

УДК 532;551

Структура и расход закрученного потока жидкости в криволинейной трубе

Helical flux structure and rate of fluid in curvilinear pipe with constant cross-section

П. В. Лукьянов, канд. физ.-мат. наук, *И. В. Мешков*,
Национальный авиационный университет, Киев, Украина

Цель. Экспериментально исследовать структуру и расход напорного течения жидкости в закрытых руслах — гибких трубах разного диаметра при наличии внутри них спирали и без, а также проверить достоверность доступных данных по увеличению расхода жидкости при определенных соотношениях шага закрутки и напора.

Методы исследований. В работе используются как теоретические, так и экспериментальные методы. Теоретические методы основаны на использовании уравнения неразрывности для несжимаемой жидкости и полученных ранее моделей вихрей с винтовой симметрией.

Результаты исследований. В ходе исследований подтвердилось указанное явление — при определенной фиксированной геометрии (обе трубы (со спиралью и без) имели одинаковую геометрию и расположение в пространстве) наблюдаются режимы как замедления спиралью потока, так и ускорение. При этом есть намеки на периодический характер данного соотношения. Неожиданным, но вполне естественным оказалось наблюдение регулярной спиральной закрутки турбулентного потока при выходе струй из т-образного разветвления в трубы со спиралью и без нее. Несмотря на идентичность пространственной геометрии, в трубе без спирали пузырьки воздуха собирались в спираль, указывая на область минимального давления, а в трубе со спиралью воздушный шнур наблюдался вдоль оси трубы, указывая на минимальное давление.

Выводы. Таким образом, наличие внутри трубы спирали может при определенных режимах (напорах) полностью изменять структуру течения, и следовательно, влиять на расход. И главное, может увеличивать расход, максимально — приблизительно на одну треть (33%).

Ключевые слова: отрицательная турбулентная вязкость, структура течений с винтовой симметрией, криволинейный трубопровод постоянного сечения.

Введение

Хорошо известно, что жидкость, двигаясь в поле силы тяжести Земли, стремится к закрученному состоянию (сток, течение воды в ручьях, горных реках). В настоящее время существует теория [1,2,3], согласно которой, жидкость, имея спиральную закрутку, может проявлять необычное свойство — обладать отрицательной вихревой (турбулентной) вязкостью. Речь идет об открытом ещё 50 лет назад эффекте, присущем спиральной турбулентности [2]. Он состоит в обратном каскаде энергии турбулентности — от мелкомасштабного движения к крупномасштабному. Явление обратного каскада — одно из возможных объяснений присутствия во Вселенной, на фоне космической пыли, крупномасштабных образований — планет, звездных систем, галактик. С физической точки зрения, вихревая вязкость, присущая турбулентному движению, не обязана иметь всегда диссипативный характер. Спиральная турбулентность — подтверждение этому.

Существует множество примеров закрученных потоков жидкости. Все они указывают на некую оптимальность или преимущество закрученного потока по сравнению с незакрученным. С точки зрения практической гидравлики, представляет интерес явление увеличения скорости транспортировки жидкости по трубопроводам, как для напорных потоков, так и для безнапорных, в закрытых и открытых руслах. Исходя из этого, целью данной работы является изучение особенностей закрученного потока жидкости в (криволинейной) трубе и выработка рекомендаций по увеличению пропускной способности трубопровода.

Течение с винтовой симметрией — один из способов стационарного движения несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе

Принято считать, что течением с винтовой симметрией является закрученный ламинарный безнапорный поток жидкости, у которого все характеристики сохраняются вдоль спирали — винтовой линии. При этом продольная V_z и азимутальная V_θ скорости течения взаимосвязаны соотношением [4]

$$V_z = V_z^0 - \frac{r}{l} V_\theta \quad (1)$$

в котром V_z^0 — значення продольної шкорути на осі. Величина l називається шагом винтової симетрії, r — радіальна координата. При правосторонній закрутці она положительна, при левосторонній — отрицательна.

