УДК: 53.043, 532.5, 533.6.01, 533.16, 533.17

PACS: 47.10.-g, 47.32.-y

DOI:

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

**Vadym A. Ostanin**

03039, 16 Demiivska Str, Kyiv, Ukraine

**Вадим Олексійович Останін**

03039, Україна, Київ, вул. Деміївська 16

**Аннотация**

**Актуальность:** Из теории гидродинамики известно о взаимодействии пары вихрей в невязких 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 начинала 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 образуется 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:** Результаты исследования дают возможность детальнее понять процессы флюидного взаимодейтсвия, связывают зависимость силы взимодействия от параметров среды и цилиндров и показывают практическую возможность применения эффектов взаимодействия в флюидных средах.

**Ключевые слова:** Взаимодействие циркуляций, флюидные вихри, вращение цилиндров, численная симуляция

**INTRODUCTION**

Вдохновившись сходством эффектов электромагнетизма и вращающихся вихрей, и наличием исследований за 19 -20 век вихрей для водной и воздушной сред [1;2], обнаружил большинство исследований использующих для описания вихрей только численные симуляций [3-7]. Эта статья описывает практический эксперимент контролируемого притяжения и отталкивания вращающих объектов в воздушной среде, показывает возможность практического использования этих взаимодействий, и также применяет численную симуляцию для определения сил взаимодействия, используя значений кинетического давления. Практический эксперимент проводился в воздушной стационарной среде при атмосферном давлении. Этот эффект может стать решением для инженерной задачи бесконтактного взаимодействия между объектами, когда электрические или магнитные поля могут негативно повлиять на инженерную задачу.

**MATERIALS AND METHODS**

Оборудование для експеримента (Рисунок 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 улавливания 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 769 мм.рт.ст. и температорой 25 ℃. Геометрические размеры цилиндров, скорость вращения и условия воздушной среде используются для расчёта числа Рейнольдса (1) 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

(1)

где – радиус цилиндра = ;

– лина цилиндра = 0.1 m*;*

– скорость вращения цилиндра ;

– плотность воздуха при 25℃ ;

*–* кинематическаявязкость [8] воздуха при 25 ℃ ;

*–* динамическая вязкость воздуха = .

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

*Source: [9]*



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

*Source: [9]*



**Рисунок 4. Циркуляция вокруг цилиндра**

*Source: [9]*

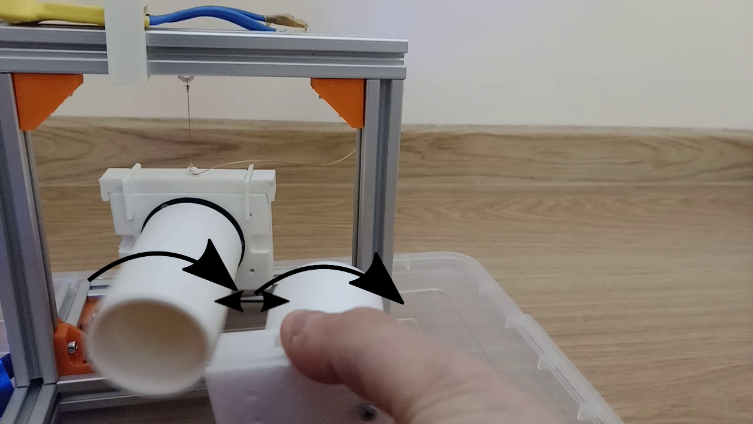
Для подтверждения причин наблюдаемых эффектов использовалось программное обеспечение для численной симуляции OpenFOAM версии 9 с алгоритмом PISO. Результаты вычислений и графики получены после работы симуляции длительностью 40 секунд. Результаты по 4 симуляциям представлены в статье. Разница между симуляциями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

**Таблица 1.** Параметры пограничного слоя и среды для разных симуляций в OpenFOAM9

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Название | Условия пограничного слоя в симуляции одного из двух цилиндров  ( файл 0.orig/U ) | Параметры кинематической 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; |

**RESULTS AND DISCUSSION**

При первом запуске моторы цилиндров вращаются в одном направлении, ручной цилиндр подносится к висячему цилиндру и на расстоянии около 7 и менее сантиметров наблюдается отталкивание висячего цилиндра от ручного цилиндра. Чем ближе приближается ручной цилиндр, тем больше отталкивается висячий цилиндр, и создаваемая потоками сила достаточна, чтобы удерживать висячий от соприкосновения с ручным цилиндром, и не позволять висячему вернуться к равновесному положению натянутой проволоки (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). Вовремя не убрав ручной цилиндр часто приводило к контакту и разбалансировке висячего цилиндра.



