

УВИДЕТЬ НЕВИДИМОЕ

Воздух практически не поглощает и не отражает свет в видимой части спектра; не испускает он и собственных лучей. Но опираясь на эту невидимую субстанцию, на специальных крылатых машинах (самолетах) мы способны передвигаться со скоростью, во многие сотни раз превышающей скорость пешехода! Как сделать полет максимально эффективным и в то же время предельно безопасным? Ответ вполне очевиден – надо прежде всего изучить особенности воздушных течений вокруг корпуса летящей машины. Поэтому одна из насущных задач аэродинамики, поставленная более века назад и ставшая особо актуальной с ростом авиаскоростей, – увидеть эти мощные, но невидимые потоки воздуха

ГОЛУБЕВ Максим Павлович – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории оптических методов диагностики газовых потоков Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 30 работ

Ключевые слова: аэродинамика, летательные аппараты, воздушные потоки, оптические методы, визуализация, фотохромные материалы.
Key words: aerodynamics, flight, aircraft, gas flow, optical methods, visualisation, photochromic materials



После успехов авиационных технологий прошлого века может показаться удивительным, что в настоящее время усилия, направляемые на совершенствование форм летательных аппаратов, практически не способствуют дальнейшему улучшению их летных качеств. Это видно по внешнему сходству самолетов одного класса, созданных разными авиаконструкторами в течение последних лет.

И это неудивительно, ведь законы аэродинамики для всех едины, поэтому максимально эффективную форму *планера* (корпуса самолета) с требуемыми летными характеристиками все разработчики находят независимо друг от друга. И сравнивая, например, современные истребители пятого поколения – американский F-22 «Raptor» и разрабатываемый в России Т-50, нетрудно заметить сходство их контуров, формы крыльев и хвостовых стабилизаторов, близкие углы наклона килей и т. д.

Следует признать, что достигнут практический предел технологии изготовления планеров, основанной на теории Жуковского. Но этот факт отнюдь не ограничивает дальнейшее развитие авиационной техники. В настоящее время улучшения летных характеристик добиваются за счет регулирования режимов обтекания летящего аппарата набегающим воздухом.

Известно, что при движении самолета в потоке воздуха иногда происходят нежелательные явления, увеличивающие сопротивление среды, в первую очередь – образование вихрей и ударных волн, а также «отрыв потока» от поверхности корпуса. Борьба за экономичность и увеличение скорости полета определяет значимость исследований этих аэродинамических явлений. Воздействие на процессы их образования и развития может повысить управляемость аппарата, уменьшить расход топлива, снизить визуальную и акустическую заметность, расширить диапазон доступных режимов полета и т. п.

На этапе проектирования самолета большое внимание уделяется не только экспериментальным, но и численным исследованиям обтекания как планеров, так и элементов конструкции летательных аппаратов (внешних частей двигателя, воздухозаборников, люков, навесного оборудования). Развитие вычислительной

техники позволило существенно ускорить и вывести на более высокий уровень математический расчет параметров движения воздуха.

Однако сложность и многообразие аэродинамических явлений довольно часто ограничивают возможность численного моделирования реальных условий полета, что приводит к снижению точности или даже невозможности расчетов. В этих случаях единственный выход – проведение экспериментальных исследований, позволяющих получить как численную информацию, так и наглядное представление об общей картине процесса.

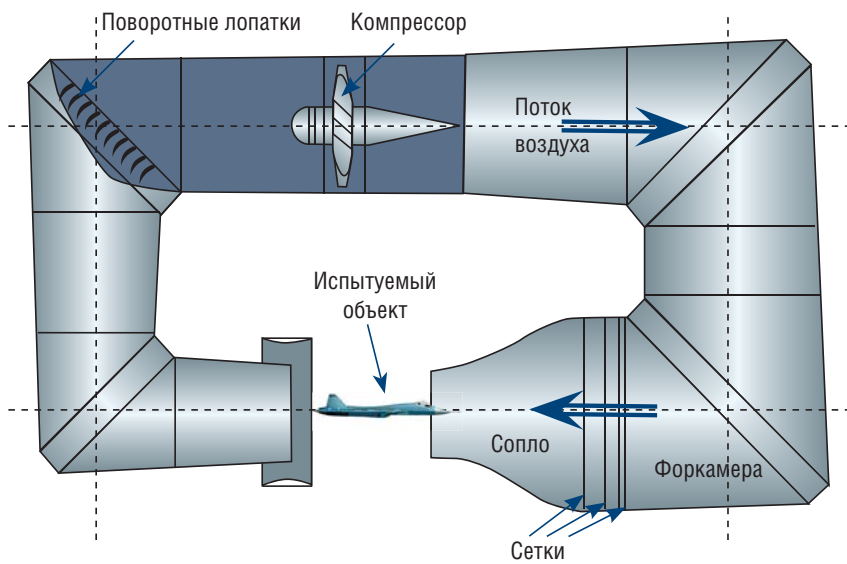
Дело авиаконструкторов – труба

С точки зрения пилота (и летательного аппарата), находящегося в полете, неважно, он ли летит сквозь неподвижную воздушную среду, или же поток воздуха набегаает на «подвисший» самолет. Поэтому существует два типа экспериментов: либо исследуемые объекты обдувают потоком воздуха в так называемой *аэродинамической трубе*, либо, закрепляя их на самолетах, проводят летные испытания в реальных условиях. При этом с помощью датчиков измеряют давление и температуру, подъемную силу, сопротивление, нагрузки и т. д.