Покажем, что независимо от характера течения (ламинарного или турбулентного) винтовое течение присуще закрученному потоку жидкости в криволинейной трубе. Поскольку при течении жидкости в трубе радиальная компонента скорости отсутствует, класс рассматриваемых стационарных движений можно представить следующими соотношениями

$$V_r \equiv 0; \quad V_\theta = V_\theta(r, \theta, z), \quad V_z = V_z(r, \theta, z), \quad (2)$$

При этом важно отметить, что компоненты скорости в (2) могут соответствовать как ламинарному, так и турбулентному течению (осредненные величины). Покажем, что в этом случае винтовое течение согласуется с уравнением неразрывности. Действительно, уравнение неразрывности, независимо от характера течения, имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial r}(rV_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(rV_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(rV_z) = 0. \quad (3)$$

Подставляя (2) в (3), получаем

$$\frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + r \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Исходя из сказанного выше, винтовое течение должно удовлетворять уравнению неразрывности. Покажем это. Введем в рассмотрение винтовую координату как

$$\vec{\chi} = \vec{B} \times \vec{e}_r = B^2 \left[\vec{e}_\theta - \frac{r}{l} \vec{e}_z \right], \quad (5)$$

где представленный в таком виде \vec{B} — вектор Бельтрами [5]; $\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z$ — орты соответствующих направлений в цилиндрической системе координат. Вводятся две новые компоненты скорости [4]

$$V_B = \frac{\vec{B} \cdot \vec{V}}{B^2} = V_z + \frac{r}{l} V_\theta, \quad V_\chi = \frac{\vec{\chi} \cdot \vec{V}}{B^2} = V_\theta - \frac{r}{l} V_z. \quad (6)$$

Решая систему уравнений (6) относительно V_z, V_θ , получаем

$$V_z = \frac{V_B - \frac{r}{l} V_\chi}{1 + (r/l)^2}, \quad V_\theta = \frac{V_\chi + \frac{r}{l} V_B}{1 + (r/l)^2}. \quad (7)$$

Уравнение неразрывности в новых координатах будет иметь вид

$$\frac{\partial V_\theta}{\partial \chi} \cdot \frac{\partial \chi}{\partial \theta} + \frac{\partial (rV_z)}{\partial \chi} \cdot \frac{\partial \chi}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

Подставим теперь решение (7) в уравнение (8). Получим

$$\frac{\partial \left(V_\chi + \frac{r}{l} V_B \right)}{\partial \chi} \cdot \frac{1}{1 + (r/l)^2} + \frac{\partial \left(r \left(V_B - (r/l)^2 V_\chi \right) \right)}{\partial \chi} \cdot \left(-\frac{1}{l} \right) = 0, \quad (9)$$

что эквивалентно

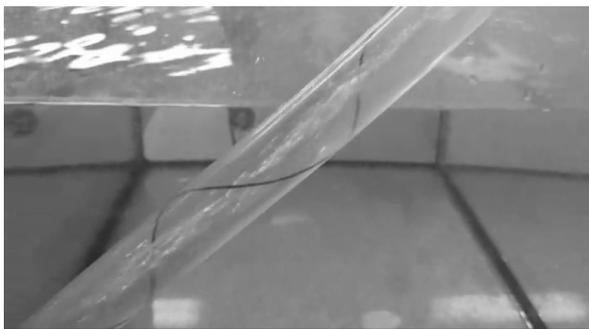
$$\frac{\partial V_\chi}{\partial \chi} + \frac{\partial (rV_B)}{l \cdot \partial \chi} - \frac{1}{l} \left(\frac{\partial}{\partial \chi} (rV_B) - \left(\frac{r}{l} \right)^2 \frac{\partial V_\chi}{\partial \chi} \right) = 0.$$



а)



б)



в)

Рисунок 1 — Влияние спирали на закрученный поток
а) Т-образное разветвление; б) поток в трубе без спирали; в) поток в трубе со спиралью

- гибкие прозрачные трубы разных, указанных выше, диаметров;
- проволока толщиной 1-2 мм, причем проволока большего диаметра желательно должна быть пружинной, например изготовленной из стали марки ЗК-7, либо 70, либо 70 Г;
- соединительные муфты, тройники, колена соответствующих размеров, а также хомуты и т. п.

