

**Деменов С. Л.**

**ЛЕВИТАЦИЯ ШАРА  
В СТЕСНЕННОМ ПОТОКЕ**

СТРАТА  
Санкт-Петербург  
2017

С. Л. Деменок

# ЛЕВИТАЦИЯ ШАРА В СТЕСНЕННОМ ПОТОКЕ

СТРАТА  
Санкт-Петербург  
2017

УДК 532.546:536.24

ББК 30.124:31.31

Д 30

**Деменок С. Л**

Д 30 Левитация шара в стесненном потоке/Сергей Деменок. —  
СПб.: Страта, 2017. — 130 с., с илл.

ISBN 978-5-9909788-3-6

Монография рассматривает вопрос применения гидроаэродинамической левитации для повышения эффективности энергетических аппаратов.

От основных физических эффектов левитации автор переходит к частным случаям левитации шара в стесненном потоке и ее применению в различных технических приложениях для обеспечения высокой эффективности теплового и массообменного оборудования. Через фундаментальные исследования и грамотно выполненные инженерные решения раскрываются новые возможности для энергосбережения на нефтехимических, химических и других предприятиях.

Монография предназначена для специалистов-теплотехников, занимающихся решением теоретических и прикладных задач по тепло- и массообмену. Может быть полезна для студентов, обучающихся по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника», «Ядерная энергетика и технологии», «Физика», «Физико-технические науки и технологии».

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельцев.

All rights reserved. No parts of this publication can be reproduced, sold or transmitted by any means without permission of the publisher.

УДК 532.546:536.24

ББК 30.124:31.31

ISBN 978-5-9909788-3-6

© Деменок С. Л., 2017, текст  
© «Страта», 2017

*Главное — не прекращать  
задавать вопросы.*

*Альберт Эйнштейн*



# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. БАЗОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ.....	9
1.1. Притягивающее — отталкивающее действие струи на тело.....	9
1.2. Эффект Коанда.....	10
1.3. Эффект Магнуса.....	12
1.4. Парадокс Эйлера – Даламбера.....	14
1.5. Эффект Эйфеля.....	17
1.6. Струйное обтекание цилиндра.....	19
1.7. Струйное обтекание шара.....	20
1.8. Эффект левитации тел вращения в стесненном потоке.....	22
1.9. Модель обтекания шара в стесненном потоке.....	27
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛЕВИТАЦИИ ШАРА.....	33
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЯЧЕЙКИ С ЛЕВИТИРУЮЩИМ ШАРОМ.....	44
ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЛЕВИТАЦИИ ШАРА В ТРУБАХ И КАНАЛАХ.....	48
4.1 Гидродинамика.....	48
4.2 Интенсификация теплообмена.....	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ЛЕВИТАЦИЯ И ОЛУНЕНИЕ.....	72
Приложение 1.....	77
Приложение 2.....	93
Приложение 3.....	106
Список литературы.....	126

## ВВЕДЕНИЕ

В мистических текстах о левитации упоминается о сверхъестественной способности преодолевать силу притяжения Земли без каких либо устройств. Однако современные инженеры создали немало практических устройств, производящих эффект левитации. Одна из самых известных таких машин — это левитирующий поезд Маглев. Вот уже несколько десятилетий по железным дорогам в разных частях света передвигаются «летающие поезда» на магнитной подушке (рис. 1).



Рис. 1. Левитирующий поезд Маглев



Рис. 2. Левитирующий диван



Рис. 3. Левитирующая лампочка

Еще одно новейшее изобретение — левитирующий диван «Облачная софа», использующий в своей конструкции принцип магнитной левитации. Софа состоит из двух частей — стоящей на полу платформы и зависшего над ней матраса в виде пушистого облака. Такой диван позволяет вам, расслабившись на нем, буквально парить в воздухе (рис. 2).

Не менее удивительным устройством является левитирующая лампочка Flyte (рис. 3). Хотя концепция беспроводной передачи электроэнергии впервые была предложена Николой Тесла еще в начале XX века, использовать ее начинают только сейчас.

Шведский изобретатель Саймон Моррис захотел изменить классическую конструкцию лампочки, которая не менялась в течение последних 135 лет. Это может показаться нереальным, но лампочка Морриса может работать получая энергию из окружающего воздуха! Лампочка Flyte является беспроводной лампочкой, которая парит в воздухе над небольшим деревянным основанием, в которое встроены магниты.

Вот как это работает: деревянное основание лампочки подключается к обычной электросети. Далее электроэнергия передается без проводов от основания к лампочке с помощью индуктивной технологии, уже используемой в беспроводных зарядных устройствах для смартфонов. Чтобы заставить лампочку левитировать, нужно просто поместить ее в центр основания, после чего она взлетит в воздух и начнет вращаться.

У этого изобретения есть еще одна возможность применения — Flyte можно использовать в качестве беспроводного зарядного устройства для телефонов. Нужно просто положить смартфон на деревянное основание, чтобы он начал заряжаться.

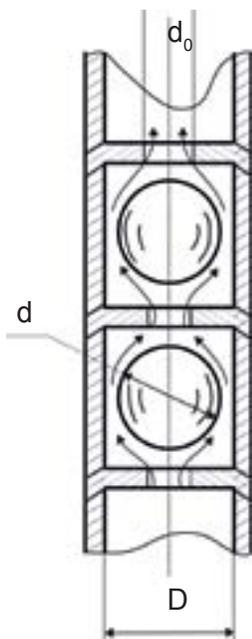


Рис. 4. Тепловая труба с левитирующими шарами

Описанный в предыдущих примерах принцип магнитной левитации имеет множество технических применений. В широком смысле левитация (от лат. *levitas* «легкость, легковесность») есть преодоление гравитации. Традиционно левитацией считается отталкивание от воздуха, как в случае насекомых, птиц, аэропланов и ракет. Однако аэродинамическая левитация возможна. Так, например, шар в канале, омываемый потоком газа или воды, ведет себя так, словно гравитации не существует вовсе (рис. 4). Если начать вращать канал, как показано на рисунке, то в поведении шара ничего не изменится. Шар продолжает вращаться и вибрировать, не обращая внимания в горизонтальном или вертикальном положении находится канал, в котором он размещен.

Это вращение и пульсация шара способствует уменьшению толщины пограничного слоя и может интенсифицировать теплообмен от стенок канала к потоку теплоносителя внутри канала. Поэтому гидроаэродинамическая левитация находит свое применение в тепло- и массообменном оборудовании. Подвижные турбулизаторы потока (в нашем случае это шар) способны обеспечивать высокую эффективность теплового и массообменного оборудования.

Как показано в настоящей работе, для интенсификации теплообмена не следует применять турбулизаторы с резкими очертаниями, так как в мощных вихрях, возникающих до них и за ними, диссипация энергии соизмерима или даже больше выработки турбулентности, что связано с большими гидравлическими сопротивлениями, а значит, и низкой энергетической эффективностью. Одинаковая (избыточная над диссипацией) выработка турбулентности у плавно и резко очерченных турбулизаторов достигается при существенно различных гидравлических потерях. У плавно очерченных турбулизаторов эти потери много меньше. В связи с этим шаровые, овальные или яйцевидные турбулизаторы перспективны для использования в теплообменниках и напряженных деталях тепловых двигателей.

Настоящая работа представляет собой введение в область технического использования эффекта гидроаэродинамической левитации в технических приложениях, большинство из которых связано с повышением эффективности энергетических аппаратов.

## Глава 1

### БАЗОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Одно из применений уравнения Бернулли связано с эффектами притяжения и отталкивания тел струями. С одной стороны, струя может эжектировать окружающую среду, притягивать тела или сама притягиваться к телам за счет более низкого давления в струе по сравнению с давлением в окружающей среде. С другой стороны, струя выталкивает находящееся в ней тело, причем, по мере выравнивания давлений в струе и в окружающей среде, проявляется ударное действие струи на препятствие.

Опишем связанные с указанными свойствами струи известные физические эффекты.

#### 1.1. Притягивающее — отталкивающее действие струи на тело

Пусть струя вытекает из сопла с плоской шайбой. Небольшое плоское тело разместим перпендикулярно струе. По мере приближения тела к шайбе возрастает скорость радиальных потоков жидкости между телом и шайбой, давление в этой области становится меньше давления в окружающей среде, и тело притягивается к соплу до тех пор, пока притяжение не будет компенсировано выталкивающим действием струи [2.]–[5.].

Этот эффект лежит в основе прибора Клемана — Дезорма, описанного, например, в [3, с. 107]. На конце сопла диаметром  $\approx 100$  мм установлена шайба диаметром  $\approx 200$  мм, к которой на стержнях прикреплен диск диаметром  $\approx 200$  мм (рис. 1.1).

Вдоль стержней диск может свободно перемещаться на расстояние до 20 мм от шайбы. Струя прижимает диск к шайбе настолько сильно, что подача воздуха почти прекращается, и диск падает под действием силы тяжести. Подача воздуха снова увеличивается — и диск поднимается. В силу кратковременности описанных явлений визуально наблюдается сближение дисков, сопровождаемое шумом от ударов диска о шайбу.

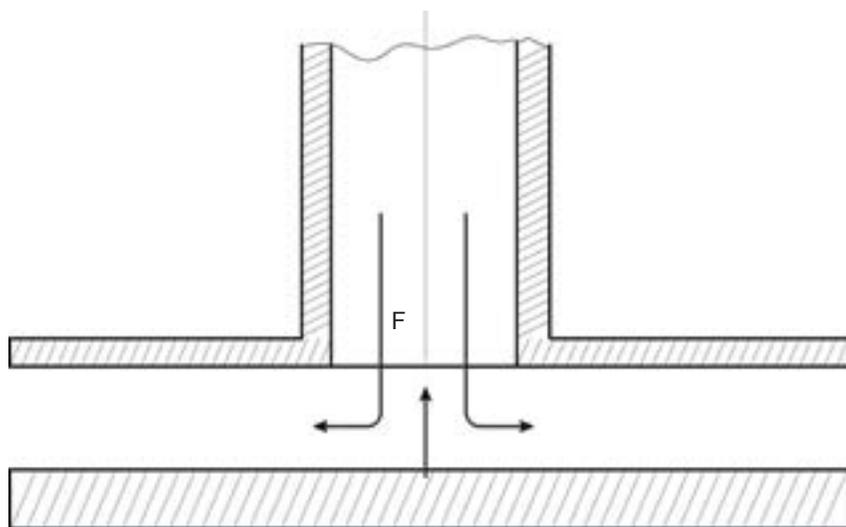


Рис. 1.1. Прибор Клемана – Дезорма



Более подробно принцип работы прибора Клемана – Дезорма вы сможете посмотреть по данной ссылке, сканировав код.

<http://levitation.htri.ru/video-4.html>

## 1.2. Эффект Коанда

В 1910 г. румынский инженер Анри Коандэ, ученик Александра Густава Эйфеля, студент Высшей Школы Аэронавтики (École Supérieure Aeronautique) обратил внимание, что раскаленные выхлопные газы двигателя реактивного самолета выходят в опасной близости от деревянного фюзеляжа. Для его защиты он установил отражающие металлические пластины. Но во время очередного полета самолет Коанда потерпел аварию из-за того, что пластины притягивали пламя.

Американский ученый, специалист в области воздухоплавания Теодор Карман исследовал новое явление и назвал его эффектом Коанда.

Сам Коандэ, позднее стал главным инженером Бристольской авиастроительной компании, но изучением этого вопроса в дальнейшем занимался мало. Прошло более четверти века, пока другие исследователи заинтересовались данной проблемой [7], [11].

Эффект Коанда наблюдается и при истечении струй жидкости в пространство, заполненное менее плотной средой. Так, если к струе воды, вытекающей из крана, поднести цилиндрическое тело, то струя, коснувшись тела, притянется к нему и, частично огибая тело, отклонится от своего первоначального положения. Об этом свойстве струи писали еще Юнг в 1800 г. [6], Рейнольдс в 1870 г. [10] и другие.

Каждый может наблюдать, как вода, вытекающая из носика чайника, стекает по его стенкам. Келлер назвал подобные проявления эффекта Коанда «эффектом чайника» [8]. Несмотря на то, что такое явление наблюдается при малых скоростях движения жидкости, Келлер утверждает, что оно не связано ни с вязкостью, ни с капиллярностью жидкости и определяется только разностью между давлениями в текущей жидкости и в окружающей среде. Вследствие эффекта Коанда струя прилипает к поверхности и движется по ней (рис. 1.2).

Струи жидкостей и газов отклоняются вследствие перепада давления, возникающего поперек струи и преодолевающего действие центробежных сил. Однако возникает этот перепад в силу разных причин и в деталях вариант затопленной струи и струи со свободной внешней границей существенно различаются [6]. Эжекция жидкости из окружающего пространства играет определяющую роль для затопленной струи. Отсос жидкости из ограниченного пространства между струей и прилегающей твердой границей приводит к понижению местного давления и возникновению перепада давлений поперек струи. В то же время затопленная струя, в силу эжекции, при удалении от сопла постоянно расширяется, скорость в ней уменьшается, а давление повышается [9]. Нарастание давления, в конце концов, приводит к отрыву струи от стенки. В случае истечения струи со свободной внешней границей, например, воды в атмосферу, массообмен на внешней границе струи практически отсутствует, вязкость жидкости проявляется слабо, и течение жидкости в струе может быть рассмотрено в рамках модели потенциального течения [6].

К настоящему времени эффект Коанда широко применяется в различных областях техники для интенсификации рабочих процессов или повышения их экономичности [6]–[17].

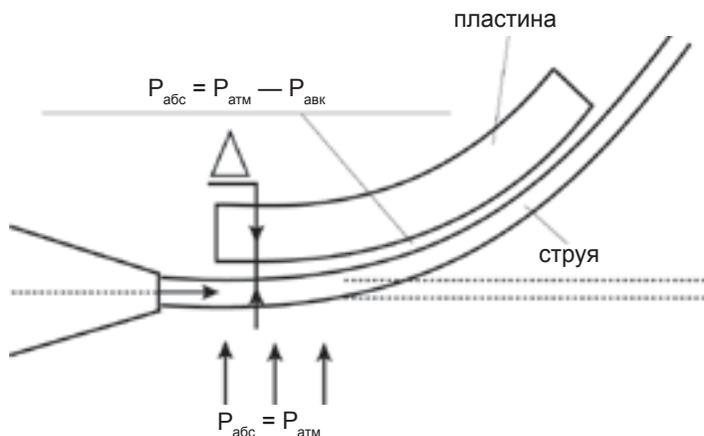


Рис. 1.2. Схема, поясняющая эффект Коанда



Эффект применяют в кондиционерах для создания эффекта прилипшей струи для лучшего циркулирования воздуха в помещении, а также в современных безлопастных вентиляторах.

<http://levitation.htri.ru/video-3.html>

### 1.3. Эффект Магнуса

Эффект Магнуса возникает при обтекании вращающегося цилиндра или шара потоком жидкости или газа. Образуется сила, воздействующая на тело и направленная перпендикулярно направлению потока (рис. 1.3).

Если твердый цилиндр (или шар) вращается вокруг продольной оси в набегающем перпендикулярно этой оси потоке, то он увлекает во вращение прилегающие к нему слои жидкости или газа; в результате окружающая среда движется относительно цилиндра не только поступательно, но еще и вращается вокруг него. С той стороны, где направление

поступательного и вращательного движения совпадают, результирующая скорость движения окружающей среды превосходит скорость набегающего на цилиндр потока. А с противоположной стороны цилиндра скорость прилегающих к его поверхности слоев жидкости или газа меньше скорости набегающего потока.

Из уравнения Бернулли известно, что в тех точках, где скорость больше, давление понижено, и наоборот. Таким образом, на вращающийся цилиндр с разных сторон действуют разные силы. В итоге появляется результирующая сила, которая всегда направлена перпендикулярно направлению потока.

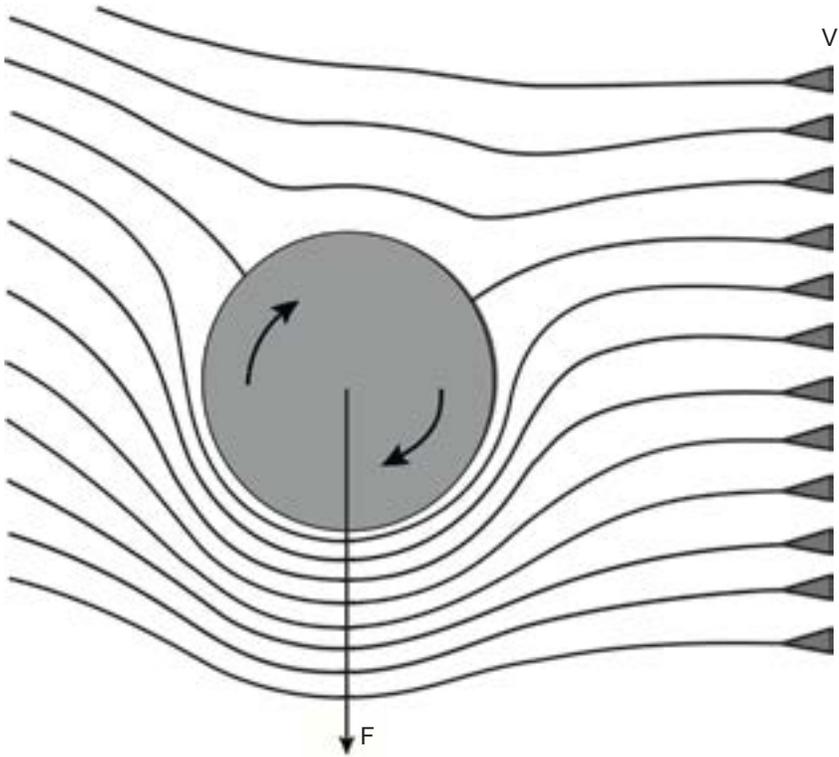


Рис. 1.3. Эффект Магнуса



Видео о практическом применении эффекта Магнуса можно посмотреть, сканировав код.

<http://levitation.htri.ru/video-1.html>

#### 1.4. Парадокс Эйлера – Даламбера

Парадоксом называется суждение, которое противоречит опыту, интуиции или «здравому смыслу». Парадокс Эйлера – Даламбера — это один из самых известных парадоксов в гидродинамике. В 1742 году петербургский академик Леонард Эйлер рассчитал сопротивление цилиндра, движущегося в жидкости, лишенной трения, и получил удивительный результат: сила сопротивления оказалась равной нулю! Спустя семь лет выдающийся французский механик Жан Лерон Д’Аламбер с помощью изящных ухищрений рассчитал обтекание произвольного тела конечного объема и получил все тот же ошеломляющий результат — нулевое сопротивление.

Такой вывод явно вступает в противоречие со «здравым смыслом». Даламбер, как и каждый из нас, из личного опыта знал, что для поддержания движения к телу необходимо приложить силу, преодолевающую силу сопротивления потока жидкости или газа. Именно поэтому летательные аппараты, корабли и подводные лодки снабжены двигателями. Даламбер не смог объяснить полученный результат и с горечью заметил: нулевое сопротивление — единственный парадокс, разрешение которого я оставляю геометрам будущих времен.

Все дело в том, что модель, которую приняли Эйлер и Даламбер, предполагала симметричное обтекание тела. Распределение давлений при этом симметрично относительно миделевого сечения тела, а результирующая сил давления равна нулю. Такая модель игнорирует влияние трения и срыв потока с поверхности тела. Математическая модель, использованная Эйлером и Даламбером, оказалась слишком упрощенной.

Реальные течения несимметричны (подобно тем, которые изображены на рисунках 1.4.). Именно трение (вязкость) нарушает симметрию. И именно оно ответственно за образование следа за телом.

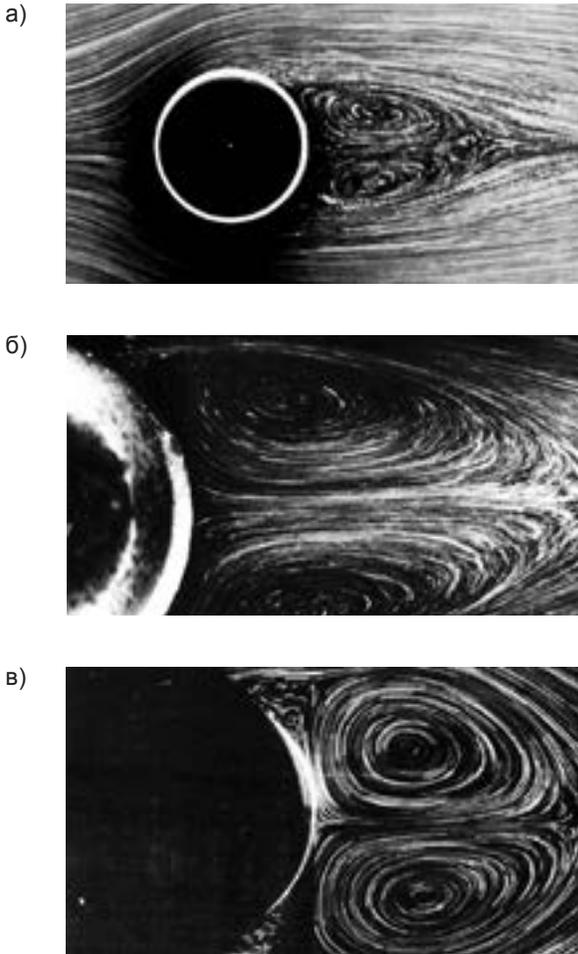


Рис. 1.4. Обтекание тела вращения потоками газа: а — обтекание кругового цилиндра при  $Re = 26$ ; б — обтекание шара при  $Re = 118$ ; в — обтекание шара при  $Re = 500$

Модель Эйлера – Даламбера предполагает симметричное обтекание тела, подобное тому, которое показано на рисунке 1.5. В 1868 году знаменитый немецкий физик Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц построил модель, в которой за цилиндром образуется след — область покоящейся жидкости (рис. 1.6.) Таким образом, он учел трение и отрыв потока от тела. Даже в отсутствие вязкости модель Гельмгольца предсказывает некоторое сопротивление, которое выталкивает тело по потоку.

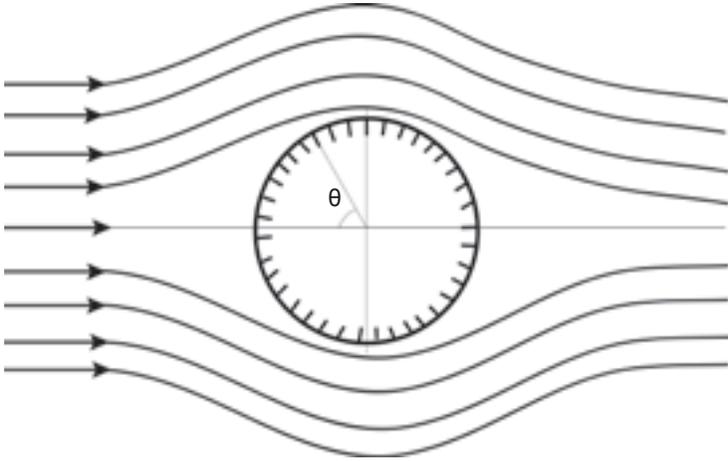


Рис. 1.5. Безотрывное обтекание тела по модели Эйлера – Даламбера

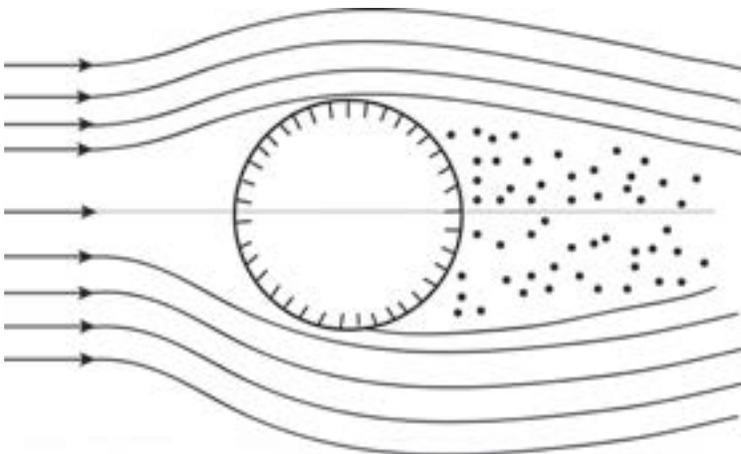


Рис. 1.6. Обтекание тела по модели Гельмгольца

## 1.5. Эффект Эйфеля

Знаменитый французский инженер-строитель, создатель Эйфелевой башни, Густав Эйфель на склоне лет заинтересовался гидродинамикой в связи с вопросом о воздействии ветровых нагрузок на строительные конструкции.

В 1912 году Эйфель построил в Париже аэродинамическую трубу. «Продувая» в ней сферы, он обнаружил парадокс [37], названный впоследствии его именем: вблизи «критического» числа Рейнольдса  $Re \approx 150000$  сила сопротивления сферы резко (в 4–5 раз) уменьшается с увеличением скорости (рис. 1.7).

Аналогичный эффект для цилиндра был обнаружен итальянцем Констанци. Прандтль [38] объяснил этот эффект турбулизацией пограничного слоя, за счет чего точка отрыва потока на поверхности шара или цилиндра смещается вниз по потоку.