Вообще говоря, данные, получаемые в летных испытаниях, более достоверны, однако такие эксперименты весьма затратны и часто нецелесообразны.

Для изучения обтекания полномасштабной модели или настоящего самолета нужна аэродинамическая труба огромного размера. Такая труба находится, например, в распоряжении ученых американского исследовательского центра «Ames». В нее помещается даже авиалайнер «Боинг-737» в натуральную величину. Подобных аэродинамических установок в мире немного, и работают они на относительно малых скоростях (менее 200 км/ч), моделируя в основном проблемные низкоскоростные режимы полета (например, посадку).

Чаще исследования проводят в трубах меньшего размера. Это позволяет не только удешевить эксперимент, но и расширить доступный диапазон изучаемых параметров обтекания. При этом испытывают либо уменьшенную модель целого объекта, либо отдельные



Аэродинамическая труба – устройство, предназначенное для испытаний летательных аппаратов. Трубы бывают разных типов, но во всех действует один принцип – искусственно создаваемый поток воздуха обдувает исследуемый объект, моделируя его полет. Основной элемент трубы – компрессор – накачивает воздух в форкамеру (широкую часть трубы), где он замедляется и проходит через набор сеток, устраняющих неоднородности поля скоростей. Далее воздушный поток поступает в сужающееся сопло, откуда с ускорением выходит в открытую рабочую часть (секцию, где производят измерения) и, если труба замкнутого типа, снова направляется к компрессору. Угловые стыки трубы снабжены специальными поворотными лопатками, которые плавно изменяют направление потока воздуха, не позволяя развиваться в нем дополнительным турбулентным завихрениям

Самая большая в мире аэродинамическая труба расположена в комплексе ангаров исследовательского центра «Ames» (Калифорния, США). Ее размеры – 25 метров в высоту и 50 метров в ширину; она может вместить 180-местный аэробус. Для обеспечения компрессорной системы ветродуйных аппаратов энергией рядом расположена стомегаваттная электростанция. Испытуемые летательные аппараты фиксируют на вертикальных штангах – пилонах. Меняя их относительную высоту, аппарат ориентируют под нужными углами к направлению потока

его части в натуральную величину или в масштабе. Это относится не только к самолетам, но и к автомобилям, поездам, строениям и т. п. Иногда используют и простые геометрические формы (шар, цилиндр, плоский клин, конус) – обычно для изучения фундаментальных эффектов и явлений.

Однако получить в эксперименте набор цифр (значения температуры, давления, величины и направления скорости потока воздуха в различных точках) часто бывает недостаточно. Зрительный образ процесса как дополнение к числовому представлению иногда дает более ценную информацию, поскольку позволяет выявить ряд особенностей воздушного течения, определить наиболее интересные области для дальнейшего изучения и т. д. И в этом исследователям помогают *оптические* методы диагностики – одни из мощнейших в аэродинамике.

Тень от невидимки

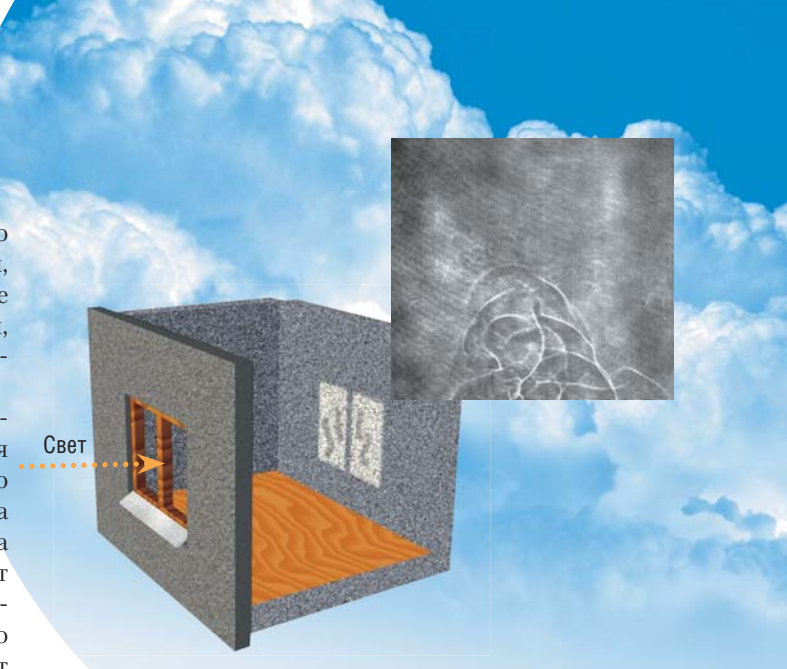
Суть оптических методов аэродинамического исследования заключается в том, что параметры воздушного течения определяют через изменение свойств излучения (например, интенсивности, частоты и фазы колебаний), пропускаемого через эту среду. Используя физические принципы, лежащие в основе того или иного метода, можно определить градиенты давления и плотности газа, скорость течения и т. п.

Оптические методы имеют два неоспоримых достоинства: *бесконтактность* и *панорамность*. Иными словами, они не оказывают воздействия на систему «объект – воздух» и позволяют во многих случаях получать данные в виде изображения сразу по всему полю течения.

Среди оптических методов можно выделить методы *визуализации* потока, которые не менее важны, чем измерения его параметров, потому что дают наглядное представление об общей картине течений.

