

Лукьянов П.В. канд. физ.-мат. наук, с.н.с., Мешков И.В. магистр
Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНОГО КАСКАДА ЭНЕРГИИ СПИРАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ

Аннотация: Предлагаются результаты экспериментальных исследований закрученных турбулентных потоков жидкости (воды) в трубах постоянного диаметра и криволинейной формы. Наличие изгибов трубы, а также проволоочной спирали, приводит к появлению закрутки в течение несжимаемой жидкости. Как давно уже известно, спиральная турбулентность может, при определенных условиях, обладать свойством отрицательной вихревой вязкости. Энергия мелких вихрей может переходить к осредненному потоку, усиливая кинематические свойства последнего. С практической точки зрения, это может приводить к такому явлению как увеличение напора жидкости в трубе: закрученный поток может вытекать быстрее незакрученного. В результате экспериментальных исследований были получены два основных научных результата. Первый – влияние внутренней спирали (тонкой проволоки) может быть существенным, что отражается на реализации различных течений, то есть распределения поля скорости. Второй – путем вариации напора жидкости (воды) обнаружены области параметров (геометрия и кинематика), для которых данные измерений устойчиво указывают на увеличение расхода закрученного потока по отношению к незакрученному.

Ключевые слова: отрицательная вихревая вязкость, обратный каскад турбулентной энергии, трубопровод по Виктору Шаубергеру

Введение, понятие и примеры обратного каскада турбулентной энергии

Мы привыкли к тому, что хаотическое турбулентное движение жидкости или газа со временем, без подкачки энергии извне, исчезает. Происходит диссипация энергии турбулентности. Но как объяснить тогда многочисленные природные явления – от образования галактик и планет – до зарождения жизни (дипольной симметрии в живой природе). Ведь все должно «рассеяться». После появления теории Колмогорова [1] (1941) о каскаде турбулентной энергии от вихрей больших размеров к вихрям меньших размеров (прямой каскад) прошло всего около четверти столетия и в уже 1967 появилась другая точка зрения. Речь идет о работе [2], где автор высказал впервые возможность существования процесса передачи энергии турбулентных вихрей меньших масштабов в осредненное течение, имеющее значительно большие масштабы. Данная точка зрения получила название обратного каскада турбулентной энергии. Возникает логический вопрос о том, при каких условиях может происходить данное явление? Как указывают факты, обратный каскад реализуется не в обычной турбулентности, а в спиральной. Иными словами, турбулентная среда (жидкость, газ) должна обладать закруткой. Если турбулентный поток жидкости или газа является закрученным, тогда закон парности турбулентных напряжений может [3] нарушаться. Ответственность за появление указанного эффекта может выполнять лишенная отражательной симметрии вихревая спиральность [4].

Вводится так называемое понятие вращательной вязкости, которое связано с антисимметричной частью $R_{ij}^a = \frac{1}{2}(R_{ij} - R_{ji})$ турбулентного тензора напряжений R_{ik} .

С учетом асимметричности тензора турбулентных напряжений Рейнольдса R_{ik} , можно представить

$$R_{ij} \equiv -\langle u_i' u_j' \rangle = R_{ik}^s + R_{ik}^a, \quad (1)$$

где симметричная часть $R_{ij}^s = \frac{1}{2}(R_{ik} + R_{ki})$ представляется как

$$R_{ij} = -\frac{2}{3}b\delta_{ij} + 2v^T S_{ij} - v_H^T \left\{ \langle \omega_{ai} \rangle \frac{\partial H}{\partial x_j} + \langle \omega_{aj} \rangle \frac{\partial H}{\partial x_i} - \frac{2}{3} (\langle \omega_a \rangle \cdot \nabla H) \right\} - C_s v_H^T \{ \varepsilon_{ilm} S_{jm} + \varepsilon_{jlm} S_{im} \} \frac{\partial H}{\partial x_i} - v_\theta^T \left(q_{\theta i}^T g_j + q_{\theta j}^T g_i - \frac{2}{3} (q_\theta^T \cdot g) \delta_{ij} \right), \quad (2)$$

$$q_{\theta i}^T = -k_\theta^T \left(\frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_i} - \frac{g_i}{c_p} \right) + k_{\theta 1}^T S_{ij} \left(\frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_j} - \frac{g_j}{c_p} \right) + k_{\theta 2}^T \varepsilon_{ijk} \langle \omega_{aj} \rangle \left(\frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_k} - \frac{g_k}{c_p} \right). \quad (3)$$

