные полимерные добавки + газовые микропузырьки + податливая стенка, риблеты + УРВ, либо другие комбинации;

4) оптимизация применяемых для управления устройств;

5) поиск оптимальных способов управления течением на телах фюзеляжеобразной формы, сопротивление трения которых составляет около 30 % от полного сопротивления.

Добавим к этому, что к настоящему времени остро назрела необходимость разработки более совершенных методов и средств измерений и контроля основных параметров течения в пограничном слое и прежде всего силы трения, без которых дальнейшее продвижение по пути решения перечисленных проблем представляется невозможным.

Не случайно научно-исследовательские центры США, Франции, Германии и других стран заняли активные позиции в данном направлении. Усилия российских ученых также сконцентрированы на решении многих из указанных проблем, однако следует признать, что некоторое отставание в этой области имеется.

2. ПРИОРИТЕТНЫЕ ЗАДАЧИ. СОСТОЯНИЕ И УРОВЕНЬ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одна из актуальных задач, которая стоит перед отечественной аэродинамикой, так или иначе связана с разработкой облика будущих высокоэффективных летательных аппаратов. С этой точки зрения немаловажная роль должна отводиться использованию методов и средств управления турбулентным течением с целью снижения аэродинамического сопротивления и улучшения других характеристик летательных аппаратов. Напомним, что многие способы управления могут применяться для целого ряда существующих летательных аппаратов без принципиального изменения их конструкции, что представляется весьма важным. Принимая также во внимание обнадеживающую эффективность некоторых из них (в том числе в ряде гидродинамических течений), усилия специалистов следует сконцентрировать на изучении свойств высокомолекулярных полимерных добавок, газовых микропузырьков, ПАВов, риблет, УРВ, МЭМС, податливых поверхностей и вихревых ячеек, а также вопросах практического применения таких устройств в воздушном, водном, высокоскоростном наземном и других видах транспорта. Судя по полученным результатам, поразительные возможности, которые еще до конца не изучены, обеспечивают полимерные добавки и различные комбинации такого метода управления с другими способами воздействия на турбулентный пограничный слой. Пристального внимания заслуживают устройства разрушения вихрей и риблеты, совместное использование которых является одним из наиболее перспективных, относительно простых и дешевых способов управления турбулентностью. В то же время основные физические свойства и доминирующий механизм воздействия таких устройств на турбулентные сдвиговые течения, а также аспекты их практического применения не вполне ясны и требуют дальнейших исследований.

До настоящего времени в абсолютном большинстве работ анализировалась эффективность УРВ, состоящих из одного или двух (схема “тандем”) элементов, установленных в несжимаемом турбулентном пограничном слое, формирующемся при обтекании плоской поверхности. Аналогичных исследований на телах фюзеляжеобразной формы почти не встречается. Между тем именно такие конфигурации представляют наибольший практический интерес, поскольку в отличие, например, от крыловых поверхностей, где формируется достаточно обширная область ламинарного течения и где существует широкий спектр методов управления, на указанных телах пограничный слой нередко почти с самого начала находится

в турбулентном состоянии, и способы воздействия на такое течение носят ограниченный характер. Кроме того, поддержание ламинарного течения на таких протяженных конструкциях, каким является фюзеляж самолета, может оказаться невыгодным вследствие того, что в этом случае пришлось бы платить слишком высокую цену, не говоря уже о том, что такое течение чрезвычайно чувствительно к внешним возмущениям. Таким образом, совершенно очевидно, что в подобных ситуациях более эффективным способом управления является метод непосредственного воздействия на структуру не ламинарного, а турбулентного течения. Все это свидетельствует о необходимости специального изучения механизмов управления течением с помощью УРВ, риблет и других устройств на телах фюзеляжеобразной формы.

Первая отечественная публикация, относящаяся к проблеме использования риблетных поверхностей, появилась в начале 80-х годов прошлого века (А.с № 1086246, 1984). Автору удалось показать, что при рациональном выборе оребрения плоской поверхности с треугольным профилем ребра можно добиться снижения турбулентного трения на 8–10 %. Несколько позднее (Енютин, 1987, 1988) проведены обстоятельные исследования на пластине, которые в общей сложности охватывали более 30 конфигураций оребренных поверхностей. Оказалось, что в диапазоне скоростей потока вплоть до 100 м/с можно добиться уменьшения турбулентного трения на 8–9 %. Обнаружено, что независимо от геометрии ребер, оптимальные значения параметра s^+ , соответствующие минимуму поверхностного трения, находятся в диапазоне 10–15. В дальнейшем в ЦАГИ более широким авторским коллективом проведены детальные экспериментальные исследования, результаты которых свидетельствуют об эффективности использования не только риблет, но и УРВ и подтверждаются работами (Гудилин, 1989, 1995; Енютин, 1991; Кузенков, 1996) при обтекании пластины и работами (Коновалов, 1992, 1998) — для тел вращения. Установлено (Кузенков, 1996), что основным результатом воздействия УРВ является уменьшение частоты выбросов замедленной жидкости из пристенной зоны турбулентного пограничного слоя во внешнюю область течения и, тем самым, внесен вклад в объяснение механизма этого явления.

С определенным приближением УРВ можно рассматривать как частный случай хонейкомба, который с некоторых пор стал рассматриваться как средство возможного уменьшения сил сопротивления в турбулентном пограничном слое. В частности, в работе (Косорыгин, 1984) при низкой дозвуковой скорости установлено явное снижение локальных сил трения на плоской поверхности позади хонейкомба, однако выигрыша в суммарном сопротивлении не обнаружено.