Одними из первых методов визуализации, получивших ввиду своей простоты очень широкое распространение, стали так называемые *теньевые* методы. Вот их простейшая иллюстрация: на стене, освещенной падающим в окно прямым солнечным светом, можно видеть неоднородности воздуха в виде темных и светлых пятен. Дело в том, что нагретый от теплой стены воздух имеет меньшую плотность, а следовательно, и меньший коэффициент преломления. Из-за возникающей разницы с окружающим воздухом проходящие лучи света отклоняются на небольшие углы, при этом в одном месте на стене освещенность увеличивается, а в другом уменьшается (т. е. туда как бы отбрасывается тень этой неоднородности).

В аэродинамических экспериментах солнечный свет, конечно же, не используется. Вместо него применяют



В яркий солнечный день на стене напротив окна можно увидеть теньевую картину – интересное явление, источником которого служат неоднородности нагретого воздуха

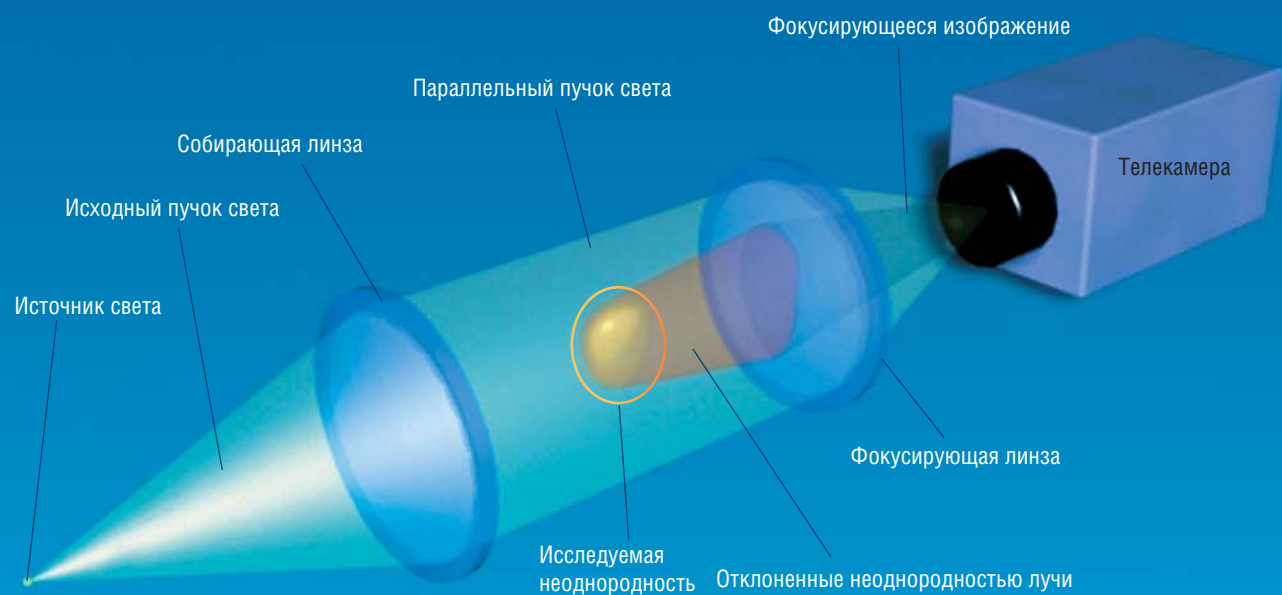
искусственные источники света: лампы накаливания, светодиоды, искровые разрядники и т. п. Суть от этого не меняется – на экране наблюдают тень возмущений среды, вносимых взаимодействием с объектом. Такой метод называют *прямотеньевым*.

Если надо уменьшить изображение до размера входного объектива регистрирующей телекамеры, то между изучаемой областью и экраном ставят собирающую линзу. На полученных таким методом фотографиях можно, например, увидеть положение и форму ударных волн и турбулентности в пограничном слое потока вдоль препятствия. Поскольку на ударных волнах перепад плотности очень большой, они выглядят как темные линии, потому что отклоняют излучение очень сильно. В дозвуковых потоках, но при достаточной высоте (околозвуковых) скоростях течения перепады плотности не такие сильные, однако если вдоль хода луча размер неоднородности большой, то луч отклонится существенно, формируя соответствующую теньевую картину.

Чем больше перепад плотности, тем большее изменение яркости наблюдается на теньевом изображении. Однако при просвечивании слабых неоднородностей интенсивность отклоненных лучей может оказаться столь малой, что их совсем не будет заметно на фоне общей засветки. Для преодоления этой трудности необходимо отсечь фоновое излучение.

Способ отсекающего лишнего света был предложен еще в 1857 г. французским физиком Л. Фуко. Для контроля точности изготовления зеркала он придумал поместить в его фокальной плоскости непрозрачную ширму с острой кромкой. Спустя семь лет этот метод усовершенствовал немецкий физик А. Теплер. Он предложил использовать схему с отсекающей фоновое излучение