Предварительно были осуществлены попытки повторить результат, полученный ранее. Затем, в ходе экспериментов, появились рациональные идеи вариации параметров. Попытки повторить эксперимент с двумя трубами, одновременно подключенными к тройниковой развилке, вызвали ряд вопросов относительно равенства напоров на входе. Поэтому, в конце концов, было решено подключать отдельно трубы со спиралью и без неё. При этом контролировать расход жидкости через кран, создав круговую шкалу в виде циферблата с разбиением круга на 12 равных частей.

или, после приведения подобных слагаемых

$$\frac{\partial V_z}{\partial \chi} \cdot \left(1 + \frac{r^2}{l^3} \right) = 0. \quad (10)$$

Выражение в скобках никогда не обращается в ноль. Поэтому (10) равносильно

$$\frac{\partial V_z}{\partial \chi} = 0. \quad (11)$$

Таким образом, в винтовых координатах уравнение неразрывности эквивалентно винтовой симметрии течения. А это, в свою очередь, подтверждает факт возможности существования течений с винтовой симметрией в цилиндрических трубах переменной кривизны. Поэтому моделировать и изучать винтовое течение в трубе — логично. Частным случаем общего винтового течения, рассмотренного выше, есть осесимметричное течение, все характеристики которого не зависят от продольной координаты. Именно приблизительно такой тип течения наблюдался в верхних частях труб (рисунок 1).

Организация эксперимента

Поскольку эффект отрицательной турбулентной вязкости демонстрируется (khdr.horod.ru/pipe.htm) на примере сравнения течения жидкости по двум гибким трубам, закрепленным к т-образному соединению (тройнику), было принято аналогичное решение. Кроме гибких труб соответствующего диаметра (25 мм), использовались также более узкие — диаметром 20 мм и 12 мм. Естественно, представляет интерес шаг закрутки проволоки в спираль, а точнее, его взаимосвязь с величиной напора, при котором наблюдается максимальный эффект увеличения скорости потока. Для проведения экспериментов понадобились:

- источник жидкости (водопровод);
- труба, поднимающая жидкость на некоторую высоту (1,5—2 м);
- два крана — один шариковый (для быстрой остановки потока), а второй вентильный для фиксации расходов;

Результаты лабораторных наблюдений. Спиральная структура течения

При подключении двух труб диаметром 20 мм одновременно наблюдалась следующая картина течения (рисунок 1, а) При расходе, равном 0,15 л/с, благодаря тангенциальной составляющей выходящих из тройника струй, течения в трубах становились закрученными. При этом сила тяжести способствовала этой закрутке (как при стоке). При этом обнаружено совершенное различие в структуре течения. Так, в трубе без спирали течение приобретает такой характер, что минимум давления находится вдоль спиральной линии, являющейся линией тока, что хорошо видно на фотографии (рисунок 1, б), сделанной на основе видеосъемки. Поскольку пузырьки воздуха подхватывались вытекающей из тройника струей, их расположение как раз и указывает на локализацию области минимального давления. Изменение напора влияет на характер «воздушной» спирали. Согласно опытам, диаметр спирали может уменьшаться.

Второй тип течения наблюдается в трубе со спиралью (рисунок 1, в). Пристеночная струя нарушается расположенной спиралью. Минимум давления в этом случае, наоборот, находится на оси трубы. Воздушный шнур это хорошо отображает. Этот тип течения визуально не проявляется как спирально симметричный. Но, в Интернете, по ключевым словам *трубопровод по Шаубергеру*, легко найти видео с двумя стеклянными вертикальными трубками, где показано сравнение ламинарного течения в трубке без спирали и турбулентного — со спиралью. Важно то, что эти результаты при закрутке потока спиралью согласуются с нашими.

Известны математические модели компактных вихревых течений с винтовой симметрией [6,7].