Антисимметричная часть выражается как

$$R_{ij}^a = \frac{1}{2} (R_{ij} - R_{ji}) = -v_{rot}^T \varepsilon_{ijk} [\langle \omega_k \rangle - m_k / J] \quad (4)$$

Подробности изложены в работе [4]. Приведенные соотношения позволяют сделать вывод о возможности реализации отрицательной вращательной вязкости.

Экспериментальное подтверждение эффекта

Численный эксперимент выявляет многочисленные примеры того, как из мелкомасштабного поля турбулентных вихрей образуются вихри средних масштабов [5]. Гораздо меньше натуральных подтверждений этому. Так в Интернете можно найти простейший эксперимент с наполнением двух трехлитровых банок водой (ключевые слова *трубопровод по Шаубергеру*), где используется т-образная развилка, к которой подключены две гибких трубы. Диаметр труб – дюйм, но сами трубы не прозрачные. Поэтому можно лишь наблюдать вытекающие струи воды. Результат этих экспериментов состоит в том, что в трубе со спиралью (2мм толщиной и шагом винтовой симметрии около 15см) расход жидкости может существенно увеличиваться – до 50%. Очевидно, что проволочная спираль вносит возмущение в турбулентный поток, но совсем неочевидно увеличение расхода.

С целью проверки, обнаружения и возможного изучения указанного эффекта, в гидравлической лаборатории Национального авиационного университета Украины, г. Киев, была проедена серия натуральных экспериментов по сравнению расходов текущей по гибкой трубе жидкости – со спиралью и без. Использовались три различных диаметра труб (12мм, 20мм, 25мм), два вида проволоки (с толщинами 0.75мм и 2мм) и различные шаги винтовой симметрии (спирали). Как оказалось, исследуемый эффект проявился далеко не повсеместно. Более того – лишь для труб диаметром 25 мм и толщиной проволоки 2мм. Это, вероятно, и объясняет отсутствие других примеров в Интернете. Эффект обратного каскада проявляется гораздо реже, чем обычный – прямой каскад.

Организация эксперимента состояла в том, что брались две гибкие трубы, связывались вместе скотчем и фиксировались (приблизенно) в пространстве. Поочередно, а не одновременно, подключались трубы – без спирали и со спиралью. При этом фиксировался угол поворота крана. Поскольку эксперименты проводились в учебном корпусе, выбиралось время выходных дней – чтобы свести на нет колебания давления во внешнем трубопроводе. Приведенные ниже данные получены на серии – 3-4 экспериментов в разные дни. Обратите внимание на рис. 1 а, б, в. Несмотря на различие абсолютных значений, относительные значения указывают на один и тот же (приблизительно) промежуток расхода, где эффект проявляется максимально. Эксперименты проводились в разные дни, что указывает отличие кривых. Максимальные относительное различие достигают 30% (рис. 1 б)) и даже более (в некоторых экспериментах 40% (рис. 1 а и рис. 1 в)). С учетом примитивной техники эксперимента, «сбросим» процентов десять и скромно остановимся на нижней границе максимума (30%). Понятно, что погрешности ручной установки на определенном делении не могут быть несколько десятков процентов, а наличие серии экспериментов значительно

минимизирует вероятность ошибки. Важным, в смысле достоверности, оказалось то, что сравнение с представленными в Интернете результатами выявило приблизительное совпадение тех значений расхода, где наблюдался максимум. Это величина расхода приблизительно равная 0,150 л за секунду.

