Библиографический
список

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. 183 с.

2. Пиралишвили Ш.А., Михайлов В.Г. Экспериментальные исследования вихревой трубы с дополнительным потоком //Некоторые вопросы исследования теплообмена и тепловых машин. Вып. 56. Куйбышев, 1973. С. 64–74.

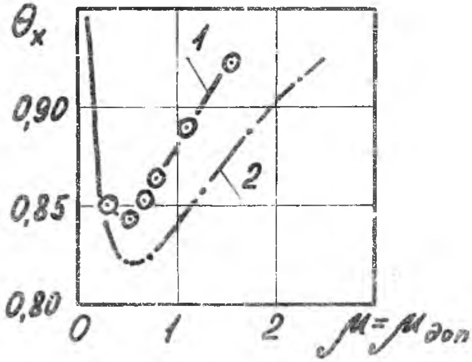


Рис. 4. Сравнение результатов расчета и эксперимента для ВТДП: 1 – опытные данные [2]; 2 – результаты расчета для π = 4

УДК 532.537

П.Т.Крамаренко

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ЭФФЕКТА

(Горьковский инженерно-строительный институт)

Показано, что в объеме газа, находящемся в поле внешних сил, хаотическое молекулярное тепловое движение вырождается в направленное по направлению действия внешней силы. Градиент температуры, возникающий при этом – результат перераспределения энергии теплового движения в энергию направленного движения.

В области изучения газов существует целый ряд опытных данных, которые не согласуются с теорией и могут быть объяснены введением дополнительных гипотез. К таким данным можно отнести: градиент тем-

ISBN 5-230-16926-5

Вихревой эффект
и его применение в технике.
Самара, 1992

пературы в атмосфере Земли, температурное разделение закрученного потока газа, турбулентность. Их объединяет наличие градиента температуры по направлению действия внешней силы.

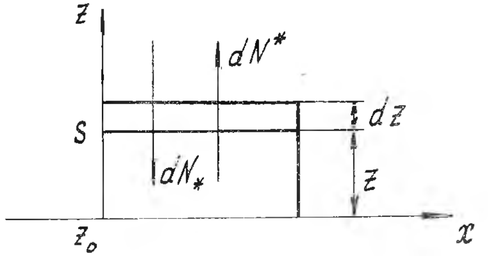
Были различные попытки объяснить перепад температуры во внешнем консервативном поле хаотическим движением молекул (первая принадлежит И.Лошмидту, 1876 г.), но, опираясь на существующие как континуальные, так и статистические уравнения, обосновать такой градиент температуры невозможно. Это обусловлено тем, что при выводе уравнений вводилось допущение о постоянстве термодинамической температуры в объеме газа, находящемся в поле сил. В континуальных уравнениях такое допущение закладывалось самой моделью сплошной среды, а в статистических – тождественностью частиц объема газа и вытекающим отсюда принципом молекулярного хаоса, что в итоге приводило к тем же свойствам модели сплошной среды. Поэтому при наложении условий симметрии из кинетического уравнения Больцмана при первом приближении получим уравнение Эйлера, а при втором – уравнение Навье-Стокса.

В статье предпринята попытка провести анализ объема газа на основании предположения, что молекулы в объеме газа нетождественны, т.е. часть молекул обладает поступательным тепловым движением, а часть – колебательным тепловым движением.

Основания для такого предположения следующие.

В очень плотных газах среднее расстояние между молекулами такого же порядка, как размеры самих молекул, поэтому молекулы могут совершать малые колебания и, следовательно, скорость поступательного теплового движения таких молекул равна нулю. В то же время, в разреженных газах, обладающих свойствами идеальных газов, количество молекул с нулевой скоростью поступательного теплового движения, согласно функции распределения по скоростям, равно нулю. Следовательно, можно предположить, что существует такой газ, в котором одновременно находятся молекулы, обладающие поступательным тепловым движением, и молекулы, совершающие колебательное движение. Если такой газ поместить в поле внешних сил, то, видимо, молекулы, совершающие колебательное движение, имеют большую вероятность перемещаться по направлению действия внешних сил. А раз так, то в газе возникает упорядоченное движение молекул, так как существует преобладающее направление движения.

Для анализа свойств такого газа рассмотрим (рис.) вертикальный цилиндрический столб газа, содержащего молекулы массой m. Направим координатную ось z по вертикали. Плоскость $z = z_o$ – основание газового столба. Считаем, что высота столба мала по сравнению с поперечным его сечением, чтобы можно было пренебречь влиянием стенок, ограничивающих газовый столб по бокам. На столб газа действует внешняя сила, имеющая ускорение a, вектор которой направлен по оси z, в результате чего существует градиент давления по этой оси. Объем газа находится в равновесии. В цилиндрическом столбе газа выделена площадка S, перпендикулярная оси z и проницаемая для молекул.



