

## ТУРБУЛЕНТНЫЙ ЦИКЛ

© Воронков С.С.

Контакт с автором: [vorss60@yandex.ru](mailto: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  $T = 2\pi/\omega$ ,  $\omega$  — 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  $\Delta t$  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.