Правильность своего вывода Прандтль подтвердил экспериментально [38]. На некотором расстоянии от экватора шара, обтекаемого потоком воздуха, он укрепил на его поверхности тонкое проволочное кольцо. Наличие этого кольца вызвало искусственную турбулизацию пограничного слоя и повлекло за собой «кризис сопротивления» при числах Рейнольдса, меньших, чем при отсутствии кольца.

С физической точки зрения наиболее простым способом предотвращения отрыва было бы уменьшение разности между скоростями внешнего потока и обтекаемой стенки путем приведения ее в движение в направлении потока [36, с. 53]. Такой способ на примере вращающегося цилиндра исследовал Прандтль.

На той стороне цилиндра, где вращающаяся стенка движется в одном направлении с внешним потоком, не наблюдается отрыва пограничного слоя. На другой стороне цилиндра, где его поверхность и внешний поток движутся в противоположных направлениях, наблюдается незначительный отрыв.

В результате около вращающегося цилиндра возникает течение с циркуляцией и результирующей поперечной силой, которое с большой степенью приближения можно рассматривать как течение без трения.

Другим эффективным способом предотвращения отрыва пограничного слоя является его отсасывание. В 1904 г. Прандтль почти полностью исключил отрыв пограничного слоя за счет отсоса через щель в кормовой части цилиндра.

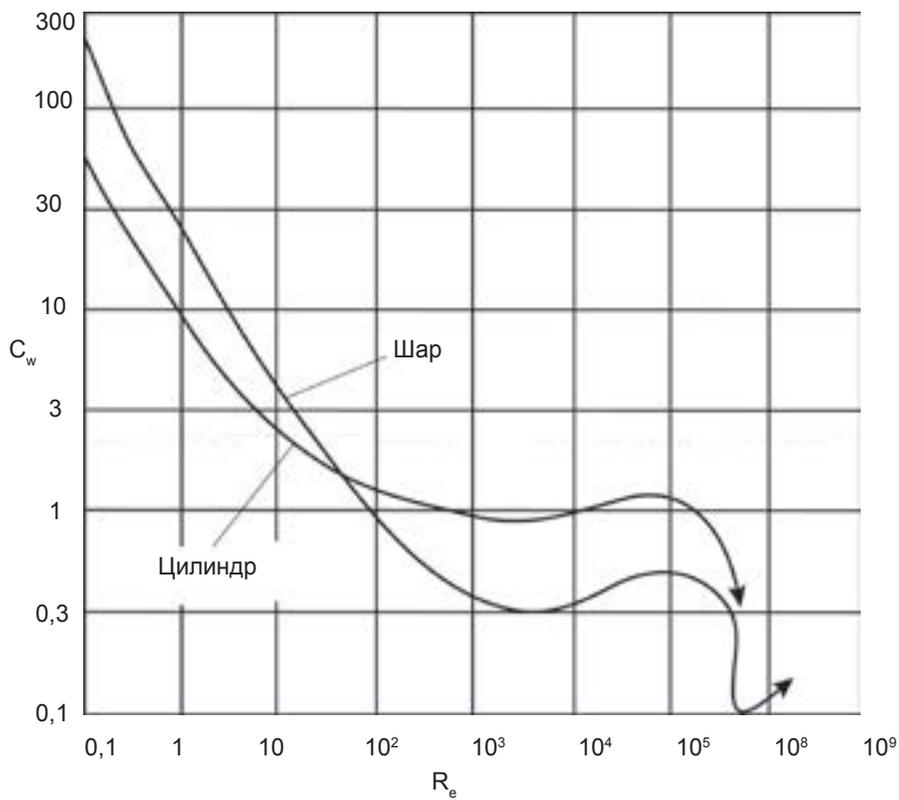


Рис. 1.7. Зависимость коэффициентов сопротивления шара и круглого цилиндра от числа Рейнольдса

## 1.6. Струйное обтекание цилиндра

Для выявления зависимости угловой скорости вращения цилиндра от параметров, характеризующих неоднородность потока в его окрестности, М. А. Гольдштик и В. Н. Сорокин поставили следующий эксперимент [18]. Цилиндр, имеющий возможность свободно вращаться вокруг неподвижной оси, помещался в струю воздуха, точнее, в область границы этой струи (рис. 1.8). Результат опыта оказался совершенно неожиданным. В некотором интервале погружений, в противоположность эффекту Коанда, цилиндр выталкивается из потока и при этом вращается в направлении, обратном ожидаемому, — против «мельничного колеса» [19]. Такой эффект наблюдается только при условии двухстороннего обтекания цилиндра. Если цилиндр заглублен настолько мало, что обтекается лишь с одной стороны, он вращается в естественно ожидаемом направлении — так, что поверхность цилиндра, омываемая струей, движется в направлении струи.

По мере передвижения цилиндра от периферии струи к ее оси, скорость его вращения возрастает до некоторого максимума и далее падает до нуля, когда ось цилиндра совпадает с границей струи. При дальнейшем перемещении цилиндра вглубь струи направление вращения цилиндра изменялось на противоположное, вновь достигался максимум скорости и, наконец, — остановка цилиндра, когда цилиндр полностью погружается в поток. Если речь идет о тонкой струе, сравнимой по толщине с диаметром цилиндра, то при аномальном вращении струя сильно отклоняется от цилиндра, который может быть далеко заглублен за геометрическую ось не возмущенной струи. Однако в некоторый момент струя скачком перебрасывается по другую сторону цилиндра, и он начинает вращаться в обратном направлении, так что явление носит гистерезисный характер. Было установлено также, что эффект наблюдается не только для цилиндра, но и для шара при обтекании его водяными и воздушными струями.

При этом угловая скорость вращения свободного цилиндра пропорциональна скорости натекающего потока, что позволяет использовать его в качестве расходомера.

Экспериментально установлено, что парадоксальное направление вращения цилиндра исчезает, если жидкость практически невязкая (ее число Рейнольдса очень велико) или, наоборот, слишком вязкая (с очень малыми числами Рейнольдса) [28, с. 244] (рис. 1.7).

Этот эксперимент подтверждает объяснение аномального вращения тел в струях с наличием вихревых зон у кормовой части тел вращения, данное в [28].

Отметим, что в [29], [30] объяснение аномального вращения дано на основе предположения, что вырабатываемая в окрестности обтекаемого тела циркуляция минимизирует максимум скорости.

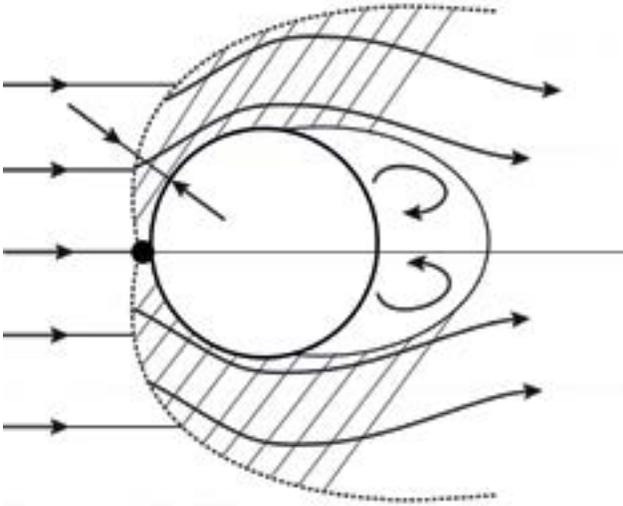


Рис. 1.8. Струйное обтекание цилиндра

## 1.7. Струйное обтекание шара

При центральном обтекании шара широкой струей картина мало отличается от безграничного обтекания шара как плохообтекаемого тела [31]. Однако тонкой струей шар обтекается безотрывно. Переход между этими крайними случаями довольно резок и напоминает скачок [19]. Безотрывный характер обтекания шара тонкой струей связан с эффектом Коанда, когда струя притягивается к поверхности шара.

Теплоотдача шара при струйном обтекании экспериментально исследована в работах [33], [34]. В области  $d = 0,2 \dots 0,7$  коэффициент теплоотдачи шара в начальном участке струи на 10...20%, а в основном участке струи примерно на 40% выше по сравнению с его значением в однородном потоке [34]. Значительно большее увеличение коэффици-

ента теплоотдачи при струйном обтекании, отмеченное в [33], вероятно, обусловлено стесненными условиями обтекания шара.

Сопrotивление шара в условиях струйного обтекания резко снижается и при  $d_0/d < 1,4$  пропорционально  $(d_0/d)^2$  [35].

Широко известен эффект устойчивого витания шара в струе, вертикальной или наклонной, диаметр которой меньше диаметра шара [32].

Экспериментальное исследование и теоретическое объяснение этого эффекта содержится в статье Т. А. Вильгельми [32].

Сила сопротивления шара в струе может быть рассчитана по формуле:

$$F = \frac{\pi d_0^2}{4} \zeta w_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{d_0}{d_1} \right)^2 \right] \quad (1.1)$$

и, соответственно, коэффициент сопротивления

$$\zeta = \frac{8F}{\zeta w_0^2 \pi d^2} \quad (1.2a)$$

где  $d_0$  — диаметр струи перед шаром,

$d_1$  — диаметр струи за шаром,

$d$  — диаметр шара,

$w_0$  — скорость газа или жидкости в струе перед шаром,

$\zeta$  — плотность газа или жидкости.

Экспериментально установлено, что коэффициент сопротивления шара автомоделен относительно числа Рейнольдса

$$R_c = \frac{w_0 d}{\nu} \quad (1.26)$$

$\nu$  — кинематический коэффициент вязкости) в диапазоне  $R_c = 6,7 \times 10^4 \dots 2 \times 10^5$

Менее известно поведение шара, лежащего на плоскости под падающей вертикальной струей воды. Проще всего наблюдать поведение шара, положив его на перевернутый стакан под струей воды. Если струйка слабая и тонкая, шар располагается на ее оси и покоится. При увеличении скорости потока в некоторый момент шар теряет устойчивость и начинает колебаться в некоторой плоскости.

Дальнейший рост скорости струи приводит к вращению этой плоскости вокруг оси струи. Далее колебания теряют регулярность: шар коле-

блется со случайными сбоями частоты и направления вращения, а также плоскости колебаний, но, несмотря на большую скорость струи, не выскакивает из нее, что напоминает странный аттрактор [19].



Видео о витании шара в струе воздуха можно посмотреть по ссылке, сканировав код.

<http://levitation.htri.ru/video-2.html>

## 1.8. Эффект левитации тел вращения в стесненном потоке

В том случае, если струя из сопла вытекает в цилиндрическую трубу, диаметр которой несколько больше диаметра шара, то шар может сохранять равновесие вне трубы (витание), у выходного конца трубы (прилипание) или внутри нее (парение) [19]. В [13] для демонстрации эффекта парения шара в струе (левитации — от англ. levitate — подниматься и парить) рекомендуют струю через сопло диаметром  $d_0 = 10$  мм направить в канал диаметром  $d = 40$  мм, в котором находится шар, диаметр которого  $d = 38$  мм.

При экспериментальном исследовании влияния формы канала на обтекание тел на кафедре Атомной энергетики УПИ им. С. М. Кирова (Свердловск) А. В. Марченко и Л. А. Зайнулин обнаружили эффект гидродинамической подвески шара в канале специальной конфигурации (рис. 1.9, 1.10), состоящего из входного расширяющегося участка — диффузора, цилиндрического расширенного участка и выходного сужающегося участка — конфузора [20], [21], [22], [23]. Эффект левитации заключается в том, что шар, не касаясь стенок канала, устанавливается в строго фиксированном взвешенном положении. Исследования Г. Г. Шкловера, П. Ф. Короткова, Н. И. Лохина [24]–[26] показали, что эффект левитации тел вращения наблюдается при размещении их в цилиндрической камере постоянного сечения с внезапным сужением во входном участке (рис. 1.11).

При левитации устойчивость тел вращения сохраняется в широком диапазоне скоростей потока, начиная с некоторого минимума, при котором тело устанавливается во взвешенном положении. Изменение ориентации канала, скачки расхода, гидравлические удары и вибрация практически не оказывают влияние на устойчивость левитирующего тела. Шар в состоянии левитации совершает колебательные движения относительно точки равновесия с амплитудой, не превышающей 1–2 мм в радиальном направлении и со значительно большей амплитудой в осевом направлении [25].

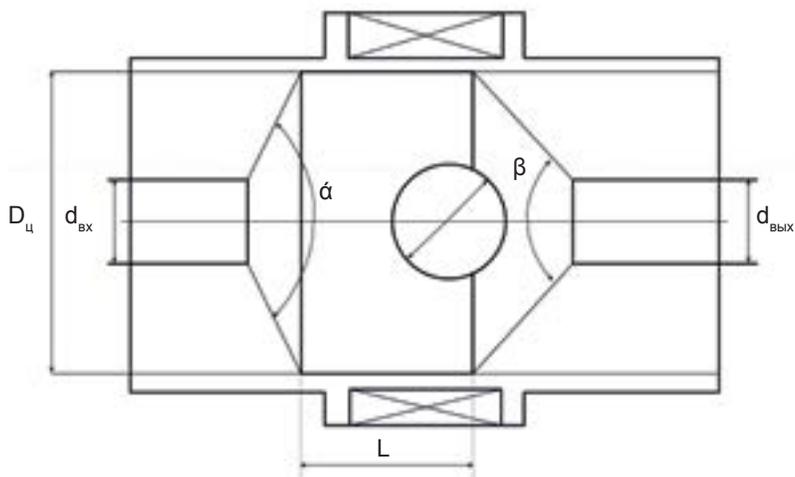


Рис. 1.9. Эффект гидродинамической подвески шара в канале

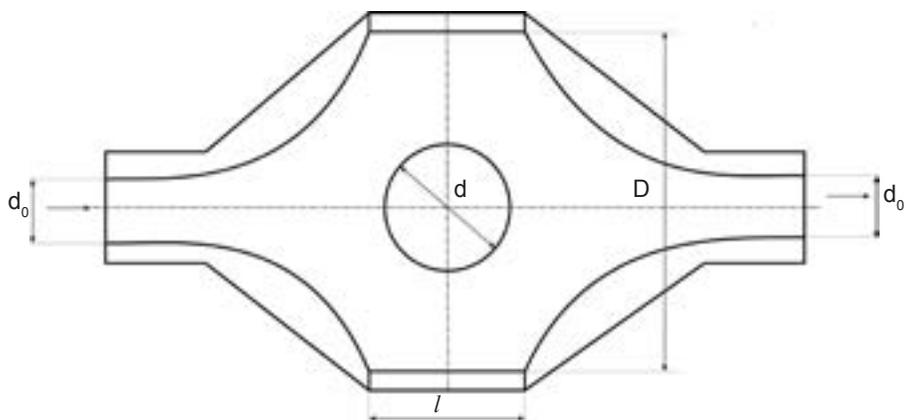


Рис. 1.10. Канал специально конфигурации с шаром

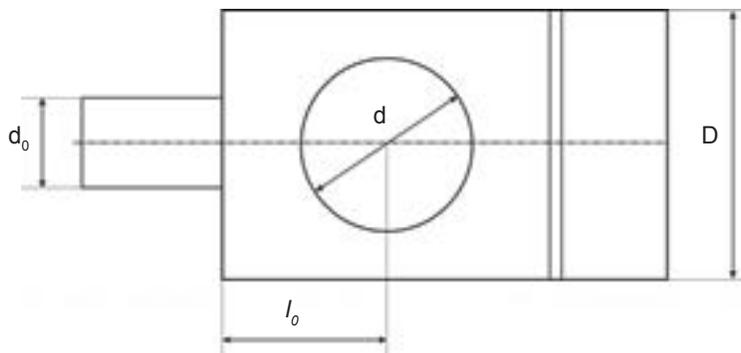


Рис. 1.11. Камера с внезапным сужением во входном участке

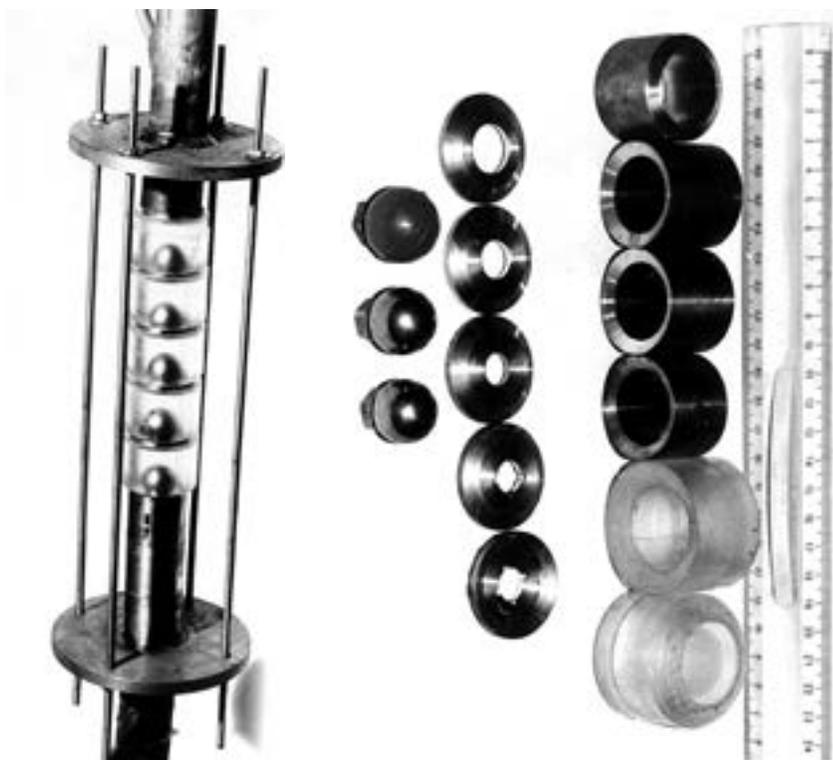


Рис. 1.12. Элементы рабочего участка экспериментального стенда

С увеличением потока амплитуда колебаний уменьшается, а частота возрастает [22].

Исследования [21] показали, что шар с гладкой поверхностью, удерживаясь в центре ячейки, не имеет вращательного движения в каком-то определенном направлении.

Шар, имеющий сквозное диаметральное отверстие  $d_{\text{отв}} = (0,1 \dots 0,3) d$ , приобретает вращательное движение вокруг собственной оси, перпендикулярно оси отверстия и направлению потока [22], [23]. При этом скорость вращения шара пропорциональна расходу, что использовано при создании расходомера [27] (авт. свид. СССР №489951).

Визуальные наблюдения линий тока показывают, что обтекание шара в состоянии левитации происходит безотрывно [21], [25] и напоминает обтекание шара потенциальным потоком идеальной жидкости [26].

Принято считать, что левитация обеспечивается в результате взаимодействия струи и вихревого кольца, которое способствует обжатию струи и тем самым образованию зоны пониженного давления у лобовой поверхности шара. Результирующая всех сил, действующих на шар, становится равной нулю, и шар оказывается в «потенциальной яме» — в точке левитации. В этом состоянии на шар одновременно действуют силы, удерживающие его в осевом и радиальном направлениях.

В осевом направлении на шар действуют силы динамического напора струи, вязкостного трения и сила, обусловленная неравномерным распределением статического давления по поверхности шара.

При радиальном смещении шара из-за нарушения осесимметричности потока происходит перераспределение статического давления по поверхности шара, в результате чего возникает «возвращающая сила», действующая в направлении оси потока.

Ячейку с левитирующим в ней шаром можно рассматривать, как местное сопротивление и потери напора определять по формуле:

$$\Delta P = \xi \frac{\zeta w_0^2}{2} \quad (1.3)$$

где  $\Delta P$  — перепад давлений,

$\zeta$  — коэффициент гидравлического сопротивления,

$\zeta$  — плотность газа,

$w_0$  — скорость потока во входном сечении ячейки.

Коэффициент гидравлического сопротивления в канале с внезапным расширением по формуле Борда равен:

$$\xi = \left[ 1 - \left( \frac{d_0}{D} \right)^2 \right]^2 \quad (1.4)$$

В [25] проведено исследование гидравлического сопротивления канала с внезапным расширением, в котором размещался левитирующий шар (рис. 1.12). Общие потери напора в исследованных ячейках не зависели от диаметра шара и наличия в нем отверстия, а коэффициент гидравлического сопротивления оставался таким же, как в канале без шара и удовлетворительно совпадал с рассчитанным по формуле Борда.

Для ячеек сложной конфигурации (рис. 1.9, 1.10, 1.11) в [20], [23] получена эмпирическая формула, применимая в диапазоне числе Рейнольдса  $Re = \rho w_0 d / \mu = 5 \times 10^4 \dots 2 \times 10^5$ .

$$\xi = \left[ 1 - \left( \frac{d_0}{D} \right)^2 \right]^2 \left( 1 + \frac{d^2}{D^2} \right)^{2.5} \quad (1.5)$$



Описанные выше эффекты великолепно иллюстрирует учебный фильм «Общие основы аэродинамики», снятый еще в 1969 году под руководством профессора Н. Я. Фабриканта

<http://levitation.htri.ru/video-5.html>

## 1.9. Модель обтекания шара в стесненном потоке

Для построения модели обтекания шара в стесненных условиях определим существенные его отличия от обтекания шара в безграничном потоке, которая хорошо изучена.

Как показывают наблюдения, при числах Рейнольдса ( $R_e = \rho d w / \mu$ ,  $w$  – скорость набегающего на шар потока), малых по сравнению с единицей, завихренность, возникающая на поверхности шара, с одной стороны, диффундирует в окружающую жидкость, с другой стороны, переносится к кормовой части и сносится вниз по потоку в виде тонкого следа за шаром. С ростом числа Рейнольдса все большее количество завихренности переносится к кормовой части шара. В результате возникает асимметрия линий тока, за шаром образуется параболообразная заторможенная зона. С ростом динамика этой зоны при обтекании шара в засыпке и в безграничном потоке различна.

При  $R_e = 5 \div 50$  за шаром в неограниченном потоке образуется стационарный тороидальный вихрь, который с ростом числа Рейнольдса увеличивается в размерах и при  $Re = 130$  начинает совершать слабые колебания. При более высоких числах Рейнольдса кольцевой вихрь за сферой колеблется с большей амплитудой, и некоторая часть жидкости вырывается из области замкнутых линий тока и сносится вниз по потоку в виде непрерывного ряда вихревых петель (спиральных нитей), несимметричных относительно оси. Характерной чертой описанного срыва является то, что на энергетическом спектре турбулентных пульсаций, измеренном за сферой, на определенной частоте, зависящей от режима обтекания, возникает узкополосный пик (рис. 1.13).

В случае обтекания шара в стесненных условиях подобного срыва не происходит. Объяснить это можно тем, что для срыва просто нет места. Вследствие эффекта Коанда в кормовой части сферы образуется область ускоренного течения и сносится вниз по потоку.

Неустойчивость вихревой зоны за сферой приводит к турбулизации течения. Четкая вихревая структура размывается, но если провести осреднение по правилам Рейнольдса и построить линии тока осредненных скоростей, то получится картина, сходная с ламинарным обтеканием шара. Внешние к вихревой области линии тока будут похожи на линии тока при потенциальном (безвихревом) обтекании шара. При достаточно больших числах Рейнольдса наступает автомодельность, т.е. течение и относительные скорости перестают зависеть от скорости набегающего

потока. Завихренность при этом локализуется в тонкой пристенной области на поверхности шаров и в вихревых зонах за шарами, вне которых распределение скорости может быть предсказано на основе уравнений движения невязкой жидкости.

Завихренность, как известно, может генерироваться только на поверхности шара, а внутри области течения возможен только конвективный перенос завихренности и ее диффузия. Благодаря осевой симметрии обтекания шара потоком вихревые линии представляют собой окружности в плоскостях, перпендикулярных оси  $z$ , с центрами на этой оси (рис. 1.14).

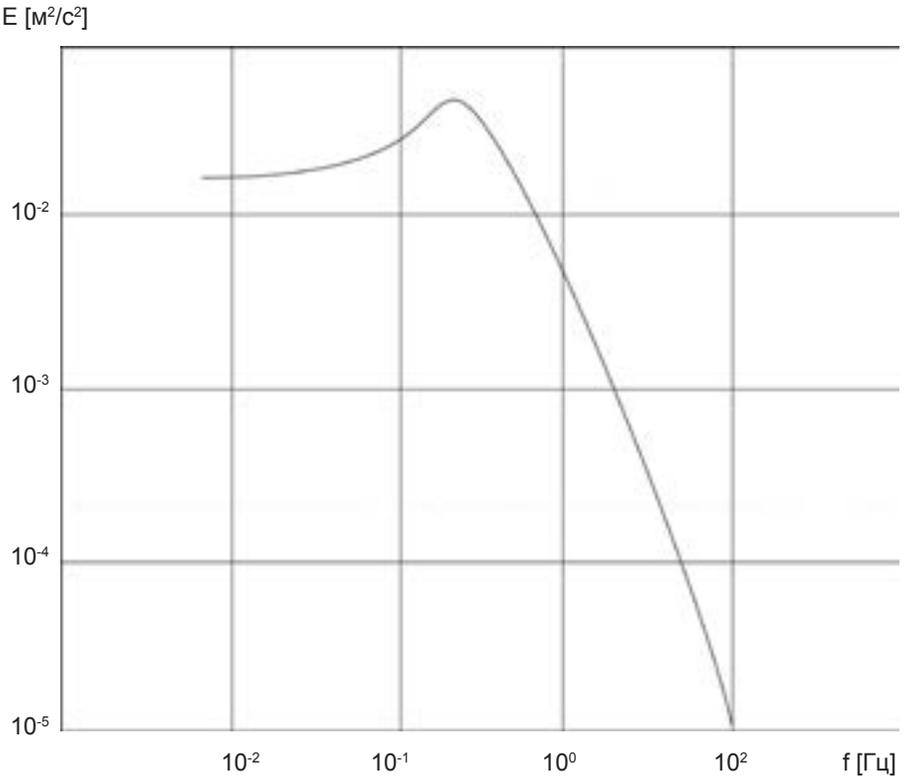


Рис. 1.13. Энергетический спектр турбулентных пульсаций осевой скорости  $w$  за одиночной сферой.

