

ЧТО ТАКОЕ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Александр Владимирович Ефимов, ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова", Москва

СТАТЬЯ ИЗ ГРУППЫ
ВЕДУЩЕЙСЯ С 2010 г.

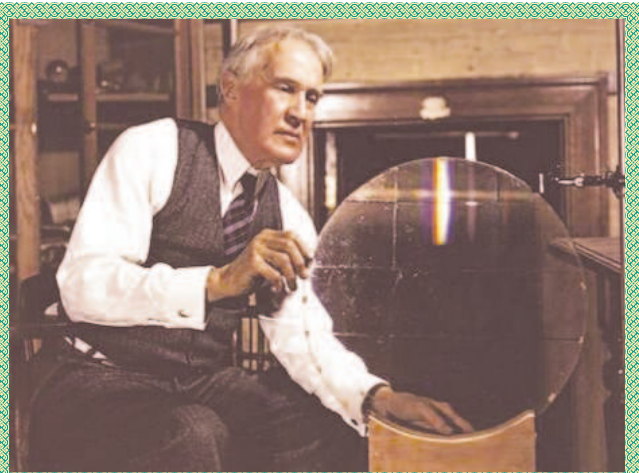
ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Тематика турбулентного течения жидкости, давно и всесторонне освещаемая нашим журналом, оказалась настолько популярной, что и наши давние авторы, трудящиеся в сфере, где эта тема всю работу, тоже решили отдать дань попытке её понимания.

На примере решения классической газодинамической задачи показаны возможные причины возникновения периодических процессов при течении в жидкости/газе. Данное явление принято называть - турбулентность.

The possible causes of periodic processes during flow in a liquid/gas are shown by the example of solving a classical gas-dynamic problem. This phenomenon is often referred to as turbulence.

Центробежные ступени, многорядные решетки, обтекание цилиндров, периодические процессы
Keywords: centrifugal stages, multi-row vane cascades, flow around a cylinder, periodic processes



Роберт Вуд однажды сказал:
- Когда я умру и предстану перед Богом, я задам ему два вопроса.
1. - что такое электричество и
2. - что такое турбулентность!

На второй вопрос, кажется, получен ответ ...

Исследовалась центробежная ступень при равномерном стационарном потоке на входе и при отсутствии входного направляющего аппарата (ВНА). Было обнаружено, что в одном из каналов решетки трехрядного колеса, возникает периодическое течение, частота которого не связана с частотой следования лопаток лопаточного диффузора или другими источниками возмущения.

Это натолкнуло на мысль, исследовать течение при обтекании групп профилей, например при обтекании групп цилиндров [1].

Было последовательно рассмотрено обтекание одного, двух



Рис. 1 Обтекание 3 цилиндров

и трех цилиндров. В результате было получено как закономерное, так и неожиданное решение.

Ожидаемо, получено, что обтекание одного цилиндра возможно как бесциркуляционное, так и с положительной и отрицательной циркуляцией.

Обтекание пары цилиндров, дает уже более неожиданный результат - на цилиндрах обязательно возникают встречно направленные циркуляции, причем циркуляции направлены так, что скорость между цилиндрами меньше, чем на внешнем контуре.

Обтекание трех цилиндров дает еще более неожиданный результат.

Было получено, что бесциркуляционное обтекание цилиндра расположенного посередине, невозможно, а реализуются два решения с разнонаправленными циркуляциями (на среднем цилиндре) и встречно направленными циркуляциями на крайних.

Таким образом, решение задачи обтекания группы из трех цилиндров приводит к решению, когда на одном, среднем цилиндре, вероятно, возникает знакопеременное периодическое изменение циркуляции, которое, по-видимому, наблюдалось в ранее описанном исследовании центробежной ступени. Отметим также, что для

пары цилиндров в потоке не нарушается правило Кельвина, т.е. сумма завихренностей остается величиной постоянной, т.к. на цилиндрах возникают два противоположно направленных и равных вихря. Для трех же цилиндров, ввиду невозможности существования нулевой циркуляции на среднем цилиндре, правило Кельвина может выполняться только при периодическом возникновении и сносе вниз по потоку свободного вихря, равного и противоположного по знаку, циркуляции на среднем цилиндре.