В работах Корнилова (Горшков, 2003; Kornilov, 2004; Gorshkov, 2004) получены результаты, которые дают отчетливое представление о перспективности использования УРВ на осесимметричном теле вращения в условиях его обтекания несжимаемым потоком. Устройство разрушения крупных вихрей выполнено в виде плоского кольца, изготовленного из стальной шлифованной ленты с относительной толщиной $t/\delta = 0,01$. Положение такого элемента в пограничном слое фиксировалось с помощью регулируемых по высоте миниатюрных стоек, диаметр которых выбран из соображений обеспечения наименьшего аэродинамического сопротивления и ослабления возможных вибраций в потоке. Один из основных вопросов, который возникает при выполнении подобных исследований, состоит в том, имеется ли снижение локального трения позади кольцевого УРВ. В практике эксперимента используется ряд приемов и методов определения поверхностного трения (Корнилов, Литвиненко, 2001а, б; Kornilov, Litvinenko, 2001, 2002 а, в), однако применительно к данной ситуации ни один из них не гарантирует абсолютной надежности. Выполненный в работе (Горшков, 2003) анализ показал, что многие из

широко применяемых эмпирических методов (Людвига — Тиллмана, Кейза — Кроуфорда, Хэда — Пейтеля, Кармана — Шенхера, Фокнера и др.), базирующихся на использовании интегральных характеристик пограничного слоя и хорошо зарекомендовавших себя в разнообразных условиях (Kornilov, 2000, 2001, 2002; Kornilov, Litvinenko, 2002a) не пригодны для анализа течения позади кольцевого УРВ. В то же время обнаружено, что профили скорости вниз по течению быстро принимают форму закона стенки. В этой ситуации вполне приемлемым оказался метод диаграмм Клаузера, основанный на анализе профилей скорости в предположении существования в пограничном слое закона стенки.

Полученные в работах (Горшков, 2003; Kornilov, 2004) данные в определенной степени подтверждают механизмы воздействия УРВ на структуру течения, справедливые для пластины. В частности, имеет место заметное подавление уровня турбулентных пульсаций скорости в области течения между стенкой и самим УРВ. Тонкий след позади УРВ выполняет роль своеобразной разделительной пластинки, препятствующей обмену импульсом между внешними слоями жидкости пограничного слоя и внутренними, уменьшая тем самым уровень продольной и поперечной компонент пульсаций скорости, что в итоге способствует уменьшению турбулентного трения. Существенное снижение плотности турбулентных пульсаций скорости позади УРВ на телах вращения зафиксировано также в работе (Христинич, 1997) во всем диапазоне частот.

При обтекании тела вращения с установленным на нем УРВ обнаружены регулярные вихревые структуры типа дорожки Кармана (Горшков, 2003; Kornilov, 2004). Поскольку такая структура, как правило, носит упорядоченный характер, именно она может служить одной из необходимых предпосылок для снижения турбулентного трения. Суть данного механизма состоит в том, что реализующиеся в следе за УРВ вихри, взаимодействуя с окружающей турбулентностью, изменяют характерный масштаб вихрей и способствуют перераспределению энергии турбулентности, что в конечном итоге приводит к уменьшению трения. Вместе с тем найдено, что с увеличением высоты расположения УРВ в пограничном слое интенсивность вихревой дорожки явно ослабевает. Данный факт заставляет усомниться в целесообразности использования УРВ в окрестности внешней границы пограничного слоя, как это рекомендуется в ряде литературных источников. В целом полученные на осесимметричном теле новые данные свидетельствуют о том, что:

1) все исследованные варианты УРВ, в том числе и одноэлементные, обеспечивают снижение коэффициента поверхностного трения на величину, максимальное значение которой в зависимости от высоты расположения УРВ в пограничном слое может достигать 16 %. Однако по существу ни одно из одноэлементных устройств не дает возможности получить выигрыш в полном сопротивлении в сравнении с аналогичной величиной для исходной конфигурации;

2) тандемная схема УРВ является достаточно эффективным средством воздействия на структуру пристенной турбулентности и обеспечивает выигрыш в полном сопротивлении в сравнении с аналогичной величиной для исходной конфигурации. Начиная с расстояния от УРВ, составляющего около 10 толщин пограничного слоя δ_0 , и далее вниз по течению, вплоть до $(90 - 100)\delta_0$, наблюдается устойчивое снижение полного сопротивления поверхности, максимальная величина которого достигает 15 %. Однако эффективность исследованных устройств существенно ослабевает при увеличении относительной длины УРВ и, наоборот, заметно возрастает при установке УРВ под небольшим положительным углом атаки ($\alpha = 1.8^\circ$);

3) полученные данные дают основание для осторожного прогноза о том, что при увеличении числа Рейнольдса Re_L эффективность используемых устройств, по крайней мере, не уменьшается.