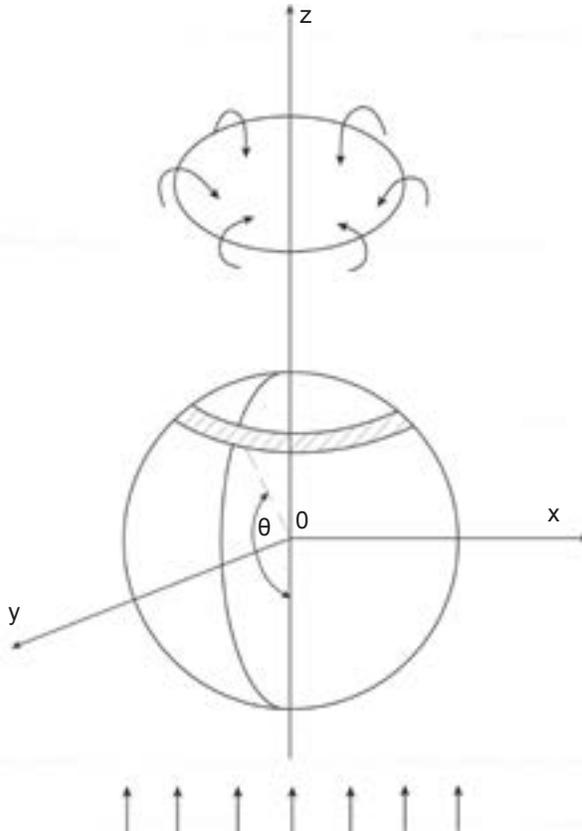


Рис. 1.14. Генерация завихренности шаром

Отличие обтекания шара в стесненном потоке от обтекания шара неограниченным потоком связано, прежде всего, с тем, что завихренности, генерируемые поверхностью шара и стенкой, стесняющей поток, имеют противоположные знаки. Завихренности, порождаемые на этих поверхностях, взаимоуничтожаются. Поэтому завихренность резко затухает по мере удаления от поверхности шара. Это служит основанием допущению, согласно которому вокруг шара в стесненных условиях формируется безвихревой поток.

При сшивке вихревого и безвихревого течений обычно полагают, что на границе этих потоков отсутствуют касательные напряжения и, следовательно, отсутствует обмен энергией.

Эффект поперечного стеснения потока при безвихревом обтекании тела общепринято учитывать приближенной формулой:

$$C_D(Q) = (1 + Q_0) C_D(0), \quad (1.6.)$$

где  $C_D(0) = C_D = 2\Delta P / \rho w^2$  — коэффициент сопротивления тела при безграничном обтекании, рассчитанный по скорости набегающего потока;  $C_D(Q) = 2\Delta P / \rho \omega_{\max}^2$  — коэффициент сопротивления тела, рассчитанный по скорости в месте наибольшего сужения  $w_{\max}$ ;  $Q = (w/w_{\max}) - 1$  — степень сжатия потока при стесненном обтекании тела;  $Q_0$  — степень сжатия потока при безграничном потенциальном обтекании тела.

С учетом сказанного в основу предлагаемой математической модели обтекания шара в стесненных условиях будем рассматривать вязкое обтекание шара с завихренностью, локализованной в тонком слое на его поверхности, вне которого течение носит безвихревой характер и является потенциальным течением.

Уравнение количества движения (2.3) для ламинарного течения несжимаемой жидкости можно записать в виде:

$$\rho(\bar{w}, \nabla) \bar{w} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \bar{w}. \quad (1.7.)$$

Понимая под завихренностью вектор

$$\bar{\zeta} = \text{rot} \bar{w} = \nabla \times \bar{w}, \quad (1.8.)$$

с учетом уравнения неразрывности и векторных тождеств

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \bar{w} &= \nabla(\nabla \bar{w}) - \nabla \times (\nabla \times \bar{w}), \\ (\bar{w}, \nabla) \bar{w} &= \frac{1}{2} \nabla w^2 - \bar{w} \times (\nabla \times \bar{w}), \end{aligned} \right\} \quad (1.9.)$$

представим уравнение (1.6) в форме Ламба:

$$\nabla \frac{w^2}{2} + \bar{\zeta} \times \bar{w} = -\frac{\nabla P}{\rho} - \nu (\nabla \times \bar{\zeta}). \quad (1.10.)$$

Согласно принятой модели завихренность, возникающая на поверхности шара укладки, локализована в тонкой пристенной области. Считаем, что толщина этой области стремится к нулю. Скорость на внутренней поверхности вихревой области  $\Gamma_s^-$  (поверхность шара) по условию прилипания обращается в нуль. Так как скорость жидкости всюду непрерывна, то на внешней границе вихревой области  $\Gamma_s^+$  она совпадает со скоростью потенциального течения вне вихревой зоны.

Для потенциального течения ( $\text{rot} \vec{w} = 0$ ) уравнение количества движения (1.10) примет вид:

$$\nabla \left( \frac{P}{c} + \frac{w^2}{2} \right) = 0. \quad (1.11.)$$

Используем допустимый в теории малых возмущений прием: будем сносить граничные условия с действительной на невозмущенную поверхность. Такой перенос граничных условий с одной поверхности на мало от нее отличающуюся другую вводит ошибку второго порядка малости. В соответствии с этим будем пренебрегать толщиной вихревой области на поверхности шаров. Несмотря на это допущение, сложность геометрии порового пространства шаровой укладки затрудняет расчет распределения скорости на внешней границе вихревых зон. Вместе с тем, независимое от типа укладки, скорость на поверхности шара меняется от нуля (лобовая точка) до некоторого максимального значения, определяемого условиями стеснения потока. Учитывая поперечное сжатие потенциального течения приближенной формулой (1.6), можно перейти к рассмотрению безграничного обтекания шара.

Осевая симметрия обтекания шара позволяет ввести функцию тока  $\psi$ , которая определяется следующим образом:

– в цилиндрических координатах

$$w_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial z}, w_z = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \rho}; \quad (1.12.)$$

– в сферических координатах

$$w_r = -\frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, w_\theta = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial r}. \quad (1.13.)$$

Потенциальное обтекание шара определяется условием  $\vec{\zeta} = 0$ , благодаря осевой симметрии

$$\begin{aligned} \vec{\zeta} &= \vec{e}_\varphi \left( \frac{\partial w_\rho}{\partial z} - \frac{\partial w_z}{\partial \rho} \right) = \\ &= \vec{e}_\varphi \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} \right) \right] = \frac{\vec{e}_\varphi}{\rho} E^2 \psi \end{aligned} \quad (1.14.)$$

где  $E^2$  — оператор Стокса, равный — в цилиндрических координатах:

$$E^2 = \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}; \quad (1.15.)$$

– в сферических координатах

$$E^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\sin \theta}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \right). \quad (1.16.)$$

Функция тока, найденная из условия  $E^2\psi = 0$  для обтекания шара равномерным на бесконечности потоком со скоростью  $w$ , равна:

$$\psi = \frac{1}{2} wr^2 \left[ 1 - \left( \frac{r_s}{r} \right)^3 \right] \sin^2 \theta. \quad (1.17.)$$

Указанная цель достигается тем, что в теплообменной трубе, содержащей, по крайней мере, одну ячейку с центральными отверстиями для входа и выхода теплоносителя, внутри которой размещен шаровой элемент диаметром, меньшим диаметра трубы, но большим диаметра отверстий для входа и выхода теплоносителя, стенка ячейки спроектирована по закону:

$$\bar{r} = \frac{d}{2} \left( \sqrt{0,5 + \sqrt{U}} + \sqrt{0,5 - \sqrt{U}} \right), \quad (1.18.)$$

где

$$I = - \frac{(D/d)^3 - 1}{(D/d) \sin^2 \theta};$$

$$U = \left( \frac{I}{3} \right)^3 - \frac{1}{4};$$

$g$  — величина радиус-вектора от центра ячейки до внутренней поверхности канала;  $\theta$  — угол между радиус-вектором и осью канала;  $D$  — диаметр трубы;  $d$  — диаметр шарового элемента.

В ячейке у входного и выходного отверстия могут быть расположены, по меньшей мере, по одному выступу. Предлагаемое техническое решение основывается на возможности обеспечить безвихревое обтекание шара, если ограничивающие его поверхности будут совпадать с линиями тока, удовлетворяющими условиям потенциального течения.

Такая линия тока представлена в форме кубического уравнения следующего вида:

$$\left( \frac{2\bar{r}}{d} \right)^3 + I \left( \frac{2\bar{r}}{d} \right) - 1 = 0. \quad (1.19.)$$

Применительно к рассматриваемой задаче ( $D/d > 1$ ) физический смысл имеет одно действительное решение ( $U > 0$ ) уравнения (1.19), которое выражено формулой (1.18).

## Глава 2

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛЕВИТАЦИИ ШАРА

Для определения качественных особенностей левитации шара в струе воздуха было проведено экспериментальное исследование на установке, схема которой приведена на рис. 2.1.

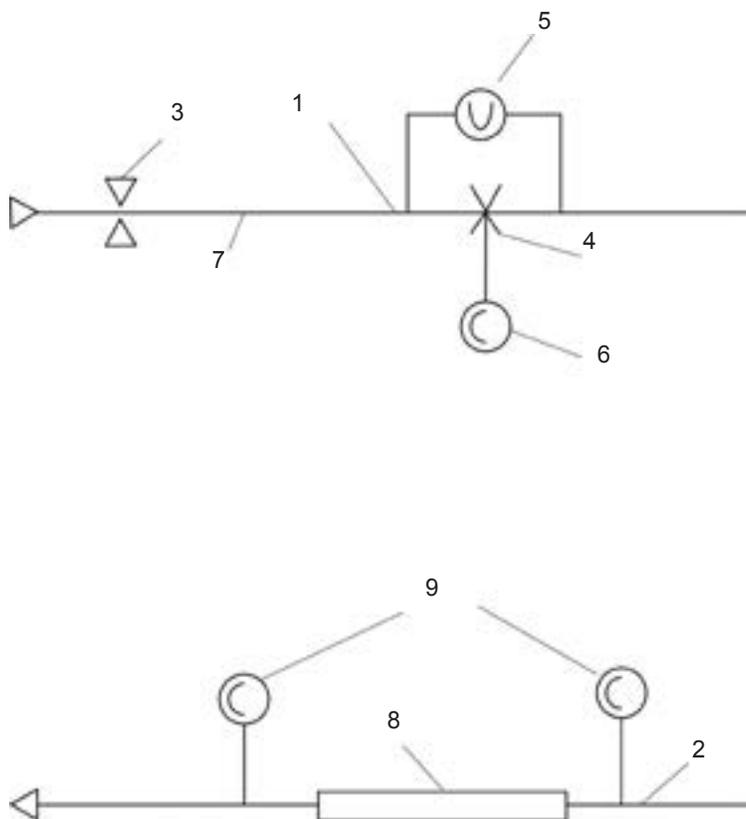


Рис. 2.1. Установка для определения особенностей левитации шара в струе воздуха

Воздух под давлением 0,6 МПа из магистрали подается через расходомерный участок (1) на вход вертикально установленного сопла (2) с цилиндрическим насадком (3) и через него выходит в атмосферу.

В опытах использовался набор из четырех сопел диаметром 12,36; 8,74; 5,53; 3,90 мм, что соответствует площадям на срезе сопла, равным 120, 60, 24, 12 мм<sup>2</sup>, а также шары: полый полистироловый диаметром 22,5мм и стальной диаметром 10 мм. Схемы исследованных объектов приведены на рис. 2.2.

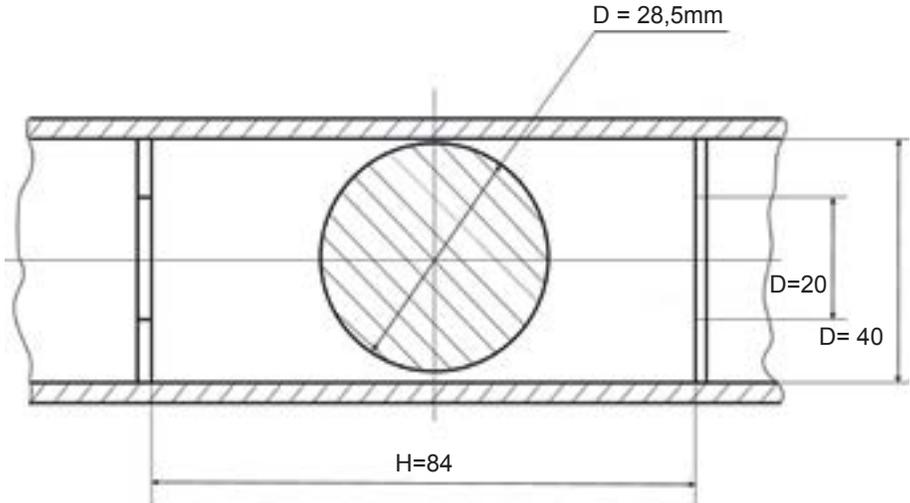


Рис. 2.2а Исследование витания шара в струе

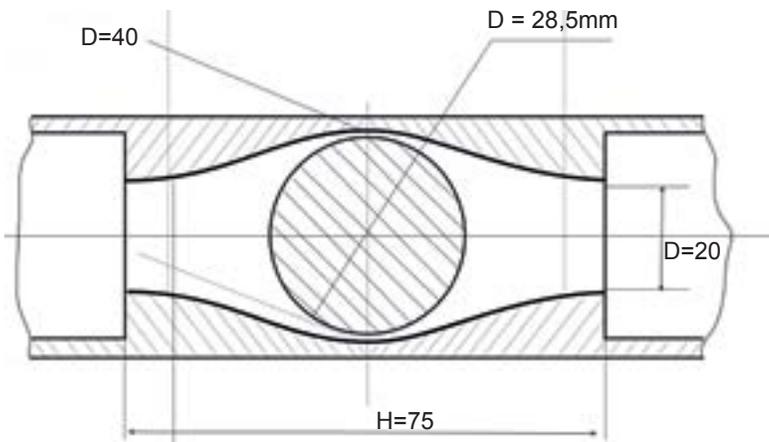


Рис. 2.2б Витание шара в профилированном канале

Результаты исследования витания шара в струе, захвата и удержания его в насадке (рис.2.2а) приведены в таблице 1. Установлено, что уменьшение величины до 8 мм не изменяет качественно поведение шара (при  $d = 22,5$  мм,  $D = 22$  мм,  $H = 20$  мм), при дальнейшем уменьшении захват не наблюдается. Качественно картина не изменяется при  $v = 8,74/10; 5,53/13; 5,53/8$ , с уменьшением диаметра сила захвата возрастает. После изменения скорости истечения из сопла шар устанавливается в новом положении равновесия примерно через минуту. Следует отметить гистерезисный характер захвата шара насадком: после захвата витающего в струе шара увеличение скорости истечения из сопла не приводит к отрыву шара, хотя сила захвата при этом уменьшается, и при больших скоростях (много больших скорости захвата) случайное возмущение может приводить к отрыву шара и переходу его в состояние витания.

Таблица 1

Ратм = 1,017 бар, $t_b = 22,5$ до = 12,36мм, H = 20мм, D = 22мм, ho= 20мм			
№			Примечания
-	бар	м/с	
1	4,5	34,6	hs = 95мм*
2	4,0	30,7	hs = 65мм*
3	3,75	28,8	hs = 51мм*
4	3,5	26,9	слабый захват
5	2,5	19,2	Только поперечные пульсации частотой 10Гц
6	2,0	15,3	
7	2,5	19,2	
8	2,7	20,8	вращение относительно струи может возникать
9	3,5	26,9	
10	4,0	30,7	Шар в состоянии захвата, покачивание отн. оси струи, шум**
11	5,2	40,0	

\*Витание шара, продольные и поперечные колебания, вращение относительно оси струи с частотой менее 1 Гц.

\*\*Слабые возмущения могут приводить к появлению вращения шара относительно оси струи или оси, перпендикулярной ей.

Далее исследовалась левитация стального шара диаметром  $d = 10$  мм в цилиндрической насадке ( $d = 10$  мм,  $h_0 = 5$  мм) при соотношениях  $b/a = 0/8; 3/5; 5/6; 4/4$ . При  $h_0 \leq 3$  наблюдается потеря захвата.

Уменьшение параметра  $b/a$  от единицы до нуля при скоростях истечения из сопла, больших 44 м/с, не оказывает заметного влияния на левитацию шара в насадке, при меньших скоростях наблюдалось затухание вращения шара вследствие его трения о стенку насадки.

Несмотря на смещение оси струи относительно оси насадка наблюдалось вращение шара как относительно оси, параллельной оси струи, так и относительно оси, нормальной оси струи. Направление вращения шара, вероятно, обуславливается случайными возмущениями.

В процессе эксперимента наблюдалось витание шара над шаром, левитирующим в канале (рис. 2.2б), что подтверждает струйный характер обтекания левитирующего шара.

Экспериментально было установлено, что отверстие в оболочке полого полистиролового шара ориентирует его в струе всегда таким образом, что отверстие располагается в кормовой части шара.

Приведенные нами исследования показали, что захват шара не наблюдается, если  $d < 0,5D$  или  $d < 1,25d_0$ .

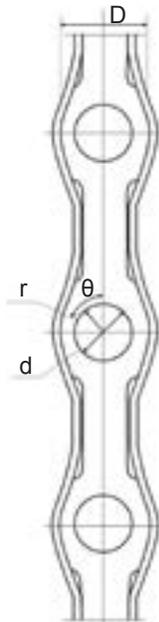


Рис. 2.3. Теплообменная труба с левитирующими шаровыми элементами

---

Далее нами было выполнено качественное исследование течения воздуха через канал, в котором последовательно размещены ячейки с шаровыми элементами (рис 2.3), отделенными друг от друга диафрагмами.

Во время опытов рабочий участок был ориентирован как вертикально, так и горизонтально.

В результате экспериментов при вертикальной ориентации в условиях восходящего течения воздуха было установлено, следующее:

1. при увеличении расхода воздуха полистироловые шары еще до наступления состояния левитации отрываются от диафрагм и начинают медленно вращаться в случайном направлении;

2. при дальнейшем увеличении расхода скорость вращения увеличивается и шары застревают на оси струи в «точке» левитации, где и остаются при дальнейшем увеличении расхода;

3. шаровые элементы вращаются хаотически в осевом и радиальном направлениях;

4. шаровые элементы приходят в состояние левитации одновременно по всей длине трубы;

5. скачки расхода и вибрация трубы не оказывают влияния на левитацию шаров, неправильность формы и шероховатость шаров не влияют на возможность возникновения эффекта левитации.

Обнаруженный эффект левитации цепочки шаров целесообразно использовать для интенсификации теплообмена в различных тепловых устройствах.

Как показано в [1], для интенсификации теплообмена не следует применять турбулизаторы с резкими очертаниями, так как в мощных вихрях, возникающих до них и за ними, диссипация энергии соизмерима или даже больше выработки турбулентности, что связано с большими гидравлическими сопротивлениями, а значит, и низкой энергетической эффективностью.

Одинаковая (избыточная над диссипацией) выработка турбулентности у плавно и резко очерченных турбулизаторов достигается при существенно различных гидравлических потерях. У плавно очерченных турбулизаторов эти потери много меньше.

В известных конструкциях шаровые элементы неподвижны либо находятся в непосредственном контакте друг с другом или с окружающими их телами. Гидравлическое сопротивление таких турбулизаторов значительно, а энергетическая эффективность невелика.

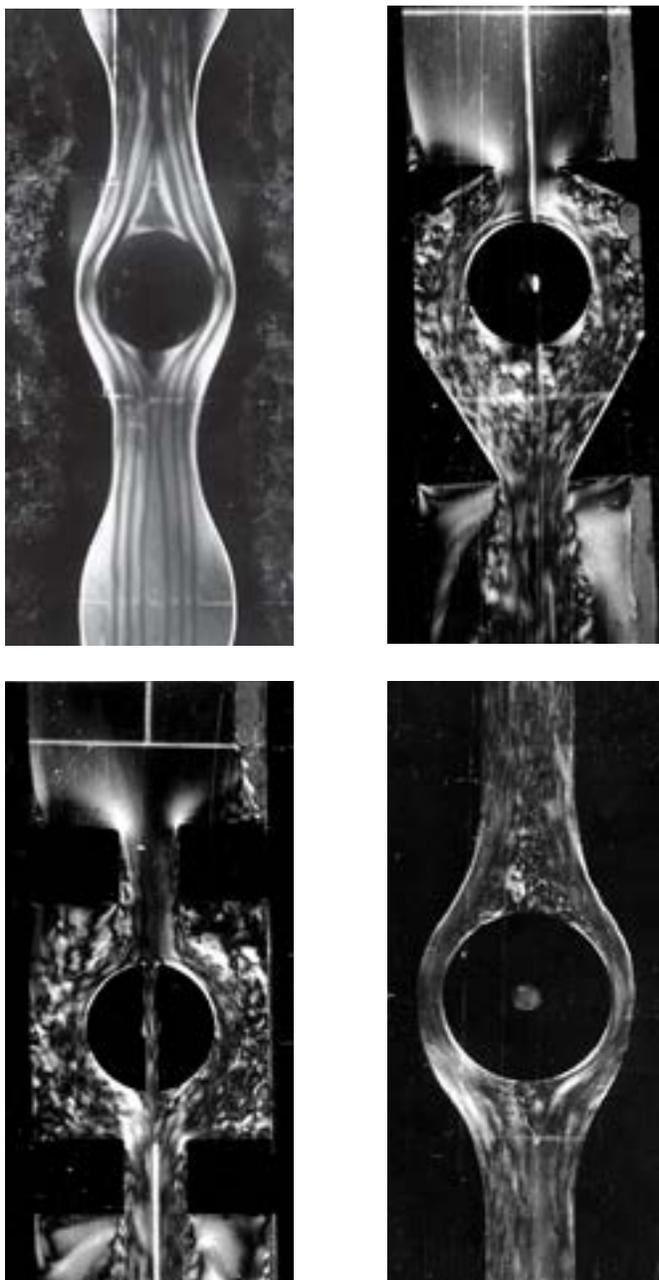


Рис. 2.4. Визуализация обтекания шара в профилированном канале

Дальнейшие исследования левитации шара в канале связаны с определением формы канала, обеспечивающей безотрывное течение газа в ячейке.

Обеспечить безвихревое обтекание шара в ячейке возможно, если ограничивающие его поверхности будут совпадать с линиями тока, удовлетворяющими условиям потенциального течения. Такие линии тока можно получить из известного выражения для функции тока потенциального обтекания шара безграничным потоком (см. Л. Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа, М.: Наука, 1987, с. 289):

$$\psi = \frac{1}{2} W_0 r^2 \left[ 1 - \left( \frac{d}{2r} \right)^3 \right] \sin^2 \theta \quad (2.1)$$

где  $\tau$  — величина радиус-вектора от центра ячейки до внутренней поверхности канала,

$\theta$  — угол между радиус-вектором и осью канала,

$d$  — диаметр шара,

$W_0$  — скорость на входе в ячейку.

В качестве условий однозначности, выделяющих линию профиля ячейки из семейства линий тока, описываемых этим уравнением, выберем следующие: 1)  $\theta = 90^\circ$  ( $D = 2\tau$  — наибольший диаметр проходного сечения ячейки) и 2)  $2\tau_{\max} \sin \theta_{\max} = d_0$  ( $d_0$  — диаметр канала на входе в ячейку). При этом линия профиля канала описывается кубическим уравнением вида:

$$\left( \frac{2\tau}{d} \right)^3 + P \left( \frac{2\tau}{d} \right) - 1 = 0 \quad (2.2)$$

где:

$$P = - \frac{(D/d)^3 - 1}{(D/d) \sin^2 \theta} \quad (2.3)$$

Детерминантом этого уравнения является величина:

$$T = \left( \frac{P}{3} \right)^3 + \frac{1}{4} \quad (2.4)$$

Был проведен анализ зависимости детерминанта  $T$  от угла  $\theta$  и отношения  $D/d$ , которая в общем виде представлена на рис. 2.5.

