

конечной длины. Ударные волны могут возникать, напр., при взрыве заряда, при торможении сверхзвуковых потоков в каналах, при движении в воздухе тел с сверхзвуковой скоростью. В последнем случае возникает *волновое сопротивление*, связанное с термодинамически необратимым нагреванием газа при торможении его в ударной волне.

Уравнения газовой динамики. Т. к. при теоретич. изучении задач Г. д. параметры газа могут испытывать разрывы на нек-рых поверхностях внутри области течения, то исходные ур-ния Г. д. записываются в интегральной форме для конечных объёмов газа. Из этих интегральных соотношений в областях непрерывного движения следуют дифференц. ур-ния Г. д. Если не учитывать вязкости и теплопроводности газа, то скорость газа v , его давление p и плотность ρ в точках области, где они непрерывны, должны быть связаны ур-ниями:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F - \text{grad } p,$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = - \text{div } v,$$

$$\rho \frac{d}{dt} \left(U + \frac{v^2}{2} \right) = \rho F v - \text{div } p v + \rho q.$$

Первое ур-ние — *Эйлера уравнение* гидродинамики — связывает ускорение жидкой частицы (т. е. объёма, состоящего из одних и тех же материальных точек, размеры к-рого малы по сравнению с характерным размером задачи) с внеш. массовой силой F и силой, приложенной к частице со стороны соседних частиц жидкости. Оно является обобщением 2-го закона Ньютона (закона сохранения кол-ва движения) применительно к движению жидкой частицы. Второе ур-ние служит выражением закона сохранения массы (скорость относительного изменения плотности частицы равна — с обратным знаком — скорости относительного изменения объёма). Третье ур-ние выражает закон сохранения энергии: изменение внутренней энергии U и кинетич. энергии частицы газа происходит вследствие работы внеш. массовых и поверхностных сил и притока теплоты q (— приток теплоты к единице массы газа за единицу времени).

При наличии разрывов величин, характеризующих течение газа, в точках поверхности разрыва должны быть выполнены условия, также вытекающие из закона сохранения массы, ур-ния кол-ва движения и закона сохранения энергии. Существуют поверхности разрыва, сквозь к-рые отсутствует поток вещества (т. н. тангенциальные разрывы). *Ударная волна* является поверхностью разрыва, к-рая пересекается частицами. При переходе через такую поверхность разрыва энтропия частиц изменяется, причём для обычно рассматриваемых сред так, что энтропия увеличивается тогда, когда плотность и давление возрастают, а скорость уменьшается. В противном случае энтропия уменьшается. Т. к. в соответствии со вторым законом термодинамики при адиабатич. процессах энтропия не может уменьшаться, то в таких средах скачки разрежения невозможны, а существуют только скачки уплотнения. При этом скорость газа перед скачком — сверхзвуковая.

В ряде задач, когда нужно учитывать происходящие в газе внутр. процессы — хим. реакции между его компонентами, диссоциацию, возбуждение внутр. степеней свободы и т. п., эти процессы нельзя считать равновесными и необходимо учитывать их конечную скорость. Ур-ния Г. д. должны быть при этом дополнены кинетич. ур-ниями для скоростей соответствующих процессов. Эта ветвь Г. д. наз. иногда физ.-хим. Г. д. или релаксационной Г. д. Она лежит в основе расчётов течений реагирующих газов, ряда областей теории горения, теории газодинамич. и хим. лазеров, теории гиперзвукового обтекания тел и др.

Разделы газовой динамики и рассматриваемые в них задачи. Одним из важных разделов Г. д. является изу-

чение т. н. в н у т р е н н и х течений газа в трубах и каналах, в частности в соплах и диффузорах реактивных двигателей и аэродинамич. труб. В приближённых методах исследования этих течений параметры газа считаются постоянными по сечению трубы или канала; изучаются течения в нек-рых газовых машинах, напр. в элементах компрессоров и газовых турбин, и др.

Широкий круг задач Г. д. связан с изучением в нем его обтекания тел газом. Для расчёта обтекания идеальным газом тонких тел, вносящих в поток лишь малые возмущения, разработаны методы, основанные на линеаризации ур-ний движения. Эти методы теряют силу при скоростях, близких к скорости звука (см. *Околосвуковое течение*), и при больших сверхзвуковых скоростях (см. *Гиперзвуковое течение*). При таких скоростях даже при обтекании тонких тел существенно нелинейные эффекты.

На основании установленных теоретич. путём законов подобия можно переносить результаты исследования обтекания одного тонкого тела при одном значении числа M на случаи обтекания других тел при том же значении числа M или того же тела при др. значениях числа M .

Расчёт обтекания сжимаемым газом тел конечной толщины вызывает значит. трудности. Получены точные решения лишь нек-рых задач об обтекании при $M > 1$ простейших тел, напр. круглого конуса и клина. В более сложных случаях течений около тел другой формы при $M > 1$ с успехом используются численные методы расчёта, в частности метод характеристик, метод сеток и др. *Дозвуковое течение* ($M < 1$) является более сложным для матем. исследования, что связано гл. обр. с трудностями при формулировании граничных условий для дифференц. ур-ний эллиптич. типа из-за того, что в дозвуковых потоках возмущения распространяются во все стороны.

Наиб. трудности связаны с изучением обтекания тел смешанных потоком, когда в части области, занятой движущимся газом, скорость газа больше скорости звука, а в др. части меньше её, что имеет место, напр., при сверхзвуковом обтекании тел, имеющих затупленную головную часть. В решении сложных задач Г. д. имеются значит. успехи, связанные с использованием численных методов для решения систем конечно-разностных ур-ний, однако для многих важных задач Г. д. всё ещё нет теорем о существовании, единственности и устойчивости решения.

Ещё одно направление газодинамич. исследований связано с задачами о неустановившихся движениях. К ним относятся, в частности, задачи внутр. баллистики, задачи о распространении и действии взрывных и детонационных волн, вопросы работы ударных труб, задачи о пульсациях давления и др. параметров в отрывных зонах, о нестационарных движениях газа в газопроводах и др. Мн. задачи об одномерных неустановившихся движениях могут быть решены численными методами. Большое значение для понимания качественных особенностей явлений имеют найденные точные решения задач о сильном точечном взрыве, о поведении произвольного разрыва в нач. распределениях параметров газа, о распространении сферич. детонационной волны и др. Важный раздел Г. д. — теория газовых струй. Теория турбулентных струй с учётом сжимаемости развивается, как и в случае несжимаемой жидкости, на полумпирич. основе. Она применяется, в частности, для расчёта эжекторов.

Учёт вязкости и теплопроводности газа в задачах об обтекании тел и в ряде задач о течениях газа в трубах и каналах производится во мн. случаях на основе теории *пограничного слоя*. В отличие от течений несжимаемой жидкости, в случае газа задачи об определении поверхностного трения и об определении темп-ры и тепловых потоков связаны друг с другом. Специфическим для околосвуковых и сверхзвуковых течений газа является взаимодействие между пограничным