Для применения УРВ непосредственно в воздушном или водном транспорте, они, по-видимому, должны иметь форму колец, установленных с требуемым зазором на фюзеляже самолета или корпусе подводного аппарата. Однако, поскольку тонкие ленты не обладают необходимой жесткостью, они должны иметь в сечении форму аэродинамического профиля малого сопротивления. Чтобы получить снижение суммарного сопротивления необходимы специальные расчетные и экспериментальные исследования, направленные на выявление перспективных форм профилей крыльев. Кроме того, целесообразны дальнейшие исследования, направленные не только на оптимизацию УРВ, но и на использование комбинированных способов управления и более совершенных методов измерения основных параметров течения в пограничном слое, вплоть до прямого взвешивания сил, действующих на тело вращения. Поскольку УРВ и риблеты работают при разных масштабах течения в турбулентном пограничном слое, их можно использовать совместно, чтобы добиться еще большего снижения сопротивления. Результаты испытаний в аэродинамических трубах ЦАГИ (Гудилин, 1989, 1995, 1996) убеждают, что эффект от совместного использования указанных элементов существенно усиливается.

В течение последних 40 лет в России проводились интенсивные исследования с целью снижения турбулентного трения с помощью податливых (упругих) поверхностей (Мальцев и др., 2000). В Институте теплофизики СО РАН разработан метод и создается аппаратура для измерения колебательных характеристик вязкоупругих покрытий и кожных покровов животных. Экспериментами, выполненными на буксируемых и всплывающих моделях при числах Рейнольдса более 10^7 с фиксированием колебательных характеристик покрытий, подтверждены расчетные прогнозы по выбору эффективных типов покрытий. В лабораторных условиях получено снижение трения на 42–44 % для многослойного покрытия и на 15–20 % для однослойного монолитного покрытия, рекомендованного в практику. Ранее (Semenov, 1991) разработана методика выбора оптимальной податливой поверхности для уменьшения турбулентного сопротивления, основанная на теории Стенберга. Используя предложенное оптимальное податливое покрытие, в статье (Kulik, 1991) выполнены эксперименты на озерной воде, которые обнаружили уменьшение сопротивления до 20 %. Чтобы проверить эти результаты в работе (Choi, 1997) проведены совместные исследования в водяной трубе Ноттингемского университета с использованием податливых покрытий, аналогичных тем, которые изучались в работах (Kulik, 1991, 1996). Результаты демонстрируют, что действительно имеет место уменьшение турбулентного трения до 7 % во всем исследуемом диапазоне скоростей, однако полного подтверждения выполненных ранее экспериментов не получено.

Обнаружено также снижение турбулентных пульсаций давления на обтекаемой поверхности в частотном диапазоне, прогнозируемом интерференционной теорией. На ее основе разрабатываются новые схемы покрытий и ведется поиск эффективных материалов. При этом используются также результаты гидробионических исследований дельфинов. Выполнены пионерские опыты, свидетельствующие о перспективности исследований совместного использования вязкоупругих покрытий с вводом в поток полимерных добавок и газовых микропузырьков (Семенов, 1999; Мальцев, 2000). Получены впечатляющие результаты при натурных испытаниях на озерной воде тела вращения с использованием указанного выше комбинированного способа управления потоком, которые свидетельствуют о возможности снижения сопротивления трения такого тела на 35 %. Интерференционная теория позволила также прогнозировать область параметров рационального применения вязкоупругих покрытий совместно с риблетами и с вводом в поток полимерных добавок.

Интересные идеи относительно механизма снижения сопротивления морских животных, основанного на принципе бегущей волны, представлены в работе (Меркулов, 1989).

Следует отметить, что, хотя на податливых поверхностях получены интересные и практически важные результаты, ни один из них не был успешно повторен независимыми исследователями. В этом смысле заслуживает внимания статья (Kornilov, 2004), в которой удалось показать, что при малых скоростях воздушного потока ($U_{\infty} \leq 10-15$ м/с) тщательно подобранный образец, изготовленный из синтетического каучука, обеспечивает снижение поверхностного трения на плоской пластине до 5%. Это означает, что податливая стенка с заданными физико-химическими параметрами может рассматриваться в качестве пассивного способа управления свойствами турбулентного пограничного слоя в воздушном потоке. Вместе с тем обнаружено, что при увеличении скорости потока ее эффективность снижается.

Как показывает анализ, отечественных исследований, направленных на разработку и использование МЭМС-технологий для управления турбулентным течением, практически не существует. Некоторым исключением является работа (Voiko, 1998), выполненная применительно к управлению ламинарно-турбулентным переходом пограничного слоя в несжимаемом потоке. Имеется также ряд публикаций (Grek, 1993, 1995; Voiko, 1997), посвященных изучению эффективности для указанных условий риблетных поверхностей.

Что касается проблемы снижения лобового сопротивления обтекаемых тел, то она должна быть предметом отдельного обстоятельного обзора. Вместе с тем нельзя не отметить, что вклад отечественных специалистов в этом направлении значителен. Отметим, основываясь на результатах хотя бы некоторых публикаций, что при сверхзвуковых скоростях потока волновое сопротивление тела может быть уменьшено в 1,5–2,5 раза за счет организации передней иглы или диска малого диаметра (Белов, 1985, 1987), при помощи мощного оптического пульсирующего разряда (Гаранин, 2001) или за счет локального энергоподвода (Chernyi, 1998; Korotaeva, 1998).

Таким образом, из процитированных выше результатов и иной доступной информации следует, что многие проблемы анализируемого научного направления являются объектами изучения не только за рубежом, но и у нас в стране, и их уровень в целом достаточно высок. При этом тематика исследований практически совпадает с основными тенденциями развития мировой науки, что видно из публикаций российских специалистов. Однако достойно сожаления, что на сегодняшний день в России отсутствуют целенаправленные исследования по управлению турбулентным течением, проводимые в рамках единой научной программы, аналогичной тем, которые существуют за рубежом.

