УДК: 53.043, 532.5, 533.6.01, 533.16, 533.17

PACS: 47.10.-g, 47.32.-y

DOI:

Full name: Vadym Alexeevich Ostanin

**Эффекты отталкивания и притяжения между вращающимися цилиндрами в флюидах**

**V.A. Ostanin**

03039, 16 Demiivska Str, Kyiv, Ukraine

**Аннотация**

**Актуальность:** Из теории гидродинамики известно о взаимодействии пары вихрей в невязкой флюидах. Актуальность исследования обусловлена наличием множества исследований численных симуляций взаимодействий двух вихрей или двух цилиндров, но нехваткой исследований практических установок для наблюдения эффектов притяжения и отталкивания в флюидных средах, что может замедлять исследование в этой области для практического применения.

**Цель:** Целью данного исследования является практическая демонстрация возможности эффекта двойного взаимодействия в воздухе с вычислением примерной величины силы, стремящейся притянуть каждый из цилиндров или оттолкнуть.

**Методы:** В практическом эксперименте используется пара пластиковых цилиндров, которые приводятся в движение двигателями и вращаются рядом друг с другом в воздухе при атмосферном давлении. Численное моделирование эффекта показывает природу эффекта и позволяет предсказать величину силы, создаваемой вращающимися цилиндрами друг на друга. Связь между направлениями вращения цилиндров и наблюдаемыми эффектами была проверена численным моделированием с использованием численной симуляции конечных объёмов OpenFOAM версии 9.

**Результаты:** В практическом эксперименте пара вращающихся цилиндров начинало взаимодействие на расстоянии 5-7 см эксперименте, что при меньшем расстоянии 2-3 см создавало достаточную силу, позволяющую стабилизировать колебания одного из цилиндров вокруг нити за которую он подвешен. Численная симуляция показывает, что в пространстве между цилиндрами образует зона высокого или низкого давления в зависимости от направления вращения. Вращение соседних дисков с противоположными направлениями вращения помогает циркуляции другого цилиндра поддерживать скорость потока в зазоре, что снижает давление флюида между вращающимися дисками и притягивает их. И наоборот, вращающиеся диски с одинаковым направлением гасят и сжимают флюидные потоки в зазоре, что увеличивает давление воздуха между вращающимися предметами выше стационарного давления и отталкивает их.

**Выводы:** Сила взаимодействия зависит от плотности среды и скорости вращения, вязкость влияет на быстроту формирования разности давлений. Наблюдаемые эффекты отталкивания и притяжения можно использовать для манипулирования предметами в тех случаях, когда магнитное или иное бесконтактное взаимодействие невозможно.

**Ключевые слова:** Взаимодействие циркуляций, флюидный вихри, вращение цилиндров

1. **Вступление.**

~~Эта статья описывает опыт контролируемого притяжения и отталкивания в вязкой воздушной среде, и приводит численную симуляцию наблюдаемых эффектов в несжимаемой флюидной вязкой ламинарной безвихревой среде газа и жидкости с числом Рейнольдса от для воздуха, и до~~  ~~для воды между двумя вращающимися дисками. Этот эффект пригодится для инженерной задачи бесконтактного взаимодействия между объектами, когда электрические или магнитные поля могут негативно повлиять на инженерную задачу. Описываемый эффект был обнаружен под вдохновением от изучения магнитных эффектов вызванных “спин” свойством электрона в проводниках с током, но, как будет показано в статье, похожие эффекты наблюдаются и в флюидных средах. Эти эффекты описаны ранее в статье [1]. Объектом исследования являются два пластиковых цилиндра длиной 10 см и диаметром 5 см, приводимые во вращение двигателями. Предметом исследования являются эффекты притяжения и отталкивания, возникаемые между вращающимися цилиндрами, а также изучается как эффекты зависят от взаимодействий циркуляций флюидов вокруг цилиндров. Объединения или сталкивание циркуляции ведёт к повышения или понижения давления в пространстве между цилиндрами, соответственно. Практический эксперимент проводился в воздушной стационарной вязкой среде при атмосферном давлении. Для визуального объяснения эффектов приводятся результаты численных симуляции для воздуха и воды при скорости вращения цилиндров RPM.~~

Ещё в 19 веке исследователи заметили [1] сходство эффекта магнетизма и вращающихся вихрей в вязкой жидкости, так же исследовали их практически [2] и с помощью численных симуляций [3]. Эта статья описывает практический эксперимент контролируемого притяжения и отталкивания в воздушной среде, показывающий возможность практического использования эффектов. Практический эксперимент проводился в воздушной стационарной среде при атмосферном давлении. Этот эффект станет решением для инженерной задачи бесконтактного взаимодействия между объектами, когда электрические или магнитные поля могут негативно повлиять на инженерную задачу. Описываемый эффект был обнаружен под вдохновением от изучения магнитных эффектов вызванных “спин” свойством электрона в проводниках с током, но, как будет показано в статье, похожие эффекты наблюдаются и в флюидных средах.