**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.

Создаваемые цилиндрами вихри, схожи с вихрями, зарождаемыми под толщей воды в потоках с отрицательным продольным градиентом скорости вблизи твердой границы [10]. Пара природных вихрей являются нестабильными [11] и стремятся объединиться при однонаправленном вращении [12], а при противоположном вращении разрушение вызывает развитие неустойчивости Кроу, что приводит к множественным искривлениям вихрей [13]. Схожие процессы и результаты продемонстрировали E. Dormy and H.K. Moffatt [14]. Они описывают поведения потоков среды в условиях малого расстояния, 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 [15,16] (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 (2), что согласуется с уравнением Бернулли для вязких флюидов:

(2)



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

Скорость циркуляции флюидов вокруг цилиндра обратно пропорционально зависит от расстояния от цилиндра (3) (Рисунок 8).



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

(3)

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 (4):

(4)

Сила взаимодействия соседних слоев, соприкасающихся по поверхности S, равна (5):

(5)

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



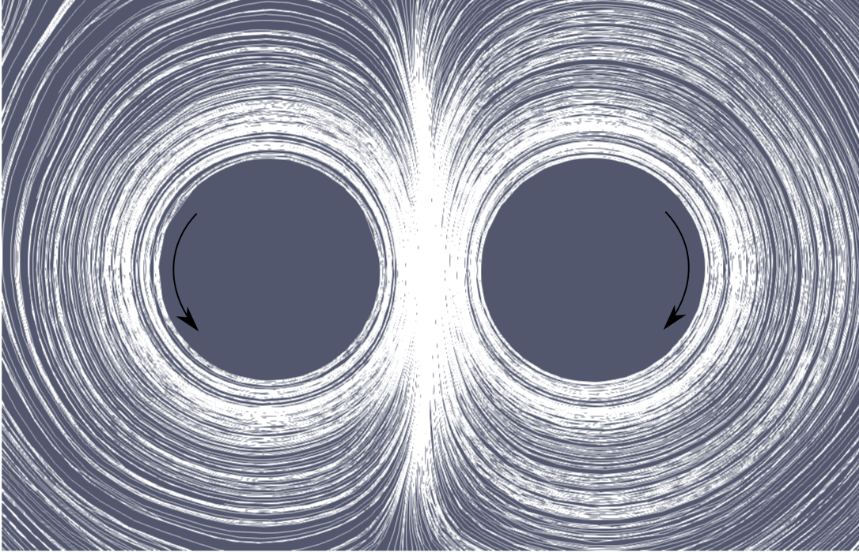
**Рисунок. 9.** Распределение кинематического давления одного цилиндра в симуляции

