

Свет против звука

В Институте теоретической и прикладной механики СО РАН (Новосибирск) впервые в мире получен квазистационарный оптический разряд в воздушном сверхзвуковом потоке аэродинамической установки. Обнаружено, что взаимодействие теплового следа от разряда с ударной волной, генерируемой моделью, приводит к ослаблению ее интенсивности. Эффект может найти применение в авиации для снижения уровня звукового удара.

Возрастающий темп современной жизни и глобализация бизнеса, требующие скоростных перевозок, стимулируют исследования по созданию гражданских сверхзвуковых авиалайнеров. Разработки пассажирских сверхзвуковых самолетов второго поколения широко ведутся за рубежом и в России начиная с 90-х годов прошлого века. По единодушному мнению специалистов, основным препятствием на этом пути является экологическое ограничение на уровень звукового удара (ЗУ).

При полете в атмосфере со скоростью, превышающей скорость звука, область возмущенного течения ограничена головной ударной волной (УВ), исходящей от носовой части самолета, и хвостовой УВ, формирующейся в кормовой части. Вблизи самолета (так называемая ближняя зона) присутствуют промежуточные УВ, а также волны разрежения и сжатия, создаваемые отдельными элементами конструкции летательного аппарата. Так как возмущения, генерируемые каждой точкой его поверхности, распространяются со скоростью, близкой к скорости звука (которая меньше скорости самолета), то форма ударных волн близка к конической.

За головной УВ в результате наложения возмущений скачкообразно увеличивается давление, температура и плотность воздуха. При удалении от самолета (дальняя зона) из-за нелинейных эффектов (зависимости скорости распространения возмущений от их амплитуды) течение трансформируется таким образом, что распределение избыточного (относительно атмосферы) давления принимает N-образную форму. Наблюдателем на поверхности Земли эта N-волна воспринимается в виде одного или двух (в зависимости от размера

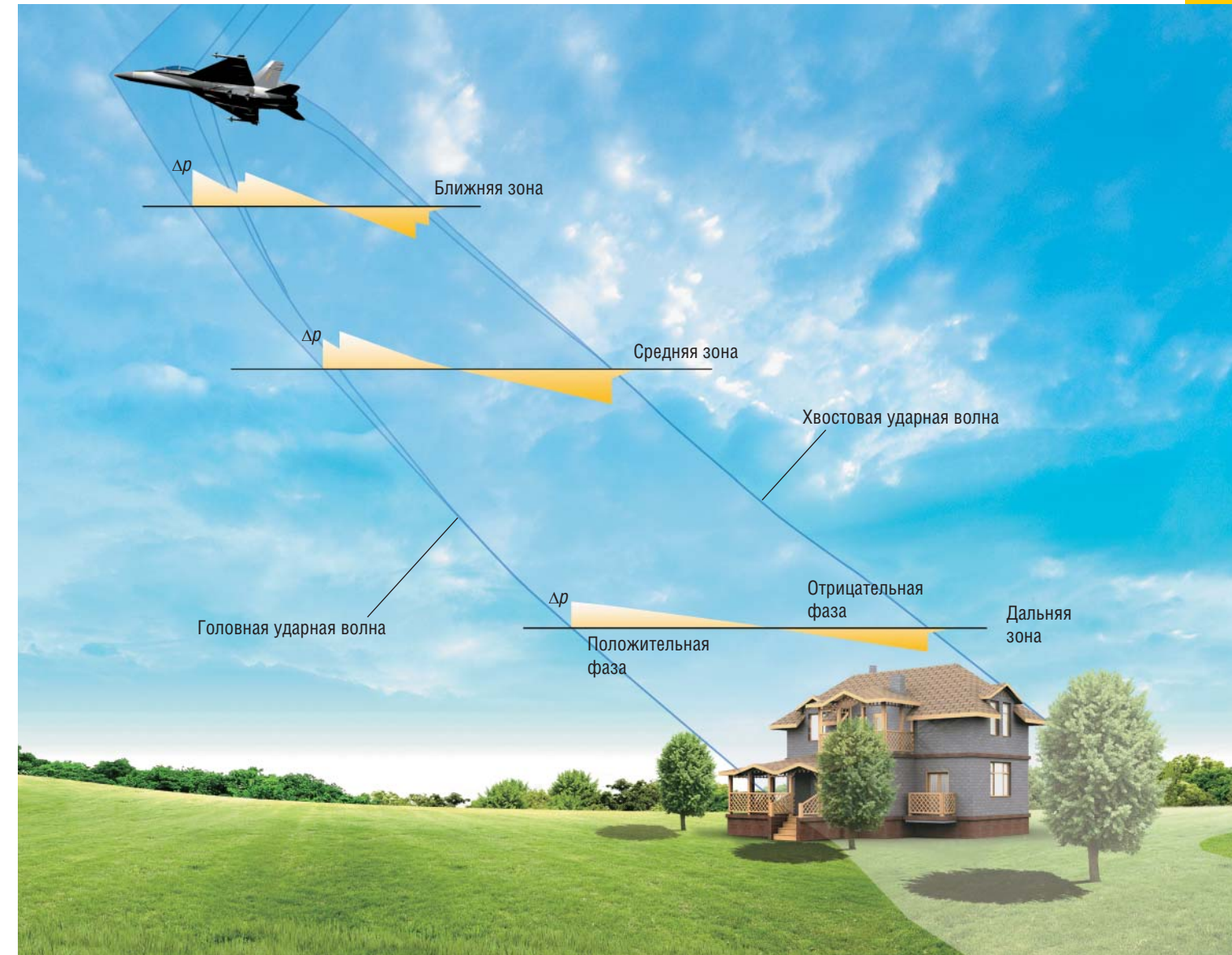
самолета и высоты полета) отдаленных взрывов. Это явление, порождаемое резкими перепадами давления на ударной волне, и носит название звукового удара.