Так правильно-ли наше представление об обтекании не толь-

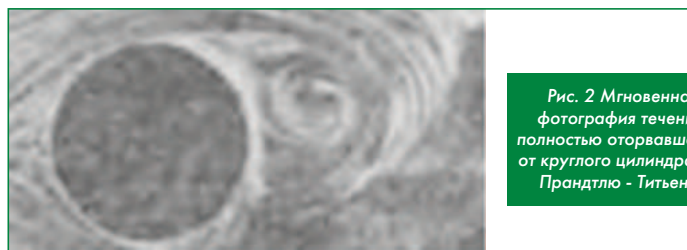


Рис. 2 Мгновенная фотография течения, полностью оторвавшегося от круглого цилиндра. По Прандтлю - Титъенсу

ко групп цилиндров, но и одиночного? Может быть и на обтекание одиночного цилиндра следует посмотреть иначе?

А если появление "дорожки Кармана" связано не только с вязкостью?

Обратимся к другому явлению.

Мы все живем в поле потенциальных сил тяготения. Потенциальных потому, что для перемещения на большую высоту, с одной линии потенциала на другую, энергию затрачиваем, а на меньшую получаем. А если перемещаемся по линии потенциала, то энергия не меняется.

Если мы бросим упругий шарик на твердую поверхность, то начнется периодический процесс. Аналогичное явление получим, привязав шарик на ниточку, подвесив и качнув.

В жидкости, согласно классической газодинамической теории также можно выделить линии потенциала, а также, в отличие от поля сил тяготения, линии тока. А поле сил давления в жидкости также носит потенциальный характер и связано с течением жидкости, т.е. линиями тока и линиями потенциала. А при переходе с одной линии потенциала на другую появляется градиент. Если нет градиента, то нет и течения, или течение равномерное и стационарное без осо-

бенностей внутри области течения. А если появляется особенность, например: наш обтекаемый цилиндр или группа цилиндров, то появляется и градиент. А если появляется градиент, то, по-видимому, возникает и вероятность периодического процесса.

Градиент возникает и при обтекании пары цилиндров - большее давление в пространстве между цилиндрами, но это равноценно ситуации устойчивого равновесия, словно маятник в нижней точке, вот если притормозить поток жидкости с внешней поверхности одного из цилиндров... Но воздействие должно быть более существенным, чем воздействие соседнего цилиндра.

Так, именно такая ситуация появляется при появлении третьего цилиндра. И периодический процесс запущен. Следует иметь в виду, что в статье получено знакопеременное значение циркуляции на среднем цилиндре для невязкого потенциального потока несжимаемой жидкости, а дорожка Кармана описывается с учетом вязкости.

А при обтекании одиночного цилиндра, важен уровень градиента. Если скорость мала и градиент мал, периодический процесс не запускается. Даже при случайном изменении скорости течения возле одной из сторон цилиндра. Достигли пороговой скорости - процесс запустился, превысили некоторое критическое значение - явление исчезло т.к. градиент исчез. Скорость так велика, что градиент давления не наблюдается.

Повторим [1], что согласно данным приведенным в монографии Г. Шлихтинга, на некотором расстоянии позади обтекаемого тела образуется правильная последовательность вихрей, вращающихся попеременно вправо и влево. Такая последовательность вихрей называется вихревой дорожкой Кармана. На рис. 2 хорошо виден готовый к отрыву от цилиндра вихрь дорожки Кармана, вращающийся вправо.

Регулярные вихревые дорожки образуются только в области чисел Рейнольдса Re примерно от 60 до 5000. Для чисел Рейнольдса, меньших 60, течение позади цилиндра ламинарное. При числах Рейнольдса больше 5000 дорожка Кармана не наблюдается.

Экспериментальные данные по частоте образования вихрей при обтекании трех цилиндров в настоящее время отсутствуют.

А при течении в трубе, действительно, градиент создается за счет трения о стенки, но как показывает данная работа, трение (вязкость) не единственный источник появления турбулентности. Главный источник - потенциальное поле сил давления, а как появляются линии разного потенциала, не суть важно.