Р и с. Расчетная схема цилиндрического столба газа

При равновесии объема газа число молекул, пересекающих площадку S как снизу вверх, так и сверху вниз в единицу времени, должно быть одинаково. Так как согласно исходному предположению в объеме газа наряду с молекулами, обладающими поступательным тепловым движением (в дальнейшем молекулы класса N^+), находятся молекулы, обладающие колебательным тепловым движением (в дальнейшем молекулы класса N_*), последние под действием внешней силы движутся вниз и пересекают площадку S, что приводит к изменению концентрации молекул под площадкой, а следовательно, к нарушению равновесия. Для восстановления равновесия через площадку S снизу вверх формируется поток частиц.

Рассмотрим слой (см. рис.), параллельный основанию столба газа, толщиной dz. Толщина dz слоя может быть как угодно мала, но слой должен содержать достаточно большое число n молекул. При равновесном состоянии в числе n молекул слоя dz находится часть dN_* молекул, перемещаемых внешней силой за пределы слоя, такое же количество dN^* молекул перемещается в обратном направлении. Обозначим $2N = dN_* + dN^*$, так как $dN_* = dN^*$ и $\mathcal{E} = 2N/n$, откуда $N = f/2\mathcal{E}n$. Тогда энергия, вносимая в слой dz за счет внешней силы, составит

3-200

$$e_a = dN_* madz = f/2 \mathcal{E} nmadz. \qquad (1)$$

Поток частиц dN^* снизу вверх через площадку S формирует внутренний слой объема газа и, следовательно, на перемещение молекул, которое в дальнейшем будем называть направленным движением, будет расходоваться внутренняя энергия, равная $f/2 \mathcal{E} nmadz$. Тогда средняя энергия направленного движения по ансамблю в слое равна $f/2 \mathcal{E} madz$ и после интегрирования при $a = const$ и $\mathcal{E} = const$ составит

$$e_a = f/2 \mathcal{E} maz. \qquad (2)$$

В уравнении (2) выражение представляет собой среднеквадратичную скорость направленного движения молекул, вызванного силой упругости. Рост величины e_a (2), зависящий только от координаты z, обусловлен тем, что средняя энергия теплового движения уменьшается на такую же величину. Тогда, согласно закону сохранения энергии, $e_0 - e_a = e$ и для единицы массы, учитывая, что $e_0 = c_V T_0$ и $e = c_V T$, получим уравнение энергии

$$c_V T_0 - c_V T = f/2 \mathcal{E} a z. \qquad (3)$$

Величина e_a не может расти беспредельно с ростом z, рост ее ограничен значением среднеквадратичной скорости направленного движения, которая в пределе может достичь половины квадрата среднеарифметической скорости $(v^2 = 8RT/\pi)$ молекул, т.е.

$$\mathcal{E} a z = 4RT/\pi. \qquad (4)$$

Решая уравнение (4) относительно z, находим

$$z^* = \frac{4RT}{\pi \mathcal{E} a}. \qquad (5)$$

Достигнув значения z^*, координата не оказывает влияния на величину z. Это связано с тем, что с ростом координаты молекулы обладают все большим значением модуля z - компоненты скорости, и в пределе модуль z - компонента достигает значения модуля среднеарифметической скорости молекул. Вектор скорости молекул на координате $z = z^*$ строго параллелен оси z. Газ при этом становится однородным, т.е. составляющие скорости по осям x и y равны нулю.

Перепад термодинамической температуры, вычисленный по уравнению (3) при тангенциальной скорости на периферии вынужденного вихря, равной скорости звука для воздуха при $\mathcal{E}$ = I, T = 327 К, C_V = 720 Дж/(кг·К), R = 287,15 м^2/(с^2·К), равен 77°С, что соответствует экспериментальным данным. Радиус разделения вихрей r_2, вычисленный по уравнению (5), при той же тангенциальной скорости равен радиусу вихревой трубы. Перепад температуры при $\mathcal{E} = 0$ по уравнению (3) равен нулю, т.е. для газа, соответствующего свойствам идеального, перепад температуры по радиусу закрученного потока отсутствует.

На основании изложенного можно сделать следующий вывод. В объеме реального газа, расположенного в поле внешней силы, хаотическое молекулярное тепловое движение вырождается в направленное по направлению действий внешних сил, а градиент температуры, возникающий при этом, является результатом перераспределения энергии теплового движения в энергию направленного движения молекул.

УДК 621.396.6:621.574

А.И.Азаров, В.А.Кириличев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ АКУСТИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВЫХ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ

(Ленинградский политехнический институт)

Сопоставляются спектральные характеристики шума одно- и многоканальных вихревых труб, оборудованных различными глушителями. Показаны возможности создания многоцелевых вихревых аппаратов с интегральным уровнем звукового давления менее 56 дБА и менее 50 дБА. Предложена комплексная характеристика аппарата, учитывающая не только эф-

ISBN 5-230-16926-5

Вихревой эффект
и его применение в технике.
Самара, 1992