Поскольку в рассматриваемом случае  $P < 0$  (т.к.  $D/d > 1$ ), то при  $T \leq 0$  кубическое уравнение (2) имеет три действительных решения, а при  $T > 0$  одно действительное и два мнимых решения (см. Бронштейн И. Н.,

Семендяев К. А. Справочник по математике. — М., Наука, 1986, с. 147). Значения параметров  $\theta$  и  $D/d$ , при которых детерминант  $T$  изменяет знак, показаны на графике рис. 2.6а, а зависимость детерминанта  $T$  от  $D/d$  при  $\theta = 90^\circ$  и от  $\theta$  при  $D/d = 1,3; 1,7$  на рис. 2.6б и 2.6в соответственно.

Из рис. 2.6 видно, что уравнение (2) имеет единственное действительное решение ( $T > 0$ ) во всем диапазоне значений угла  $\theta = 0 \dots 90^\circ$  только при  $D/d \leq 1,57$  ( $D/d \leq 0,64$ ).

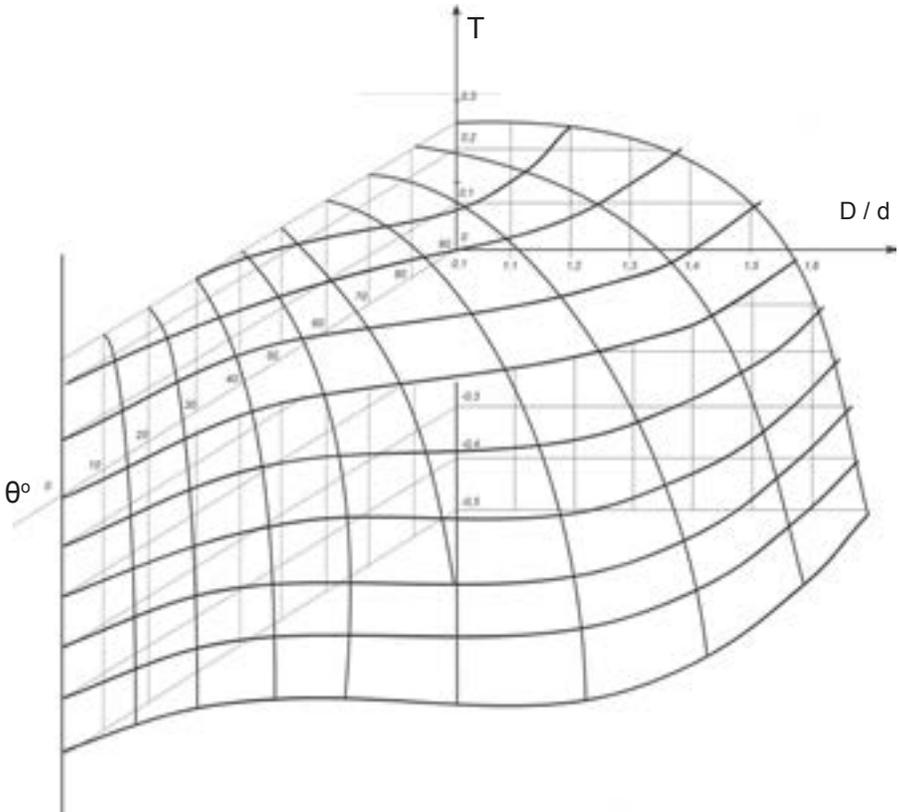


Рис. 2.5. Анализ зависимости детерминанта  $T$  от угла  $\theta$  и отношения  $D/d$ .

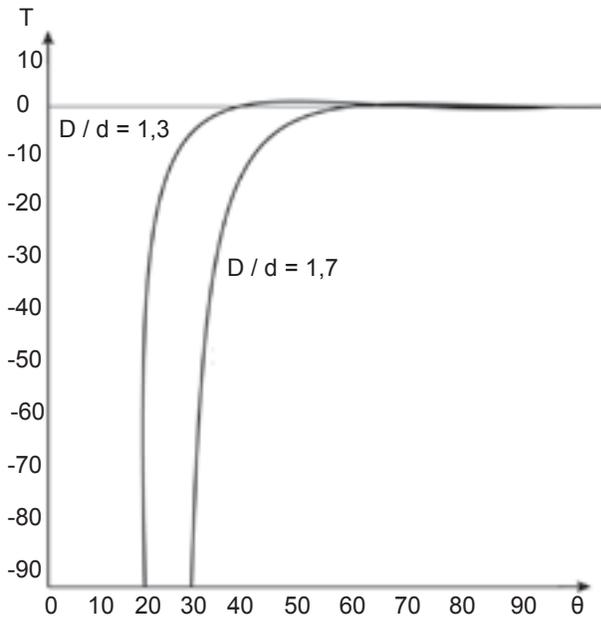


Рис. 2.6а

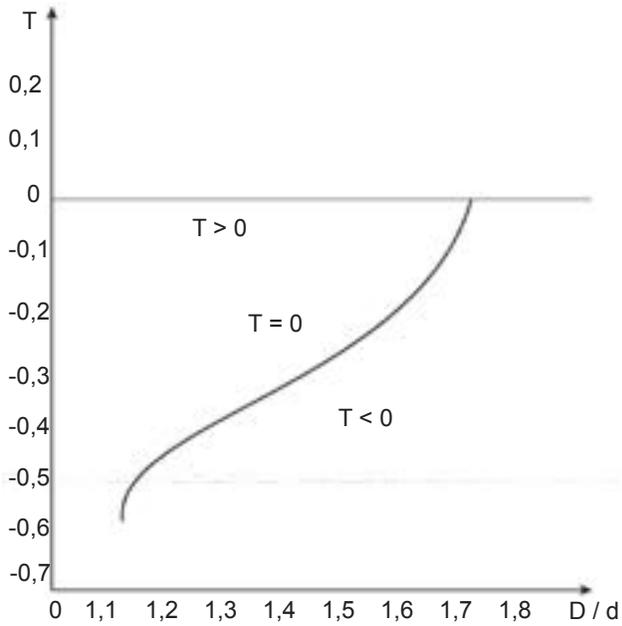


Рис. 2.6б

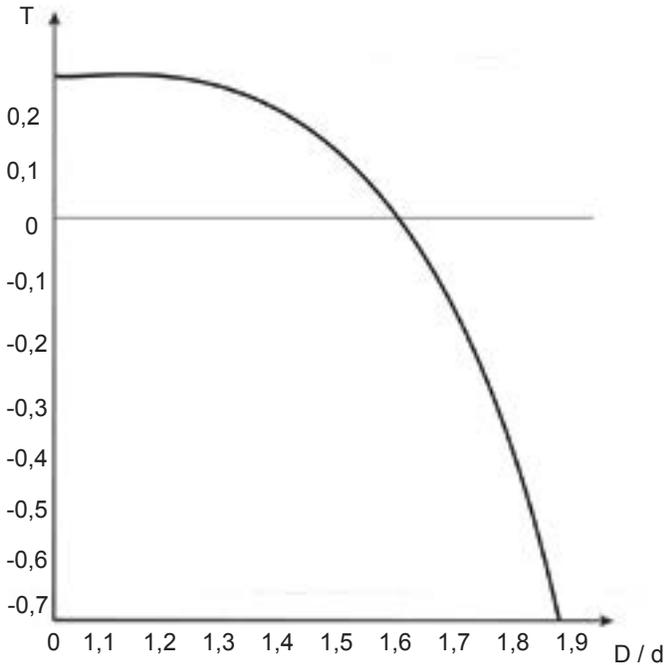


Рис. 2.6в

Величина  $\tau_{max}$  согласно принятым выше условиям однозначности определяется из уравнения:

$$\tau_{max} = \frac{d^3}{2} \sqrt{\frac{(d_0/d)^2(D/d)}{(d_0/d)^2(D/d)+1-(D/d)^3}} \quad (2.5)$$

Расстояние между входом и выходом из ячейки  $l$  может быть определено из формулы:

$$l = 2\tau_{max} \sqrt{\frac{(D/d)^3 - 1}{(2\tau_{max}/d) - 1} \times \frac{2\tau_{max}}{D}} \quad (2.6)$$

Далее, при условии, что  $\tau_{max}$  достигается при значении  $\theta$ , соответствующих изменению знака величины  $T$ , установлена зависимость  $d_0/d$  от  $D/d$ , которая приведена на рис. 2.7.

Из рисунка видно, что  $d_0/d < 1$  при  $D/d < 1,25$  ( $d/D > 0,8$ ).

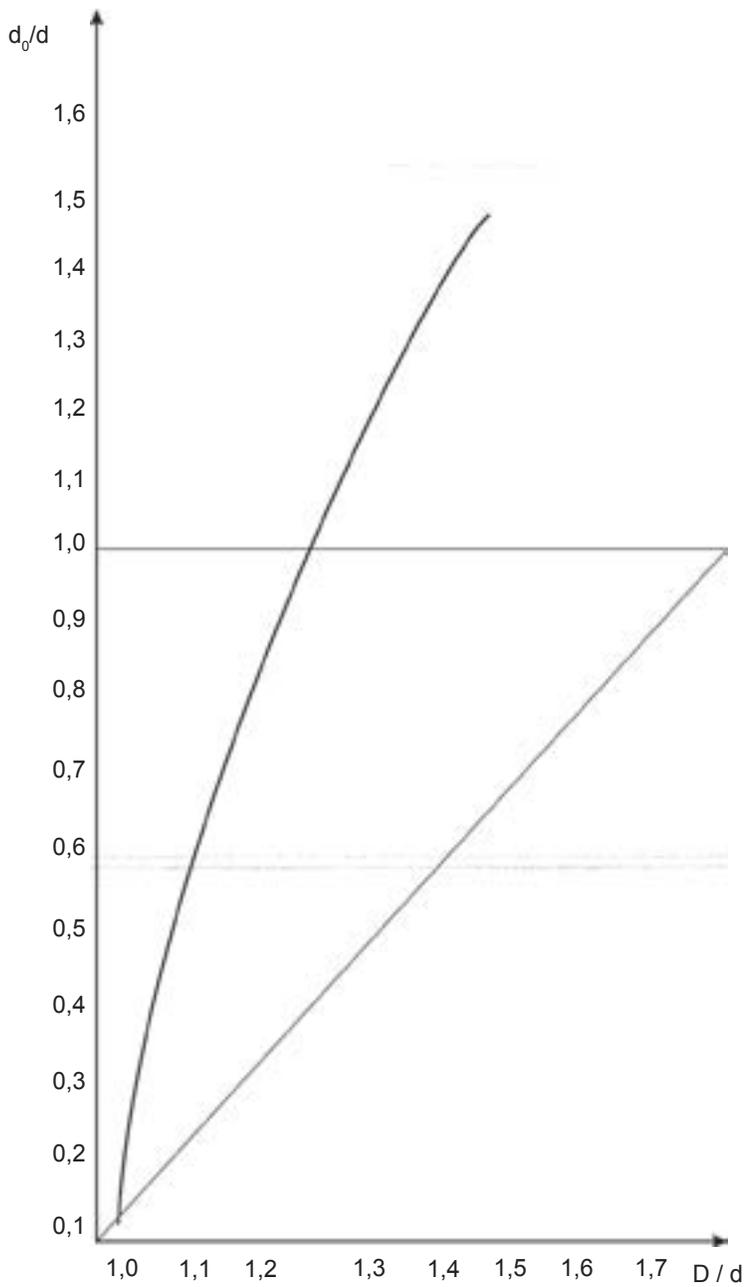


Рис. 2.7. График зависимости  $d_0/d$  от  $D/d$

## Глава 3

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЯЧЕЙКИ С ЛЕВИТИРУЮЩИМ ШАРОМ

Экспериментальный стенд представляет собой аэродинамическую трубу открытого типа, включающую расходомерный (1) и рабочий (2) участки (рис. 3.1).

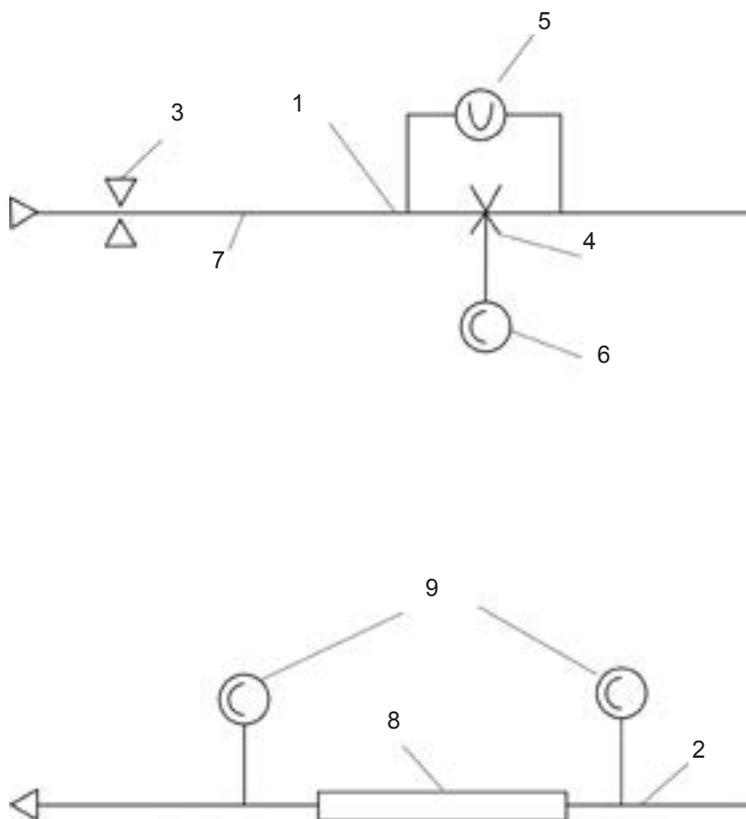


Рис. 3.1. Экспериментальный стенд

Воздух из магистрали под давлением 0,6МПа через клапан (3) поступает на расходомерный участок, где установлено стандартное сопло Вентури 4 (D = 50 мм, d = 20 мм, m = 0,16, L = 0,994 [39]). Расходомерное сопло удалено на 20 калибров от клапана (3) перед ним и от колена трубопровода, внутренний диаметр которого 50 мм. На расходомерном участке измеряются: избыточное давление (по показаниям образцового манометра — с ценой деления 0,04 ат.); перепад давлений на сопле (измеряется с помощью u-образного водяного манометра ДТ-5); температура воздуха на входе в расходомерный участок измеряется термометром сопротивления, соединенным с КСМ2-004И).

Объемный расход воздуха через расходомерный участок рассчитывается по формуле [39]:

$$Q = 1,264 \times 10^{-4} \alpha \varepsilon K_t^2 d^2 \sqrt{\frac{\Delta P_c}{\zeta^1} \zeta_B g M^{3/4}} \quad (3.1)$$

где  $\alpha = 0,994$ ,  $\varepsilon = 0,998$ ,  $K_t = 1$ ,  $d = 20$ мм,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$\Delta P_c$  — перепад давлений на сопле Вентури, ммвд.ст.;

$\zeta^1$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\zeta_B$  — плотность уравнивающей жидкости (воды), примерно равная 998,23 кг/м<sup>3</sup>.

Плотность воздуха определяется из уравнения

$$\zeta^1 = \frac{P_1}{T_1} \times \frac{T_H}{P_H} \zeta_H \quad (3.2)$$

где индекс «H» соответствует номинальным параметрам. В качестве номинальных приняты  $P_H = 760$  мм рт. ст = 101324,22 Па,  $T_H = 293,15$ К,  $\zeta_H = 1,205$  кг/м<sup>3</sup>. В этом случае:

$$\zeta^1 = \frac{P_1}{286,84 T_1} \quad (3.3)$$

Абсолютное давление  $P_1$  на расходомерном участке определяется по формуле:

$$P_1 = 133,3 P_{\text{бар}} + 9,81 \cdot 10^4 P_{\text{изб}}, \text{ Па,}$$

где  $P_{\text{бар}}$  — барометрическое давление, мм рт.ст.,

$P_{\text{изб}}$  — избыточное давление на расходомерном участке, кгс/см<sup>2</sup>.

Среднерасходные скорости в канале и в отверстии диафрагм определяются по формуле:

$$W_0 = \frac{Q_0^1}{\zeta^{11} 3600 (\pi d^2 / 4)} \quad (3.5)$$

где  $d$  — диаметр отверстия диафрагмы.

Рабочий участок представлял собой горизонтально установленную оргстеклянную трубу внутренним диаметром 40 мм, в которой размещались диафрагмы с диаметрами отверстий 20 мм и шар диаметром 28,5 мм (рис. 3.2).

Избыточные давления до рабочего участка и за ним определялись по показаниям образцовых манометров с ценой деления 0,01 ат. Кроме того, при малых расходах перепад давлений на рабочем участке измерялся  $v$ -образным водяным манометром. Температура воздуха на выходе из рабочего участка определялась по показаниям лабораторного ртутного термометра с ценой деления 0,2 К.

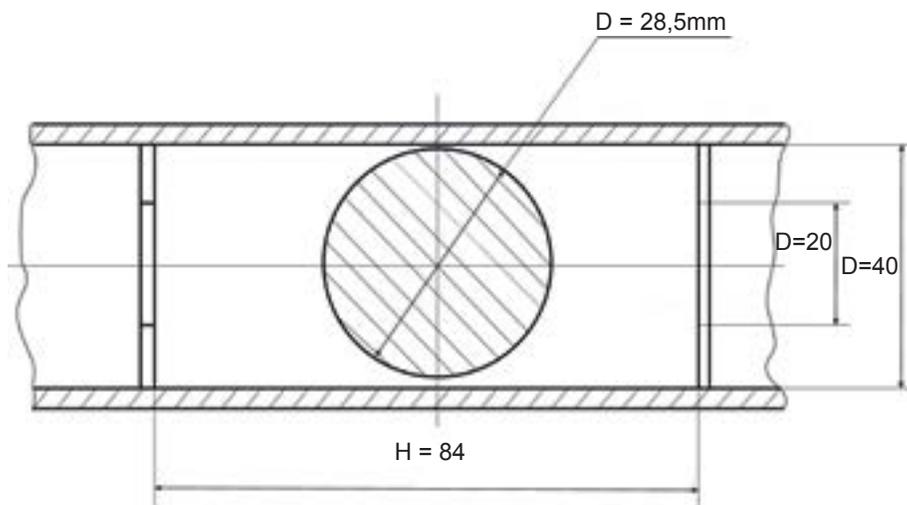


Рис. 3.2. Труба с диафрагмами и шаром

Плотность и динамический коэффициент вязкости воздуха на рабочем участке определялись по известным соотношениям. Обобщение опытных данных выполнено в форме зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса.

Зависимость для ячейки без шара и с левитирующим шаром приведена на рис. 3.3. Из рисунка видно, что гидравлическое сопротивление ячейки с левитирующим шаром примерно в два раза выше, чем без него.

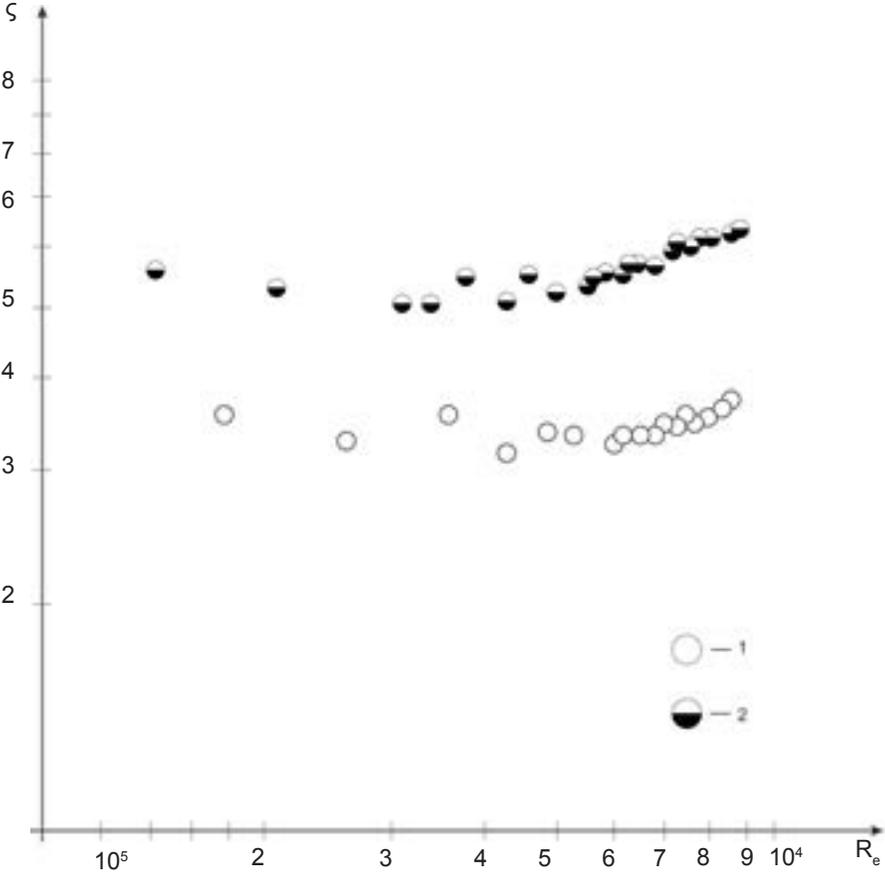


Рис. 3.3. Зависимость сопротивления коэффициента сопротивления ячейки без шара (1) и с левитирующим шаром (2)

## Глава 4

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЛЕВИТАЦИИ ШАРА В ТРУБАХ И КАНАЛАХ

Эффект левитации шара в трубах и каналах может эффективно использоваться в инженерных решениях для организации потока (гидродинамика) или повышения эффективности работы теплового оборудования (теплообмен). Рассмотрим примеры полезного использования левитации шара в каналах.

### 4.1 Гидродинамика

Рассмотрим использование шаровых элементов в установках с двухфазным рабочим телом, например в паротурбинных установках [47]. Впрыскивающий пароохладитель (рис. 4.1) содержит корпус (1) с пароподводящим патрубком (2), камеру смешения (3) и защитную рубашку (4). Камера смешения (3) установлена в корпусе с образованием кольцевого зазора (5). Камера смешения (3) выполнена в виде трубы Вентури, в конфузурной части которой расположен распылитель воды (6). В полости защитной рубашки (4) установлены конфузурные элементы (7), между которыми расположен сепарационный элемент в виде шара (8).

Диаметр шара превышает диаметр меньшего основания конфузурных элементов (7). Защитная рубашка (4) между конфузурными элементами (7) выполнена перфорированной. В кольцевом зазоре (5) установлены непроницаемые перегородки (9), примыкающие с одной стороны к корпусу (1), а с другой — к кромкам большого основания конфузурных элементов. Цель изобретения — повышение эффективности работы пароохладителя путем улучшения сепарации влаги и обеспечение его надежной работы.

При работе пароохладителя в камере смешения (3) образуется двухфазная смесь пара и воды, подаваемых, соответственно, пароподводящим патрубком (2) и распылителем воды (6). Движущийся двухфазный поток ускоряется вблизи конфузурных элементов (7) и приводит шары (8) во взвешенное состояние. В окрестности конфузурных элементов происходит дробление периферийных капель о поверхность последних и срыв пленки воды с поверхности защитной рубашки.

В окрестности шаров происходит захват капель воды в центральную часть устройства, их укрупнение и выброс к проницаемой стенке защитной рубашки (4).

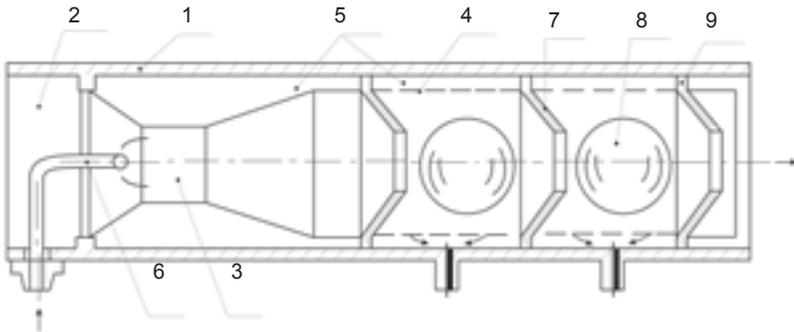


Рис. 4.1. Впрыскивающий парохладитель [47]

Кроме того, хаотические пульсации левитирующих шаров турбулизируют двухфазный поток, что способствует разрушению коагулированных струй воды и пристенных пленок. Непроницаемые перегородки (9) препятствуют протеканию двухфазного потока в обход конфузоров и шаров. Шары могут быть выполнены полыми. Легкие шары позволяют эффективно работать парохладителю при малых расходах пара.

Следующее изобретение относится к системам обработки газа и может быть использовано, например, при мокрой очистке газа. Известен каплеуловитель в установке для очистки газа (рис. 4.2).

С целью повышения эффективности каплеуловителя, в цилиндрическом корпусе (1) с патрубками для подвода (2) и отвода газа (3) и штуцером (4) для слива жидкости, соосно с корпусом (1) установлена проницаемая обечайка (5), в которой размещены подвижные шары (6), а между шарами расположены диафрагмы (7) с центральными отверстиями (8), диаметры которых меньше диаметров шаров.

При работе двухфазная газожидкостная среда по патрубку подается в каплеуловитель, где, проходя через центральные отверстия диафрагм, она приводит шары в состояние левитации.