Но возможно появление вихревой пелены и в результате появления градиента температуры.

Рассмотрим еще одно явление - возникновение автоколебаний (звука) при постоянном подогреве в вертикально расположенной трубке. Устройство получило название по первооткрывателю явление - "Трубка Рийке" [2].

Достаточно простое устройство представляющее собой вертикально стоящую трубку с сеткой расположенной (по данным других авторов) на высоте $1/4$ от длины трубки снизу. Обязательным условием является наличие сильной тяги, обычно применяют термин "сквозная тяга". Замеренная на выходе трубки температура поднималась до $120\text{ }^\circ\text{C}$. Скорость движения воздуха замеренная по кинограмме составила 1.2 м/с (в области предшествующей появлению звука - $0.4...0.7\text{ м/с}$). Теоретические условия возникновения акустических колебаний - скорость движения воздуха $0.6...0.7\text{ м/с}$ и удлинение трубки не менее 14 калибров. В наших экспериментах удавалось извлечь звук из трубок с относительными длинами от 11 до 27 калибров. Можно извлечь звук и расположив сетку, но только сильно охлажденную, на $1/4$ высоты трубки от верхнего среза. При этом получится "сквозная тяга наоборот".

Явление может быть объяснено следующим образом: При включении нагревателя нагретый воздух поднимается вверх, к срезу трубки. От среза трубки, в момент выхода неоднородности плотности, возникшей в результате нагрева, вниз спускается отраженная волна возмущения. Дойдя до

нагревателя, она (волна возмущения) провоцирует новую неоднородность плотности и бежит дальше, до входного среза, отражается и возвращается к нагревателю. Если нагреватель расположен на расстоянии $1/3$ длины трубки от входного среза (а не как принято $1/4$) т, возможно усиление возмущающего действия нагревателя, от пришедшей волны с верхнего среза ($2/3$ от полной длины) и удвоенного расстояния от нагревателя до входного среза.

Данное предположение может объяснить, почему в спектре существуют гармоники с частотой соответствующей 2-ой гармонике и на удвоенной частоте (т.е. на 4-ой гармонике), причем примерно с той же амплитудой (см. рис. ниже).

Определить частоту первой гармонике можно по формуле , где a - скорость звука в газе, внутри трубки, l - длина трубки. Мы определили на нашей метровой трубке частоту звука и она ока-

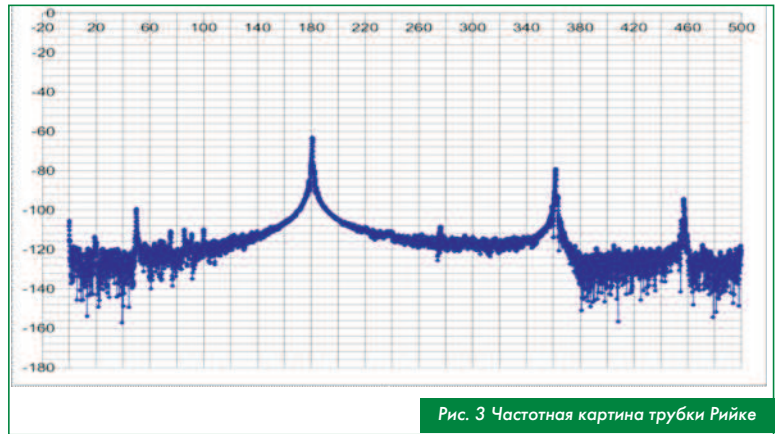


Рис. 3 Частотная картина трубки Рийке

залась около 180 Гц, что соответствует 2-ой гармонике, соответственно 1-ая гармоника составляет 90 Гц. Звук настолько сильный, что при диаметре трубки около 70 мм дрожат оконные стекла. При некотором навыке удастся извлечь звук практически из любой трубки. Трубка меньшего диаметра ($0.02...0.018\text{ м}$) и меньшей длины (0.5 м) звучит на частоте около 333 Гц, что также соответствует 2-ой гармонике

Следует обратить внимание, что скорость звука в холодной части, до нагревателя, меньше, чем в горячей части, после нагревателя. В нашем случае. при температуре на входе $20\text{ }^\circ\text{C}$, а температура после нагревателя - $120\text{ }^\circ\text{C}$, то разница составит 16 %

Таким образом воздействие будет более растянутым по времени. Расположение нагревателя, по данным других авторов, в сечении $1/4 \cdot l$ требует объяснение, т.к. в этом сечении для четвертой гармонике расположен узел и подогрев в данном сечении не должен воздействовать на интенсивность звука.