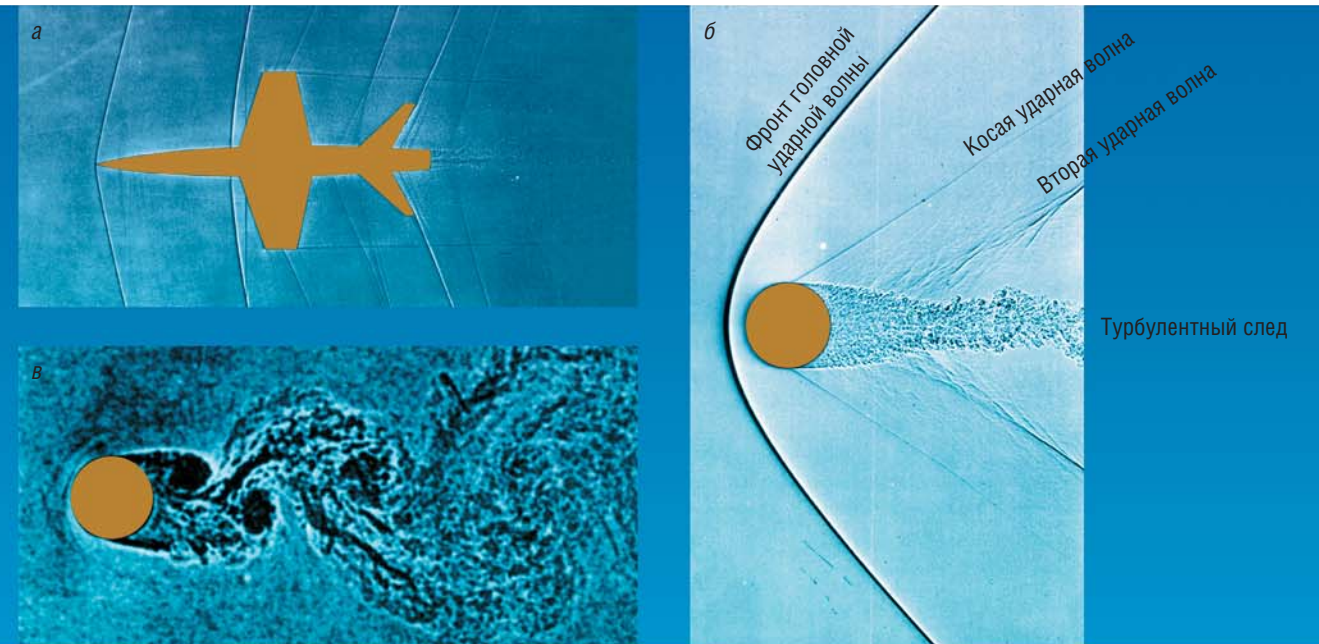
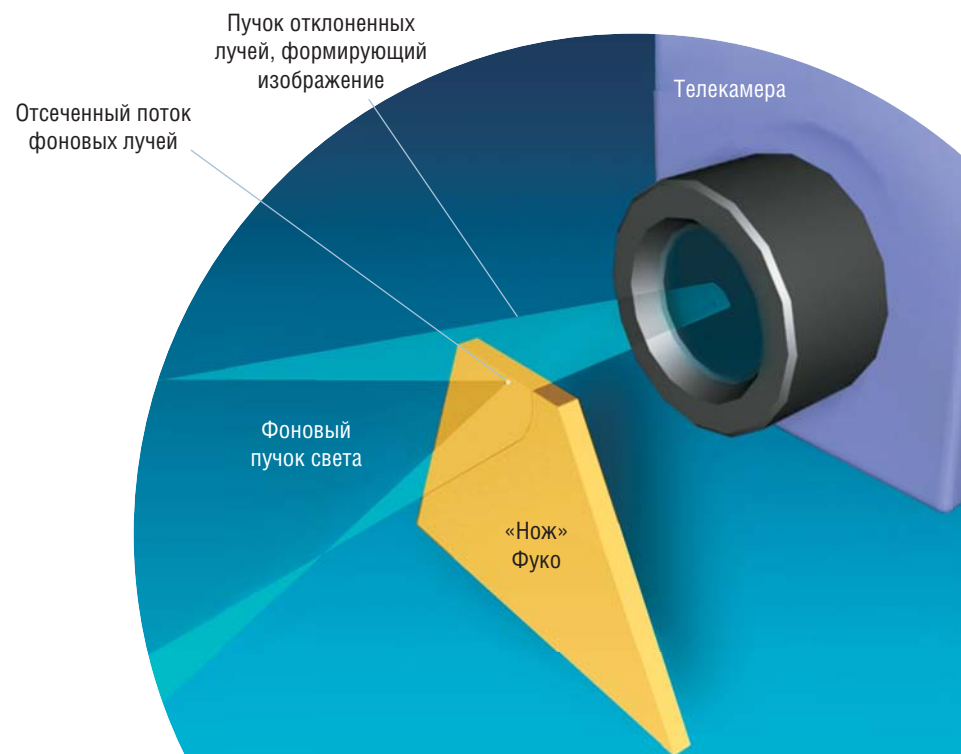




Теневые методы визуализации основаны на явлении отбрасывания тени локальными возмущениями в воздухе. Она возникает потому, что лучи света, проходя через локальное сгущение или разрежение газа отклоняются от прямолинейного хода

Суть *прямотеневого* метода состоит в том, что с помощью светового источника и собирающей линзы генерируется параллельный пучок света, которым «просвечивают» исследуемый участок воздушной среды. При наличии неоднородности совокупность отклоняемых ею лучей формирует изображение, которое фокусируется второй линзой на экран или в телекамеру. Однако в случае слабых возмущений плотности воздуха прямотеневое изображение получается малоcontrastным, с плохо различимыми деталями

