

ТУРБУЛЕНТНЫЙ ЦИКЛ

© Воронков С.С.

Контакт с автором: vorss60@yandex.ru

Турбулентность в пограничном слое вязкого газа представляет собой циклический процесс возникновения и распада вихревых трубок. Назовем его турбулентный цикл. Турбулентный цикл включает следующие этапы: усиление низкочастотных возмущений, возникновение волн Толлмина-Шлихтинга, возникновение вихревых трубок, деформация и растяжение вихревых трубок, распад вихревых трубок, сопровождающийся взрывным, асимптотическим ростом пульсации давления, распространение возмущений давления по вихревым трубкам с образованием турбулентных пятен Эммонса, возникновение пульсаций скорости различных частот и интенсивностей. Каждый из этапов описывается своим уравнением или формулой. Некоторые из приведенных этапов в тех или иных условиях могут отсутствовать.

Ключевые слова: турбулентность, турбулентный цикл, вихревая трубка, пограничный слой, вязкий газ.

Турбулентность в пограничном слое вязкого газа представляет собой циклический процесс возникновения и распада вихревых трубок. Назовем его турбулентный цикл. Турбулентный цикл есть круговой процесс возникновения и распада вихревых трубок.

Оценим частотные характеристики турбулентного пограничного слоя. «Частотные (спектральные) характеристики турбулентного пограничного слоя показывают, – как отмечается в [1], – что внутри слоя преимущественное значение имеют колебания частоты, низкой по сравнению с частотами колебаний вне пограничного слоя. Так, в пограничном слое на пластине в сечении, соответствующем числу Рейнольдса $Re_x=650000$, преимущественное значение имеют частоты до 40–50 Гц, при $Re_x=1600000$ – до 20 Гц, а вне пограничного слоя – порядка 100 Гц. Доля высоких частот (порядка 1000 Гц) совершенно невелика». Примем в качестве круговых частот вихревых трубок $\omega_0 = 20\pi \div 200\pi$ рад/с, соответствующих частотам 10–100 Гц.

Время жизни вихря составляет [2]

$$\Delta t \sim T, \quad (1)$$

где T — период вихря, определяемый равенством $T = 2\pi/\omega$, ω — круговая частота вихревой трубки.

Как отмечается в [2]: «Соотношение (1) является весьма специфическим предположением о динамике вихрей в турбулентной среде. Согласно этому предположению, время жизни вихря сравнимо по величине с периодом его вращения. Еще более условно можно считать, что Δt является постоянной времени, характеризующей эволюцию вихря, так что, согласно (1), любой вихрь полностью исчезает через несколько оборотов. Это предположение, вообще говоря, во многом подтверждается теорией турбулентности».

Примем в качестве времени полного распада вихревых трубок

$$t_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}, \quad (2)$$

что соответствует времени $t_0 = 0,01 \div 0,1$ с.

Турбулентный цикл включает следующие этапы [3]:

1. Усиление низкочастотных возмущений.
2. Возникновение волн Толлмина-Шлихтинга.
3. Возникновение вихревых трубок.
4. Деформация и растяжение вихревых трубок.
5. Распад вихревых трубок, сопровождающийся взрывным, асимптотическим ростом пульсации давления.
6. Распространение возмущений давления по вихревым трубкам с образованием турбулентных пятен Эммонса.
7. Возникновение пульсаций скорости различных частот и интенсивностей, подготавливающих условия для нового цикла генерации турбулентности.

Каждый из этапов описывается своим уравнением или формулой. Приведем эти уравнения в форме таблицы.

Таблица

№ этапа	Название	Уравнения
1.	Усиление низкочастотных возмущений.	$\Delta p = 2(k-1)\mu \frac{u_\infty u'_m}{\omega \delta^2} \sin \omega t.$
2.	Возникновение волн Т-Ш.	$\frac{\partial^2 \mathbf{V}}{\partial t^2} = (a_s^2 + \frac{4}{3}(k-1)v \operatorname{div} \mathbf{V}) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{V}.$
3.	Возникновение вихревых трубок.	$\frac{\partial^2 \boldsymbol{\omega}}{\partial t^2} = 0.$
4.	Деформация и растяжение вихревых трубок.	$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \boldsymbol{\omega} \dot{S} - \boldsymbol{\omega} \operatorname{div} \mathbf{V} - \text{ур-ние Фридмана}.$
5.	Распад вихревых трубок.	$\Delta p = \frac{4(k-1)}{9} \mu \frac{\omega_0^4 t_0^3}{(1-\tau)^3}.$
6.	Распространение возмущений давления.	$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = (a_s^2 + \frac{4}{3}(k-1)v \operatorname{div} \mathbf{V}) \operatorname{div} \operatorname{grad} p.$
7.	Возникновение пульсаций скорости.	$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + \frac{\nu}{3} \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{V} -$ уравнение Навье-Стокса.

Обозначения переменных приведены в работе [3].

Некоторые из приведенных этапов в тех или иных условиях могут отсутствовать. Этап 2 возникновения волн Толлмина-Шлихтинга происходит, как правило, на передней кромке пластины при низкой начальной турбулентности и в развитом турбулентном потоке отсутствует. Этап 6, при равномерном растяжении вихревой трубки по всей длине, также может отсутствовать.

Полученные в этой работе результаты для совершенного газа без особого труда обобщаются на газ Ван-дер-Ваальса и жидкости, как это сделано в работе [4].

Выводы:

1. Турбулентность в пограничном слое вязкого газа представляет собой циклический процесс возникновения и распада вихревых трубок. Назовем его турбулентный цикл. Приведены уравнения, описывающие турбулентный цикл, включающий различные этапы. Некоторые из приведенных этапов в тех или иных условиях могут отсутствовать.
2. Полученные в этой работе результаты для совершенного газа без особого труда обобщаются на газ Ван-дер-Ваальса и жидкости.

Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 5-е. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
2. Теннекес Г. Турбулентность: диффузия, статистика, динамика спектров, в кн.: Турбулентность. Принципы и применения, под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. – М.: Мир, 1980, с. 142-163.
3. Воронков С.С. Турбулентность как циклический процесс. – Vorss60@yandex.ru, Псков, Россия, 15.12.2021, – 9 с. <http://new-idea.kulichki.net/pubfiles/211215215912.pdf>
4. Воронков С.С. О турбулентности в жидкости. Электронный журнал «Техническая акустика», – Режим доступа: <http://www.ejta.org>, 2021, 4.