

длинноволновая неустойчивость дальнего следа. Результаты расчетов по данной модели показали хорошее соответствие с экспериментальными данными, что указывает на ее приемлемость для описания турбулентного течения в вихревом следе за самолетом и для определения времени жизни интенсивного вихревого следа. Из измерений характеристик следа с помощью лидаров известно, что циркуляция правой (или левой) половины следа с течением времени уменьшается по абсолютной величине. С помощью аналитического решения задачи о диффузии двух вихрей в работе раскрыт физический механизм потери циркуляции.

Определение характеристик вихревого следа позволило решить следующие практически важные проблемы: определение сил и моментов, действующих на самолет, случайно или преднамеренно попавший в зону влияния вихревого следа, и математическое моделирование движения самолета, попавшего в вихревой след, на пилотажном стенде в режиме реального времени. Решение последней задачи стало возможным благодаря использованию нейронных сетей. Данная математическая модель установлена на пилотажных стендах ЦАГИ, РСК МИГ, ФАЛТ МФТИ и имеет целью обучение управлением самолета при его случайном или преднамеренном (например, на режиме дозаправки) попадании в зону влияния вихревого следа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-01-00128).

## **Подобие в задаче о сверхзвуковом обтекании тел при наличии области энерговклада в набегающем потоке**

**П. Ю. Георгиевский, В. А. Левин**  
*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова*  
georgi@imec.msu.ru

В своей замечательной книге «Методы подобия и размерности в механике» Л. И. Седов указывал сколь важно выделять универсальные параметры подобия для исследуемого класса физических явлений. При этом он отмечал, что «наиболее существенные и полезные результаты получаются путем комбинирования соображений теории размерности с общезначимыми предположениями».

В аэродинамике яркими примерами такого подхода, основанного на ясных (хотя и не совсем строгих) физических соображениях, являются закон гиперзвукового подобия, гипотеза плоских сечений и правило площадей, которые широко применялись при конструировании сверхзвуковых летательных аппаратов.

Еще в самой первой нашей работе (Письма в ЖТФ, 1988, 14(8): 684) было отмечено, что основной причиной снижения волнового сопротивления тел при локальном тепловом воздействии на набегающий поток является формирование передних отрывных зон. В настоящем докладе изучено влияние числа Маха потока, интенсивности энерговклада и размера области энерговклада на геометрические характеристики передних отрывных зон и эффективность снижения сопротивления для затупленных тел.

Сформулирован универсальный критерий подобия: интенсивность энерговклада должна быть обратно пропорциональна линейному размеру энергоисточника и прямо пропорциональна числу Маха набегающего потока. Первое условие является прямым следствием теории размерностей – точным условием подобия для задачи об обтекании энергоисточника сверхзвуковым потоком, которое обеспечивает сохранение параметров температурного следа при изменении размеров энергоисточника. Второе условие является физическим, оно означает, что жидкая частица за время движения через область энерговклада получает при разных скоростях набегающего потока примерно одинаковое количество тепла (чем меньше время пролета, тем выше должна быть интенсивность энерговклада).

На первом этапе проведена серия расчетов для задачи об обтекании энергоисточника сверхзвуковым потоком. Оказалось, что при соблюдении критерия подобия один из основных параметров – коэффициент мощности энерговклада (отношение подведенной мощности к потоку энтальпии через поперечное сечение энергоисточника) остается примерно постоянным. Более того, что при различных числах Маха набегающего потока распределение плотности в дальнем следе в поперечном направлении остается одинаковым с высокой точностью (в пределах погрешности вычислений). А ведь согласно С.В. Гувернюку (ДАН, 2007, 413(2): 188) именно параметры следа оказывают определяющее воздействие на формирование изобарических отрывных зон.

На втором этапе проведена серия численных расчетов нестационарного обтекания сферы при наличии в набегающем пото-

ке энергоисточников. В соответствии с концепцией «тепловой иглы» при динамическом уменьшении размеров энергоисточника с соблюдением критерия подобия форма передней отрывной зоны изменяется, приближаясь к форме конуса с малым затуплением, но при этом статическое давление в отрывной зоне не изменяется, и снижение сопротивления остается постоянным. Важным результатом оказалось, что для различных чисел Маха формируются передние отрывные зоны практически одинаковой геометрии и, соответственно, снижение сопротивления также остается примерно одинаковым.

Получена и проверена в численных расчетах простая формула для коэффициента эффективности снижения сопротивления (определяется как отношение сэкономленной мощности к вложенной). Показано, что при выполнении критерия подобия коэффициент эффективности пропорционален числу Маха в квадрате и обратно пропорционален линейному размеру области энерговклада в квадрате. В расчетах зафиксировано снижение волнового сопротивления 30%, а коэффициент эффективности при числе Маха 5 превысил 1000 (для сферического энергоисточника радиус которого в 50 раз меньше радиуса сферы).

Работа выполнена в соответствии с планом научных исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект НШ-8425.2016.1) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-29-01092).

## **Фокусировка ударной волны при взаимодействии с цилиндрическим облаком мелкодисперсной пыли**

**П. Ю. Георгиевский, В. А. Левин, О. Г. Сутырин**

*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова*

*sutyurin@imec.msu.ru*

Распространение ударных волн по запыленному газу имеет место в широком круге задач, важными примерами которых являются процессы в межзвездной среде, взрывобезопасность угольных шахт и импульсные методы нанесения порошковых покры-