Отрицательное воздействие звукового удара на человека и животных (психологическое и физиологическое), а также на сооружения (деструктивное) заставило установить ограничение на допустимое избыточное давление на УВ. По мере накопления информации о воздействии ЗУ на окружающую среду эта норма периодически пересматривалась. С учетом прогноза до 2012 г. (15 Па) можно констатировать, что за последние 40 лет экологические требования ужесточены практически на порядок.

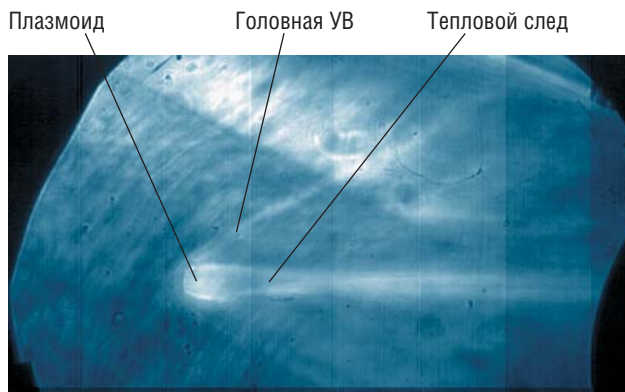
Согласно классической теории Дж. Уизема, используемой при проектировании сверхзвуковых самолетов, величина перепада давления на головной УВ определяется распределением объема и подъемной силы по длине самолета и уменьшается с увеличением высоты полета, длины самолета и уменьшением его веса. Условия, способствующие снижению уровня ЗУ, затрудняют при заданной полезной нагрузке и дальности полета обеспечение аэродинамической, а значит, и экономической эффективности самолета. А для воздушных судов массой более 100 т удовлетворить современным экологическим нормам проблематично даже с потерей экономической эффективности.

Учитывая ограниченные возможности традиционных методов, в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН ведутся исследования по снижению уровня ЗУ путем активного воздействия на возмущенное течение – с помощью подвода массы, энергии и отвода энергии вблизи летательного аппарата. В частности, в 2007 г. разработан не имеющий аналогов в мире способ управления параметрами промежуточной ударной волны путем инъекции хладагента в область ее формирования. Это позволило уменьшить перепад давления на головной УВ на 40% практически без увеличения сопротивления самолета.

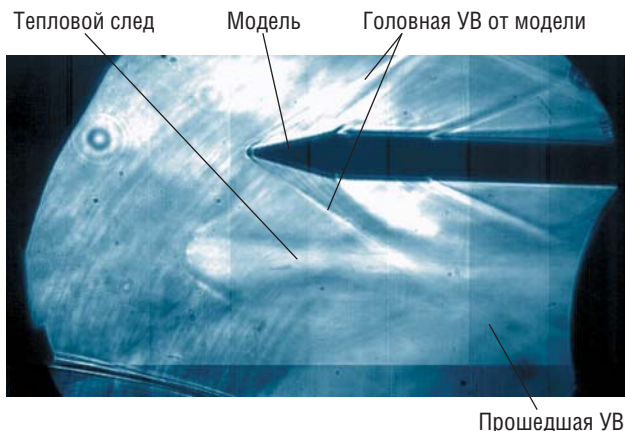
В настоящее время в ИТПМ исследуется возможность ослабления ЗУ за счет взаимодействия возмущенного течения со слоем нагретого воздуха. Предварительное численное моделирование показало, что ударная