В большинстве организаций аэрофизического профиля научное оборудование позволяет решать подобные задачи на относительно высоком уровне, хотя нельзя не отметить постепенное его старение. Как следствие, заметна тенденция к сокращению экспериментальных исследований, хотя динамика данного процесса в последние годы меняется к лучшему. Особенно это касается исследований структуры и характеристик турбулентных пограничных слоев, где выполнение экспериментов на мировом уровне невозможно без кардинального обновления материальной базы и использования передовых технологий. Подобные исследования требуют не только широкого применения достижений компьютерной техники, но и переоснащения исследовательских лабораторий и групп современным научным оборудованием, включающим оригинальные нетрадиционные приборы и средства для диагностики пристенных турбулентных течений. Все больше ощущается необходимость в существенном увеличении информативности экспериментальных результатов. Речь идет не просто о максимуме информации, а о получении макси-

мального объема информации в единицу времени. Для уменьшения стоимости эксперимента здесь предстоит также ответить на непростые вопросы, связанные с совершенствованием самих экспериментальных установок, их оснащением самыми современными быстродействующими измерительными средствами и автоматизированными системами.

Подводя окончательный итог, отметим более определенно, что в настоящее время прогресс в аэродинамике, одной из главных целей которой является уменьшение сопротивления летательного аппарата или другого движущегося тела, увеличение его маневренности, улучшение аэродинамических характеристик, связывают с решением нескольких физических проблем:

- сохранением ламинарного режима обтекания;
- пониманием возможности управления отрывом потока на обтекаемой поверхности;
- управлением структурой турбулентного течения активными и пассивными методами.

В то же время эти вопросы являются составной частью более общей фундаментальной проблемы — описания турбулентности, и здесь, несмотря на большие успехи, еще многие задачи требуют своего решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамзон А.А.** Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества. — Л., 1984.
- Амфилохий В.Б., Артюшков Л.С., Барбанель Б.А. и др.** Современное состояние теории управления пограничным слоем. — СПб.: Малахит, 2000. — 414 с.
- А.с. № 1086246.** Поверхность, обтекаемая жидкостью или газом / Е.С. Виноградов // БИ. — 1984. — № 14.
- Афанасьев В.Н., Веселкин В.Ю., Леонтьев А.И. и др.** Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углублений на исходно гладкой поверхности. — Ч. 1. — М., 1991. — 56 с. — (Препр. / МГТУ им. Н.Э. Баумана; № 2–91).
- Баранов П.А., Гувернюк С.В., Ермишин А.В. и др.** Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В. Ермишина, С.А. Исаева. — М.; СПб.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. — 360 с.
- Белов И.А., Исаев С.А., Коновалов В.Н. и др.** Волновое сопротивление тела степенной формы с установленным впереди диском в сверхзвуковом потоке // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1987. — № 4, вып. 1. — С. 24–28.
- Белов И.А., Исаев С.А., Коновалов В.Н. и др.** Оценка волнового сопротивления тела вращения с передней срывной зоной в сверхзвуковом потоке // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1985. — № 4, вып. 1. — С. 47–51.
- Гаранин А.Ф., Третьяков П.К., Тупикин А.В. и др.** Аэродинамика течений с оптическим пульсирующим разрядом. — Новосибирск, 2001. — 22 с. — (Препр. / СО РАН. Ин-т теорет. и прикл. механики и Ин-т лаз. физики; № 7–2001).
- Гезенек Й. Г., Наджиб Х.М.** Механизмы снижения суммарного сопротивления в управляемых пограничных слоях // Аэрокосм. техника. — 1990. — № 8. — С. 103–112.
- Горшков В.Г., Корнилов В.И.** Влияние устройств разрушения крупных вихрей на характеристики турбулентного пограничного слоя на теле вращения. — Новосибирск, 2003. — 43 с. — (Препр. / Ин-т теорет. и прикл. механики СО РАН; № 4–2003).
- Гудилин И.В., Енютин Г.В., Ким А.Ю. и др.** Экспериментальное исследование совместного влияния продольного оребрения и разрушителей вихревых структур на турбулентное трение // Уч. зап. ЦАГИ. — 1989. — Т. 20, № 6. — С. 8–14.
- Гудилин И.В., Лашков Ю.А., Шумилкин В.Г.** Совместное влияние продольного оребрения и разрушителей вихревых структур на турбулентное трение на пластине // Изв. АН СССР. Сер. МЖГ. — 1995. — № 3. — С. 39–46.
- Гудилин И.В., Лашков Ю.А., Шумилкин В.Г.** Экспериментальное исследование влияния риблетов и разрушителей вихревых структур на сопротивление тела вращения // Изв. АН СССР. Сер. МЖГ. — 1996. — № 3. — С. 154–157.
- Енютин Г.В., Лашков Ю.А., Самойлова Н.В. и др.** Влияние внешней турбулентности и градиента давления на эффективность снижения турбулентного трения на мелкоробристой поверхности // Уч. зап. ЦАГИ. — 1991. — Т. 22, № 4. — С. 33–38.