Если попытаться поставить в соответствие приведенным данным указанные модели, то закрученный в спираль воздушный шнур сложно аппроксимировать, так как минимум давления, согласно аналитическим выражениям

$$V_z = \begin{cases} V_z^0 - \frac{V_0 r^2}{h}, & 0 \leq r \leq a; \\ V_z^0 - \frac{V_0 a(R^2 - r^2)}{R^2}, & a \leq r \leq R. \end{cases} \quad V_\theta = \begin{cases} \frac{V_0}{a} r, & 0 \leq r \leq a, \\ \frac{V_0 a(R^2 - r^2)}{(R^2 - a^2)r}, & a \leq r \leq R. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь максимум скорости находится вблизи стенки трубы, не является результатом простого интегрирования уравнения циклострофического баланса. Очевидно, что за счет пространственной кривизны трубы реальное течение, с математической точки зрения, гораздо сложнее.

Второй тип течения, наблюдавшийся в трубе со спиралью, указывает на то, что минимум давления здесь находится на оси трубы. Такое течение можно *локально* аппроксимировать, используя модель квазиточечного вихря для азимутальной скорости течения и соответствующее ей распределение скорости для течения с винтовой симметрией [6].

$$V_\theta(r) = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) = 0, \quad V_z = -\frac{\Gamma}{2\pi l} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad V^2 = \left(\frac{\Gamma}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{l^2}\right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^2. \quad (13)$$

Покажем, что минимум давления, согласно (13), находится на оси. Поскольку течение симметричное относительно оси трубы, в уравнении для радиальной компоненты скорости ускорение свободного падения не играет существенную роль. Из уравнения циклострофического баланса легко получить

$$p = p_0 + \int_0^r \frac{V_\theta^2}{r} dr. \quad (14)$$

Так как подинтегральное выражение всегда неотрицательное, правая часть (14) — возрастающая функция радиальной координаты, минимум которой находится на оси при $r = 0$.

Исследование влияние закрутки потока на расход

С практической точки зрения представляет интерес вопрос о том, как зависит расход жидкости от закрутки потока. Судя по приведенным выше фотографиям, равномерную закрутку потока можно достичь лишь использованием внутри трубы средств закрутки, например, спирали. Тогда поток будет равномерно закручен. Идея проведения таких экспериментов не нова. Так, по ключевым словам «*закрученное течение в трубе*» можно выйти в Интернете ссылку на такой феномен, как «*трубопровод по Виктору Шаубергеру*» (evgars.com/tr.htm). Кроме этого, теоретическое обоснование эффекта отрицательной вихревой вязкости можно найти в [8,9]. В Интернете предлагается видео, где показывается, как наличие внутри трубы спирали ускоряет поток. Количественно это