«Шлирен-фотография» – теневой метод, дающий более контрастное изображение. Для этого в месте фокусировки фонового излучения помещают непрозрачную пластинку или диск, и оно отсекается этим своего рода «ножом». Но лучи света, отклоненные на исследуемой неоднородности, преимущественно проходят вне точки фокуса, поэтому большинство их минует «нож» и попадает в фотокамеру. Таким образом, соотношение интенсивностей отклоненного и фонового излучений существенно увеличивается, и неоднородности проявляются сильнее – в виде светлых областей на темном фоне



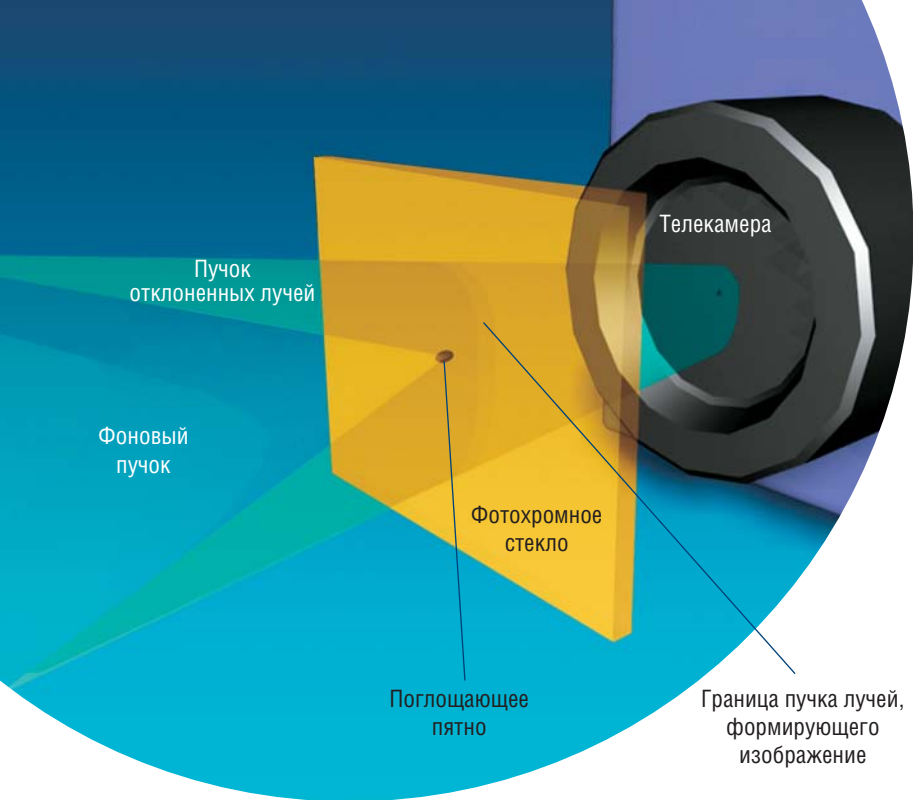
Сверхзвуковой полет неизбежно сопровождается формированием ударных волн с огромным перепадом плотности, выделяющихся на теневых картинах контрастными линиями. Например, ударные волны создаются выступающими частями корпуса модели самолета, «летающей» со сверхзвуковой скоростью 420 м/с (а). При сверхзвуковом полете шара (б) отчетливо виден фронт головной ударной волны (гиперболической формы), а от верхней и нижней точек шара отходят косые (плоские) ударные волны. Сразу за шаром начинается турбулентный след, порождающий слабые возмущения, которые далее сливаются во вторую ударную волну. При дозвуковом (скорость около 210 м/с) обтекании цилиндра (в) след образован из вихрей, попеременно срывающихся то с верхней, то с нижней точки

ширмой – «ножом Фуко» – для поиска включений инородных микрочастиц (в том числе и пузырьков воздуха) в изделиях из стекла, в частности для контроля качества линз. Теплер назвал этот способ *шлирен-методом*, от немецкого «Schlieren» (дефекты, помехи, грязь в прозрачной среде). Немногим позже эта методика стала применяться и для диагностики газовых сред.

Фотографируем воздух

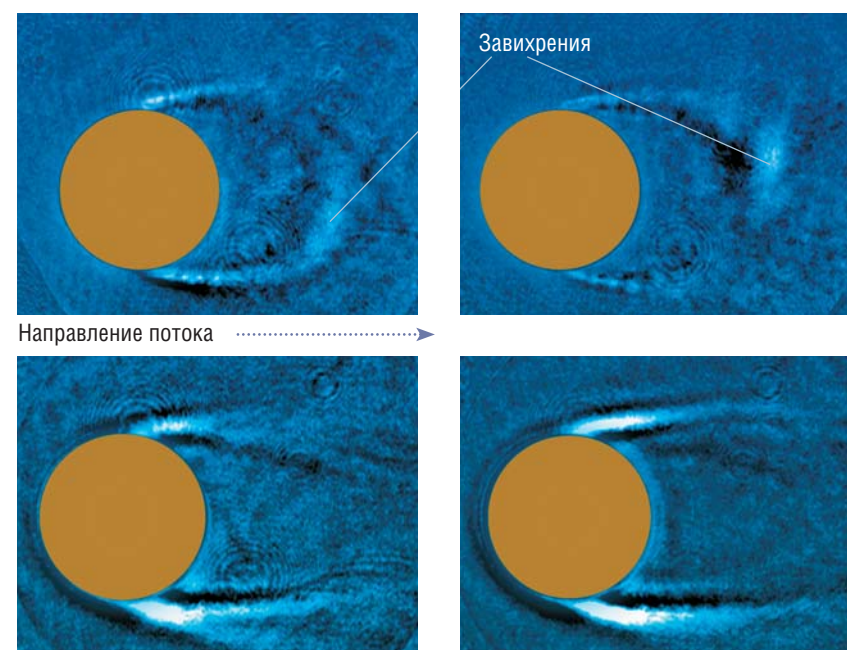
На шлирен-фотографии сверхзвуковой струи с использованием горизонтального «ножа» изображение верхней и нижней половин получается разной яркости. Это происходит из-за того, что формирующие его лучи частично перекрываются «ножом». Поэтому довольно часто вместо пластины используют нанесенную на прозрачное стекло черную точку, добиваясь попадания излучения в ее центр. Она позволяет отсечь только фоновое излучение, фокусирующееся в этом месте. Применяют и другие маскирующие приспособления, помещаемые в точку фокуса. Поскольку благодаря