Капли влаги захватываются левитирующими шарами (6), укрупняются и отбрасываются на проницаемую обечайку (5), проходя через которую, по кольцевому зазору между обечайкой и корпусом под действием силы тяжести влага стекает в нижнюю часть аппарата, где через штуцер для слива жидкости (4) удаляется из него.

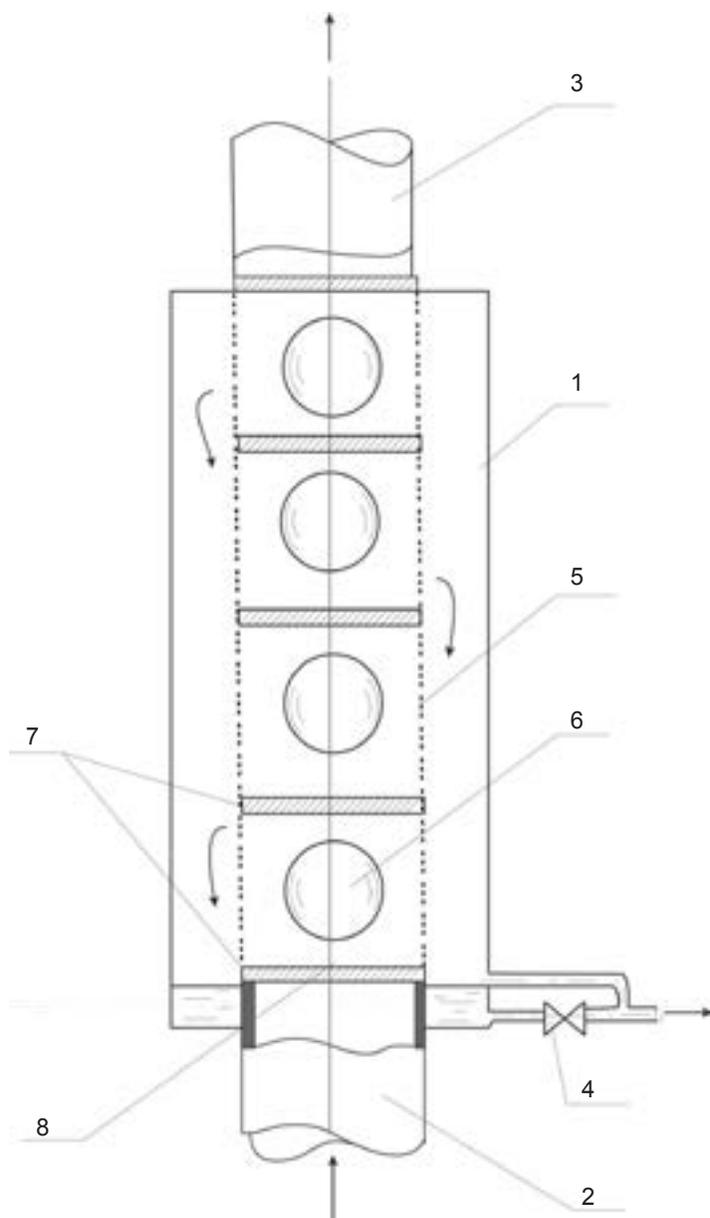


Рис. 4.2. Каплеуловитель в установке для очистки газа

Газовая часть потока, пройдя через подвижные шары, отводится из аппарата по патрубку (3).

Шары целесообразно изготавливать из полистирола, полыми внутри. Легкие шары позволят эффективно использовать каплеуловитель на малых расходах газа.

Технико-экономический эффект предлагаемого изобретения заключается в том, что:

1. Обеспечивается требуемый уровень очистки газа от влаги при любом расходе газожидкостного потока;
2. Исключается повторный унос, уже выделенной из потока влаги;
3. Гидравлическое сопротивление собственно шара практически исключено.

На рис. 4.3а показан продольный разрез устройства для очистки газа, а на рис. 4.3б — устройство для очистки с профилированной трубой Вентури.

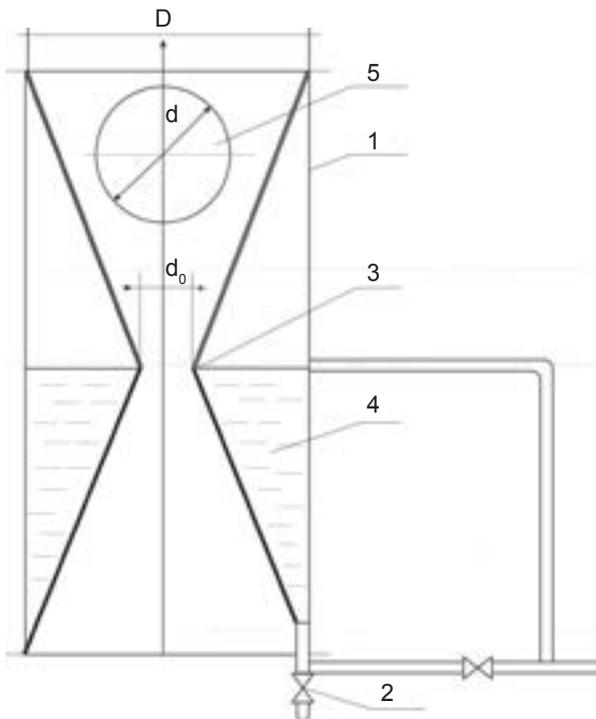


Рис. 4.3а. Устройство для очистки газа [50]

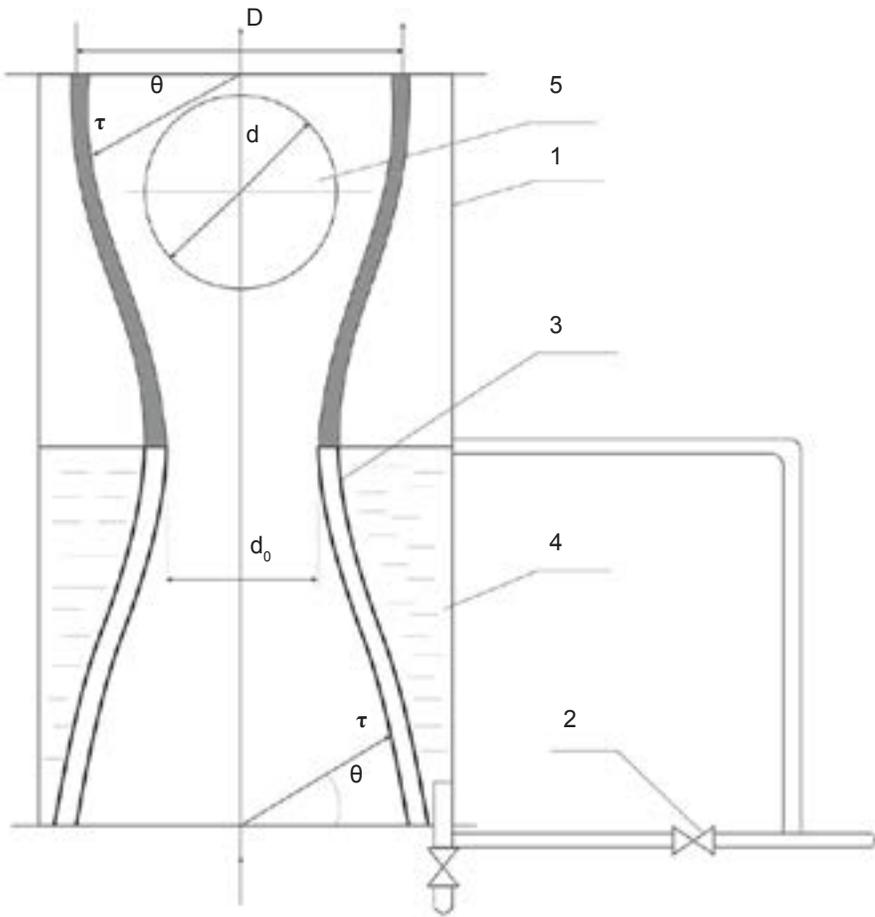


Рис. 4.36. Устройство для очистки газа с трубой Вентури

В известном аппарате диаметр дроссельной части больше диаметра шара. При этом за шаром образуется вихревая область, которая определяет гидравлическое сопротивление шара. Наличие в газовом тракте аппарата шара с присоединенным вихрем за ним и форсунок обуславливает сравнительно большое гидравлическое сопротивление аппарата.

Если через форсунки вода подается крупными каплями, то поверхность контакта между ними газом и водой сравнительно мала, следовательно, эффективность очистки газа невелика и, кроме того, из-за большого расхода воды снижается экономичность аппарата. Если обратная вода подается через отверстия форсунки малого диаметра, то по-

верхность контакта газа с водой выше, а расход воды меньше. Однако при этом обратная вода должна быть очищена от взвеси, в противном случае отверстия форсунок могут забиться пылью. Это приводит к необходимости дополнительных затрат энергии на циркуляцию и очистку обратной воды. Кроме того, в аппарате с форсунками мелкого распыла велик унос потоком газа мелких капель воды. Все это снижает эффективность и экономичность известного аппарата.

Целью изобретения является повышение эффективности и экономичности устройства. В предлагаемом техническом решении обеспечивается самопроизвольная циркуляция воды в рабочей части аппарата за счет действия эффекционных и графитационных сил, без дополнительных затрат мощности на циркуляцию воды.

В цилиндрическом вертикальном корпусе (1) со штуцером (2) для подачи и слива воды установлена труба Вентури (3), образующая совместно с корпусом кольцевую водяную камеру (4). В проницаемой диффузорной части трубы Вентури размещен регулирующий шар (5), диаметр которого больше диаметра горловины трубы Вентури (3).

При работе газ подается в трубу Вентури, ускоряется в ее конфузорной части, подсасывает воду по периферии дроссельной части трубы Вентури вблизи ее горловины, обеспечивает левитацию регулирующего шара, взаимодействует с раздробленными капельками воды, очищается от вредных веществ и удаляется из устройства.

При уменьшении расхода регулирующий шар уменьшает проходное сечение, поддерживая постоянной максимальную скорость газа вблизи горловины трубы Вентури за счет высокой скорости газа, эжектируемая из водяной камеры (4) вода дробится на мелкие капли, которые захватываются регулирующим шаром и отбрасываются на периферию дроссельной части трубы Вентури, где через проницаемую стенку попадают обратно в водяную камеру. Требуемый уровень воды регулируется штуцером (2) для подачи и слива воды.

Образующая трубы Вентури выполнена по закону:

$$\tau = d \sqrt{\frac{\rho}{3}} \operatorname{ch} \left( \frac{\varphi}{3} \right); \quad (4.1)$$

где:

$$\varphi = \alpha \tau \operatorname{ch} \left[ 0,5 \left( \frac{\rho}{3} \right)^{-1,5} \right]; \quad (4.2)$$

$$\rho = \frac{(D/d)^3 - 1}{(D/d) \sin^2 \theta}; \quad (4.3)$$

$\theta$  — угол наклона радиуса-вектора  $\tau$  к продольной оси трубы Вентури;

$D$  — диаметр трубы Вентури;

$d$  — диаметр регулируемого шара.

Технико-экономический эффект предполагаемого изобретения заключается в том, что:

1. снижается каплеунос из устройства;
2. повышается интенсивность массообмена;
3. обеспечивается самопроизвольная циркуляция воды, снижается ее удельный расход;
4. уменьшается гидравлическое сопротивление в газовом тракте устройства.

Следующее изобретение относится к области теплоэнергетики, в частности, к устройствам для использования теплоты продуктов сгорания органического топлива.

Известен регенеративный теплообменник, содержащий газовую камеру, соединенную с водяной камерой каналами подвода и отвода промежуточного теплоносителя, выполненного в виде монолитных металлических шаров, установленный в канале подвода питателя, а в водяной камере — элеватор.

Применение в известном техническом решении сложных кинематических механизмов (питателя и элеватора) снижает эксплуатационную надежность. Кроме того, интенсивность теплообмена в газовой камере невысока.

С целью повысить надежность и экономичность устройства был создан регенеративный теплообменник (рис. 4.4а), содержащий цилиндрическую газовую камеру (1), соединенную с водяной камерой (2) каналами (3) и (4) подвода и отвода промежуточного теплоносителя, выполненного в виде полых металлических шаров (5).

На входе в газовую камеру расположена диафрагма (6) на расстоянии  $l$ , равном  $1,5 \dots 3,5$  диаметра шара в «холодном» состоянии, от которой расположено отверстие (7), соединяющее камеру (1) и канал для подвода промежуточного теплоносителя. Выход из газовой камеры перегорожен отражающей решеткой (8). Шары выполнены из двух полусферических половинок (9), соединенных гофром (10), и частично заполнены жидким теплоносителем (11), например, водой. В нижней части камеры (2) имеется отстойник (12) (рис. 4.4.б).

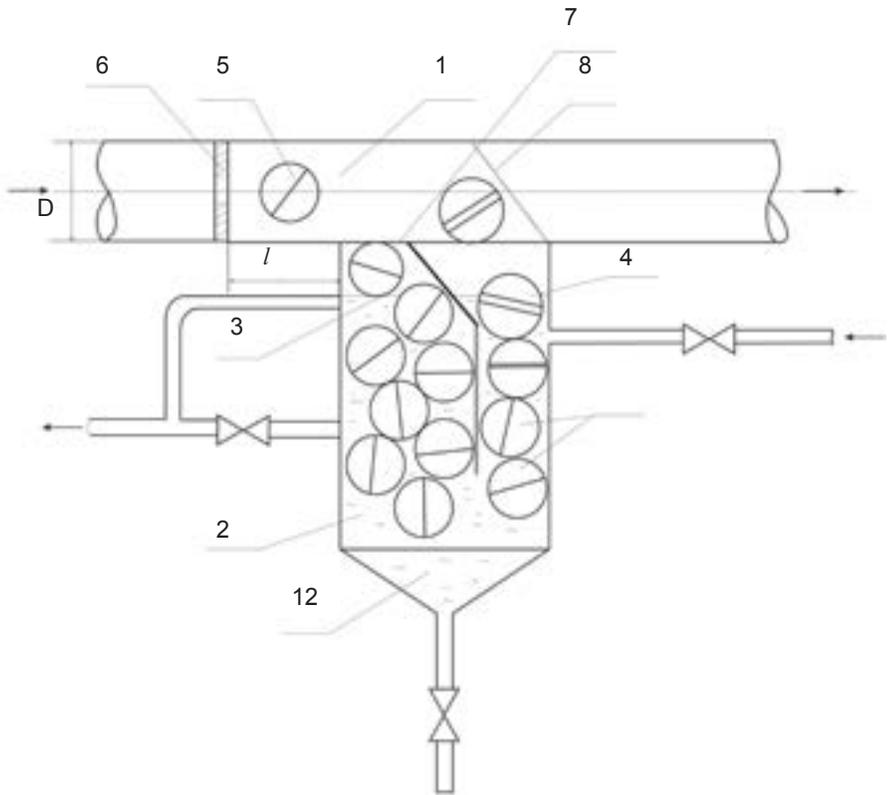


Рис. 4.4а. Регенеративный теплообменник

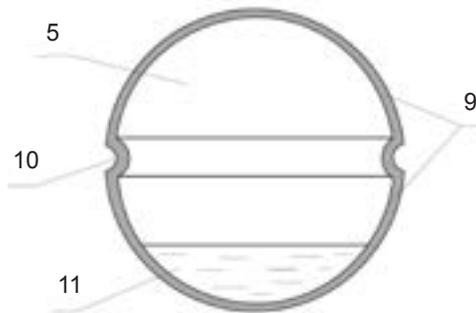


Рис. 4.4б. Шар, заполненный жидким теплоносителем

В предлагаемом техническом решении заполнение полых металлических шаров таково, что обеспечивается их положительная плавучесть, для чего жидкий теплоноситель заполняет их частично. Всплывая, шары выталкиваются к каналу подвода промежуточного теплоносителя в газовую камеру.

Горячий газ, поступающий в эту камеру через диафрагму с центральным отверстием в виде струи, подхватывает из отверстия «холодный» шар и притягивает его к диафрагме, где он висит в струе газа, хаотически вращаясь и не касаясь стенок камеры. Такое выполнение регенеративного теплообменника позволяет полностью отказаться от сложных кинематических схем, организующих движение промежуточного теплоносителя, что повышает его эксплуатационную надежность.

Техническо-экономический эффект предлагаемого технического решения, по сравнению с прототипом, заключается в том, что:

1. устраняются сложные кинематические механизмы;
2. увеличивается интенсивность теплообмена между горячим газом и промежуточным теплоносителем, как за счет струйного обтекания, так и за счет отсутствия точек контакта шаров со стенками газового канала;
3. увеличивается теплоаккумулирующая способность промежуточного теплоносителя, как за счет теплоемкости дополнительного жидкого теплоносителя, так и за счет использования скрытой теплоты фазового перехода;

Все это позволяет повысить надежность и экономичность регенеративного теплообменника.

Надежность теплообменника может быть дополнительно повышена за счет выполнения гофров из материала с обратимой памятью формы так, что в «холодном» состоянии гофр распрямлен, а в нагретом изогнут (рис.4.5). При этом нагретые шары, выброшенные на периферию водяной камеры, тонут, поскольку объем их мал и они не обладают положительной плавучестью. Поэтому исключается загромождение по периферии водяной камеры и, следовательно, устраняется возможность заклинивания шаров. Заполнение шара жидким теплоносителем в этом случае должно быть таково, чтобы при сжатом гофре у него не было запаса плавучести.

Теплообменник с гофром, выполненным из материала с обратимой памятью формы, содержит водяную камеру (1), образованную вертикальным цилиндрическим корпусом (2) и торцевыми стенками (3) с патрубками подвода (4) и отвода (5) воды, внутри которой соосно

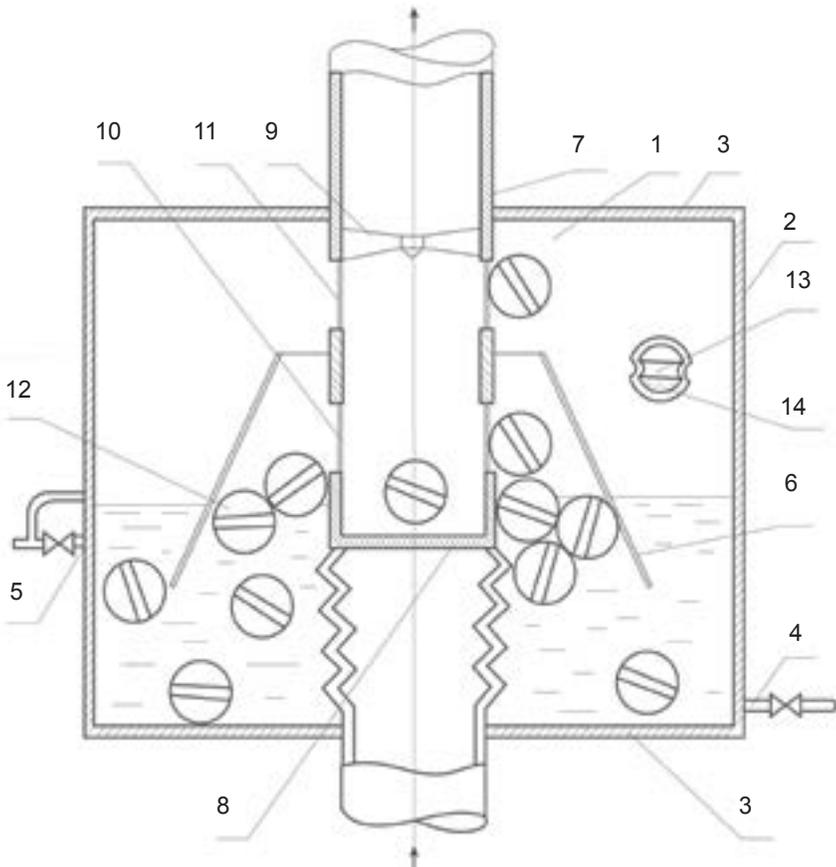


Рис. 4.5. Регенеративный теплообменник с гофром из материала с обратной памятью формы [51]

с корпусом установлены коническая направляющая решетка (6) и газовый патрубок (7), в котором одна над другой размещены диафрагма (8) и отражающая крыльчатка (9), а между ними в газовом патрубке (7) выполнены окна для подвода (10) и отвода (11) промежуточного теплоносителя в виде шаров (12), изготовленных из двух полусферических половинок, соединенных гофром (13) и частично заполненных жидким теплоносителем (14).

Работа теплообменника осуществляется следующим образом. Шар (12) подхватывается из водяной камеры (1) через окно подвода промежуточного теплоносителя (10) струей горячего газа, образующейся в газовом патрубке (7) за диафрагмой (8), и притягивается к диафрагме.

В газовой струе шар левитирует и нагревается. При этом находящийся в шаре (12) жидкий теплоноситель (14) испаряется, давление в шаре повышается, и гофр (13) распрямляется или изгибается, размер шара изменяется и он выталкивается струей от диафрагмы, попадает на крыльчатку (9), закручивается и вследствие циклонного эффекта выбрасывается через окно отвода промежуточного теплоносителя на периферию водяной камеры (1), где шар 12 погружается в воду, отдает свою теплоту, охлаждается, гофр (13) изгибается или распрямляется, шар принимает исходную форму, благодаря положительной плавучести всплывает и вдоль конической направляющей решетки выталкивается следующими за ним шарами к окну подвода промежуточного теплоносителя.

После того как следующий перед ним шар выталкивается потоком газа от диафрагмы, струя подхватывает этот шар, и цикл повторяется.

Следующее изобретение относится к области приборостроения и может быть использовано в любых областях народного хозяйства, где необходимо определение расхода жидкости или газа. Известен шариковый роторный расходомер (авт. свид. СССР № 924513, G01 F1/10, 1982), содержащий корпус с бесконтактным узлом съема сигнала и проточной цилиндрической камерой, имеющей сопловый входной участок и выходной цилиндрический участок с установленным перед ним ограничителем, и свободно расположенный в камере шар, в теле которого выполнено сквозное отверстие. В известном техническом решении шар безотрывно обтекается струей, вытекающей из сопла, что сводит к минимуму гидравлические потери, связанные с обтеканием шара. Однако в проточной камере сразу за соплом образуется обширная вихревая зона, что приводит к большим гидравлическим потерям.

Цель изобретения состоит в снижении гидравлического сопротивления и повышении ресурса расходомера с шаровым ротором за счёт обеспечения безвихревого омывания шарового ротора в рабочей камере расходомера путем профилирования стенки корпуса рабочей камеры по закону:

$$\tau = d \sqrt{\frac{\rho}{3}} \operatorname{ch}\left(\frac{\varphi}{3}\right) \quad (4.4)$$

где  $\tau$  — радиус-вектор, проведенный из центра рабочей камеры к ее стенке;  $d$  — диаметр шарового ротора;

$\rho$ ,  $\varphi$  — величины, зависящие от угла наклона  $\theta$  радиуса-вектора  $\tau$  к продольной оси рабочей камеры и диаметра  $D$  при  $\theta = 90^\circ$

На рис. 4.6 изображен продольный разрез расходомера. Расходомер содержит корпус (1) с входным (2) и выходным (3) патрубками, расположенными соосно с рабочей камерой (4), образованной внутренней стенкой корпуса, которая спрофилирована исходя из соотношения 4:4. В камере свободно размещен намагниченный шаровой ротор (5), имеющий устройство (6) стабилизации направления его вращения, и перед выходным патрубком (3) установлен ограничитель (7). На внешней поверхности корпуса размещен узел съема сигнала (8).

Устройство стабилизации направления вращения шара может быть выполнено в виде, по крайней мере, одного сквозного отверстия в его теле или турбинки, расположенной в выходном патрубке и жестко присоединенной осью к шару. Ограничитель выполняют в виде хотя бы одного ребра или перемычки удобно обтекаемой формы. При работе измеряемый поток рабочего тела поступает в корпус расходомера и по входному патрубку (2) направляется в рабочую камеру, где безотрывно обтекает шаровой ротор (5), приводя последний в состояние левитации, и омывая ограничитель (7) движется к выходному патрубку (3), через который и удаляется из расходомера.

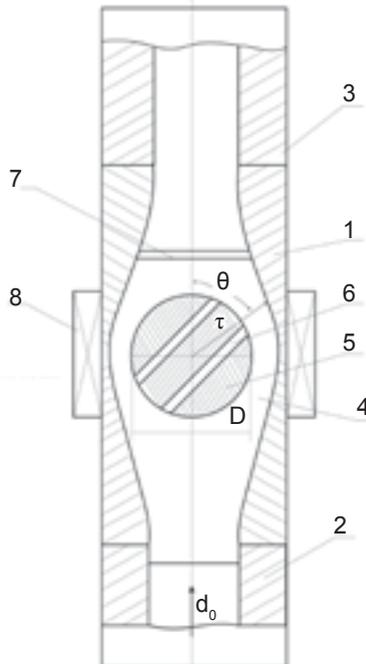


Рис. 4.6. Продольный разрез расходомера [55]

Благодаря тому, что шаровой ротор намагничен, частота его вращения пропорциональна расходу рабочего тела, а направление вращения стабилизировано, в узле съема сигнала (8) возникает электрический сигнал, величина которого пропорциональна частоте вращения ротора. При заполнении расходомера рабочим телом ограничитель препятствует запиранию ротором отверстия выходного патрубка, не вызывая заметного роста гидравлического сопротивления.