***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).

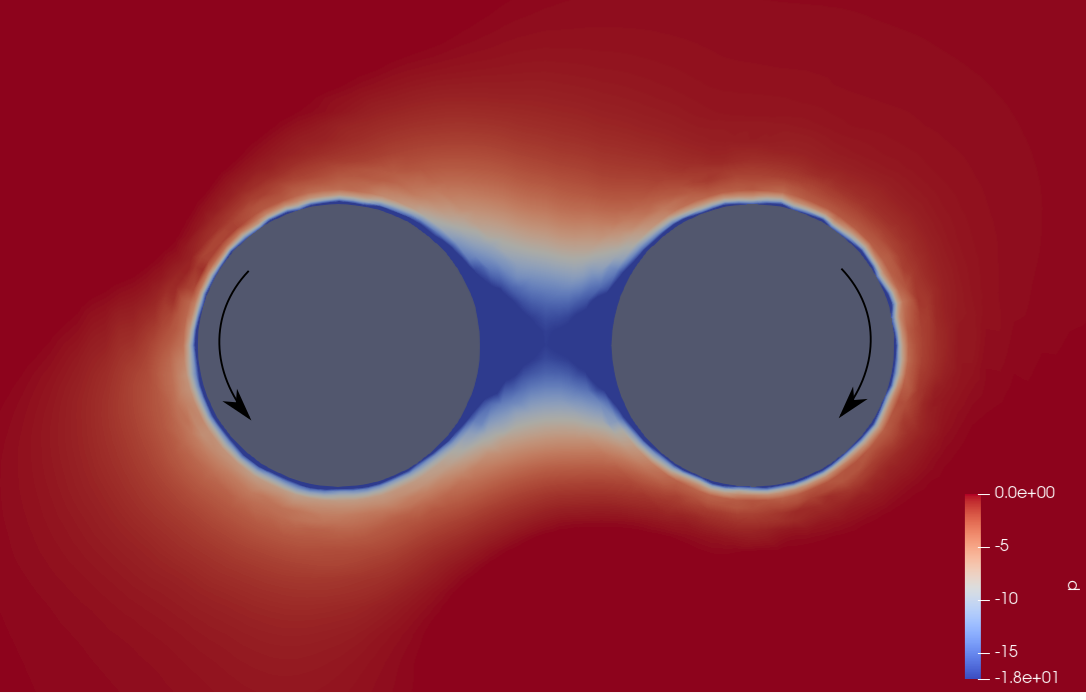
****

**Рисунок 10.** Вычислительная сетка.

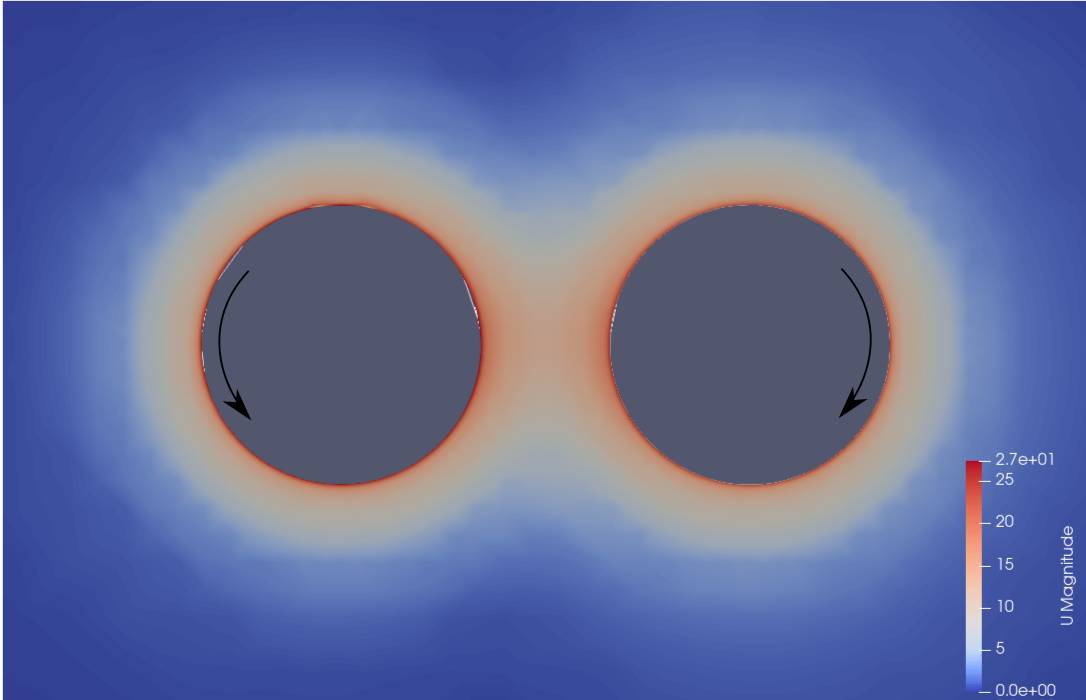
**Эффект флюидного притяжения в симуляции**. Два цилиндра диаметром 0.05 метра на расстоянии 0.025 метра друг от друга настраиваются на вращение в противоположных направлениях, например один цилиндр настраивается на вращение против часовой стрелки, а другой по часовой стрелке. Между цилиндрами потоки 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 11.** Трассировка циркуляции воздушного потока в симуляции при разнонаправленном вращении пограничного слоя воздуха