1. **Методология**

Оборудование для експеримента (**Fig. 1.**) состоит из двух гладких пластиковых цилиндров диаметром 50 мм и длиной 100 мм. Они приводятся во вращение двумя независимыми моторами от использованных жестких дисков, запитывающимися от источника постоянного тока 12 Вольт через контроллеры для бесколлекторных двигателей, расчитанных на потребление не больше 1.5 Ампер. Один из цилиндров подвешен на тонкой проволоке к каркасу, а второй находится в свободном положении для манипулирования им рукой. Подвешенное положение одного из цилиндров выбрано для улавливание очень слабого влияния эффекта. Проволока использовалась вместо нитки, чтобы уменьшить раскручивание цилиндра из-за свойств нити к раскручиванию при натяжении. Воздух вокруг установки будет играть роль вязкой среды через которую цилиндры будут взаимодействовать. Воздух стационарен с атмосферным давлением и температорой 25 ℃. Геометрические размеры цилиндров (1), (2), скорость вращения (3) и условия воздушной среде (4), (5), (6) используются для расчёта числа Рейнольдса (8) для практического експеримента. При включении обоих моторов, цилиндры раскручиваются до стабильной скорости приблизительно оборотов в минуту, что равно 26.2 м/c. Скорость вращения измерялась цифровым тахометром с точностью 0.05%.



**Рисунок. 1.** Экспериментальное оборудование

Характеристики эксперимента:

– радиус цилиндра = (1)

– длина цилиндра = 0.1 m(2)

– скорость вращения цилиндра (3)

– плотность воздуха при 25℃ (4)

*–* кинематическаявязкость воздуха при 25 ℃ (5)

*–* динамическая вязкость воздуха = (6)

(7)

Придав каждому цилиндру (Рисунок 2) вращение, пограничный слой воздуха будет образовываться на вращающемся теле вращения из-за условия прилипания к поверхности тела с эффектом «условия отсутствия проскальзывания», что означает, что на границе твердого объекта вязкая жидкость течет с нулевой скоростью относительно этой границы (Рисунок 3). Когда каждый цилиндр вращается, это создает очень тонкий «пограничный слой» вокруг цилиндра, воздух рядом с цилиндром просто вращается вместе с ним с той же скоростью (Рисунок 4). Цилиндр буквально тащит за собой воздух. А в следующий слоях вращение в вязкой среде создаёт безвихревую циркуляцию потока по окружности вокруг цилиндра.



**Рисунок 2.** Геометрия вращающегося цилиндра



**Рисунок 3.** Пограничный слой над вращающимся диском



**Рисунок 4.** Циркуляции вокруг цилиндра

Источник рисунков [4].

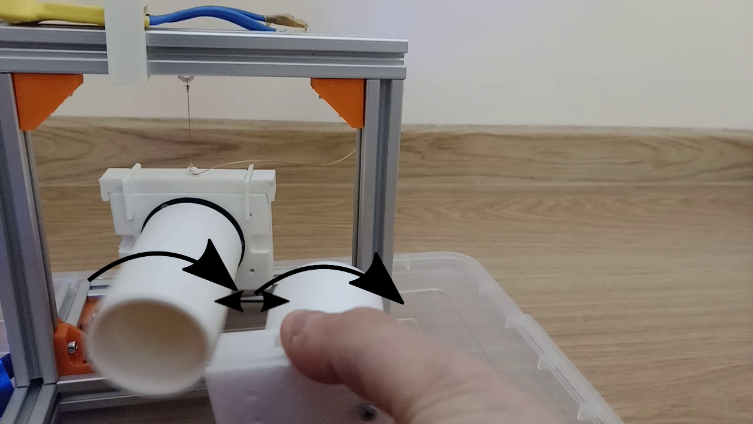
Для подтверждения причин наблюдаемых эффектов использовалось программное обеспечение для численной симуляции OpenFOAM версии 9 с алгоритмом PISO. Результаты вычислений и графики получены после работы симуляции длительностью 40 секунд. Результаты по 4 симуляциям представлены в статье. Разница между симуляциями представлена в (**Таблица 1.**)