Предлагаемое техническое решение, по сравнению с прототипом, позволяет обеспечить безвихревое течение рабочего тела у стенок рабочей камеры, что существенно снижает гидравлическое сопротивление расходомера и, тем самым, повышает энергетическую эффективность тех устройств и установок, в которых он применяется. Устранение вихреобразования в рабочей камере исключает резонанс колебаний шарового ротора при вращении, а следовательно, деформацию его при возможных ударах о стенки камеры, что повышает ресурс расходомера, способствует увеличению точности его показаний за счет исключения подтормаживающего воздействия стенки при контакте с шаром; повышает стабильность измерений путем снижения амплитуды вибрации шарового ротора.

Кроме того, безвихревое течение среды в рабочей камере расходомера приводит к снижению шума и вибрации трубопроводов, что заметно повышает их надежность, улучшает условия эксплуатации и обслуживания.

## 4.2 Интенсификация теплообмена

Рассмотрим изобретение, которое относится к области ядерной энергетики и может быть использовано при разработке активной зоны ядерного реактора с жидким охлаждением.

Тепловыделяющий элемент, состоящий из наружной и гофрированной внутренней цилиндрических оболочек, между которыми находится топливная композиция, отличающаяся тем, что с целью увеличения критической мощности в каждой полости между гофрами дополнительно размещен шаровой элемент, выполненный из материала, замедляющего нейтроны, например, гидрида циркония, а расстояние между гофрами  $L$  и диаметр отверстия  $d_0$ , образованного вершиной гофра, выполняются исходя из соотношений  $L/D < 2$ ,  $d_0/D < 0,6$ ,  $d_0/d < 0,9$ , где  $D$  — диаметр гофрированной оболочки,  $d$  — диаметр шарового элемента.

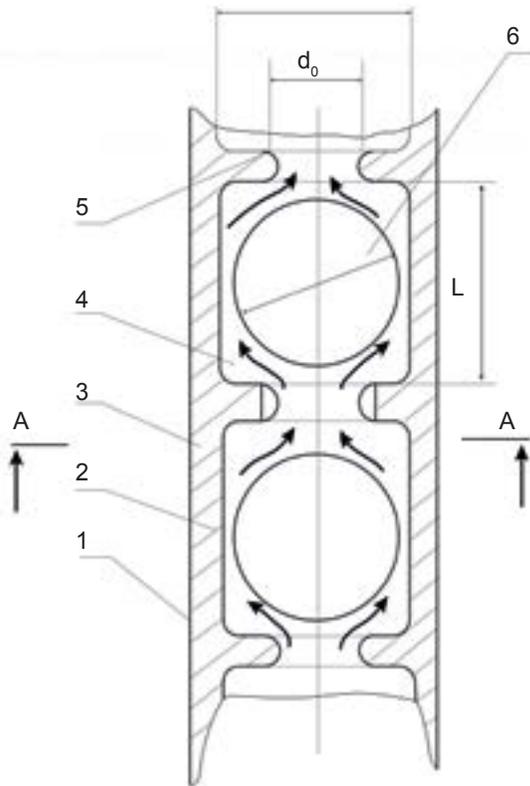


Рис. 4.7а. Тепловыделяющий элемент [52]

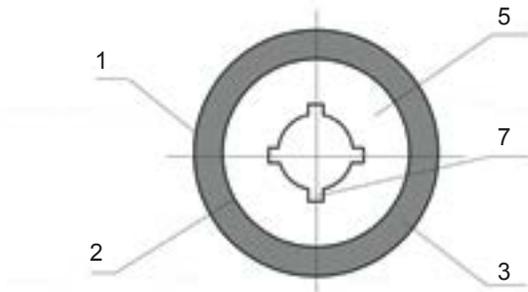


Рис. 4.7б. Сечение А–А тепловыделяющего элемента

При этом на гофрах выполнена, по крайней мере, одна впадина. На рис. 4.7а показан продольный разрез тепловыделяющего элемента, а на рис. 4.7б — сечение А–А.

Тепловыделяющий элемент состоит из наружной (1) и гофрированной (2) цилиндрических оболочек, между которыми находится топливная композиция (3), а в полости (4) между гофрами (5) размещен шаровой элемент (6), выполненный из материала, замедляющего нейтроны. На гофрах (5) выполнены впадины (7).

Работает тепловыделяющий элемент следующим образом. Теплоноситель проходит по внутренней полости, отводит теплоту от внутренней гофрированной оболочки (2) в теплообменник. Проходя через отверстие, образованное вершиной гофра, теплоноситель в виде струи натекает на размещенный в полости между гофрами шаровой элемент, взвешивает и, обтекая его, проводит колебания, приближаясь к внутренней оболочке на участках со сравнительно низкой критической тепловой нагрузкой. Обогнув его, направляется в отверстие, образованное следующим по ходу теплоносителя гофром.

При малых расходах теплоносителя, исключающих левитацию шаровых элементов (6), последние контактируют с гофрами. Наличие впадин обеспечивает предотвращение заклинивания проходного сечения тепловыделяющего элемента. Впадины (7) имеют произвольную форму.

В качестве материала, замедляющего нейтроны, для изготовления шаровых элементов целесообразно использовать гидрид циркония, который по замедляющим свойствам близок к воде, но в отличие от нее не изменяет свои замедляющие свойства при изменении температуры, что упрощает управление ядерным реактором. Следует отметить, что вращение левитирующего шарового элемента, учитывая относительно большое отстояние его от теплопередающей поверхности, слабо сказывается на интенсивности теплообмена. Предлагаемое техническое решение, по сравнению с прототипом, позволяет путем направления струи теплоносителя к теплопередающей поверхности и дополнительной его турбулизации устранить участки со сравнительно низкой критической тепловой нагрузкой, что приводит к возможности увеличить критическую мощность ядерного реактора.

Следующее изобретение тоже относится к области реакторной техники и может быть использовано при разработке активной зоны ядерного реактора с шаровыми тепловыделяющими элементами, преимущественно с газовым теплоносителем.

Надежная работа ядерного реактора с шаровыми тепловыделяющими элементами в значительной степени определяется теплонапряженным состоянием оболочек элементов. Главной причиной, вызывающей деформацию и разрушение оболочек, являются термические напряжения, возникающие вследствие неравномерности их температурного поля, а также радиационного распухания материалов. Неравномерность температурного поля оболочки связана с неравномерностью теплоотвода с его поверхности.

В существующей тепловыделяющей сборке интенсивность теплообмена с поверхности элемента крайне неравномерна. Это обусловлено наличием точек контакта со смежными элементами и перфорированной оболочкой, а также зон ухудшенного теплообмена, расположенных вблизи мест контакта, в которых течение рабочего тела близко к ламинарному [48], что вызывает появление существенной температурной неравномерности в материале оболочки и, как следствие, значительные термические напряжения в ней.

Кроме того, под действием сильных нейтронных потоков в ядерном реакторе происходит радиационное распухание материалов активной зоны, которое зависит от температуры. Поэтому к термическим напряжениям, вызванным неравномерностью температурного поля, добавляются связанные с ней напряжения, обусловленные неравномерностью радиационного распухания, [49] а также механические напряжения, связанные с динамическими и вибрационными нагрузками транспортных энергетических установок, передаваемыми оболочками элементов через точки контакта с другими тепловыделяющими элементами и ограждающими поверхностями.

Все это снижает надежность работы оболочек, что ограничивает повышение температурного уровня и напряженности и сдерживает улучшение массогабаритных характеристик активной зоны реакторов ядерных энергетических установок.

Была создана активная зона канального типа, содержащая по крайней мере один цилиндрический канал с расположенными в нем шаровыми тепловыделяющими элементами, отличающаяся тем, что с целью повышения надежности работы активной зоны в канале дополнительно установлены диафрагмы, между которыми размещен шаровой элемент, при этом расстояние между диафрагмами  $L < 2D$ , а диаметр отверстия в диафрагме  $d_0 < 0,6D$ ,  $d_0 < 0,9d$ , где  $D$  — диаметр канала, а  $d$  — диаметр тепловыделяющего элемента.

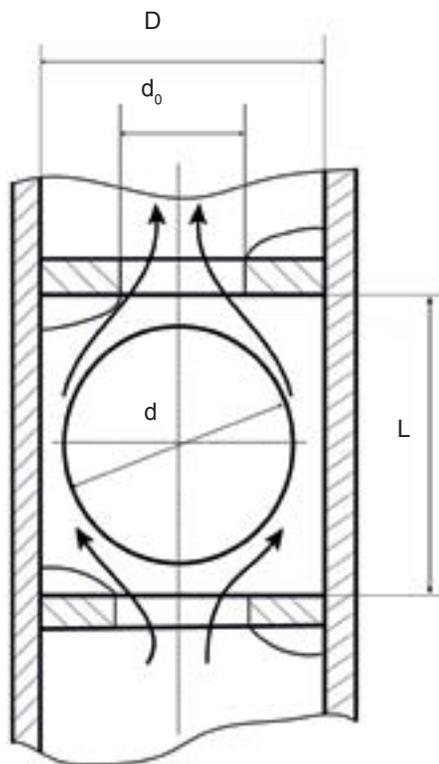


Рис. 4.8а. Диафрагма с выступами

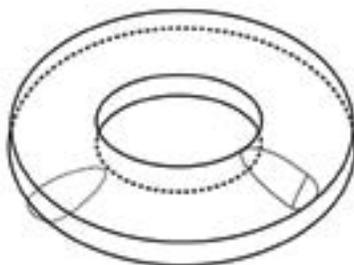


Рис. 4.8б. Цилиндрический канал активной зоны [53]

На рис. 4.8а показан вариант диафрагмы с выступами, а на рис. 4.8б — продольный разрез цилиндрического канала активной зоны канального типа с шаровыми тепловыделяющими элементами.

Активная зона канального типа (рис. 4.9), содержащая по крайней мере один цилиндрический канал с ячейкой, образованной профилированной стенкой канала с расположенными в ней шаровым тепловыделяющим элементом и осевыми отверстиями для входа и выхода теплоносителя, при этом диаметр осевого отверстия,  $d_0 < 0,6D$ ,  $d_0 < 0,9d$  отличается тем, что с целью повышения энергетической эффективности активной зоны стенка канала в пределах одной ячейки спрофилирована по закону:

$$\tau = d \sqrt{\frac{\rho}{3}} \operatorname{ch}\left(\frac{\varphi}{3}\right); \quad (4.5)$$

где

$$\varphi = \alpha \tau \operatorname{ch}\left[0,5\left(\frac{\rho}{3}\right)^{-1,5}\right]; \quad (4.6)$$

$$\rho = \frac{(D/d)^2 - 1}{(D/d)\sin^2\theta}; \quad (4.7)$$

$\tau$  — радиус-вектор, проведенный из центра рабочей камеры к ее стенке;

$\theta$  — угол между радиус-векторами осью канала;

$D$  — диаметр канала;

$d$  — диаметр тепловыделяющего элемента.

На рис. 4.9 показан продольный разрез цилиндрического канала активной зоны канального типа с шаровыми тепловыделяющими элементами.

В канале (1) имеется по меньшей мере одна ячейка (2), образованная профилированными стенками канала, с расположенными в ней шаровым тепловыделяющим элементом (3) и центральными отверстиями для входа (4) и выхода (5) теплоносителя; на внутренней поверхности ячейки имеется по крайней мере один выступ (6).

При работе холодный теплоноситель поступает в цилиндрический канал, проходя через отверстие (4), омывает и взвешивает шаровой тепловыделяющий элемент, нагревается и удаляется через отверстие (5) из ячейки.

При малых расходах теплоносителя, исключая левитацию шаровых элементов, последние контактируют с внутренней поверхностью ячейки, а наличие выступов обеспечивает предотвращение запирания проходного сечения канала. Выступы имеют произвольную форму.

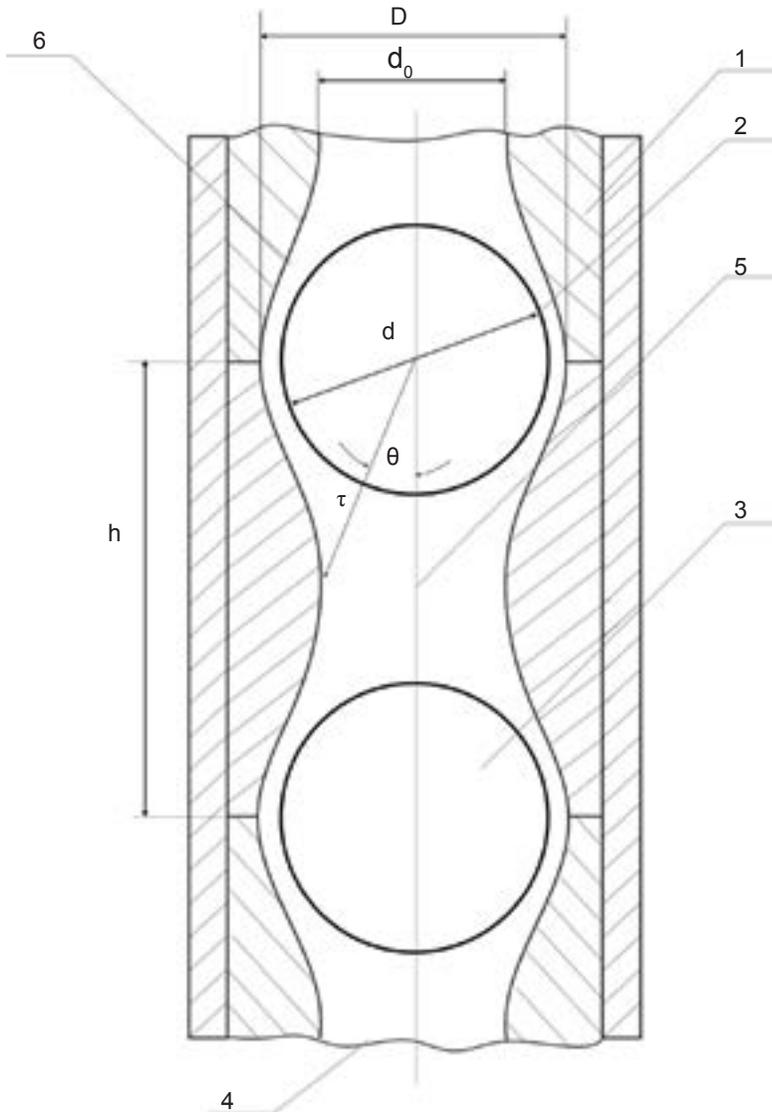


Рис. 4.9. Активная зона канального типа [53]

Предлагаемое техническое решение, по сравнению с прототипом, позволяет обеспечить безвихревое течение теплоносителя в канале активной зоны при сохранении эффекта левитации элементов, благодаря чему уменьшается гидравлическое сопротивление канала и, следовательно, повышается энергетическая эффективность активной зоны канального типа.

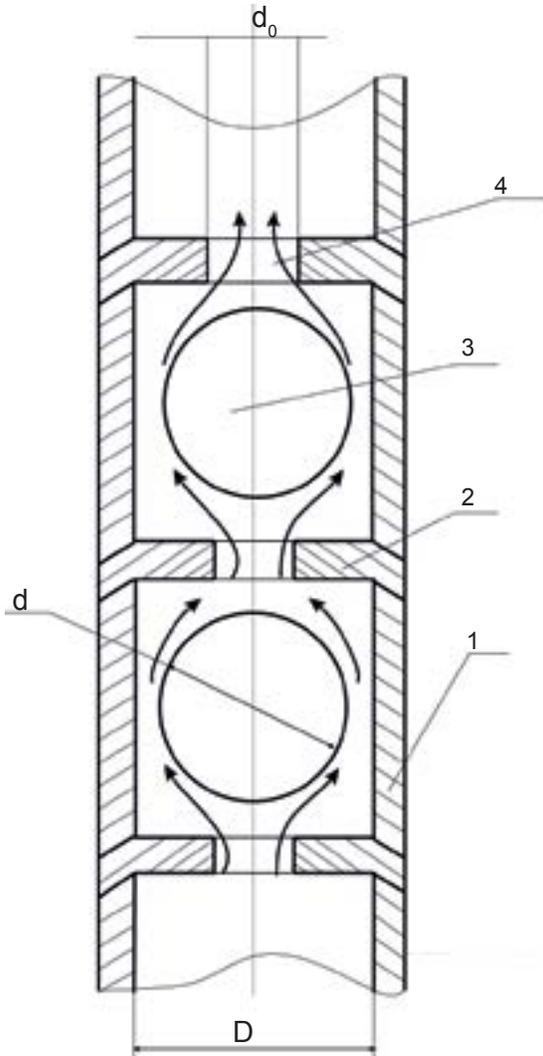


Рис. 4.10. Теплообменная труба [45]

Рассмотрим еще один пример использования шаровых элементов для интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах.

Известна теплообменная труба, содержащая по крайней мере одну ячейку с центральными отверстиями для входа и выхода теплоносителя 4, внутри которой размещен шаровой элемент 3, диаметр которого меньше диаметра трубы, но больше диаметра отверстий для входа и выхода теплоносителя (рис. 4.10) [45]. При работе такого устройства теплоноситель, движущийся во внутренней полости теплообменной трубы (1), в виде струи вытекает из отверстия (4) для входа теплоносителя и омывает размещенный в ячейке шаровой элемент (3).

Под воздействием струи теплоносителя шаровой элемент зависает в струе на некотором расстоянии от отверстия для входа теплоносителя, хаотически вращается, не касаясь стенок ячейки трубы (находится в состоянии левитации). Шаровой элемент турбулизирует пристенный слой теплоносителя, при этом отсутствуют точки контакта шаровых элементов как между собой, так и со стенками теплообменной трубы, что устраняет зоны вблизи этих точек, где интенсивность теплообмена невелика, а возникающее в указанных зонах гидравлическое сопротивление течению теплоносителя велико. Все это позволяет повысить энергетическую эффективность теплообменных аппаратов.

Однако в описанном устройстве ячейка образована цилиндрической проставкой (1) и диафрагмами (2), а это приводит к тому, что при течении теплоносителя в местах соприкосновения проставки с диафрагмами образуются застойные вихревые зоны, снижающие интенсивность теплообмена и увеличивающие гидравлическое сопротивление течению теплоносителя. Поэтому энергетическая эффективность такой теплообменной трубы невысока.

В [46] поставлена цель — повысить энергетическую эффективность теплообменной трубы путем снижения гидравлического сопротивления течению теплоносителя.

Указанная цель достигается тем, что в теплообменной трубе, содержащей по крайней мере одну ячейку с центральными отверстиями для входа и выхода теплоносителя, внутри которой размещен шаровой элемент диаметром, меньшим диаметра трубы, но большим диаметра отверстий для входа и выхода теплоносителя, стенка ячейки спрофилирована по закону:

$$\bar{r} = \frac{d}{2} \left( \sqrt{0,5 + \sqrt{U}} + \sqrt{0,5 - \sqrt{U}} \right) \quad (4.8)$$

где

$$U = \left(\frac{I}{3}\right)^3 - \frac{1}{4}; \quad (4.9)$$

$$I = -\frac{(D/d)^2 - 1}{(D/d)\sin^2 \theta} \quad (4.10)$$

$r$  — величина радиус-вектора от центра ячейки до внутренней поверхности канала;  $\theta$  — угол между радиус-вектором и осью канала;

$D$  — диаметр трубы;  $d$  — диаметр шарового элемента.

В ячейке у входного и выходного отверстия может быть расположено, по меньшей мере по одному выступу.

Предлагаемое в [46] техническое решение основывается на возможности обеспечить безвихревое обтекание шара, если ограничивающие его поверхности будут совпадать с линиями тока, удовлетворяющими условиям потенциального течения.

Такая линия тока представлена в форме кубического уравнения следующего вида:

$$\left(\frac{2F}{d}\right)^3 + I\left(\frac{2F}{d}\right) - 1 = 0 \quad (4.11)$$

Применительно к рассматриваемой задаче ( $D/d > 1$ ) физический смысл имеет одно действительное решение ( $U > 0$ ) уравнения 4.11, которое выражено формулой 4.8.

Такое выполнение теплообменной трубы позволяет в рабочем режиме (когда шаровые элементы находятся в состоянии левитации) устранить застойные вихревые зоны в ячейках, что резко снижает гидравлическое сопротивление течению теплоносителя, поэтому энергетическая эффективность в таком техническом решении высока.

Наличие выступов у входного и выходного отверстий ячейки (которые могут быть выполнены в виде ребер) не приводит к сколько-нибудь заметному повышению гидравлического сопротивления, но позволяет устранить возможность запираания шаровым элементом входного или выходного отверстия ячейки в тех случаях, когда расход теплоносителя недостаточен для обеспечения левитации шарового элемента, т. е. на частичных режимах работы, которые характерны, например, для транспортных энергетических установок.

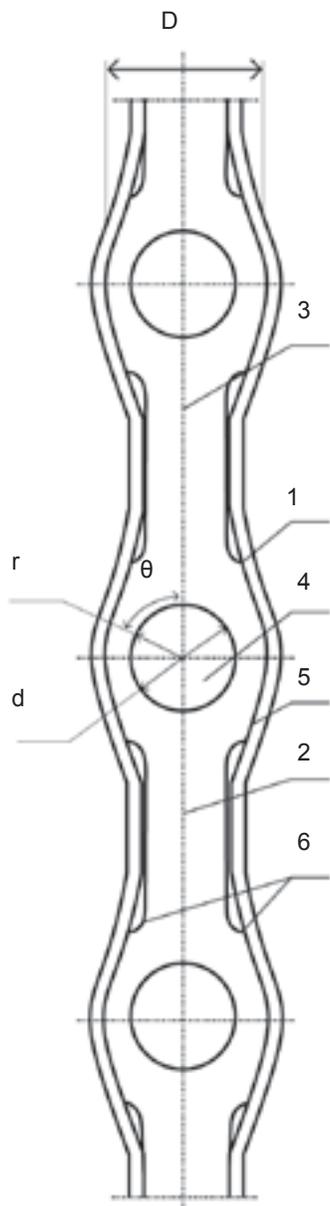


Рис. 4.11. Теплообменная труба с левитирующими шаровыми элементами [45]

На рис. 4.11. изображен продольный разрез теплообменной трубы, которая содержит, по крайней мере, одну ячейку (1) с центральными отверстиями для входа (2) и выхода (3) теплоносителя. В ячейке (1) размещен шаровой элемент (4), а стенка (5) ячейки спрофилирована по закону, описанному формулой (4.1). У отверстий (2) и (3) расположены выступы (6).

Устройство работает следующим образом. При работе теплоноситель поступает в ячейку (1) в виде струи, вытекающей из отверстия для входа теплоносителя (2) и натекающей на размещенный в ячейке (1) шаровой элемент (4). Под воздействием струи теплоносителя шаровой элемент (4) зависает в струе на некотором расстоянии от отверстия (2), хаотически вращается, не касаясь стенок (5) ячейки (1) (находится в состоянии левитации). Благодаря левитации шарового элемента (4) и профилированию стенки (5) ячейки (1) по закону, описанному формулой (4.1), в ячейке 1 отсутствуют застойные вихревые зоны, что снижает гидравлическое сопротивление течению теплоносителя и тем самым обеспечивает высокую энергетическую эффективность теплообменной трубы.

Отработавший теплоноситель удаляется из ячейки (1) через отверстие (3). Выступы (6) позволяют использовать теплообменную трубу на долевых (частичных) режимах работы, когда расход теплоносителя недостаточен для обеспечения левитации шаровых элементов (4), и они могут закрывать отверстия (2) или (3), увеличивая затраты энергии на прокачку теплоносителя. Выступы (6) препятствуют на этих режимах закрытию отверстий (2) или (3), что обеспечивает возможность эффективно использовать теплообменную трубу в транспортных энергетических установках.

Описанное техническое решение позволяет полностью устранить застойные вихревые зоны в ячейках теплообменной трубы, что резко снижает затраты энергии на прокачку теплоносителя, повышает интенсивность теплообмена и тем самым повышает энергетическую эффективность теплообменной трубы [46].

В Приложении 2 приведено полное описание Авторского свидетельства на изобретение тепловой трубы с левитирующими тепловыми элементами SU 1733899 по классу F28 F13/12 от 1983 года.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ЛЕВИТАЦИЯ И ОЛУНЕНИЕ

Будучи самой простой формой, шар идеально подходит для начального исследования левитации тел в стесненном потоке. Наряду с шарами в насадках с псевдооживленным слоем широко применяют эллипсоидные и яйцевидные элементы засыпок. Их использование имеет некоторые преимущества по сравнению с шаровыми элементами. В частности, они перемещаются более равномерно по всему псевдооживленному слою. Нами также было замечено стабилизирующее влияние отверстия в шаре на его вращательное движение.

Нами были намечены, но еще не проведены исследования олунения поверхности шара при его левитации в стесненном потоке. Насколько нам известно, идея использования лунок для интенсификации теплообмена была предложена группой специалистов ИАЭ им. И. В. Курчатова, возглавляемой Геннадием Ираклиевичем Кикнадзе. Основанием для использования лунок с целью интенсификации теплообмена явилось открытие эффекта зарождения торнадо в выемках на поверхностях Земли, а также эксперименты с мячами для игры в гольф. Эти эффекты описаны в статье Бермана и Харвея [41].