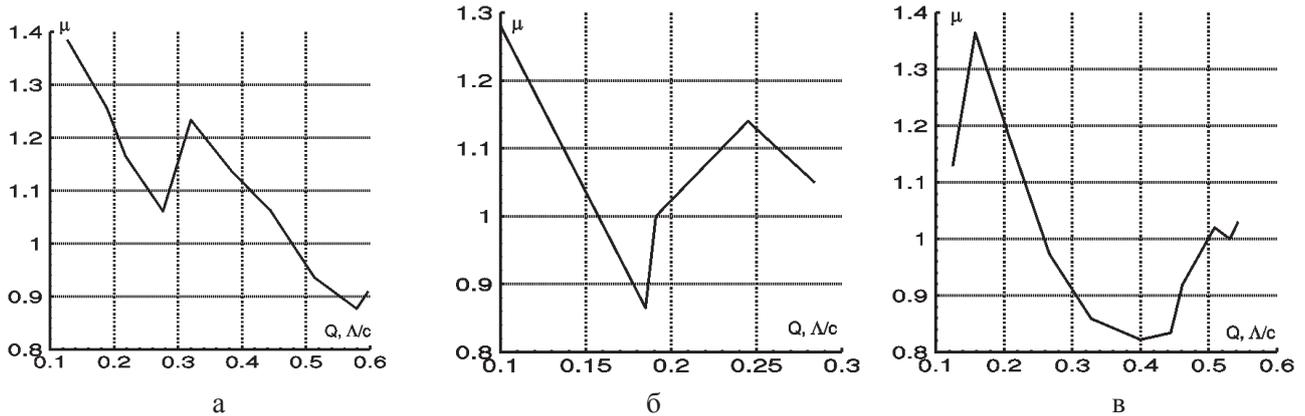


Рисунок 2 -- Относительные расходы воды:
а) — с малой примесью воздуха; б) — без примеси; в) — без конфузора на конце трубы

явление демонстрируется на видео с двумя трехлитровыми ёмкостями, которые наполняются по-разному: та, что со спиралью внутри, успевает заполниться до краев, в то время как наполняемая из обычной трубы (без спирали) ёмкость — приблизительно лишь на 2 л. Иными словами, эффект ускорения потока — около 50%. Поскольку на указанном видео гибкие трубы непрозрачные, то возник, прежде всего, вопрос о достоверности представленных результатов. А также появился научный интерес — исследовать ряд возможных вариантов.

Эксперименты с трубой диаметром 12 мм со спиралью толщиной 0,85 мм с небольшим шагом спирали порядка 5 см показали, что спираль играет роль гидравлического сопротивления и расход уменьшается на треть (то есть обратный эффект тому, что представлен в Интернете).

Эксперименты с трубой диаметром 25 мм со спиралью толщиной 2 мм дали интересный набор результатов. При одних режимах (расходах) наблюдались всегда уменьшение расхода, а при других — всегда увеличение. Остановимся подробно на результатах экспериментов.

Эффект увеличения расхода жидкости

Указанный эффект наблюдался в различные дни в трех сериях близких, но все же отличающихся между собой экспериментах. Сначала, в первой серии экспериментов, хомуты зажимали трубы так, что внутрь попадало небольшое количество воздуха в виде маленьких пузырьков. На конце трубы были зажаты металлическими конфузорами.

$$\text{Введём относительный объёмный расход } \mu = \frac{Q_s}{Q}, \quad (15)$$

где Q , Q_s — расходы жидкости в трубе без спирали и со спиралью соответственно.

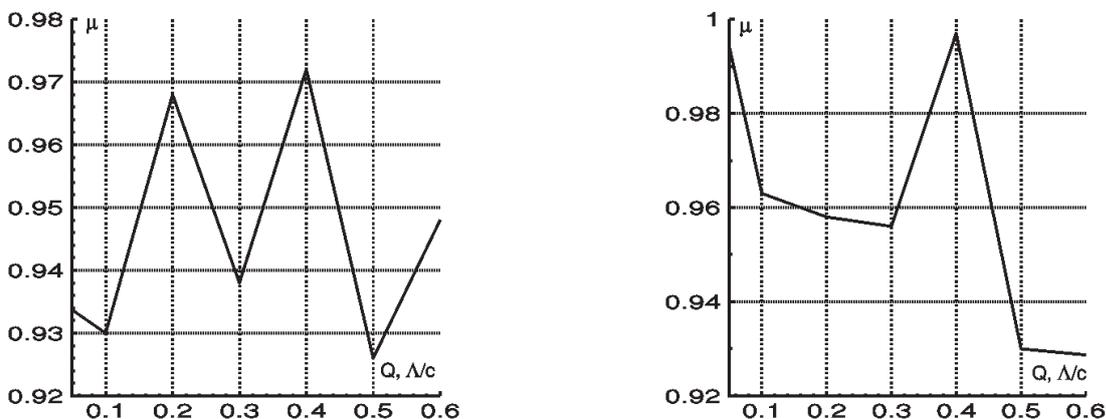


Рисунок 3 — Относительный расход в трубе диаметром 20 мм
а) спираль из тонкой проволоки (0,75 мм) и шагом винта 5—7 см;
б) спираль из толстой проволоки (2 мм) с шагом винта 15—20 см