**Таблица 1.** Параметры пограничного слоя и среды для разных симуляций

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Название | Условия пограничного слоя в симуляции  ( файл 0.orig/U ) | Параметры вязкости и давления среды  ( файл transportProperties ) |
| Притяжение в воздухе | code  #{  const fvPatch& boundaryPatch = patch();  const vectorField& Cf = boundaryPatch.Cf();  vectorField rot(Cf.size(), vector(0,0,0));  rot = -10000.0/60\*6.28\*vector(0,0,1)^(Cf-vector(0.075,0.0, 0.0));  operator==(rot);  #}; | transportModel Newtonian;  nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1.56e-05;  rho rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1.185; |
| Отталкивание в воздухе | code  #{  const fvPatch& boundaryPatch = patch();  const vectorField& Cf = boundaryPatch.Cf();  vectorField rot(Cf.size(), vector(0,0,0));  rot = 10000.0/60\*6.28\*vector(0,0,1)^(Cf-vector(0.075,0.0, 0.0));  operator==(rot);  #}; | transportModel Newtonian;  nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1.56e-05;  rho rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1.185; |
| Притяжение в воде | code  #{  const fvPatch& boundaryPatch = patch();  const vectorField& Cf = boundaryPatch.Cf();  vectorField rot(Cf.size(), vector(0,0,0));  rot = -10000.0/60\*6.28\*vector(0,0,1)^(Cf-vector(0.075,0.0, 0.0));  operator==(rot);  #}; | transportModel Newtonian;  nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 0.903e-06;  rho rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 997.3; |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Отталкивание в воде | code  #{  const fvPatch& boundaryPatch = patch();  const vectorField& Cf = boundaryPatch.Cf();  vectorField rot(Cf.size(), vector(0,0,0));  rot = 10000.0/60\*6.28\*vector(0,0,1)^(Cf-vector(0.075,0.0, 0.0));  operator==(rot);  #}; | transportModel Newtonian;  nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 0.903e-06;  rho rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 997.3; |

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ**

Изначально при заданных условиях эксперимента цилиндры вращаются в одном направлении, ручной цилиндр подносился к висячему цилиндру и на расстоянии около 7 и менее сантиметров наблюдалось отталкивание висячего цилиндра от ручного цилиндра (Рисунок 5).

**Рисунок 5.** Демонстрация отталкивания

Меняя условия эксперимента и вращая цилиндры в противоположные стороны, также ручной цилиндр подносился к висячему цилиндру. При этом наблюдалось притяжение висячего цилиндра к ручному на расстоянии 5 и менее сантиметров (Рисунок 6).

**Рисунок 6.** Демонстрация притяжения

При разбалансировке висячего цилиндра, для выполнения нескольких экспериментов подряд, приходилось либо останавливать висячий цилиндр балансировать его и медленно запускать, или замедлять его вращение на нити с помощью отталкивания или притяжения в воздушной среде. Что получалось достигнуть быстрее при взаимном отталкивании быстрее, чем при взаимном притяжении. Сила взаимопритяжения возрастала с приближением, и не убрав вовремя ручной цилиндр, их столкновение приводило к разбалансировке висячего цилиндра. Высокая скорость вращения и отсутствие точек опоры не позволяли уменьшать расстояние между цилиндрами меньше 3 миллиметров.

Исследуя статью [2] E. Dormy and H.K. Moffatt, в которой как раз описаны поведения потоков среды в условиях малого расстояния и контакта и отрицательного расстояния между двумя цилиндрами. В месте контакта суммарная сила взаимодействия F, состоящая из сил вязкости , сил давления и силы контакта равна нулю.

**Симуляция одного цилиндра**

По мере увеличения скорости движения пограничных слоев, вязкое воздушное течение обтекает цилиндр, формируя отдельные безвихревые циркуляции потоков воздуха в виде концентрических окружностей (Рисунок 7). При резком старте вращения цилиндра вначале могут наблюдаться вихревые потоки, но через несколько секунд циркуляция становилась безвихревой. Вязкое трение значительно влияет на поведение среды. Циркуляция потоков флюидов, обусловленная силами вязкого трения, возникает вокруг вращающегося цилиндра. В пограничной зоне воздуха и цилиндра давление самое низкое из-за высокой скорости потока (8), что согласуется с уравнением Бернулли для вязких флюидов:

(8)



**Рисунок 7.** Циркуляция одного цилиндра в симуляции со скоростью вращения об/мин

Скорость циркуляции флюидов вокруг цилиндра обратно пропорционально зависит от расстояния от цилиндра (9)(Рисунок 8).