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



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

Сила, возникающая из-за разности внешнего и внутреннего давления , вычисляется с помощью формулы из определения давления (6), а разница давлений как (7)[12]:

(6)

(7)

Тогда сила равна произведению разности давлений на площадь поверхности, испытующей давление (8):

(8)

Из результатов симуляции (Рисунок 14б) видно, что минимальное давление между цилиндрами равно (9):

. (9)



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



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

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 (7) относительно атмосферного равна (10):

(10)

Площадь контакта внешнего давления по направлению в пространство между цилиндрами равна половине поверхности цилиндра (11) (12):

(11)

(12)

Используя разность давлений (10) и площадь контакта (12), сила вычисляется как (13):

(13)

Используя значения (12,18), вычислим силу . Для этого зададим для воды также как и для воздуха, а основные характеристики вода при 25 как (14, 15, 16):

(14)

(15)

= (16)

Кинематическое давление между цилиндрами дано из графика (Рисунок 15), приводится к изменению динамического давления (17, 18, 19).

(17)

(18)

(19)

Используя разность динамических давлений и площадь контакта , сила вычисляется как (20):

(20)

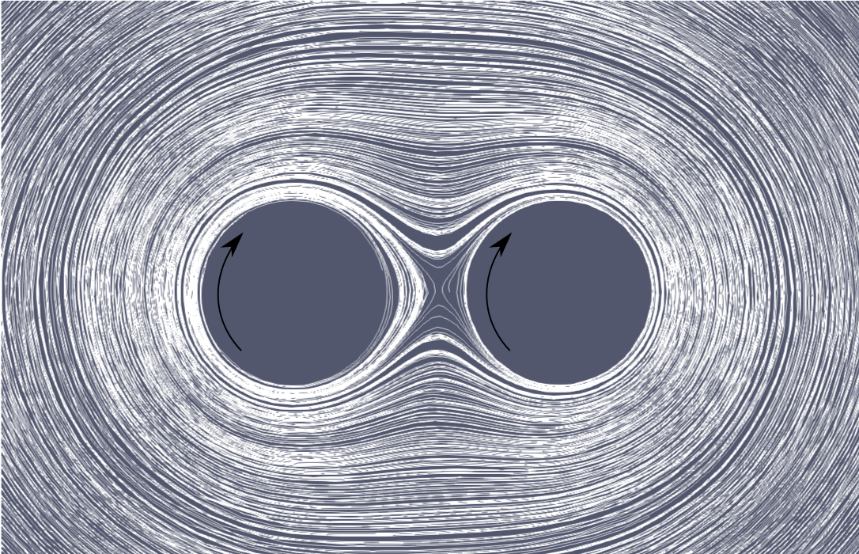
**

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

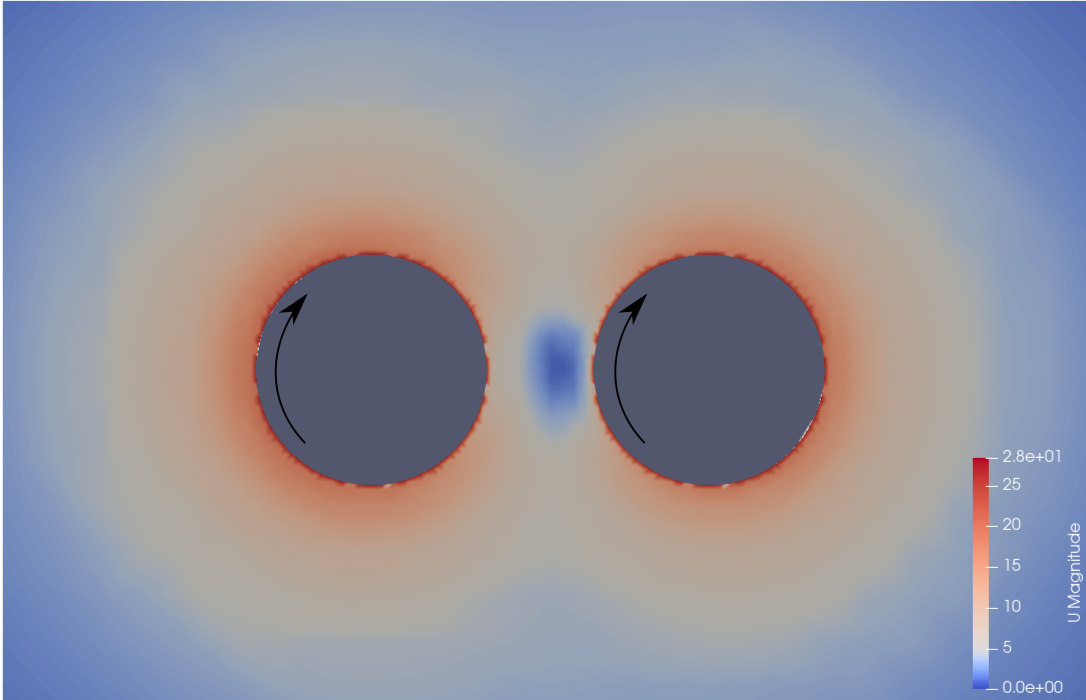
**Рисунок 16.** График падения давления между цилиндрами по времени в симуляции при разнонаправленном вращении пограничного слоя воздуха и воды