При полете самолета со сверхзвуковой скоростью область возмущенного течения ограничена головной и хвостовой ударными волнами. За головной УВ в результате наложения возмущений давление воздуха сначала скачкообразно увеличивается (положительная фаза волны ЗУ). Далее вниз по потоку под действием расширения течения, формируемого при обтекании аппарата, оно падает ниже атмосферного (отрицательная фаза волны ЗУ). На больших расстояниях от самолета (дальняя зона) течение трансформируется таким образом, что распределение давления принимает N-образную форму. На графиках показана зависимость избыточного (относительно атмосферы) давления Δp от координаты (вниз по потоку) в характерных зонах



Теневой снимок структуры течения, образующейся при взаимодействии сверхзвукового воздушного потока (число Маха $M = 2$) с плазмойдом, порождаемым лазерным излучением. Разработанный в ИТПМ CO_2 -лазер в режиме импульсно-периодического излучения выдавал импульсную мощность до 150 кВт. Перед областью оптического пробоя формируется ударная волна как от затупленного твердого тела. За плазмойдом виден след нагретого воздуха, поперечный размер которого немонотонно изменяется вниз по потоку



Теневой снимок структуры течения при взаимодействии области оптического пробоя с возмущенным течением, генерируемым моделью в виде конуса на цилиндре. Наблюдается прошедшая тепловой слой УВ от модели и заметное изменение структуры потока за падающей УВ. Течение за ударной волной при входе в тепловой слой переориентируется по направлению набегающего потока

волна в результате прохождения слоя газа с низкой плотностью и высокой скоростью звука (обеспеченных нагревом) может существенно ослабляться при определенном соотношении температур в слое и потоке.

Эксперименты по воздействию теплового слоя на УВ, генерируемую модельными объектами, проводились на малогабаритной аэродинамической установке, где создавался сверхзвуковой воздушный поток поперечным размером 100 мм. Тепловой слой формировался излучением газового CO_2 -лазера, разработанного в ИТПМ, со средней мощностью до 4,5 кВт (ускоренные темпы развития лазерной и СВЧ-техники позволяют рассматривать эти устройства как наиболее перспективные бортовые источники энергии). Подвод энергии излучения в сверхзвуковой поток воздуха возможен в области *оптического пробоя*. Этим термином принято обозначать переход газообразного вещества в состояние плазмы под воздействием электромагнитного поля оптической частоты. Для реализации эффекта необходима интенсивность лазерного излучения порядка 10^9 – 10^{10} Вт/см² за время 0,3–1 мкс. Обеспечить такие экстремальные параметры пока возможно только в режиме повторяющихся (с частотой 80–100 кГц) импульсов сфокусированного излучения. При этом в воздушном потоке возникают сгустки плазмы (*плазмойды*) с температурой 20–30 тыс. градусов. За плазмойдом образуется тепловой след.

В первых экспериментах внимание исследователей было сосредоточено на изучении особенностей структуры течения, формирующейся при взаимодействии с плазмойдом потока воздуха, скорость которого в 2 раза превышала скорость звука.

Следующим важным этапом работы стал анализ взаимодействия области оптического пробоя (разряда) с возмущенным течением, генерируемым моделью в форме конуса. В области взаимодействия на фоне нестационарного течения фиксировались моменты исчезновения УВ, прошедшей тепловой слой. Наблюдения велись с помощью оптического теневого прибора и скоростной видеокамеры.

Наблюдаемые изменения структуры течения указывают на явное ослабление интенсивности головной УВ, генерируемой моделью. Попутно отметим, что согласно оценкам ударная волна от самого плазмойда уже при небольших удалениях существенно слабее, чем от модели.

Сейчас исследования направлены на получение количественной информации об эффективности воздействия теплового следа плазмойда на параметры ударной волны. Для этого планируется выполнить прямые измерения распределения давления в воздушном потоке.

К. т. н. В. Ф. Чиркашенко
(Институт теоретической и прикладной механики
СО РАН, Новосибирск)