**Рисунок 8.** Распределение скорости циркуляций вокруг одного цилиндра в симуляции со скоростью об/мин



(9)

При вращении цилиндр увлекает прилегающие слои воздуха, вызывая его циркуляцию. Безвихревые циркуляции вязкой среды охватывают всё пространство вне цилиндра, при условии безграничности пространства вокруг. Но если пространство ограничено, например стенками, то в районе стенок возникают завихрения. Но скорость потока в этих завихрениях намного меньше основного потока возле цилиндра, поэтому они не учитываются в наблюдениях эффектов. Чем больше вязкое трение, тем более стабильны циркуляции, и тем медленнее скорость циркуляции убывает, отдаляясь от цилиндра. Скорость течения жидкости различна у стенок и вдали от них. Если ввести поперечную (перпендикулярную к вектору скорости движения) координату расстояния от поверхности цилиндра *r*, то скорость жидкости есть функция этого расстояния v(*r*) (Рисунок 6). Эта зависимость определяется передачей импульса в поперечном направлении или иначе градиентом скорости, как и в случае вязкого газа (10):

(10)

Сила взаимодействия соседних слоев, соприкасающихся по поверхности S, равна (11):

(11)

Отдаляясь от цилиндров, скорость циркуляции уменьшается, сохраняя давление близким к стационарному, являющимся более высоким относительно вблизи цилиндра (Рисунок 9).

