Эффект Ранка или «Демон Максвелла»

Якубовский Е.Г.

e-mail yakubovski@rambler.ru

При исследовании турбулентного вихревого потока обнаружен эффект неоднородности температуры по сечению трубопровода. При длительном течении в трубопроводе температура не устанавливается одинаковой вдоль радиуса сечения трубопровода. «Происходит разделение потоков газа на два, один из них – периферийный – имеет температуру выше исходного газа, а второй – центральный – ниже исходного газа» цитата из [1]. Общее описание завихрения, дается формулой $V = \frac{C}{r}[1 - \exp(-r^2 / r_0^2)]$, где величина r это радиус трубопровода. Этому явлению необходимо было дать объяснение. Происходила передача тепла от холодного тела к горячему, и реализовывался «Демон Максвелла». Этот эффект описан в [1]. Удовлетворительного, простого объяснения этого явления не существует. В статье предложено такое объяснение.

Тепловое уравнение имеет вид см. [2]

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V}\nabla T = \chi \Delta T + \frac{\nu}{2c_p}\left(\frac{\partial V_i}{\partial x^k} + \frac{\partial V_k}{\partial x^i}\right)^2. \qquad (1)$$

Где используется ν, c_p кинематическая вязкость несжимаемой жидкости и удельная теплоемкость при постоянном давлении, χ температуропроводность. Вихревому движению соответствует мнимая скорость см. [3]. При действительной скорости последний член в уравнении (1) определяет нагрев среды за счет вязкого трения потока жидкости. При комплексной или мнимой скорости этот член может быть отрицателен, что приведет к охлаждению среды при средних радиусах, приближающихся к минимальному, где градиент мнимой вихревой скорости потока велик.

$$\frac{\nu}{2c_p}(\frac{\partial V_i}{\partial x^k}+\frac{\partial V_k}{\partial x^i})^2=\frac{\nu}{2c_p}[(\frac{\partial \mathrm{Re} V_i}{\partial x^k}+\frac{\partial \mathrm{Re} V_k}{\partial x^i})^2-(\frac{\partial \mathrm{Im} V_i}{\partial x^k}+\frac{\partial \mathrm{Im} V_k}{\partial x^i})^2+$$
$$+2i(\frac{\partial \mathrm{Re} V_i}{\partial x^k}+\frac{\partial \mathrm{Re} V_k}{\partial x^i})(\frac{\partial \mathrm{Im} V_i}{\partial x^k}+\frac{\partial \mathrm{Im} V_k}{\partial x^i})].$$

Мнимая часть квадрата скорости имеет положительное и отрицательное значение и сокращается. Если мнимая часть скорости велика, то этот член имеет отрицательное значение. Установится постоянное действительное значение температуры из равенства

$$\mathrm{Re}\,\mathbf{V}c_p\nabla T/\nu=\chi c_p\Delta T/\nu+\frac{1}{2}(\frac{\partial \mathrm{Re} V_i}{\partial x^k}+\frac{\partial \mathrm{Re} V_k}{\partial x^i})^2-(\frac{\partial \mathrm{Im} V_i}{\partial x^k}+\frac{\partial \mathrm{Im} V_k}{\partial x^i})^2.$$

Где мнимая часть имеет положительный и отрицательный знак и поэтому сократится. Для получения безразмерного вида этого уравнения, умножим его на величину a^4/ν^2, получим

$$\mathrm{Re}\,\mathbf{R}\nabla T'=\chi'\Delta T'+\frac{1}{2}[(\frac{\partial \mathrm{Re} R_i}{\partial y^k}+\frac{\partial \mathrm{Re} R_k}{\partial y^i})^2-(\frac{\partial \mathrm{Im} R_i}{\partial y^k}+\frac{\partial \mathrm{Im} R_k}{\partial y^i})^2]$$
$$R_i=\frac{V_i a}{\nu}, T'=c_p T a^2/\nu^2, y_k=x_k/a, \chi'=\chi/\nu.$$

Отметим, что член с оператором Лапласа и член, описывающий диссипацию энергии делится на квадрат приращения по координате, причем получается $\delta T'\sim(\mathrm{Re}R)^2-(\mathrm{Im}R)^2$.

Этот же процесс можно объяснить без комплексной скорости. В местах с большой скоростью завихрения эффективная температура потока выше чем исходная, за счет добавки к энергии температуры энергии завихрения. Устанавливается постоянная эффективная температура всего потока. Энергия эффективной температуры равна истинной температуре плюс энергия вращения вихря. Но кроме мнимой энергии вихря, надо рассматривать комплексную энергию турбулентного потока, чья мнимая часть оказывает влияние на эффективную температуру потока, и из равенства эффективных температур потока, оказывает влияние на истинную температуру потока. При этом истинная температура в местах с большой кинетической энергией вихря и мнимой части турбулентного потока меньше. Истинная температура меряется термометром, причем так как на поверхности термометра скорость потока равна нулю, термометр меряет истинную температуру, а не эффективную. Если скорость завихрения плюс мнимая часть турбулентной скорости V близка к скорости звука, то наблюдается большое понижение температуры $\mu V^2/2 = k\delta T$, где μ молекулярный вес среды. При $V = c/2 = 16500 см/сек$ температура воздуха уменьшится на $\delta T = 105° K$. При больших числах Рейнольдса мнимая часть скорости потока преобладает над действительной частью см.[3] формула (1.1.3).

Выводы

Предложено простое объяснение уменьшения температуры в точках с большой скоростью завихрения и передачи тепла к точкам потока с малой скоростью завихрения. Приведена оценка изменения температуры.

Литература

1. Гуцол А.Ф. Эффект Ранка, УФН, т.167, №6, 1997 г., стр. 665-670
2. *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц* Гидродинамика. -М.: Наука, 1980.-535с.
3. *Е.Г. Якубовский* Исследование решения уравнения Навье – Стокса, «Научное обозрение. Реферативный журнал», т.1, 2016, http://science-review.ru/abstract/pdf/2016/1/632.pdf