Продемонстрируем одно измерение, которое может объяснить отличие.

Обратите внимание на рисунок на котором изображены результаты измерения температуры на оси вблизи нагревателя.

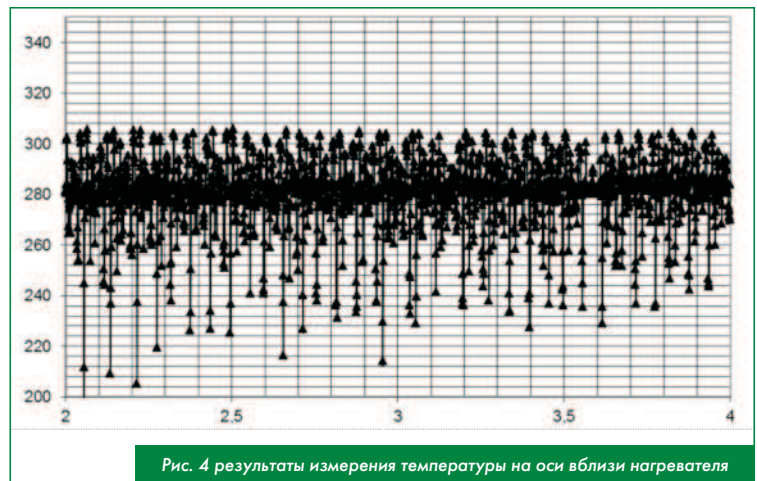


Рис. 4 результаты измерения температуры на оси вблизи нагревателя

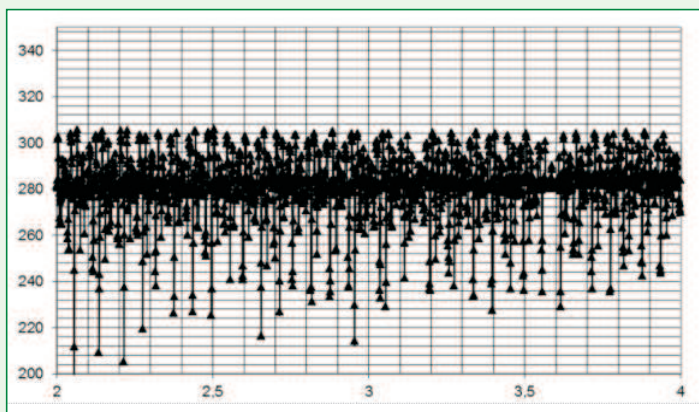


Рис. 5 Спектр сигнала записанного с термопары расположенной на оси в середине трубки

Ось x - время в с, ось y - значения ЭДС термопары расположенной на оси в вблизи нагревателя, приведенные к температуре по стандартной зависимости.

Выраженные пики амплитуд можно интерпретировать, как вихреобразование на нагретых элементах нагревателя и, возможно, в ядре потока.

Примерная частота появления положительных и отрицательных выбросов температуры - 10 Гц. На спектре зафиксирована большая частота. Примерно 45 Гц.

Из полученных диаграмм температуры, при наличии звука, профиль температуры оказывается более наполненным. Расчет чисел Re показал, что для исследованных трубок значение чисел Рейнольдса при начале звучания примерно соответствует переходу ламинарного течения в турбулентное.

В ряде опытов фотографировалась струя на выходе из трубки. Также были сделаны снимки с помощью тепловизора. Фотог-

рафии струи вытекающей из трубки также показывали более наполненный профиль температуры.

Если предположить, что на поверхности нагревателя возникает вихревая пелена и вихри имеют более высокую температуру, чем основной поток, то выше по потоку, возможно разрушение вихрей пришедшей отраженной волной и местный рост температуры и давления.

В нашем случае нагреватель был протяженный и занимал сечения включающие $1/4 * l$ и $1/3 * l$.