- Енютин Г.В., Лашков Ю.А., Самойлова Н.В. и др.** Влияние продольного оребрения на сопротивление турбулентного трения // Уч. зап. ЦАГИ. — 1988. — Т. 19, № 4. — С. 37–44.
- Енютин Г.В., Лашков Ю.А., Самойлова Н.В. и др.** Экспериментальное исследование влияния продольного оребрения на сопротивление трения плоской пластины // Изв. АН СССР. Сер. МЖГ. — 1987. — № 2. — С. 140–145.
- Коновалов С.Ф., Лашков Ю.А., Михайлов В.В.** Влияние микрооребра на сопротивление тела вращения, обтекаемого с кормовым отрывом потока // Изв. РАН. Сер. МЖГ. — 1998. — № 1. — С. 163–168.
- Коновалов С.Ф., Лашков Ю.А., Михайлов В.В. и др.** Влияние продольного микрооребра на сопротивление тела вращения // Изв. РАН. Сер. МЖГ. — 1992. — № 2. — С. 174–178.
- Корке Т.К., Гусценек И., Нагиб Г.М.** Модификация сопротивления при турбулентном течении в пограничных слоях путем манипуляции со структурами большого масштаба / Под ред. Г.Р. Хью. — М.: Машиностроение, 1984.
- Корнилов В.И.** Пространственные пристенные турбулентные течения в угловых конфигурациях. — Новосибирск: Наука, 2000. — 400 с.
- Корнилов В.И., Литвиненко Ю.А.** Сравнительный анализ методов измерений поверхностного трения в несжимаемом градиентном турбулентном пограничном слое. — Новосибирск, 2001а. — 45 с. — (Препр. / СО РАН. Ин-т теорет. и прикл. механики; № 1–2001).
- Корнилов В.И., Литвиненко Ю.А.** Эффективность применения различных методов определения поверхностного трения в турбулентном пограничном слое // Устойчивость течений гомогенных и гетерогенных жидкостей: Тез. докл. Междунар. конф. Вып. 8. — Новосибирск, 2001б. — С. 90–91.
- Косорыгин В.С.** Структура течения за хонейкомбом, установленным в турбулентном пограничном слое. Пограничные слои в сложных условиях. — Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1984. — С. 49–55.
- Кузнецов В.К., Левицкий В.Н., Репик Е.У. и др.** Исследование механизма снижения турбулентного поверхностного трения с помощью разрушителей вихревых структур // Изв. РАН. Сер. МЖГ. — 1996. — № 5. — С. 80–89.
- Мальцев Л.И., Гузевский Л.Г., Кулик В.М. и др.** Некоторые вопросы морской гидродинамики (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. — 2000. — Т. 7, № 3. — Р. 319–337.
- Меркулов В.И.** Гидродинамика знакомая и незнакомая. — М.: Наука, 1989. — 136 с.
- Пограничные слои в сложных условиях:** Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теплофизики. — Новосибирск, 1984. — 183 с.
- Семенов Б.Н., Амиров А.И., Кулик В.М. и др.** Снижение турбулентного сопротивления путем совместного использования податливого покрытия, газовых микропузырьков и полимерных добавок // Теплофизика и аэромеханика. — 1999. — Т. 6, № 2. — Р. 225–234.
- Снижение вязкостного трения /** Под ред. Г.Р. Хью. — М.: Машиностроение, 1984.
- Хефнер Дж. Н.** Проблема снижения сопротивления // Аэрокосм. техника. — 1988. — № 7. — С. 143–153.
- Хефнер Д.Н., Вайнштейн Л.М., Бушнел Д.М.** Уменьшение турбулентного сопротивления трения с помощью разрушения больших вихрей / Под ред. Г.Р. Хью. — М.: Машиностроение, 1984.
- Христич И.С.** Влияние разрушителей вихревых структур на спектральные характеристики ПС тел вращения // Пробл. мореход. качеств судов и кораб. гидромех: Тез. докл. науч.-техн. конф. — СПб., 1997. — С. 34–35.
- Anders J.B.** Outer-layer manipulators for turbulent drag reduction // *Viscous Drag Reduction in Boundary Layers*. Vol. 123. — Washington, DC, 1990. — P. 263–284.
- Anders J.B., Hefner J.N., Bushnell D.M.** Performance of large-eddy breakup devices at past-transitional Reynolds numbers. — AIAA Paper 84-0345, 1984.
- Anders J.B., Watson R.D.** Airfoil large-eddy breakup devices for turbulent drag reduction numbers. — AIAA Paper 85-0520, 1985.
- Bechert D.W.** Biological surfaces and their technological applications – laboratory and flight experiments on drag reduction and separation control. — AIAA Paper 97-1960, 1997.
- Bechert D.W., Bruse M., Hage W. et al.** Experiments on drag-reducing surfaces and their optimisation with an adjustable geometry // *J. Fluid Mech.* — 1997. — Vol. 338. — P. 59–87.
- Bechert D.W., Hoppe G., van Hove J.G.T. et al.** The Berlin oil channel for drag reduction research // *Exp. in Fluids*. — 1992. — No. 12. — P. 251–260.
- Bertelrud A.** A profile family for use in boundary layers with large-eddy breakup devices // *Conf. on Drag Reduction '89 Davos, Switzerland, July 31–Aug. 3, 1989: Proc.* — Davos, 1989. — P. 1–15.
- Bertelrud A., Truong T.V., Avellan F.** Drag reduction in turbulent boundary layers using ribbons. — AIAA Paper 82-1370, 1982.
- Blick E.F., Walters R.R.** Turbulent boundary layer characteristics of compliant surfaces // *J. Aircraft*. — 1968. — Vol. 5. — P. 11–16.