**Рисунок. 9.** Распределение кинематического давления одного цилиндра в симуляции

**Подготовка сетки для симуляции**

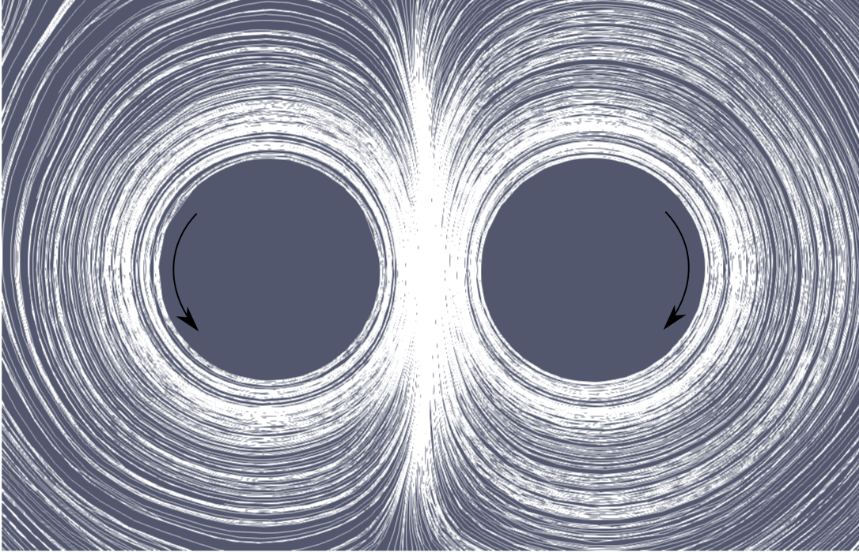
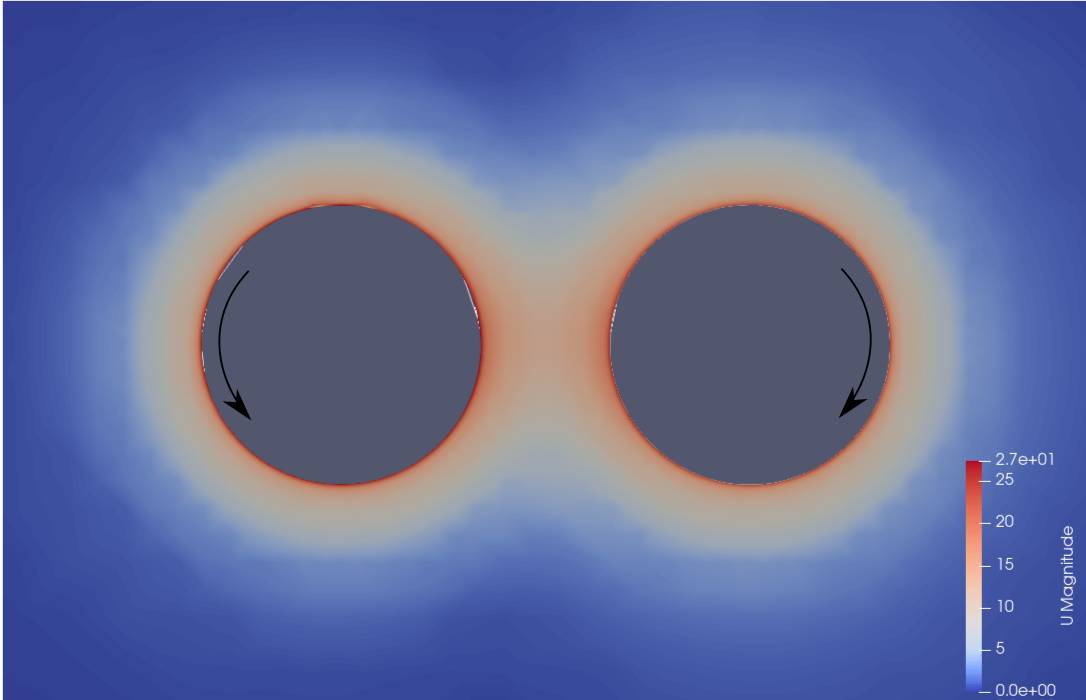
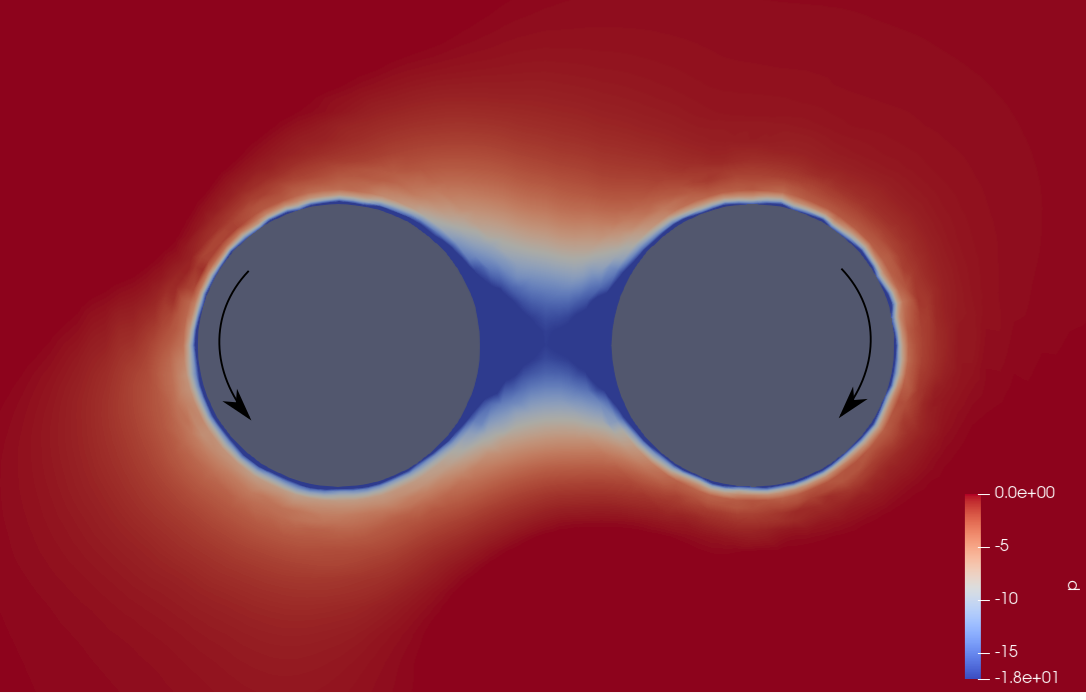
В области вблизи поверхности цилиндра, где требуется более высокая точность, используется мелкая сетка. Удаляясь от поверхности, сетка становится грубее (Рисунок 10).

****

**Рисунок 10.** Вычислительная сетка.

**Эффект флюидного притяжения в симуляции**

Два цилиндра диаметром 0.05 метра на расстоянии 0.025 метра друг от друга настраиваются на вращение в противоположных направлениях, например один цилиндр настраивается на вращение против часовой стрелки, а другой по часовой стрелке. Между цилиндрами потоки сходятся, поддерживая скорость циркуляции больше нуля, и понижая давление между ними (Рисунок 11). Скорость циркуляции потока флюидов между цилиндрами не уменьшается до нуля, она поддерживается за счёт циркуляции соседнего цилиндра (Рисунок 12). Разность давлений снаружи цилиндров и между цилиндрами создаёт притягивающую силу, действующую на каждый цилиндр в отдельности, направленную снаружи каждого цилиндра во внутрь пространства между цилиндрами (Рисунок 13).