Функция относительного расхода (15) для этого случая построена на рисунке 2, а. Видно, что максимальный эффект достигается при расходе приблизительно $0,15 \text{ л}$ за секунду. При расходах в 2—2,5 раза больше влияние спирали обратное — сопротивление потоку увеличивается. Разброс данных в 55—60% указывает на бесспорное, и главное существенное, влияние спирали на расход жидкости. При дальнейшем увеличении расходов их отношение фиксировалось на отметке вблизи 1, при слабом эффекте увеличения расхода в трубе со спиралью. Это хорошо видно на правой части графика, где значение расхода достигает $0,5 \text{ л/с}$ и выше.

Вторая серия экспериментов проводилась с теми же трубами, но при сильном зажатии хомутов так, чтобы удалить подсос воздуха в поток. Минимумы и максимумы частично сместились, но качественная структура зависимости сохранилась. Исследовался диапазон расходов ($0,1—0,3 \text{ л/с}$), где наблюдался в предыдущей серии опытов эффект увеличения расхода при наличии спирали в трубе.

Для проверки имеющихся данных эксперимента было решено с концов труб удалить конфузторы и вновь провести измерения. Результаты относительного расхода для этого случая показаны на рисунке 2, в. Максимальный эффект увеличения напора вновь наблюдался в районе тех же значений — $0,15 \text{ л/с}$.

Поскольку эффект отрицательной вязкости проявился на серии различных, хотя и схожих, экспериментов, можно с уверенностью сделать вывод о его существовании.

Уже после этих экспериментов, проводились подобные: поочередно подключались трубы диаметром 20 мм . При некоторых расходах наблюдался незначительный эффект (1—3%). Потому было решено использовать манометр малых давлений (до 1 атм.) и повторить опыты с ним. К сожалению, стрелка манометра западала при расходах, меньших $0,3 \text{ л/с}$. Результаты, которые удалось получить, представлены на рисунке 3. Отметим, что замеры делались по 2—4 раза, чтобы свести к минимуму фактор случайности. Во всех случаях расход в трубе со спиралью не превышал расход в трубе без спирали. Спираль с тонкой проволокой и малым шагом уменьшала расход приблизительно до $0,95$, если учесть 1—3% погрешность эксперимента. Заметим, что отношение площадей, соответствующих диаметрам $18,5 \text{ мм}$ ($20—1,5 \text{ мм}$ спирали) и 20 мм равно $0,855$. Это на 10% меньше среднего отношения расходов ($0,95$). Возможно закрутка потока спиралью частично компенсирует сужение диаметра русла. Тем более что в начале работы приведены примеры влияния спирали на поток.

Вторая серия экспериментов с трубами диаметром 20 мм была проведена со спиралью из проволоки диаметром 2 мм и шагом винтовой симметрии $15—20 \text{ см}$. На рисунке 3, б показаны результаты измерений. Отчетливо видны две важных детали. Первая — разброс данных увеличился примерно вдвое и составил около 8%. Это почти в три раза превышает верхнюю границу погрешности эксперимента (3%). Следовательно, кривая рисунке 3, б уже носит дополнительный качественный информативный характер. К сожалению, на рисунке 3 минимальный расход ($0,3 \text{ л/с}$) приблизительно соответствует 5% атмосферного давления. При меньших значениях стрелка манометра в условиях турбулентных пульсаций, однажды отклоняясь близко к нулю, просто залипала на этом значении — не возвращалась к исходному среднему положению.

Понятно, что в данных исследованиях одним из основных параметров является отношение площадей сечений трубы со спиралью и без. Для трубы с диаметром 20 мм эта величина составляет $0,64$, а для труб диаметром 25 мм — $0,7056$. Второе значение в относительном измерении более, чем на 10% превышает первое. Возможно, это как-то соотносится с тем, что видно из рисунке 2 в отношении расходов — приблизительно на 10% больше, чем на рисунке 3, б.

Выводы

Наличие достаточно тонкой спирали может качественно менять поле скорости течения жидкости в трубе.