Приведен график для наглядного анализа разницы в скорости изменения кинематического давления для воды и воздуха в промежутке между цилиндрами при разнонаправленном вращении, от 0 до 3 секунд (Рисунок 16)

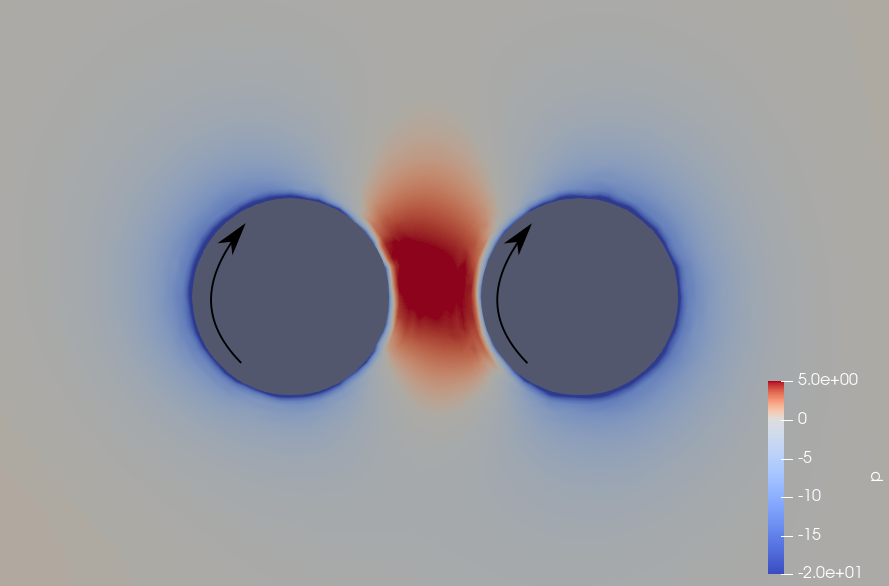
***Эффект флюидного отталкивания в симуляции.*** Оба цилиндра настраиваются на вращение в одинаковых направлениях, например один цилиндр настраивается на вращение против часовой стрелки, а другой по часовой. По мере увеличения скорости их пограничные слои ускоряют поток воздуха вокруг каждого из них 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 17). 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 18). 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 19).



**Рисунок 17.** Трассировка циркуляции воздушного потока в симуляции при однонаправленном вращении пограничного слоя воздуха



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

******

**Рисунок 19.** Распределение воздушного давления в симуляции при однонаправленном вращении пограничного слоя воздуха

Используя формулы (7, 8, 11) и данные из графика (Рисунок 20а, 20б), разность динамического давления и вычисляются как (21, 22, 24, 25), а силы отталкивания и вычисляются как (23, 26):

. (21)

(22)

(23)

(24)

(25)

(26)

****

**Рисунок 20а.** График кинематического давления потока вблизи и между цилиндрами в симуляции при однонаправленном вращении пограничного слоя для воздуха