**Рисунок 13.** Распределение воздушного давления в симуляции при разнонаправленном вращении пограничного слоя воздуха

**Рисунок 12.** Распределение скоростей воздушного потока в симуляции при разнонаправленном вращении пограничного слоя воздуха

**Рисунок 11.** Трассировка циркуляции воздушного потока в симуляции при разнонаправленном вращении пограничного слоя воздуха.

Сила, возникающая из-за разности внешнего и внутреннего давления , вычисляется с помощью формулы из определения давления:

(12)

(13)

Тогда сила равна произведению разности давлений на площадь поверхности испытующей давление:

(14)

Из результатов симуляции (Рисунок 14б) видно, что давление между цилиндрами:

. (15)



**Рисунок 14б.** График параметров потока воздуха вблизи и между цилиндрами при разнонаправленном вращении пограничного слоя воздуха: Кинематическое давление

**Рисунок 14a.** График параметров потока воздуха вблизи и между цилиндрами при разнонаправленном вращении пограничного слоя воздуха: Скорость потока

b)

Если задать давление вне цилиндров атмосферное стационарное как , потому что численная симуляция задаёт стационарное давления как , где скорость флюидов мизерна по сравнению со скоростью самого цилиндра, то разность давлений (13) относительно атмосферного равна:

(16)

Площадь контакта внешнего давления по направлению в пространство между цилиндрами равна половине поверхности цилиндра:

(17)

(18)

Используя разность давлений (13) и площадь контакта (17), сила (19) вычисляется как:

(20)

Используя формулы выше (12,18), вычислим силу . Для этого зададим для воды также как и для воздуха, а основные характеристики вода при 25 как:

(21)

(22)

= (23)

Внутреннее давление между цилиндрами дано из графика распределения кинематических давлений (Рисунок 15).

(24)

(25)

(26)

Используя разность давлений и площадь контакта , сила вычисляется как:

(27)

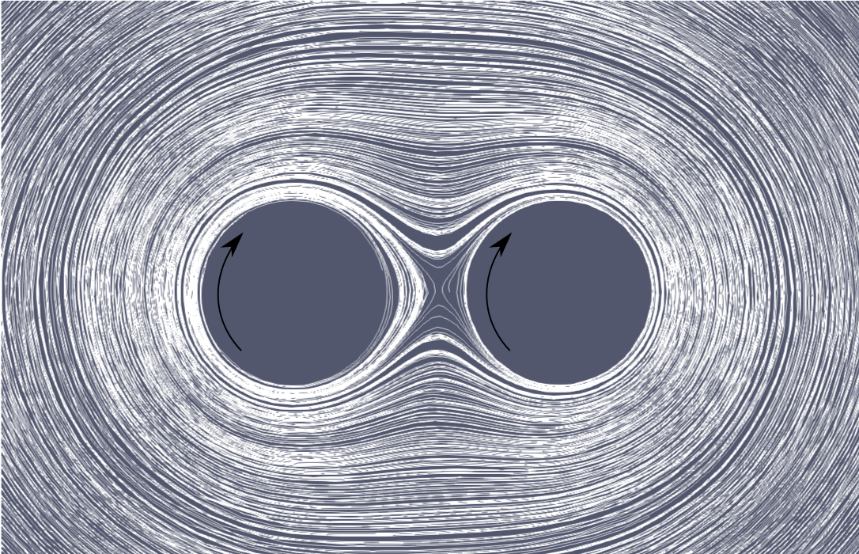
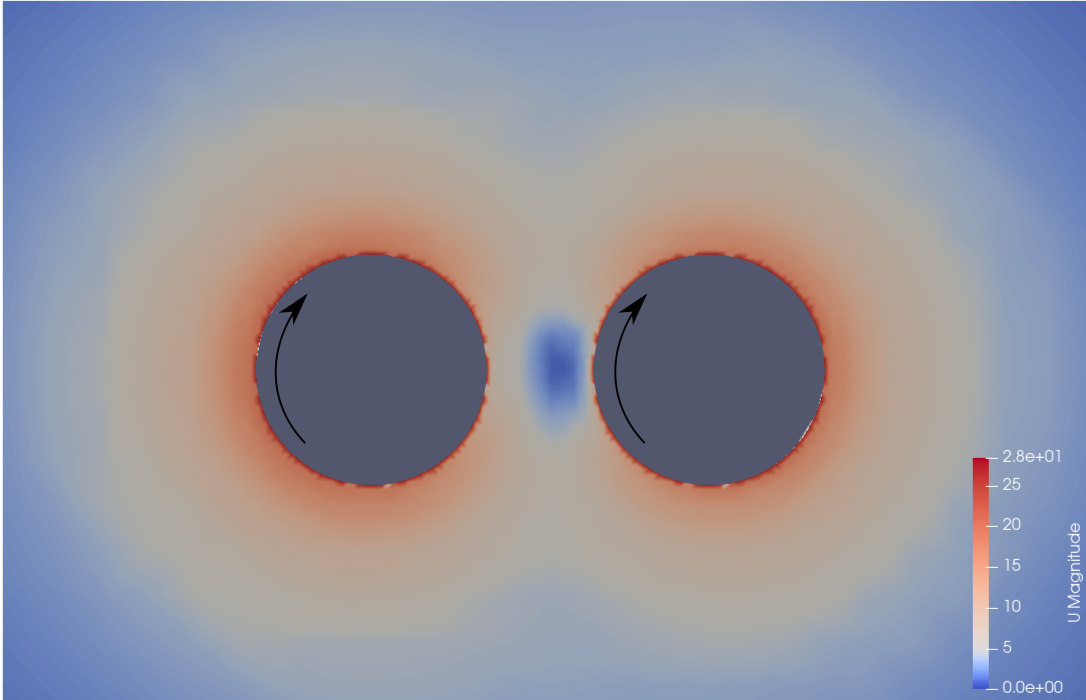
**График изменения кинематического давления в промежутке между цилиндрами при разнонаправленном вращении, от 0 до 3 секунд (Рисунок 16)