поглощению ими лишнего излучения на экране проявляется контрастное изображение (т.е. происходит визуализация невидимого объекта), эти приспособления назвали *визуализирующими элементами*. Чем меньше размер «точки» сфокусированного фонового излучения и размер поглощающего это излучение элемента, тем большей чувствительностью обладает схема. Поэтому особый интерес могло бы представлять использование в теневых методах лазеров, поскольку их излучение можно сфокусировать в узкий пучок диаметром в несколько микрон (в сотни раз тоньше человеческого волоса). Но в реальности попасть узким лучом точно на кромку или в очень маленькую точку практически невозможно: любые колебания (вибрация) шлирен-установки могут нарушить настройки ее ориентации, а неровности кромки, сравнимые по размеру со сфокусированным излучением, будут вносить сильные искажения в картину визуализации. По этой причине применение лазеров не приводило к существенному увеличению чувствительности.



Эффективная модификация шлирен-метода была недавно разработана в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН. Для отсекающего мешающего излучения используются «адаптивные визуализирующие транспаранты» (АВТ) на основе фотохромного стекла. Это изобретение впервые позволило увидеть очень малые возмущения в газе (менее одной тысячной доли от плотности среды)

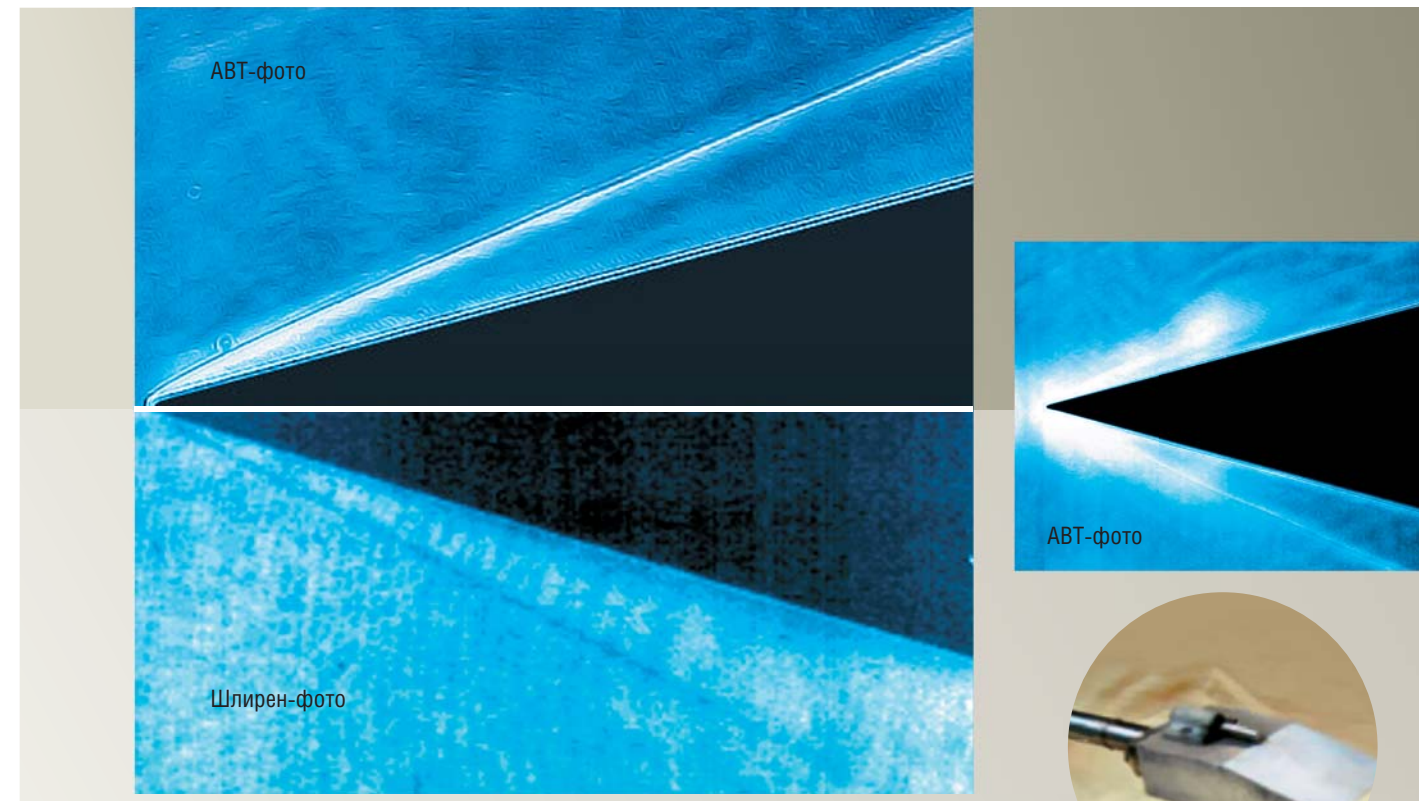
С помощью технологии АВТ возможно в режиме реального времени наблюдать формирование вихревого следа за цилиндром (при скорости 10 м/с) и образование симметричных «усов» без завихрений (1 м/с). Другими панорамными методами эти явления не удавалось визуализировать