**Рисунок 20б.** График кинематического давления потока вблизи и между цилиндрами в симуляции при однонаправленном вращении пограничного слоя для воды

**CONCLUSIONS**

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. Также присутствует прямая зависимость силы взаимодействия от плотности среды, от скорости вращения цилиндров и расстояния между цилиндрами 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 передавют импульс дальше от цилиндров, и достижение наибольшей разницы давлений займёт больше времени. У воздуха кинематическая вязкость выше, поэтому он быстрее достигает своей наибольшей разницы давлений, а вода медлеенее. Но в воде благодаря высокой плотности достигается большая сила взаимодействия. При решении технических задач бесконтактного и немагнитного взаимодействия больше подходит водная среда или среда с более высокой плотностью, что обуславливает большую силу эффектов.

Продолжение исследований вижу в создании модели конфигураций магнитов, например магнитная сборка Халбаха, в симуляции, а также физический експеримент с микромоторами и цилиндрами, чтобы проанализировать отличие поведения магнитных силовых линий в магнитной сборке Халбаха и цилиндровой сборке в воздушной среде.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Tanasheva, Nazgul & Nussupbekov, Bekbolat & Dyusembaeva, A. & Shuyushbayeva, N.. (2019). Analysis of Aerodynamic Characteristics of Two Parallel Rotating Cylinders. Technical Physics. 64. 947-949 p. 10.1134/S1063784219070247
2. Christopher P. Hills, Flow Patterns in a Two‐Roll Mill, The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Volume 55, Issue 2, May 2002, 273–296 p. https://doi.org/10.1093/qjmam/55.2.273
3. Hussain KTI, Jothi TJS. Vortex ring propagation and interactions studies. Sādhanā. 2018; https://doi.org/10.1007/s12046-018-0843-9.
4. Price TJ, Mullin T, Kobine JJ. Numerical and experimental characterization of a family of two-roll-mill flows. Proc Roy Soc. 2002;459:117-135. http://doi.org/10.1098/rspa.2002.1022
5. Ren H, Zhang G X and Guan H S 2015 Three-dimensional numerical simulation of a vortex ring impinging on a circular cylinder. Fluid Dyn. Res. 47: <https://doi.org/10.1088/0169-5983/47/2/025507>
6. Watson, E.J. 1995 The rotation of two circular cylinders in a viscous fluid. Mathematika 42, 105–126 p.
7. Dritschel DG. 1995. A general theory for two-dimensional vortex interactions. J. Fluid Mech.293:269–303 p.
8. Speight, James. Rules of Thumb for Petroleum Engineers. Kinematic Viscosity. 2017. 755 p. https://doi.org/10.1002/9781119403647.ch209
9. Childs PRN. [Rotating Flow](https://www.sciencedirect.com/book/9780123820983/rotating-flow). Philadelphia: Elsevier Inc; 2011. 389 p.
10. Melnykova ON. Channel flow dynamics. Moscow: Max Press; 2006. 133 p.
11. Leweke T, Le Dizes S, Williamson CHK. Dynamics and instabilities of vortex pairs. Annual Review of Fluid Mechanics. 2016;48:507-541 p. http://dx.doi.org/10.1146/annurev-fluid-122414-034558
12. Le Dizès S, Verga, A. Viscous interactions of two co-rotating vortices before merging. Journal of Fluid Mechanics. 2002;467:389-410 p. https://doi.org/10.1017/S0022112002001532.
13. Johnson HG, Brion V, Jacquin L. Crow instability: nonlinear response to the linear optimal perturbation. Journal of Fluid Mechanics. 2016;795:652-670 p.
14. Dormy E, Moffatt HK. Flow induced by the rotation of two circular cylinders in a viscous fluid. Fluid Dynamics; 2020. https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.04432.
15. Gadzhiev DA, Gaifullin AM, Zubtsov AV. On vortex generation by a rotating cylinder. Fluid Dynamics. 2020;55:965-981 p. <https://doi.org/10.1134/S0015462820080042>
16. Armengol J, Calbó J, Pujol T, Roura P. Bernoulli correction to viscous losses. Radial flow between two parallel discs. American Journal of Physics. 2008;76(8): 730 p.