**Рисунок 16.** График падения давления между цилиндрами по времени в симуляции при разнонаправленном вращении пограничного слоя воздуха

**Рисунок 15.** График кинематического давления потока воды вблизи и между цилиндрами в симуляции при разнонаправленном вращении пограничного слоя воздуха

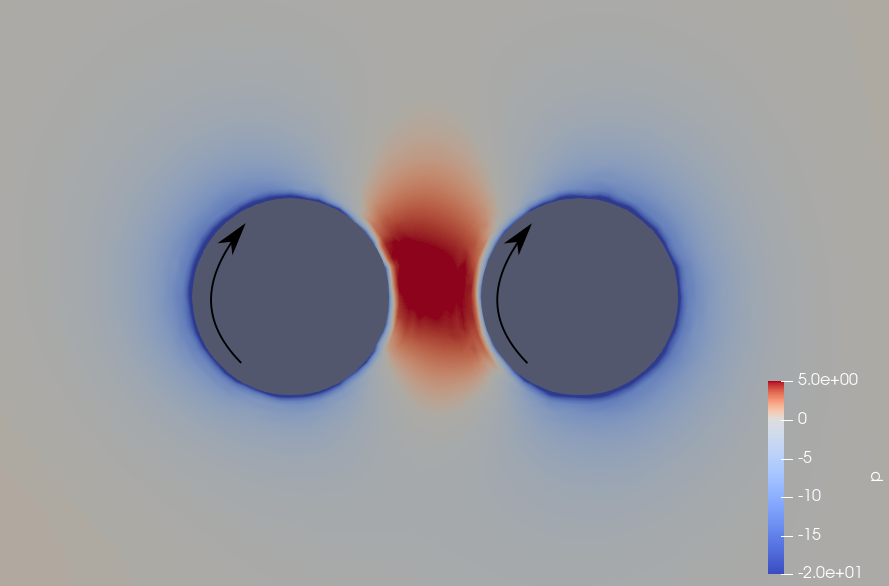
**Эффект флюидного отталкивания в симуляции**

Оба цилиндра настраиваются на вращение в одинаковых направлениях, например один цилиндр настраивается на вращение против часовой стрелки, а другой по часовой. По мере увеличения скорости их пограничные слои ускоряют поток воздуха вокруг каждого из них формируя отдельные потоки воздуха в виде концентрических окружностей. Поднося цилиндры ближе по мере увеличения скорости пограничного слоя, потоки воздуха вокруг цилиндров объединяются, формируя единый поток (Рисунок 16). Но не весь поток движется ламинарно вокруг цилиндров. Потоки воздуха у пограничного слоя цилиндра, придавленные внешним атмосферным давлением, всё ещё пытаются двигаться вокруг каждого из цилиндров. Но пытаясь двигаться между цилиндрами, встречают встречный поток от соседнего цилиндра. Это столкновение потоков останавливает циркуляцию в центре, а создаёт избыточное давление между цилиндрами (Рисунок 17). Это избыточное давление больше атмосферного и благодаря ему оба цилиндра стремятся оттолкнуться от зоны между цилиндрами. Также, из-за столкновения встречных циркуляционных потоков, скорость потоков между цилиндра стремится к нулю (Рисунок 18).