При определенных соотношениях геометрических размеров трубы и спирали (толщина спирали составляет 10% от диаметра трубы) в некоторой области значений величины напора наблюдается эффект увеличения пропускной способности трубопровода.

В качестве дальнейших исследований представляется разработка теоретических моделей течений в криволинейной трубе постоянного диаметра и, главное, совершенствование техники эксперимента с целью получения более широкого спектра зависимостей относительного расхода от геометрии трубы и спирали. Имеет смысл исследовать истечение жидкости в случае затопленной струи для трубы со спиралью и без.

Литература

1. Колисниченко, А.В. К теории инверсного каскада энергии в спиральной турбулентности астрофизического немагнитного диска / А.В. Колисниченко. — Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша., 2014. — №70. 36 с.

URL <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014—70>

2. Kraichnan, R.H. Inertial ranges in two-dimensional turbulence / R. H. Kraichnan // Phys. Fluids — 1967. — Vol. 10. — P. 1417—1423.

3. Lindborg, Erik. A two-dimensional toy model for geophysical turbulence. / Erik Lindborg and Ashwin Mohanan // Phys. Fluids — 2017. — Vol. 29, 111114.
<https://doi.org/10.1063/1.4985990>
4. Alekseenko, S.V. Theory of Concentrated Vortices: An Introduction / S.V. Alekseenko, P.A. Kuibin, V.L. Okulov — Springer — Verlag, Berlin Heidelberg, 2007. — 493 p.
5. Dritschel, D.G. Generalized helical Beltrami flows in hydrodynamics and magnetohydrodynamics // J. Fluid. Mech. — 1991. — Vol. 222. — P. 525—541.
6. Лук'янов, П.В. Модели компактных компенсированных вихрей с винтовой симметрией / П. В. Лук'янов // Прикладна гідромеханіка. — 2013. — Т. 15 (87), № 3. — С. 37—42.
7. Лук'янов, П. В. Розвиток аналітичних моделей компактних монопольних вихрових течій / П. В. Лук'янов, В. М. Турик // Наукові вісті НТТУ «КПІ» — 2017. — №4 (114). — С. 81—92.
<https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.4.1020489>.
8. Старр, В. Физика явлений с отрицательной вязкостью / В. Стар. — М.: Мир, 1971. — 259 с.
9. Высоцкий, Л.И. Существуют ли зоны с отрицательной вихревой вязкостью в продольно-однородных турбулентных потоках // Magazine of Civil Engineering. — 2013. — № 2, p.48—53. <https://doi.org/10.5862/MCE.37.7>

References

1. Kolisnichenko, A.V. On inverse energy cascade in spiral turbulence of astrophysical non-magnetic disk /A.V. Kolisnichenko — Preprints of Keldysh IPM, 2014. — V. 70. 36 p.
URL <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014—70>
2. Kraichnan, R.H. Inertial ranges in two-dimensional turbulence / R. H. Kraichnan // Phys. Fluids — 1967. — Vol. 10. P. 1417—1423.
3. Lindborg, Erik. A two-dimensional toy model for geophysical turbulence. / Erik Lindborg and Ashwin Mohanan // Phys. Fluids — 2017. — Vol. 29, 111114.
<https://doi.org/10.1063/1.4985990>
4. Alekseenko S.V. Theory of Concentrated Vortices: An Introduction / S.V. Alekseenko, P.A. Kuibin, V.L. Okulov — Springer — Verlag, Berlin Heidelberg, 2007. — 493 p.
5. Dritschel, D.G. Generalized helical Beltrami flows in hydrodynamics and magnetohydrodynamics // J. Fluid. Mech. — 1991. — Vol. 222. — P. 525—541.
6. Lukianov, P.V. Modeli kompactnykh kompensirovannykh vykhrey s vintovoi symmetrii. // Applied hydromechanics. — 2013. — V. 15 (87). — № 3. — С. 37—42.
7. Lukianov, P.V. Rozvytok analitychnykh modelei kompaktnykh monopolykh vyhrovyykh techei/ P.V. Lukianov, V.N. Turick // Research Bulletin of NTUU «Kyiv Polytechnic Institute». — 2017. — V. 4(114). — P. 81—92.
<https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.4.102048>
8. Starr, V. Fizika yavleniy s otritsatelnoy vyazkostiu. / V. Starr. — М.: Mir, 1971. — 259 p.
9. Vysotsky, L. I. Sushchestvuyut li zony s otritsatelnoy vykhrevoiy vyazkostiu v prodolno-odnorodnykh turbulentnykh potokakh // Magazine of Civil Engineering. — 2013. — № 2. — p. 48—53. doi: 10.5862/MCE.37.7 k