- Blick E.F., Walters R.R., Smith R. et al.** Compliant coating skin friction experiments. — AIAA Paper 69-165, 1969.
- Bogdevich V.G. et al.** Gas-saturated effect on near-wall turbulence characteristics // 2nd Intern. Conf. on Drag Reduction, Proc. — Cambridge, BHRA. — 1977. — P. D2-25–D2-37.
- Boiko A.V., Kozlov V.V.** Strategy of the flow MEMS control at laminar-turbulent transition in a boundary layer // IUTAM Symp. on Mechanics of Passive and Active Flow Control, Goettingen, 7–11 Sept. 1998: Proc. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998. — P. 203–208.
- Boiko A.V., Kozlov V.V., Syzrantsev V.V. et al.** Transition control by riblets in swept wing boundary layer with imbedded streamwise vortices // Eur. J. Mech. — 1997. — Vol. 16. — No. 3.
- Bruse M., Bechert D.W., Hage W.** The flow over riblets: velocity measurements with hot-film probes // IUTAM Symp. on Mechanics of Passive and Active Flow Control, Goettingen, 7–11 Sept. 1998: Proc. — Kluwer Acad. Publishers, 1998. — P. 115–120.
- Bruse M., Bechert D.W., van Hoveen J.G.T. et al.** Experiments with conventional and novel adjustable drag-reducing surfaces. // Near-Wall Turbulent Flows. — Amsterdam: Elsevier, 1993. — P. 719–738.
- Bushnell D.M.** Turbulent drag reduction of external flows. — AIAA Paper 83-0227, 1983. (См. также: Техн. информация ЦАГИ. Сер. Авиационная и ракетная техника. — 1984. — № 3. — С. 8–19.)
- Bushnell D.M., Hefner J.N.** Viscous drag reduction in boundary layer // Progress in Astronautics and Aeronautics. — 1990. — Vol. 123. — P. 3–50.
- Carpenter P.W.** Optimisation of multiple-panel compliant walls for delay of laminar-turbulent transition // AIAA J. — 1993. — Vol. 31. — P. 1187–1188.
- Chernyi G.G.** The impact of electromagnetic energy addition to air near the flying body on its aerodynamic characteristics // Proc. 2nd Weakly Ionized Gases Workshop, Norfolk, VA, April 24–25, 1998.
- Choi K.-S.** Breakdown of the Reynolds analogy over drag-reducing riblets surface // Appl. Sci. Res. — 1993. — Vol. 51. — P. 149–155.
- Choi K.-S.** European drag-reduction research – recent developments and current status // Fluid Dyn. Res. — 2000. — Vol. 26, No. 5. — P. 325–335.
- Choi K.-S.** Turbulent drag reduction mechanisms: Strategies for turbulence management. Turbulence Structure and Modulation // CISM Courses and Lectures No. 415: Springer-Verlag, 2001.
- Choi K.-S., Orchard D.M.** Turbulence management using riblets for heat and momentum transfer // Intern. J. Exp. Thermal Fluid Sci. — 1997. — Vol. 15, No. 2. — P. 109–124.
- Choi K.-S., Yang X., Clayton B.R et al.** Turbulent drag reduction using compliant surfaces // Proc. Royal Soc., A453. — 1997. — P. 2229–2240.
- Coustols E., Savill A.M.** Turbulent skin-friction drag reduction by active and passive means. Pts 1 and 2: Paper Reprinted from AGARD Report 786, 1992. — P. 8-1–8-80.
- Davis C., Carpenter P.W.** Numerical simulation of the evolution of Tollmien-Schlichting waves // J. Fluid Mech. — 1997. — Vol. 335. — P. 361–392.
- Dixon A.E., Lucey A.D., Carpenter P.W.** Optimisation of viscoelastic compliant walls for transition delay // AIAA J. — 1994. — Vol. 32. — P. 256–267.
- European Drag Reduction Conference, Potsdam, 19–21 June 2000: Notes on Numerical Fluid Mechanics, Vol. 76, Springer-Verlag, 2001, Berlin / Heidelberg.**
- 12th European Drag Reduction Meeting, Herning (Denmark), 18–20 April 2002.**
- Hefner J.N., Bushnell D.M.** Turbulent boundary-layer relaxation with application to skin-friction drag reduction // AIAA J. — 1984. — Vol. 22, No 7.
- Ho Ch.-M.** Interaction between fluid dynamics and new technology // Proc. I Conf. Interaction of Sci. and Art / Eds. N.W.M.Ko et al. — Hong-Kong, 1994. — P. 1–8.
- Ho Ch.-M., Huang Po-Hao, Yang Joon Mo et al.** Active flow control by micro systems // IUTAM Symp. on Mechanics of Passive and Active Flow Control, Goettingen, 7–11 Sept. 1998: Proc. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998. — P. 195–202.
- Ho Ch.-M., Tai Yu-Ch.** MEMS and its application for flow control // Transactions of the ASME. J. Fluids Engineering. — 1996. — Vol. 118 — P. 437–447.
- Ho Ch.-M., Tai Yu-Ch.** MEMS: Science and Technology. // ASME FED: Application of Microfabrication to Fluid Mechanics. — 1994. — Vol. 197. — P. 39–48.
- Ho Ch.-M., Tai Yu-Ch.** Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) and fluid flows // Annu. Rev. Fluid Mech. — 1998. — No. 30. — P. 579–612.
- Hwang D.P.** Skin-friction reduction by a micro-blowing technique // AIAA J. — 1998. — Vol. 36, No. 3. — P. 480–481.
- Gaudet L.** An assessment of the drag reduction properties of riblets and the penalties of off design conditions: RAE Tech. Memo. Aero No. 2113, 1987.
- Gorshkov V.G., Kornilov V.I.** Turbulent boundary layer on a body of revolution under influence of eddy breakup devices results // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Proc. Pt. 1. — Novosibirsk, 2004. — P. 112–117.