Итак, до недавнего времени считалось, что для визуализации теневыми методами есть предел – перепад плотности должен быть не менее 10^{-3} кг/м³ (это примерно тысячная доля от плотности приземного атмосферного воздуха). Этого, однако, недостаточно для исследования дозвуковых течений со скоростью менее 10 м/с и потоков разреженных газов.

Кардинально «добавить чувствительности» методу удалось в 2006 г., когда в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН (Новосибирск) было предложено использовать вместо «ножа Фуко» фотохромное стекло, затемняющееся под воздействием интенсивного света (Павлов и др., 2007). В быту подобные материалы широко применяются для создания так называемых очков-«хамелеонов», которые при ярком солнечном свете защищают глаза, становясь менее прозрачными.

Элегантность метода отсекающего лишнего света с помощью фотохромной пластинки заключается в том, что фоновое излучение, фокусируясь в ее толще, само создает поглощающее его пятно в нужном месте и соответствующего (минимально возможного) размера. Следовательно, отпадает необходимость точной настройки такого теневого прибора, потому что в случае смещения прибора пятно поглощения автоматически создается в новом месте, а в старом исчезает. При этом лучи, отклоненные на неоднородности, не фокусируются на пластинке и поэтому



На шлирен-фотографии линия уплотнения (фронт ударной волны) при обтекании клина разреженным воздухом (около 10^{-3} атм) лишь угадывается, в то время как на АВТ-фото она четко различима. Более того, с помощью АВТ-технологии удалось увидеть, как ударная волна разрушается электрическим разрядом

Так выглядит одна из широко применяемых аэродинамических моделей – клин

имеют крайне низкую интенсивность, не создают себе поглощающего пятна и проходят в регистрирующую камеру (на экран).

Благодаря способности адаптироваться к нарушению настроек прибора такие визуализирующие элементы получили название *адаптивные визуализирующие транспаранты* (АВТ).

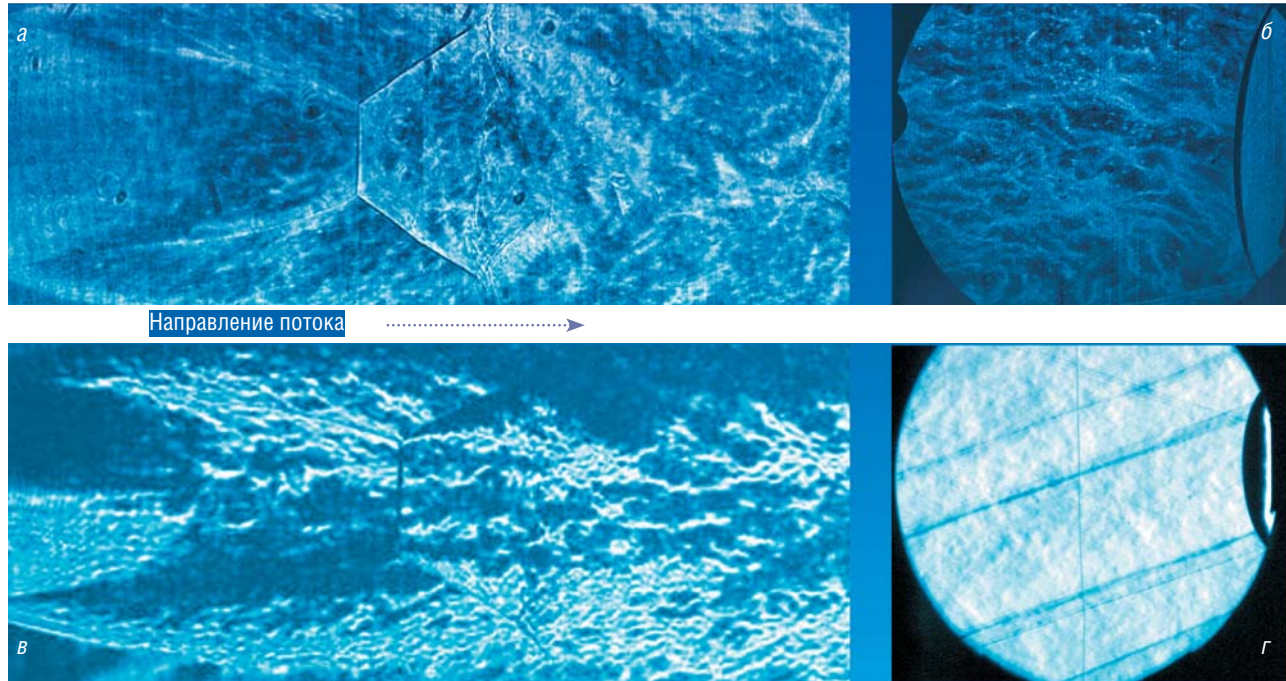
Модификация теневого метода дала впечатляющие результаты: теперь стало возможным увидеть картины течений сильно разреженного газа (давлением менее 100 Па = 0,001 атм) и потоков с очень низкой скоростью (менее 1 м/с). Но область применения новых визуализирующих систем не ограничивается этими двумя случаями.