В начале книги мы рассмотрели аэродинамические эффекты, которые обеспечивают левитацию шара в стесненном потоке. В заключении мы хотели бы описать эффект торнадо в лунках на поверхности тел, поскольку этот эффект может стать основанием для дальнейшей оптимизации технических решений, использующих левитации тела в трубе или канале. И начать следует с гольфа.

Гольф берет свое начало от шотландской пастушеской игры «гоуф» (по-шотландски «гоуф» означает «бить»). На это, кроме названия, указывает и специфика поля для гольфа. Поле усеяно многочисленными неровностями, искусственными прудами и песчаными «ловушками» — так выглядели узкие прибрежные равнины горной Шотландии. Мячом для игры в «гоуф» служил скрепленный смолой клочок овечьей шерсти. Игры получила распространение в XVI веке, но появилась, конечно, гораздо раньше. В дальнейшем форма, размер и материал для изготовления мяча многократно менялись. Мы, однако, пропустим длинную историю этой эволюции и перенесемся в середину XIX века, когда была открыта гуттаперча. Гуттаперча представляет собой эластичное веще-

---

ство, по составу сходное с каучуком, добывается из растений, произрастающих в Юго-Восточной Азии. Изготавливать мячи из гуттаперчи оказалось легко и недорого. Комок гуттаперчевой смолы размягчали в теплой воде, скатывали из него шарик и оставляли застывать на холоде. Впервые за всю историю игры, за которой к тому времени уже закрепилось название «гольф», игрокам стали доступны мячи идеально круглой формы. И тут случился неожиданный конфуз — оказалось, что идеально круглый мяч летит совсем не так точно и далеко, как рассчитывали игроки и производители.

Вскоре гольфисты заметили, что от ударов клюшками и падения на грунт на мячиках появляются выбоины — лунки, и такие «ущербные» мячики неожиданно ведут себя лучше идеально круглых, летят дальше и точнее. И тогда игроки стали специально «портить» мячики. Идею подхватили производители, и вскоре мячик для гольфа стал приобретать знакомый нам вид шара, равномерно покрытого лунками. Эта поверхность и удерживает мяч на постоянном «летном курсе». Кроме того, в силу аэродинамических свойств, мяч с лунками имеет тенденцию к вращению, а полет вращающегося тела всегда стабильнее, точнее и дальше, подобно снаряду, выпущенному из нарезного ствола. Причины данного явления, обсуждаются до настоящего времени.

В конце XIX века началось массовое промышленное производство гуттаперчевых мячей («гутти», как ласково прозвали их англичане) современной «лунчатой» формы, а в 1889 году свет увидел первый мяч из каучука. Каучуковый мяч при сходной массе обладал гораздо большей пружинистостью, и потому, при той же силе удара, летел значительно дальше «гутти».

Еще почти сто лет продолжались эксперименты с конструкцией мячиков и материалами для их изготовления. Производились мячики с ядром из металла, дерева, ртути, титана, а также с камерой, в которой находится сжатый воздух. Современная двухкомпонентная конструкция мяча была разработана в 1972 году и остается практически неизменной по сей день. Профессиональная ассоциация гольфа (PGA) утвердила окончательно современную форму мяча и размер 1,7 дюйма (4,8 см). Основой для этих параметров стал американский стандарт мячиков для гольфа.

После этого небольшого экскурса вернемся к описанию результатов более «свежих» исследований аэродинамики олуненных шаров. В работе [41] представлены исследования аэродинамического сопротивления

ния мячей для игры в гольф при нанесении на их поверхность системы сферических лунок. Из результатов, представленных на рис. 5.1, видно, как существенно падает коэффициент сопротивления шаров, покрытых сферическими лунками, по сравнению с гладкими шарами.

Необходимо заметить, что явление кризиса сопротивления шара, с ростом числа Рейнольдса хорошо известно. Оно связано с турбулизацией пограничного слоя, что приводит к сдвигу точки его отрыва вниз по потоку. Граница возникновения этого эффект по числу  $Re$  зависит от величины шероховатости поверхности шара. Применяются также искусственные шероховатости, выполненные, например, из проволочного кольца, надетого на шар со стороны натекания потока для провоцирования кризиса сопротивления. Но данные для олуненного шара имеют одну особенность. После достижения значения  $Re$ , соответствующего кризису сопротивления, коэффициент сопротивления падает примерно в 2 раза и, в отличие от шероховатых шаров, не возрастает снова с дальнейшим ростом  $Re$ . Г. И. Кикнадзе использовал этот результат для подтверждения того факта, что на олуненной поверхности возникает особое течение, отличное от обычно рассматриваемых турбулентных течений.

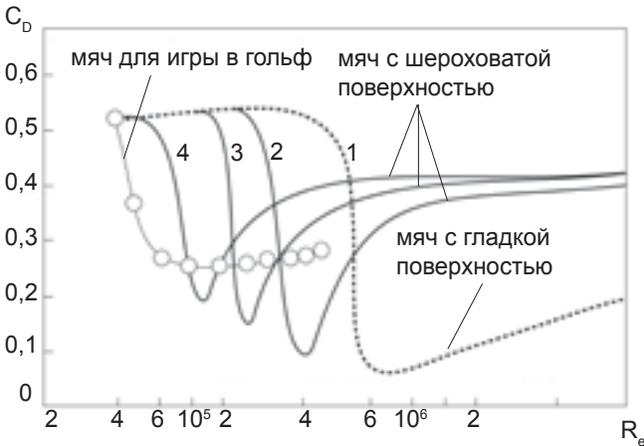


Рис. 5.1. Зависимость коэффициента сопротивления для шаров с гладкой и шероховатой поверхностью и олуненного мяча для игры в гольф:

мяч с лунками  $h/d = 0,009$ ; 2, 3, 4;

шары с относительной шероховатостью  $h/d = 0,0015, 0,005$  и  $0,0125$  соответственно;  $h$  — размер шероховатости или глубина лунки,  $d$  — диаметр шара [44]

Следует отметить, что олунение поверхности может выполняться не только на сферических поверхностях, но и, например, на наружных поверхностях компрессорных лопаток [42].

Об истории появления лунок уже говорилось выше. Прежде всего, изготовители мячей заметили, что при этом легче придать мячу устойчивое направление. Однако уже вскоре было обнаружено, что при этом достигается и существенно большая дальность полета мяча. Экспериментально была выбрана глубина впадин (лунок) 0,25 мм.

На рис. 5.2 показана зависимость дальности полета мяча для гольфа от глубины лунок. Учитывая, что стандартный диаметр мяча равен 42,7 мм, можно видеть, что величина относительной глубины лунок 0,009 (абсолютная глубина 0,25 мм) соответствует максимуму кривой на рис. 5.2. Таким образом, можно говорить о наличии оптимальной глубины с точки зрения снижения сопротивления. Она обеспечивает дальность полета, близкую к максимальной. Таким образом, первично обнаруженный эффект связан лишь со снижением сопротивления.

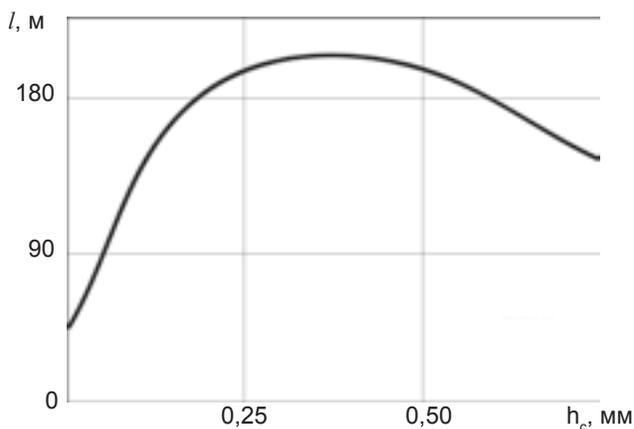


Рис. 5.2. Зависимость дальности полета мяча для гольфа от глубины лунок [44]

Сравнительно недавно были проведены новые опыты по исследованию аэродинамики шаров с лунками с использованием новых методов, в частности, метода цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry — PIV), который позволяет наглядно показать распределение скорости. Кроме того, в этих исследованиях изучалось также влияние вращения, которое, как уже упоминалось выше, оказывает большое влияние на устойчивость полета шара.

В работе [43] рассмотрена различная плотность олунения. При максимальной плотности олунения кризис сопротивления возникает в интервале  $Re = 50-100 \cdot 10^3$  (рис. 5.3), а для глубоких лунок даже при  $Re \approx 30000$ . Обратим внимание на то, что для гладкого шара кризис сопротивления происходит при  $Re \approx 300000$ .

Всплеск интереса к олунению поверхностей в 1980 годах относится к появлению данных о возможности использовать такие поверхности также для интенсификации теплоотдачи, прежде всего в каналах. Инициатором этих работ явился Г. И. Кикнадзе, который на основе визуальных наблюдений образования торнадо и поведения потока в лунках впервые обратил внимание на подобие этих явлений самоорганизации. Отсюда появился термин TLJT (tornado-like jet technology) [44]. Практическим толчком к развитию исследований в этой области явилось, с одной стороны, получение первых многообещающих результатов в области теплообмена, а с другой стороны — внешняя простота задачи исследования одиночной сферической лунки, учитывая быстрый прогресс в области вычислительной гидрогазодинамики (CFD).

Представленные на начальной фазе работы показали неоднозначные результаты. Однако постепенно появилась некоторая ясность, которая позволяет более или менее объективно оценить тот большой объем экспериментального и теоретического материала, который появился в течение последних тридцати лет.

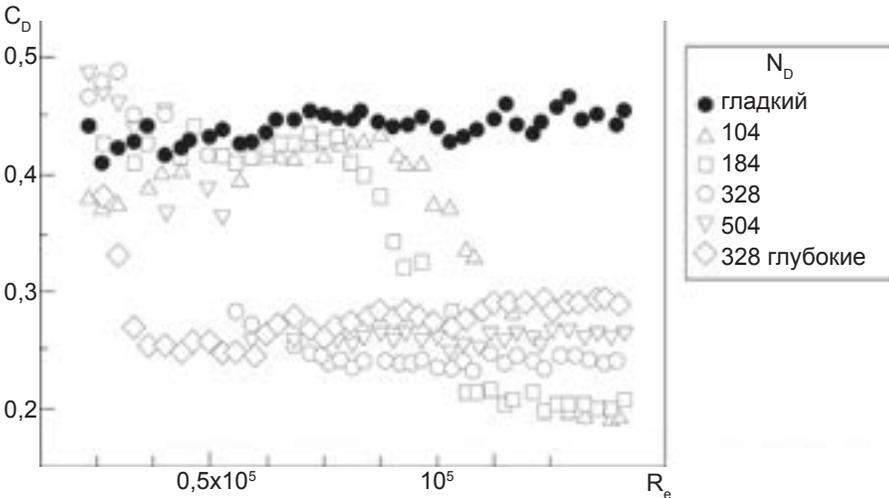


Рис. 5.3. Результаты исследования коэффициента сопротивления олуненного шара в работе [5]: ND — количество лунок

# Приложение 1



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ  
(ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

## АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1733499

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:  
"Эплюсионная труба"

Автор (авторы): Дименок Сергей Леонидович и другие,  
указанные в описании

ЛЕНИНГРАДСКИЙ КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

Заявитель:

Заявка № 4603101 Приоритет изобретения 19 марта 1990г.  
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР  
15 января 1992г.  
Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета Ю. В. Семенов  
Начальник отдела [подпись]





СОЮЗ СОВЕТСКИХ  
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ  
РЕСПУБЛИК

(SU) SU (11) 1733899 A1

ст. 13 F. 28 F. 13/12

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
ПРИ ГКНТ СССР

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

1  
(21) 4803101/06  
(22) 19.03.90  
(46) 15.05.92. Бюл. № 18  
(71) Ленинградский кораблестроительный институт  
(72) Н.Н.Сунцов, Б.В.Сударев, С.П.Деменов, В.В.Медведев и Ю.Н.Добрянский  
(53) 621.565.94 (088.8)  
(56) Авторское свидетельство СССР № 1467363, кл. F 28 F 13/12, 1983.  
(54) ТЕПЛООБМЕННАЯ ТРУБА  
(57) Изобретение относится к теплообменным аппаратам. Целью изобретения является

2  
с повышение энергетической эффективности теплообменной трубы путем снижения гидравлического сопротивления течению теплоносителя за счет заданного профилирования стенки ячейки с центральными отверстиями для входа и выхода теплоносителя, внутри которой размещен шаровой элемент, зависающий под воздействием струи. При оптимальном профилировании стенок ячеек отсутствуют застойные вихревые зоны, что снижает гидравлическое сопротивление. 1 з.л.ф-лы, 1 ил.

Изобретение относится к теплообменным аппаратам и может быть использовано в транспортных энергетических установках.

Известна теплообменная труба, содержащая неподвижную засыпку из шаров, диаметр которых несколько больше радиуса трубы. При работе теплоноситель течет между шарами параллельно стенке трубы. Шары турбулизируют поток теплоносителя, вытесняют его к стенке трубы, за счет чего увеличивается интенсивность теплообмена.

Однако наличие точек контакта между соседними шарами и со стенками трубы приводит к образованию в этих местах застойных вихревых зон, которые с одной стороны ухудшают интенсивность теплообмена, с другой — увеличивают гидравлическое сопротивление теплообменной трубы. Все это приводит к тому, что энергетическая эффективность известной теплообменной трубы невысока.

Наиболее близкой к предлагаемому является теплообменная труба, содержащая по крайней мере одну ячейку с центральными

отверстиями для входа и выхода теплоносителя, внутри которой размещен шаровой элемент, диаметр которого меньше диаметра трубы, но больше диаметра отверстий для входа и выхода теплоносителя.

При работе известного устройства теплоноситель, движущийся во внутренней полости теплообменной трубы, в виде струи вытекает из отверстия для входа теплоносителя и омывает размещенный в ячейке шаровой элемент. Под воздействием струи теплоносителя шаровой элемент зависает в струе на некотором расстоянии от отверстия для входа теплоносителя, хаотически вращается, не касаясь стенок ячейки трубы (находится в состоянии левитации). Шаровой элемент турбулизирует пристенный слой теплоносителя, при этом отсутствуют точки контакта шаровых элементов как между собой, так и со стенками теплообменной трубы, что устраняет зоны обтекания этих точек, где интенсивность теплообмена невелика, а возникающие в указанных зонах гидравлическое сопротивление течению

(SU) SU (11) 1733899 A1

теплоносителя велико. Все это позволяет повысить энергетическую эффективность теплообменных аппаратов.

Однако в известном устройстве ячейка образована цилиндрической проставкой и диафрагмами, а это приводит к тому, что при течении теплоносителя в местах сопряжения проставки с диафрагмами образуются застойные вихревые зоны, снижающие интенсивность теплообмена и увеличивающее гидравлическое сопротивление течению теплоносителя. Поэтому энергетическая эффективность известной теплообменной трубы невысока.

Целью изобретения является повышение энергетической эффективности теплообменной трубы путем снижения гидравлического сопротивления течению теплоносителя.

Указанная цель достигается тем, что в теплообменной трубе, содержащей, по крайней мере, одну ячейку с центральными отверстиями для входа и выхода теплоносителя, внутри которой размещен шаровой элемент диаметром, меньшим диаметра трубы, но большим диаметра отверстия для входа и выхода теплоносителя, стенка ячейки сprofilирована по закону:

$$r = \frac{d}{2} [ \sqrt{0.5 + \sqrt{T}} + \sqrt{0.5 - \sqrt{T}} ], \quad (1)$$

$$\text{где } T = \left( \frac{P}{3} \right)^3 - \frac{1}{4};$$

$$P = - \frac{(D/d)^3 - 1}{(D/d) \sin^2 \theta};$$

$r$  — величина радиус-вектора от центра ячейки до внутренней поверхности канала;

$\theta$  — угол между радиус-вектором и осью канала;

$D$  — диаметр трубы;

$d$  — диаметр шарового элемента.

В ячейке у входного и выходного отверстия могут быть расположены по меньшей мере по одному выступу.

Предлагаемое изобретение основывается на возможности обеспечить безвихревое обтекание шара, если ограничивающие его поверхности будут совпадать с линиями тока, удовлетворяющими условиям потенциального течения. Такая линия тока представлена авторами в форме кубического уравнения следующего вида:

$$\left( \frac{2r}{d} \right)^3 + P \left( \frac{2r}{d} \right) - 1 = 0. \quad (2)$$

Применительно к рассматриваемой задаче ( $D/d > 1$ ) физический смысл имеет одно действительное решение ( $T > 0$ ), которое выражено формулой (1).

Такое выполнение теплообменной трубы позволяет на рабочем режиме (когда шаровые элементы находятся в состоянии левитации), устранить застойные вихревые зоны в ячейках, что резко снижает гидравлическое сопротивление течению теплоносителя. Поэтому энергетическая эффективность в предлагаемом техническом решении высока.

Наличие выступов у входного и выходного отверстия ячейки (которые могут быть выполнены в виде ребер) не приведет к сколько-нибудь заметному повышению гидравлического сопротивления, но позволит устранить возможность загибания шаровым элементом входного или выходного отверстия ячейки в тех случаях, когда расход теплоносителя недостаточен для обеспечения левитации шарового элемента, т.е. на частичных режимах работы, которые характерны, например, для транспортных энергетических установок.

На чертежах изображена теплообменная труба, продольный разрез.

Теплообменная труба содержит, по крайней мере, одну ячейку с центральными отверстиями для входа и выхода теплоносителя. В ячейке 1 размещен шаровой элемент 4, а стенка 5 ячейки сprofilирована по закону, описанному формулой 1. У отверстий 2 и 3 расположены выступы 6. Устройство работает следующим образом.

При работе теплоноситель поступает в ячейку 1 в виде струи, вытекающей из отверстия для входа теплоносителя 2 и натекающей на размещенный в ячейке 1 шаровой элемент 4. Под воздействием струи теплоносителя шаровой элемент 4 заводится в струе на некотором расстоянии от отверстия 2, хаотически вращается, не касаясь стенок 5 ячейки 1 (находится в состоянии левитации). Благодаря левитации шарового элемента 4 и профилированию стенки 5 ячейки 1 по закону, описанному формулой (1), в ячейке 1 отсутствуют застойные вихревые зоны, что снижает гидравлическое сопротивление течению теплоносителя и тем самым обеспечивает высокую энергетическую эффективность теплообменной трубы. Отработавший теплоноситель удаляется из ячейки 1 через отверстие 3. Выступы 6 позволяют использовать теплообменную трубу на долевых (частичных) режимах работы, когда расход теплоносителя не достаточен для обеспечения левитации шаровых элементов 4 и они могут загромождать отверстия 2 или 3, увеличивая затраты энергии на прокачку теплоносителя. Выступы 6 препятствуют на этих режимах загромождению от-

верстий 2 или 3, что обеспечивает возможность эффективно использовать теплообменную трубу в транспортных энергетических установках.

Предлагаемое изобретение по сравнению с прототипом позволяет полностью устранить застойные вихревые зоны в ячейках теплообменной трубы, что резко снижает затраты энергии на прокачку теплоносителя, повышает интенсивность теплообмена и тем самым повышает энергетическую эффективность теплообменной трубы.

**Формула изобретения**

1. Теплообменная труба, содержащая, по крайней мере, одну ячейку с центральными отверстиями для входа и выхода теплоносителя, внутри которой размещен шаровой элемент диаметром, меньшим диаметра трубы, но большим диаметра отверстий для входа и выхода теплоносителя, отличающаяся тем, что, с целью повышения энергетической эффективности путем

снижения гидравлического сопротивления течению теплоносителя, стенка ячейки сфигурирована по закону:

$$r = \frac{d}{2} [ 0,5 + \sqrt{T} + \sqrt{0,5 - \sqrt{T}} ],$$

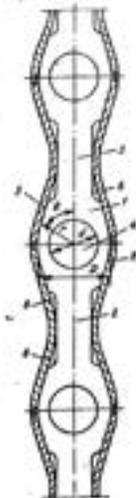
где  $T = \left(\frac{p}{3}\right)^2 - \frac{1}{4}$ ;

$$p = \frac{(D/d)^2 - 1}{(D/d) \sin^2 \theta}.$$

$r$  – величина радиус-вектора от центра ячейки до внутренней поверхности канала;  
 $\theta$  – угол между радиус-вектором и осью канала;

$D$  и  $d$  – диаметры трубы и шарового элемента соответственно.

2. Труба по п. 1, отличающаяся тем, что у входного и выходного отверстий ячейки расположено по меньшей мере по одному выступу.



50

Редактор Ю.Середа	Составитель О.Азимова Техред М.Моргентал	Корректор М.Пожо
Заказ 1661	Тираж	Подписное
ВНИИПИ Государственного комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., 4/5		
Производственно-издательский комбинат "Патент", г. Ужгород, ул. Гагарина, 101		



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК  
 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
 ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ  
 (ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

## АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№

1749614

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

"Впрыскивающий парохладитель"

Автор (авторы): Деменов Сергей Леонидович и другие,  
 указанные в описании

ЛЕНИНГРАДСКИЙ КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

Заявитель:

Заявка № 4882824 Приоритет изобретения 16 ноября 1990г.

Зарегистрировано в Государственном реестре  
 изобретений СССР

22 марта 1992г.

Действие авторского свидетельства распро-  
 страняется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

*Расс*  
*Зинин*



СОЮЗ СОВЕТСКИХ  
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ  
РЕСПУБЛИК

(19) SU (11) 1749614 A1

(21) F 22 G 5/12

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
ПРИ ГКНТ СССР

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

1

(21) 4882824/06

(22) 16.11.90

(46) 23.07.92. Бюл. № 27

(71) Ленинградский кораблестроительный институт

(72) Н. Н. Сунцов, Б. В. Сударев, С. Л. Дени-  
нок, В. В. Медведев и Б. А. Иванский

(56) Авторское свидетельство СССР

№ 754161, кл. F 22 G 5/12, 1977.

Авторское свидетельство СССР

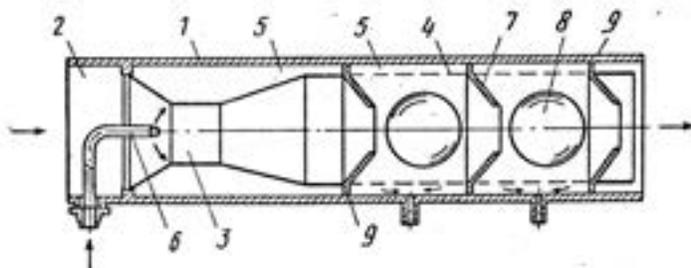
№ 1160173, кл. F 22 G 5/12, 1984.

(54) ВПРЫСКИВАЮЩИЙ ПАРООХЛАДИ-  
ТЕЛЬ

(57) Использование: для эксплуатации в па-  
рогурбинных установках. Сущность изобре-  
тения: впрыскивающий парохладитель  
содержит корпус (1) с паропроводящим пат-

2

рубком (2), камеру (3) смешения и защитную  
рубашку (4). Камера (3) смешения установле-  
на в корпусе с образованием кольцевого  
зазора (5). Камера (3) смешения выполнена  
в виде трубы Вентури, в конфузурной части  
которой расположен распылитель (6) воды.  
В полости защитной рубашки (4) установле-  
ны конфузурные (7), между которыми распо-  
ложен сепарационный элемент в виде шара  
(8). Диаметр шара (8) превышает диаметр  
меньшего основания конфузур (7). Защит-  
ная рубашка (4) между конфузурными (7)  
выполнена перфорированной. В кольцевом  
зазоре (5) установлены непроницаемые пе-  
регородки (9), примыкающие с одной сто-  
роны к корпусу (1), а с другой - к краям  
большого основания конфузуров. 1 з.п. ф-  
лы, 1 ил.



(19) SU (11) 1749614 A1

Изобретение относится к теплоэнергетике и может быть использовано в паротурбинных установках.

Известен впрыскивающий пароохладитель, содержащий корпус с пароподводящим патрубком, и установленную в корпусе камеру смешения, выполненную в виде трубы Вентури, и защитную рубашку, причем в последней размещена перфорированная обечайка и шнековый сепаратор. Для отвода конденсата в нижней части защитной рубашки установлен патрубок для отвода воды.

Недостатком известного пароохладителя является то, что он эффективно работает только при малых скоростях пара.

Наиболее близким к изобретению является впрыскивающий пароохладитель, содержащий камеру смешения и защитную рубашку, размещенные соосно относительно горизонтального корпуса, причем камера смешения выполнена в виде трубы Вентури, в конфузорной части которой расположен распылитель воды, а в полости защитной рубашки установлен ряд конфузоров.

Недостатком пароохладителя является то, что процесс сепарации влаги на конфузорах повышается с уменьшением модуля сужения конфузора, что приводит к снижению эффективности работы пароохладителя за счет увеличения остаточного сопротивления устройства.

Цель изобретения – повышение эффективности работы пароохладителя путем улучшения сепарации влаги.