**Рисунок 17.** Распределение скоростей воздушного потока в симуляции при однонаправленном вращении пограничного слоя воздуха

**Рисунок 16.** Трассировка циркуляции воздушного потока в симуляции при однонаправленном вращении пограничного слоя воздуха.

******

**Рисунок 18.** Распределение воздушного давления в симуляции при однонаправленном вращении пограничного слоя воздуха

Используя формулы (12, 14, 17) и данные из графика (Рисунок 19а, 19б), сила отталкивания может быть посчитана как:

. (29)

(30)

(31)

(32)

(33)

(34)

****

**Рисунок 19а.** График кинематического давления потока вблизи и между цилиндрами в симуляции при однонаправленном вращении пограничного слоя для воздуха

**Рисунок 19б.** График кинематического давления потока вблизи и между цилиндрами в симуляции при однонаправленном вращении пограничного слоя для воды



1. **Выводы**

Эффекты притяжения и отталкивания между двумя вращающимися цилиндрами в несжимаемой вязкой жидкости численно исследуется для воздуха и водных жидкостей с использованием программного обеспечения OpenFOAM 9 с использованием решателя PISO. Скорость вращения устанавливается фиксированной , что соответствует числам Рейнольдса для воздуха, и для воды. Результаты полученные с помощью численных методов подтверждают наличие разности давлений, вызывающие эффекты притяжения и отталкивания в флюидной среде двух и более вращающихся цилиндров. Эта работа показала, что в воде по сравнению с воздухом эффекты более выраженны. При решении технических задач бесконтактного и немагнитного взаимодействия больше подходит водная среда или среда с более высокой динамической вязкостью, что обуславливает большую силу эффектов.

По результатам исследования замечена зависимости силы взаимодействия только от плотности среды и от скорости вращения цилиндров , которые напрямую влияют на разность создаваемого давления снаружи и внутри между цилиндрами. Кинетическая вязкость влияет на быстроту изменения давления. Чем меньше кинетическая вязкость, тем медленнее молекулы среды будут передавать импульс дальше от цилиндров, и достижение разницы давлений займёт больше времени.

Сила взаимодействия цилиндров растёт с ростом кинетической вязкости среды и скорости вращения цилиндров.

Взять за аналогию особую конфигурацию магнитов, например магнитную сборку Халбаха, и собрать такую же с микромоторами и цилиндрами, чтобы проанализировать отличие поведения магнитных силовых линий в магнитной сборке Халбаха и воздушной сборке.

Дополнительные материалы можно запросить на адреса электронной почты: [vadym.ostanin@gmail.com](mailto:vadym.ostanin@gmail.com), [vadym.ostanin@dxc.com](mailto:vadym.ostanin@dxc.com)

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Vilhelm Friman Koren Bjerknes “Fields of Force”, 1904, 149 p
2. Nukiyama. D. “On the Attraction between Two Rotating Parallel Cylinders in Some Viscous Liquids, Japanese Journal of Astronomy and Geophysics, Vol. 2, 193-207 p
3. E. Dormy and H.K. Moffatt 2020 “Flow induced by the rotation of two circular cylinders in a viscous fluid” 39 p
4. Peter R.N. Childs “[Rotating Flow](https://www.sciencedirect.com/book/9780123820983/rotating-flow)”, 2011, 389 p
5. Бутиков Е.И. Физика Кн.1 с. 352 p
6. Peter R.N. Childs.Rotating Flow,DOI: 10.1016/B978-0-12-382098-3.00006-8, Chapter 6
7. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Том 2. Электромагнетизм и материя, § 4. Циркуляция, § 1. Вязкость, § 2. Вязкий поток
8. Г. Биркгоф “Гидродинамика”, 1960, страницы 248 p
9. В.А. Бударин “Метод расчёта движения жидкости”, 2006,страницы 138 p
10. Б.Н. Юрьев “Экспериментальная аеродинамика” “Часть 1” “Теоретические основы экспериментальной аеродинамики”, 1939, страницы 282 p