Так, существенным недостатком классического шлирен-метода является невозможность визуализировать слабые возмущения на фоне сильных, так как последние зашумляют изображение в целом. При использовании АВТ эта проблема отсутствует, поскольку отклоня-

емые на сильных неоднородностях лучи создают на фотохромном стекле свои области поглощающих пятен, независимо от главного (фонового) пятна. Этот эффект приводит к ослаблению контраста изображения резких перепадов плотности воздуха, вследствие чего проявляются детали слабых возмущений.

Уникальные возможности нового метода демонстрируются также на примере исследования процессов, происходящих при поглощении мощного пучка инфракрасных лучей в тонком слое органического материала. Только с помощью АВТ стало возможным в деталях наблюдать явления, сопровождающие образование горючей газовой смеси и ее последующее воспламенение: ударные волны и структуру течения за ними, звуковые волны от воспламеняющихся частиц пыли, вихревые течения в факеле.

Получить детальную картину объекта высокой яркости с помощью прямотеневого или шлирен-метода невозможно из-за крайне низкой чувствительности



Одно из главных достоинств АВТ-фотографии – возможность увидеть слабые возмущения плотности воздушной среды на фоне сильных. Например, внутри сверхзвуковой свободной воздушной струи, выдуваемой из сопла, более четко видно систему и контуры ударных волн (а), а при сверхзвуковом обтекании торца цилиндра можно увидеть в деталях практически всю область течения за ударной волной (б). В то же время при использовании традиционного метода с «ножом Фуко» изображение сильно зашумляется (в) либо полностью заглушается (г)

первого и очень высокой чувствительности второго. Однако нелинейность поглощения света фотохромным АВТ дает экспериментаторам прекрасную возможность исследовать разные процессы без замены визуализирующих элементов и перестройки оптической схемы.

Фотохромные материалы были известны давно, но лишь несколько лет назад их догадались применить для оптической диагностики газовых потоков. И это элегантное и простое по своей сути техническое решение, найденное новосибирскими учеными из Института теоретической и прикладной механики СО РАН, помогло разрешить ряд серьезных проблем, связанных с техникой визуализации.

Изобретение способной к адаптации системы визуализации существенно расширило возможности экспериментаторов, и уже на начальной стадии разработки были получены уникальные результаты мировой значимости. За это АВТ-метод был включен в список главных достижений Российской академии наук за 2007 г.

Но на этом история нового метода не заканчивается: у него есть мощный потенциал для дальнейшего повышения чувствительности и быстродействия.

Литература
 Харитонов А. М. *Техника и методы аэрофизического эксперимента. Ч. 1: Аэродинамические трубы и газодинамические установки: Учебник.* Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. 220 с.
 Бойко В. М., Оришич А. М., Павлов А. А. и др. *Теоретические основы и методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте: Учеб. пособие.* Новосибирск: Изд-во Новосибир. гос. ун-та, 2008. 412 с.
 Холдер Д., Норт Р. *Теневые методы в аэродинамике.* М.: Мир, 1966.
Оптические методы исследований в баллистическом эксперименте. Отв. ред. Г. И. Мишин. Л.: Наука, 1979.
 Ван-Дайк М. *Альбом течений жидкости и газа.* М.: Мир, 1986.
 Ландсберг Г. С. *Оптика.* М.: Наука, 1976.
 Поуп А., Гойн К. *Аэродинамические трубы больших скоростей.* М.: Мир, 1968.
 Павлов А. А., Павлов А. А., Голубев М. П. *Использование фототропных материалов в качестве адаптивных визуализирующих транспарантов в теневых приборах // Труды IX Международной научно-технической конференции ОМИП-2007 (Москва, 26–29 июня 2007).* М.: Изд-во МЭИ, 2007. С. 170–173.



В центр пластины снизу направляется ИК-излучение, очень быстро нагревающее ее тонкий слой и приповерхностный воздух. Оргстекло испаряется, а быстро расширяющийся воздух порождает ударную волну, распространяющуюся от пластины

Уникальные возможности нового оптического метода демонстрируются в эксперименте по испарению и последующему возгоранию органического стекла под действием мощного потока инфракрасных лучей. На АВТ-фотографиях (внизу справа) зафиксировано: взрывное сгорание пылинок (а); структура потоков внутри факела (б)



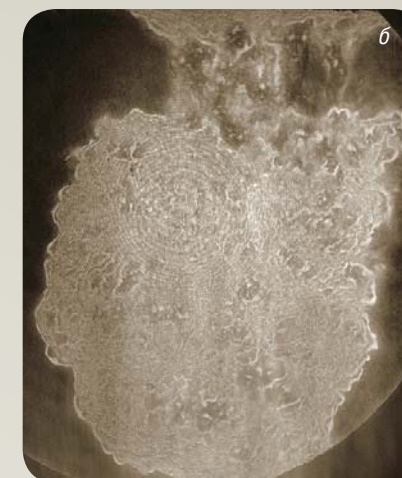
Пары оргстекла смешиваются с сильно разогретым воздухом, образуя взрывоопасную смесь, которая быстро воспламеняется



Центр воспламенения
 Ударная волна
 Сгорающие пылинки
 Сферические фронты звуковых волн от сгорающих пылинок



Продвигающийся фронт паров оргстекла образует горящий факел



б