Надійшла 12.02.2018

УДК 532; 551

Структура та витрата закрученого потоку рідини у криволінійній трубі

П. В. Лук'янов, І. В. Мешков

Мета. Експериментально дослідити структуру та витрату напірної течії рідини у закритих руслах — гнучких трубах різного діаметру при наявності усередині них спіралі та без, а також перевірити достовірність

UDC 532;551

Helical flux structure and rate of fluid in curvilinear pipe with constant cross-section

P. V. Lukianov, I. V. Meshkov

Aim. Experimentally investigate the structure and rate of head flow for fluid into closed channel, that is into flexible pipes of different diameters The pipes were with and without wire spiral. The aim is also to check the validity of

доступних даних щодо збільшення витрати рідини при певних співвідношеннях кроку закрутки потоку.

Методи досліджень. В роботі використовуються як теоретичні, так і експериментальні методи. Теоретичні методи ґрунтуються на використанні рівняння нерозривності для нестисливої рідини і отриманих раніше моделях вихорів із гвинтовою симетрією.

Результати досліджень. Протягом досліджень підтвердилось, що при певній фіксованій геометрії (обидві труби (зі спіраллю та без) мали однакову геометрію і розташування у просторі) спостерігались режими як уповільнення спіраллю потоку, так і прискорення. При цьому є ознаки періодичного характеру результатів даних спостережень. Несподіваним, але цілком природним, стало спостереження регулярної спіральної закрутки турбулентного потоку при виході струменів з т-подібного розгалуження у трубі зі спіраллю та без. Незважаючи на ідентичність просторової геометрії, у трубі без спіралі бульбашки повітря збирались у спіраль, указуючи на мінімальний абсолютний тиск течії, а у трубі зі спіраллю повітряний шнур спостерігався уздовж осі труби.

Висновки. Наявність усередині труби спіралі при певних режимах (напорах) може повністю змінювати структуру течії, і таким чином, впливати на витрату. І головне — може збільшувати витрату, приблизно на одну третину (33%) .

Ключові слова: від'ємна турбулентна в'язкість, структура течії із гвинтовою симетрією, криволінійний трубопровід сталого перерізу

accessible data as for rate increasing, for certain correlations between helicity step and head of flow.

Research methods. Both theoretical and experimental methods have been used. Theoretical methods are based on both continuity equation for incompressible fluid using and obtained earlier models for vortices with helical symmetry.

Research results. The above said phenomenon turned out to be true for certain geometry when both tubes (with spiral and without it) had the same geometry and position in space. Wire spiral can both increase and decrease the rate of the flow. It depends on parameters correlations. There is a hint on periodical character of the phenomenon. Unexpected but quite natural it was the observation of regular spiral turbulent flow for outflow from t-shape tube into tubes with spiral and without it. In spite of identical space geometry, air bubbles formed regular spiral structure in tube without wire spiral. The structure shows pressure minimum of the flow within air spiral domain. In tubes with wire spiral, air bubbles gathered in domain near tube axis. This domain corresponds both minimal pressure of the flow.

Conclusions. Thus the presence of spiral in tube can dramatically change flow structure. What is important the wire spiral presence in tube can increase flow rate for certain regimes with maximal values of some one third (33%).

Key words: negative turbulent (eddy) viscosity, structure of flow with helical symmetry, curvilinear pipeline with constant cross-section.