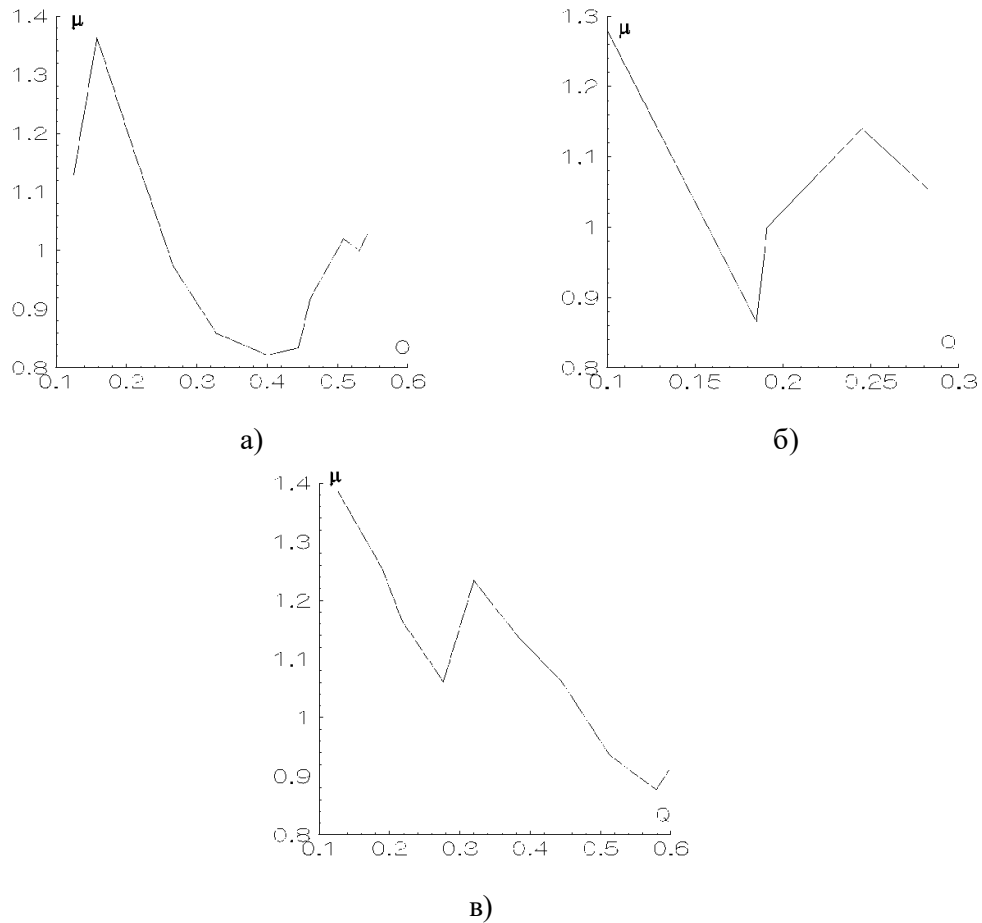


Рис. 1 – Относительные расходы воды: в трубе со спиралью в сравнение с трубой без спирали. а) – с малой примесью воздуха; б) – без примеси; в) – без конфузора на конце трубы.

В качестве основного вывода можно сказать, что максимальный эффект обратного каскада энергии турбулентности происходит при достаточно малых напорах.

Список літератури

1. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Доклады АН СССР. 1941. Т. 30. С. 299—303.
2. Kraichnan R.H. Inertial ranges in two-dimensional turbulence. Phys. Fluids 10, 1417—1423 (1967).
3. Колесниченко А.В. К теории инверсного каскада энергии в спиральной турбулентности астрофизического немагнитного диска // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. №70. 36 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-70>
4. Колесниченко А.В. , Маров М.Я. Роль гидродинамической спиральности в эволюции протопланетного турбулентного диска // Математическое моделирование 2007. Т. 20. №10. С. 99—125.
5. Oks O., Mininni P.D., Mario R., Pouquet A. Inverse cascades and resonant triades in rotating and stratified turbulence. Phys. Fluids v. 29 (11), 2017, 111109.