При включении нагревателя звук возникал начиная с некоторой температуры воздуха и скорости движения, близкой к моменту перехода ламинарного течения в турбулентное, но все же ниже критического значения Re . При дальнейшем нагреве звук постепенно усиливается. а в случае перегрева трубки, ослабевает и полностью исчезает.

Возникновением вихревой пелены можно объяснить и более широкий след за проволочкой анемометра, при условии заведомо ламинарного, по числам Re , течению. При этом классическая теория предсказывает более узкий след. Данное наблюдение ставит до сих пор многих исследователей в тупик, а, возможно, объяснение очень простое - градиент температур порождает сходящиеся последовательно вихри с разнонаправленной и равной циркуляцией, т.е. периодический процесс.

Литература

1. А.В. Ефимов (ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова", Москва) krylat@mail.ru Решение одной классической задачи газовой динамики. Изв. Вуз. Авиационная техника Казань 2019 г. № 4 стр. 80-86.

2. Б.В. Рауншенбах Вибрационное горение., М. Изд-во физмат лит. 1961 г. 500 с.

Связь с автором: krylat@mail.ru

ВЫСТАВКИ

УЧАСТИЕ РОССИЙСКИХ ИЗОБРЕТАТЕЛЕЙ И ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ИННОВАЦИОННОЙ ПРОДУКЦИИ В XVI МЕЖДУНАРОДНОМ САЛОНЕ ИЗОБРЕТЕНИЙ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ "НОВОЕ ВРЕМЯ"

XVI Международный Салон изобретений и новых технологий "Новое Время" прошел 24-26 сентября 2020 г., в г. Севастополь, Российская Федерация. Международный инновационный клуб "Архимед" при содействии Комитета по изобретательской, рационализаторской и патентно-лицензионной деятельности Ассоциации "Лига содействия оборонным предприятиям" продемонстрировал 35 инновационных проектов и изобретений, которые представляли предприятия и организации из 12 регионов Российской Федерации.

25 сентября 2020 г. в рамках деловой программы, организуемой клубом "Архимед", в Федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова" Министерства обороны Российской Федерации состоялась расширенный семинар по теме: "Система управления правами на результаты интеллектуальной деятельности на предприятиях оборонно-промышленного комплекса, в том числе при выполнении госзаказа: обзор нормативно-правовых актов, имеющих обязательные требования к РИД, организация на предприятиях системы

управления правами на РИД, правовая охрана РИД, в том числе служебных, учет РИД в составе нематериальных активов и их коммерциализация, вознаграждения за служебные РИД, актуальные вопросы в отношении РИД при взаимодействии с государственными заказчиками, инвентаризация прав на РИД". После семинара был организован круглый стол, во время которого участники семинара выступали с докладами и делились мнениями друг с другом. По окончании расширенного семинара для участников была организована культурная программа - экскурсия на катерах по Севастопольской бухте к военным кораблям Черноморского флота.

26 сентября 2020 г. состоялась торжественная церемония награждения участников Салона "Новое Время". Представители ФГБУ "16 ЦНИИ" Минобороны России, Краснодарского высшего военного авиационного училища лётчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова, АО ПО УОМЗ имени Э.С. Яламова, ФИЦ ХФ РАН, Тульского государственного университета, Филиала Военной академии Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого (г.Серпухов), НИУ МИЭТ, Военной Академии Ракетных Войск Стратегического Назначения им. Пет-



ра Великого, Московского политехнического университета, Дагестанского государственного медицинского университета Министерства здравоохранения Российской Федерации получили золотые, серебряные и бронзовые награды Салона, а также специальные призы от иностранных участников.

Во время работы Салона прошла презентация Всемирного изобретательского форума на Кипре - "Global Invention Forum in Cyprus", который состоится 14-15 октября 2020 г. Надеемся на Ваше активное участие в Форуме!

Мы поздравляем наших изобретателей с высокими наградами и желаем им дальнейших творческих успехов!

Дирекция Международного инновационного клуба "Архимед". Комитет по изобретательской, рационализаторской и патентно-лицензионной деятельности при Бюро Ассоциации "Лига содействия оборонным предприятиям"