- Grek G.R., Kozlov V.V., Titarenko S.V.** An experimental study of riblets on transition // 8th Drag Reduction Meeting, Lausanne, Switzerland, 21–23 Sept. 1993: Abstr. Pts 1 and 2. — Lausanne, 1993.
- Grek G.R., Kozlov V.V., Titarenko S.V. et al.** The influence of riblets on a boundary layer with imbedded vortices // *Phys. Fluids A*. — 1995. — Vol. 7, No. 10. — P. 2504–2506.
- Guezennec Y.G., Nagib H.M.** Mechanisms leading to net drag reduction in manipulated turbulent boundary layers // *AIAA J.* — 1990. — Vol. 28, No. 2. — P. 245–252.
- Gyr A.** Natural riblets // IUTAM Symposium on mechanics of passive and active flow control, Goettingen, 7–11 Sept. 1998: Proc. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998. — P. 115–120.
- Kato H.** Skin friction reduction by microbubbles // 1st Intern. Symp. on Smart Control in Turbulence, Dec. 1999: Proc. — Tokyo, 1999.
- Kennedy J.F., Hsu S.-T., Lin J.-T.** Turbulent flow past boundaries with small longitudinal fins // *J. Hydraulic Division*. — 1973. — Vol. 99. — No. 3.
- Kim J.** Active control of turbulent boundary layers for drag reduction // IUTAM Symp. on Mechanics of Passive and Active Flow Control, Goettingen, 7–11 Sept. 1998: Proc. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1998. — P. 195–202.
- Kornilov V.I.** Characteristics of axisymmetric turbulent boundary layer controlled by ring manipulators // Intern. Conf. on Boundary and Interior Layers: Proc. — Toulouse, 2004. — P. 187–192.
- Kornilov V.I., Litvinenko Yu.A.** Skin friction measurement in an incompressible turbulent boundary layer. Part 1. Adverse pressure gradient // *Thermophysics and Aeromechanics*. — 2001. — Vol. 8, No. 4. — P. 475–491.
- Kornilov V.I., Litvinenko Yu.A.** Skin friction measurement in an incompressible turbulent boundary layer. Pt 2. Favorable pressure gradient // *Thermophysics and Aeromechanics*. — 2002a. — Vol. 9, No. 2. — P. 157–169.
- Kornilov V.I., Litvinenko Yu.A.** Relaxation features of a turbulent boundary layer in an unfavorable pressure gradient // *Thermophysics and Aeromechanics*. — 2002b. — Vol. 9, No. 3. — P. 343–354.
- Kornilov V.I., Nikiforov S.B., Pavlov A.A.** Skin friction measurements by oil film method utilising diffuse light scattering for image registration // Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Proc. Pt. 1. — Novosibirsk — Tomsk, 2000. — P. 140–144.
- Kornilov V.I., Nikiforov S.B., Pavlov A.A.** Skin-friction measurements in an incompressible pressure-gradient turbulent boundary layer. Review of techniques and results // Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Proc. Pt. 1. — Novosibirsk, 2002. — P. 114–119.
- Kornilov V.I., Nikiforov S.B., Pavlov A.A.** Skin-friction measurement utilising diffuse light GISF // 6th Asian Symp. on Visualization, BEXCO: Proc. — Pusan (Korea), 2001. — P. 306–308.
- Kornilov V.I., Pavlyuchenko A.M., Sobolev A.V.** Effect of a viscoelastic coating on friction drag of a flat plate in air flow // *Thermophysics and Aeromechanics*. — 2004. — Vol. 11, No. 3. — P. 405–415.
- Korotaeva T.A., Fomin V.M., Shashkin A.P.** The effect of local energy source on the aerodynamic characteristics of pointed bodies at supersonic flow // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Proc. Pt. 1. — Novosibirsk, 1998. — P. 111–116.
- Kramer M.O.** Boundary layer stabilisation by distributed damping // *J. Aero. Sci.* — 1957. — Vol. 24. — P. 459–460.
- Kramer M.O.** Boundary layer stabilisation by distributed damping // *J. Am. Soc. Nav. Engr.* — 1960. — Vol. 72. — P. 25–33.
- Kramer M.O.** Boundary layer stabilisation by distributed damping // *J. Am. Soc. Nav. Engr.* — 1962. — Vol. 74. — P. 341–348.
- Kramer M.O.** Hydrodynamics of the dolphin. In: *Advances in Hydroscience*. Vol. 2. — New York: Academic, 1965. — P. 111–130.
- Kramer M.O.** The dolphin's secret // *J. Am. Soc. Nav. Engr.* — 1961. — Vol. 73. — P. 103–107.
- Kulik V.M.** Drag reduction change of polyethyleneoxide solutions in pipe flow // *Experiments in Fluids*. — 2001. — No. 31. — P. 558–566.
- Kulik V.M., Poguda I.S., Semenov B.N. et al.** Experimental investigation of one-layer viscoelastic coatings action on turbulent friction and wall pressure pulsations // *Recent Developments in Turbulence Management*. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1991. — P. 263–289.
- Kulik V.M., Semenov B.N.** The measurement of dynamic properties of viscoelastic materials for turbulent drag reduction // *Emerging Techniques in Drag Reduction*. — London: MEP, 1996. — P. 207–218.
- Landhal M.T.** Dynamics of boundary layer turbulence and the mechanism of drag reduction // *Physics of Fluids*. — 1977. — Vol. 20, No. 10. — P. 2. — P. S55–S63.
- Lemay J., Provencal D., Gourdean R. et al.** More detailed measurements behind turbulence manipulators including balance. — AIAA Paper 85-0521, 1985.
- Lin C.K., Kline S.J., Johnston T.P.** Experimental study of turbulent boundary layer on rough walls: Rep. of Thermosciences Div., Dept. of Mechanical Engrg, Stanford Univ. No. MD-15. — Stanford Univ. Press, 1966.

- Lofdahl L., Gad-el-Hak M.** MEMS applications in turbulence and flow control // Progress in Aerospace Sci. — 1999. — Vol. 35. — P. 101–203.
- Long P.Yip.** NASA/Langley using varied approach to develop subsonic high-lift devices // Aviation Week and Space Technology. — 10 February 1992. — No. 49.
- Looney W.R., Blick E.F.** Skin friction coefficients of compliant surfaces in turbulent flow // J. Spacecr. Rocket. — 1966. — Vol. 4. — P. 1562–1564.
- Lucey A.D., Carpenter P.W.** A numerical simulation of the interaction of compliant wall and inviscid flow // J. Fluid Mech. — 1992. — Vol. 234. — P. 121–146.
- Lumley J.L.** Drag reduction in two phase and polymer flows // Physics of Fluids. — 1977. — Vol. 20, No. 10, Pt. 2. — P. S64–S71.
- Madavan, N.K., Deutsch, S., Merkle, C.L.** Measurements of local skin friction in a microbubble-modified turbulent boundary layer // J. Fluid Mech. — 1985. — Vol. 156. — P. 237–256.
- McCormick M.E., Bhattacharyya R.** Drag reduction of a submersible hull by electrolysis // Naval Engineers J. — 1973. — Vol. 85, No. 2. — P. 11–16.
- Merkle C.L., Deutsch S.** Viscous Drag Reduction in Boundary Layers // Progress in Astronautics and Aeronautics. — 1990. — Vol. 123. — P. 351–412.
- Neumann D., Dinkelacker A.** Drag measurements on V-grooved surfaces on a body of revolution in axial flow // Applied Sci. Research. — 1991. — Vol. 48. — P. 105–114.
- Nguyen V.D., Dickinson J., Jean. Y. et al.** Turbulent boundary layer over a ribletted surface with tandem manipulators using surface drag balances // 1st Canadian Symp. on Aerodynamics: Proc. — Ottawa, 1989.
- Plesniak M.W., Nagib H.M.** Net drag reduction in turbulent boundary layers resulting from optimized manipulation. — AIAA Paper 85-0518, 1985.
- Robinson S.K.** A review of vortex structure and associated coherent motions in turbulent boundary layers // Structure of Turbulence and Drag Reduction. — Berlin: Springer-Verlag, 1990. — P. 23–50.
- Sahlin A., Alfredsson P.H., Johansson A.V.** Direct drag measurement for a flat plate with passive boundary layer manipulators // J. Phys. Fluids. — 1986. — Vol. 2, No. 129. (3).
- Schmitt V.** Reduction de la traînée de l'avion de transport subsonique. Tendances et perspectives actuelles // Aeronautique et Astronautique. — 1988. — No. 29. — P. 4–18.
- Schneider M., Dinkelacker A.** Drag reduction by means of surface riblets on an inclined body of revolution // Near-Wall Turbulent Flows. — Elsevier Sci. Publ. B.V., 1993. — P. 771–780.
- Semenov B.N.** On conditions of modelling and choice of viscoelastic coating for drag reduction // Recent Developments in Turbulence Management. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1991. — P. 241–262.
- Walsh M.J.** Drag characteristics of V-groove and transverse curvature riblets // Viscous Drag Reduction. — Washington, DC: AIAA, 1980. — P. 168–184.
- Walsh M.J.** Turbulent boundary layer drag reduction using riblets. — AIAA Paper 82-0169, 1969.
- Walsh M.J.** Riblets // Viscous Drag Reduction in Boundary Layers. — Washington, DC: AIAA, 1990. — P. 203–261.
- Walsh M.J., Lindeman A.M.** Optimisation and application of riblets for turbulent drag reduction. — AIAA Paper 84-0347, 1984.
- Wark C.E., Naguib A.M., Nagib H.M.** Effect of plate manipulators on coherent structures in a turbulent boundary layer // AIAA J. — 1990. — Vol. 28, No. 11. — P. 1877–1884.
- Walsh M.J., Weinstein L.M.** Drag and heat transfer characteristics of small longitudinally ribbed surfaces // AIAA J. — 1979. — Vol. 17, No. 7. — P. 770, 771.

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2005 г.