Поставленная цель достигается тем, что впрыскивающий пароохладитель содержит установленную в корпусе камеру смешения с образованием кольцевого зазора относительно последнего, причем камера смешения выполнена в виде трубы Вентури, в конфузорной части которой расположен распылитель воды, и защитную рубашку, в полости которой установлен ряд конфузоров, сепарационный элемент в виде шара, установленный между конфузорами и выполненный с диаметром, превышающим диаметр меньшего основания последних, а защитная рубашка выполнена перфорированной.

В кольцевом зазоре впрыскивающего пароохладителя установлена непроницаемая перегородка, примыкающая к кромкам большого основания конфузоров.

На чертеже представлен впрыскивающий пароохладитель, общий вид.

Впрыскивающий пароохладитель содержит корпус 1 с пароподводящим патрубком 2, камера 3 смешения и защитную рубашку 4. Камера 3 смешения установлена

в корпусе с образованием кольцевого зазора 5 и выполнена в виде трубы Вентури, в конфузорной части которой размещен распылитель 6 воды. В полости защитной рубашки 4 установлены конфузоры 7, между которыми расположены сепарационные элементы в виде шаров 8, причем диаметр шара 8 превышает диаметр меньшего основания конфузоров 7. Защитная рубашка 4 между конфузорами 7 выполнена перфорированной. В кольцевом зазоре 5 установлены плотные, непроницаемые перегородки 9, примыкающие с одной стороны к корпусу 1, а с другой – к кромкам большого основания конфузоров 7.

Впрыскивающий пароохладитель работает следующим образом.

В камере 3 смешения образуется двухфазная смесь пара и воды, подаваемая соответственно пароподводящим патрубком 2 и распылителем 6 воды. Движущийся двухфазный поток ускоряется вблизи конфузоров 7 и приводит шары 8 во взвешенное состояние. В окрестности конфузоров 7 происходит дробление периферийных капель о поверхность последних и срыв пленки воды с поверхности защитной рубашки, тем самым увеличивая аэродинамический распыл воды. В окрестности шаров 8 происходит захват капель воды в центральной части устройства, их укрупнение и выброс к принимаемой стенке защитной рубашки 4. Кроме того, хаотические пульсации левитирующих шаров 8 турбулизируют двухфазный поток, что способствует разрушению коагулированных струй воды и пристенных пленок. Непроницаемые перегородки 9 препятствуют протеканию двухфазного потока в обход конфузоров 7 и шаров 8. При повышенной проницаемости защитной рубашки 4 происходит ускоренный отвод воды, устраняющий вторичный каплеунос. Перегородки 9 могут быть выполнены заодно с конфузорами 7 и являться дистанционирующими элементами.

Шары 8 могут быть выполнены полыми. Легкие шары позволяют эффективно работать пароохладителю при малых расходах пара.

Использование впрыскиваемого пароохладителя позволит обеспечить требуемый уровень сепарации влаги и снизить остаточное сопротивление устройства.

#### Формула изобретения

1. Впрыскивающий пароохладитель, содержащий установленную в корпусе камеру смешения с образованием кольцевого зазора относительно последнего, причем камера смешения выполнена в виде трубы Вентури, в конфузорной части которой рас-

5

1749614

6

положен распылитель воды, и защитную рубашку, в полости которой установлен ряд конфузоров, отличающийся тем, что, с целью сепарации влаги, он содержит сепарационный элемент в виде шара, установленный между конфузорами и выполненный с диаметром, превышающим диаметр мень-

шего основания последних, а защитная рубашка выполнена перфорированной.

2. Пароохладитель по п. 1, отличающийся тем, что в кольцевом зазоре установлена непроницаемая перегородка, прилегающая к кромкам большего основания конфузоров.

5

Редактор Н.Гунько

Составитель Т.Колосова  
Техред М.Моргентал

Корректор Н.Бонкало

Заказ 2582

Тираж

Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР  
113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., 4/5

Производственно-издательский комбинат "Патент", г. Ужгород, ул. Гагарина, 101



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК  
 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
 ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ ССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ  
 (ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

## АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1719870

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

"Регенеративный теплообменник"

Автор (авторы): Даменок Сергей Леонидович и другие,  
 указанные в описании

Заявитель: ЛЕНИНГРАДСКИЙ КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

Заявка № 4817674 Приоритет изобретения 23 апреля 1990г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР

15 ноября 1991г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

*Ю. В. Селин*  
*Г. И. Руд*





СОЮЗ СОВЕТСКИХ  
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ  
РЕСПУБЛИК

(19) SU (11) 1719870 A1

encl F 28 D 17/00

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
ПРИ ФЕДЕ ЦС ССР

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

1

(21) 4817674/08  
(22) 23.04.90  
(45) 15.03.92. Бюл. № 10  
(71) Ленинградский кораблестроительный институт  
(72) В.А.Чмстяков, Б.В.Сударев, С.Л.Демених, В.В.Медведев и Ю.Н.Добрянский  
(53) 621.187 (088.8)  
(56) Авторское свидетельство СССР № 1012000, F 23 L 15/02, 1983, авторское свидетельство СССР № 844971, кл. F 28 D 17/00, 1979.

(54) РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ТЕПЛОБМЕННИК

(57) Использование: в теплотехнике для утилизации тепла отходящих газов. Цель - повышение надежности и экономичности. Сущность изобретения: шар (Ш) 5 подхватывается из канала 3 через проем 7 струей горячего газа, поступающего в камеру (К) 1 через центральное отверстие диффрагмы (Д) 6 и притягивается к ней. Обтекаемый струей Ш 5 хаотически вращается, не касаясь сте-

2

нок К 1 и Д 6, и нагревается. При этом находящийся в Ш 5 жидкий теплоноситель испаряется. Давление в Ш 5 повышается и выпрямляет гофр, раздвигая полусферические половинки Ш, что увеличивает его размеры. Струя перестает удерживать Ш 5 у Д 6, и он уносится потоком газа к отражающей решетке 8, которая направляет его в канал 4. Под весом поступающей следом Ш 5 он опускается в водяную К 2, где отдает свое тепло воде. Находящийся внутри шара теплоноситель конденсируется, давление понижается, и гофр 10 за счет своей упругости сжимает половинки. Охлажденный Ш 5 сохраняет положительную плавуность и всплывает к каналу 3, где выталкивается следующими за ним Ш 5 к проему 7. После того, как следующий перед ним Ш 5 выталкивается после нагрева потоком газа от Д 6, струя подхватывает этот Ш 5, и цикл повторяется. Таким образом обеспечивается устойчивая циркуляция Ш 5 без применения механизмов, что: повышает надежность и экономичность. 2 ил.

Изобретение относится к теплоэнергетике, в частности к устройствам для использования теплоты продуктов сгорания органического топлива.

Известен регенеративный теплообменник, содержащий газовую камеру, соединенную с водяной камерой каналами подвода и отвода промежуточного теплоносителя, выполненного в виде монолитных металлических шаров, и установленные в

канале подвода питатель, а в водяной камере элеватор.

Недостатком теплообменника является применение сложных кинематических механизмов питателя и элеватора, что снижает эксплуатационную надежность. Кроме того, интенсивность теплообмена в газовой камере невысока.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому является регенеративный теплообменник, содержащий

encl SU (11) 1719870 A1

газовую камеру, соединенную каналами подвода и отвода промежуточного теплоносителя, образованного полыми металлическими шарами, с водяной камерой. Канал отвода промежуточного теплоносителя снабжен винтовой направляющей.

Недостатком этого теплообменника является сравнительно низкая эксплуатационная надежность, что вызвано наличием кинематических механизмов и возможностью повреждения сминания полых шаров шнеком. Недостаточна также теплоаккумулирующая способность пустых полых металлических шаров и теплоэнергетическая эффективность газовой камеры. Последнее обусловлено малым проходным сечением в окрестностях точек контактов шаров, а следовательно, сравнительно низкой интенсивностью теплообмена. Все это снижает экономичность теплообменника.

Цель изобретения — повышение надежности и экономичности.

Поставленная цель достигается тем, что в регенеративном теплообменнике, содержащем газовую камеру, подключенную своим входным участком к источнику газа и сообщенную перепускным проемом с водяной камерой, заполненной промежуточным теплоносителем в виде полых металлических шаров, теплообменник дополнительно снабжен диафрагмой с центральным отверстием, газовая камера выполнена цилиндрической, расположена горизонтально над водяной камерой, перепускной проем выполнен в ее боковой стенке, а диафрагма размещена во входном участке газовой камеры на расстоянии от проема, составляющем 1,5–3,5 диаметра шара, при этом шары выполнены из двух полушар, соединенных гофром, и частично заполнены жидкостью.

На фиг. 1 схематично изображен регенеративный теплообменник; на фиг. 2 — шар, используемый в качестве промежуточного теплоносителя, поперечный разрез.

Теплообменник содержит цилиндрическую газовую камеру 1, соединенную с водяной камерой 2 каналами 3 и 4 для подвода и отвода промежуточного теплоносителя, выполненного в виде полых металлических шаров 5. Во входном участке газовой камеры 1 размещена диафрагма 6 на расстоянии 1 от перепускного проема 7, соединяющего камеру 1, и канал 3 водяной камеры 2, состоящим 1,5–3,5 диаметра шара 5 в холодном состоянии. Выход из газовой камеры 1 перегорожен отражающей решеткой 8. Шары 5 выполнены из двух полушар-

рических половинок 9, соединенных гофром 10, и частично заполнены жидкостью 11, например водой. В нижней части камеры 2 имеется отстойник 12.

Работа теплообменника осуществляется следующим образом.

Шар 5 подхватывается из канала 3 через отверстие 7 струей горячего газа, поступающей в камеру 1 через центральное отверстие диафрагмы 6, и притягивается к этой диафрагме вследствие подсасывающего воздействия струи, пролегающей при расстоянии 1, равном 1,5–3,5 диаметра шара 5. Обтеканием струей шар 5 находится в состоянии левитации, хаотически вращается, не касаясь стенок камеры 1 и диафрагмы 6, и нагревается. При этом находящийся в шаре 5 жидкий теплоноситель 11 испаряется. Давление в шаре 5 повышается и выталкивает гофр 10, раздвигая полушары 9, что увеличивает размеры шара, нарушая его обтекание струей. Струя перестает удерживать шар 5 у диафрагмы 6, и он уносится потоком газа к отражающей решетке 8, которая направляет его в канал 4 отвода промежуточного теплоносителя. Под весом поступающих следов шаров 5 он опускается в водяную камеру 2, где отдает свое тепло воде. Находящийся внутри шара теплоноситель 11 конденсируется, давление понижается, и гофр 10 за счет своей упругости сжимает полушары 9. Охлажденный шар 5 сохраняет положительную плавучесть и всплывает к каналу 3, где выталкивается следующими за ним шариками 5 к проему 7. После этого как следующий период ним шар 5 выталкивается после нагрева потоком газа от диафрагмы 6, струя подхватывает этот шар, и цикл повторяется.

Увеличение расстояния 1 более 3,5 или уменьшение его менее 1,5 диаметра шара 5 приводит к исчезновению эффекта захвата, что нарушает работоспособность теплообменника.

Применение предлагаемого теплообменника позволяет повысить эксплуатационную надежность за счет устранения сложных кинематических механизмов. Увеличение интенсивности теплообмена между горячим газом и промежуточным теплоносителем как за счет струйного обтекания, так и за счет отсутствия точек контакта шаров со стенками газовой камеры и увеличение теплоаккумулирующей способности промежуточного теплоносителя как за счет теплоемкости дополнительного жидкого теплоносителя, так и за счет использования скрытой теплоты фазового перехода позволяет повысить экономичность теплообменника.

5

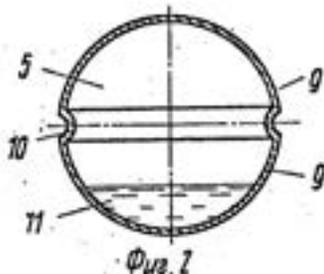
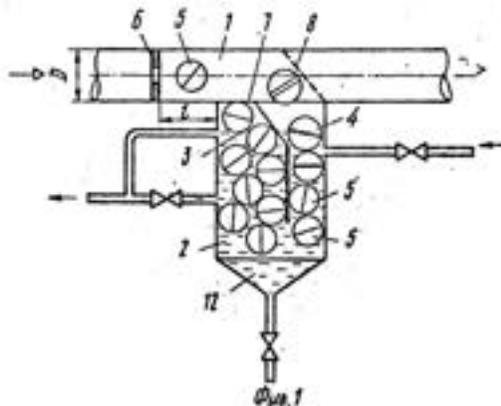
1719970

6

**Формула изобретения**

Регенеративный теплообменник, содержащий газовую камеру, подключенную своим входным участком к источнику газа и сообщенную перепускным проемом с водной камерой, заполненной промежуточным теплоносителем в виде полых металлических шаров, отличающийся тем, что, с целью повышения надежности и экономичности, он снабжен диафрагмой с цент-

ральным отверстием, газовая камера выполнена цилиндрической, расположена горизонтально над водной камерой, перепускной проем выполнен в ее боковой стенке, а диафрагма размещена во входном участке газовой камеры на расстоянии от проема, составляющим 1,5-3,5 диаметра шара, при этом шары выполнены из двух полушар, соединенных гофром, и частично заполнены жидкостью.



Редактор В.Фельдман	Составитель Г.Петров Техред М.Моргентал	Корректор И.Муска
Заказ 763	Тираж	Подписное
ВНИИПИ Государственного комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., 4/5		

Производственно-издательский комбинат "Патент", г. Ужгород, ул. Гагарина, 101



СОЮЗ СОВЕТСКИХ  
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ  
РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПАТЕНТНОЕ  
ВЕДОМСТВО СССР  
(ГОСПАТЕНТ СССР)

№ SU (11) 1782638 A1

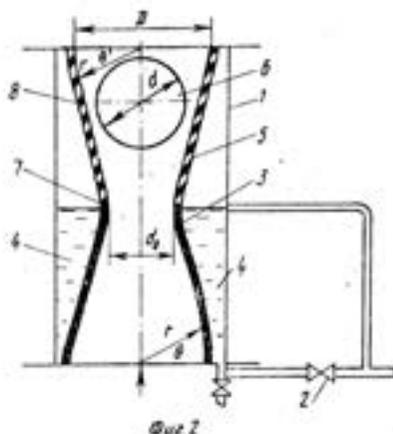
класс В 01 D 47/10

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(21) 4877516/26  
(22) 24.10.90  
(46) 23.12.92, Бюл. № 47  
(71) Ленинградский кораблестроительный институт  
(72) С. Л. Деменок, М. Э. Арисланов, В. В. Медведев, С. М. Сивуха и Д. В. Чистяков  
(56) Авторское свидетельство СССР № 325026, кл. В 01 D 47/00, 1970, публ.  
Авторское свидетельство СССР № 230084, кл. В 01 D 47/10, 1966, публ.  
(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА

(57) Использование: мокрая очистка газа. Сущность изобретения: с целью повышения эффективности и экономичности устройства для очистки газа в его цилиндрическом вертикальном корпусе 1 со штуцером 2 для подачи и слива воды установлена труба Вентури 3, образующая совместно с корпусом 1 кольцевую водяную камеру 4. В пронизывающей диффузорной части трубы Вентури 3 размещен регулирующий шар 6, диаметр которого больше диаметра горловины трубы Вентури 3, 2 ил.



№ SU (11) 1782638 A1

Изобретение относится к газоричным системам и может быть использовано при морской очистке газа.

Известна установка для очистки воздуха от механических примесей, содержащая паровоздушный эжектор, центробежный пылеуловитель, патрубки для подвода и отвода газа и трубопроводы для подачи и слива воды.

При работе установки вода подается в паровоздушный эжектор, где за счет высокой скорости газа вода дробится на мелкие капли, в результате чего увеличивается поверхность контакта газа с жидкостью, механические примеси, столкнувшись с каплями воды, укрупняются и в центробежном пылеуловителе за счет циклонного эффекта крупные частицы с водой осаждаются и удаляются из установки.

Условием эффективной очистки газа в известной установке является поддержание постоянного высокого гидравлического сопротивления в паровоздушном эжекторе. Однако довольно часто колебания расхода газа, которые имеют место на практике приводят к колебаниям перепада давления в эжекторе, при снижении которого очистка ухудшается. Скомпенсировать падение скорости газа увеличением плотности орошения при тонкой очистке газа полностью не удается. Скорость газа в центробежном пылеуловителе должна быть сравнительно велика (3,5-5 м/с), чтобы снизить прыгаюность (см. А.В. Вальдберг, с. 33). Поэтому гидравлическое сопротивление пылеуловителя велико. Большие гидравлические сопротивления в последовательно установленных паровоздушном эжекторе и центробежном пылеуловителе требуют значительной мощности газонапорного аппарата или вентилятора, что снижает экономичность устройства. Уменьшение гидравлического сопротивления вследствие снижения скорости в газовом тракте устройства приводит к снижению эффективности очистки газа.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому изобретению является аппарат для очистки газов, содержащий вертикально установленную трубу Вентури, в полости которой размещен на опоре регулирующий орган-шар и установлены форсунки орошения.

В начале технологического процесса (малые расходы) запыленный газ поступает в трубу Вентури и проходит дроссельное место создавая определенный перепад давления. По достижении определенного перепада давления шар переходит во взвешенное состояние в потоке газа и начинается режим работы с саморегулирани-

ем перепада давления. При малых расходах регулирующий орган-шар находится на опоре с минимальным заданным зазором между его поверхностью и стенками диффузора.

При взвешенном состоянии шар турбулизует поток газа и тем самым интенсифицирует массообмен между газом и каплями воды, подаваемыми в поток из форсунок орошения.

При этом за шаром образуется вихревая область, которая определяет гидравлическое сопротивление шара. Наличие в газовом тракте аппарата шара с присоединенным вихрем за ним и форсунок обуславливает сравнительно большое гидравлическое сопротивление аппарата. Если через форсунки вода подается крупными каплями, то сравнительно мала поверхность контакта между газом и водой, следовательно, эффективность очистки газа невелика и, кроме того, из-за большого расхода воды снижается экономичность аппарата. Если обратная вода подается через отверстия форсунок малого диаметра, то поверхность контакта газа с водой выше, а расход воды меньше. Однако, при этом обратная вода должна быть очищена от взвеси, в противном случае отверстия форсунок могут забиться пылью. Это приводит к необходимости дополнительных затрат энергии на циркуляцию и очистку обратной воды. Кроме того, в аппарате с форсунками мелкого расхода велик унос мелких капель воды потоком газа. Все это снижает эффективность и экономичность известного аппарата.

Целью изобретения является повышение эффективности и экономичности устройства для очистки газа.

Указанная цель достигается тем, что в устройстве для очистки газа, содержащем вертикально установленную трубу Вентури, в диффузорной полости которой размещен регулирующий шар, и снабженное системой для подачи и слива воды, согласно изобретению, труба Вентури выполнена с проникающей диффузорной частью, установленной в корпусе и образует совместно с корпусом водяную камеру, а диаметр шара больше диаметра дроссельной части трубы Вентури, образующая которой может быть выполнена по закону:

$$r = d \sqrt{p/3} \operatorname{ch} (\rho/3) \quad (1)$$

$$\text{где } y = \operatorname{arch} [0,5 (\rho/3)^{1,5}] \\ \rho = \frac{(D/d)^2 - 1}{(D/d) \cdot \sin^2 \theta}$$

$\theta$  – угол наклона радиуса-вектора  $r$  к продольной оси трубы Вентури;

$D$  – диаметр трубы Вентури (выходного сечения);

$d$  – диаметр регулирующего шара.

Такое выполнение устройства позволяет исключить применение оросителей. Пронизаемая диффузная часть трубы Вентури выполняет функции трубы-распылителя. Вода подсашивается из водной камеры через отверстия по периферии дроссельной части трубы Вентури вблизи ее горловины (дроссельной части). За счет высокой скорости газа вода дробится на мелкие капли, в результате чего увеличивается поверхность контакта газа с жидкостью.

В рабочем состоянии устройства шар выполняет функции турбулизатора и каплеуловителя, а гидравлическое сопротивление собственно шара практически отсутствует. При известных условиях (см. а.с. СССР № 924513 М кл. G 01 F 1/10), а именно  $d_0/D = 0,1-0,6$ ;  $d/D = 0,34-0,6$  (где  $D$  – диаметр трубы Вентури,  $d_0$  – диаметр горловины дроссельной части трубы Вентури,  $d$  – диаметр регулирующего шара), шар при работе устройства находится в состоянии левитации. При этом шар хаотически колеблется и вращается, а вихревая зона за ним вследствие струйного обтекания отсутствует (см. Марченко А.В. Эффект левитации тел вращения в стесненном потоке теплоносителя. Теплоэнергетика. 1977. № 3, с. 51-54). Отсутствие вихревой зоны обуславливает пренебрежимо малое гидравлическое сопротивление собственно шара. Колебания и вращение шара способствуют турбулизации газового потока и, следовательно, интенсификации процесса массообмена.

В качестве каплеуловителя шар работает следующим образом. Поскольку плотность капель воды больше плотности газа, мелкие капли воды попадают на поверхность шара и захватываются шаром (см. Р.Скорер. Аэродинамика окружающей среды. М., Мир, 1980 г., с. 75, рис. 2.9.1). На поверхности шара капли укрупняются за счет захвата новых капель, и большие капли, вследствие циклонного эффекта, возникающего благодаря вращению шара при левитации, ссылаются и отбрасываются на периферию устройства к пронизаемой стенке диффузорной части трубы Вентури. Пройдя через пронизаемую стенку, капли воды с частицами пыли и вредных веществ попадают в водную камеру, где под действием силы тяжести оседают.

В техническом решении обеспечивается самопрямовольная циркуляция воды в рабочей части аппарата за счет действия

эффективных и гравитационных сил, без дополнительных затрат мощности на циркуляцию воды.

Гидравлическое сопротивление устройства может быть снижено более, чем в два раза за счет профилирования образующей трубы Вентури по закону (1).

Соотношение (1) получено из известного выражения для функции тока при безвихревом омывании тел вращения (см. Л.Г.Лойцкинский. Механика жидкости газа. М., 1987, с. 289):

$$\psi = 0,5 \cdot W_{\infty} \cdot r^2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{2} \right)^2 \right] \sin^2 \theta \quad (2)$$

с учетом новых условий однозначности, а именно дотерминант кубического уравнения (2)  $T = \frac{1}{4} - \left( \frac{r}{2} \right)^3$  принят положительным, т.е. только в этом случае обеспечиваются условия левитации шара, и при  $\theta = 90^\circ$  радиус-вектор  $r$  составляет половину диаметра трубы Вентури ( $r = D/2$ ), что обеспечивает возможность последовательной установки друг над другом таких устройств, вследствие зеркальной симметрии конформной и диффузорной частей трубы Вентури.

Таким образом, техническое решение в отличие от прототипа позволяет интенсифицировать массообмен, снизить капаемость, гидравлическое сопротивление и удельный расход жидкости за счет совместного использования эффектов эжекции жидкости, левитации шара, захвата капель жидкости шаром и циклонного эффекта, что позволяет получить новое сверхсуммарное свойство: повысить эффективность очистки газа при снижении гидравлического сопротивления в газовом тракте устройства.

На фиг.1 показан продольный разрез устройства для очистки газа; на фиг.2 – тоже с профилированной по закону (1) трубкой Вентури.

В цилиндрическом вертикальном корпусе 1 со штуцером (системой) 2 для подачи и слива воды установлена труба Вентури 3, образующая совместно с корпусом 1 кольцевую водную камеру 4. В пронизаемом диффузоре 5 трубы Вентури 3 расположен регулирующийся шар 6, диаметр которого больше диаметра горловины трубы Вентури 3.

При работе газ подается в трубу Вентури 3, ускоряется в ее конформной части, подсашивается воду по периферии дроссельной части трубы Вентури 3 вблизи ее горловины 7, обеспечивает левитацию регулирующего шара 6, а взаимодействует с раздробленными каплями воды, омыва-

ется от вредных веществ и удаляется из устройства. При уменьшении расхода регулирующий шар 6 уменьшает проходное сечение, поддерживая постоянную максимальную скорость газа вблизи горловины 7 трубы Вентури 3. За счет высокой скорости газа хвещируемая из водной камеры 4 вода дробится на мелкие капли, которые захватываются регулирующим шаром 6 и обрасываются на периферию дроссельной части трубы Вентури 3, где через пронцаемую стенку 8 попадают обратно в водную камеру 4. Требуемый уровень воды регулируется штуцером 2 для подачи и слива воды.

Технико-экономический эффект изобретения заключается в том, что

- снижается каплеунос из устройства;
- повышается интенсивность массообмена;
- обеспечивается самопроизвольная циркуляция воды, снижается ее удельный расход;
- уменьшается гидравлическое сопротивление в газовом тракте устройства.

**Формула изобретения**

Устройство для очистки газа, содержащее вертикально установленную трубу Вентури, регулирующий шар, размещенный в диффузоре трубы и выполненный с диаметром большим диаметра горловины трубы Вентури, систему подачи воды, отличающаяся тем, что, с целью повышения эффективности и экономичности устройства, труба Вентури ограничена корпусом с образованием наружной водной камеры, снабженной системой слива и воды и подключенной к системе подачи воды, при этом диффузор трубы Вентури имеет пронцаемую стенку, а образующая ее выполнена по закону

$$r = d \sqrt{\rho/3} \operatorname{ch}(\varphi/3)$$

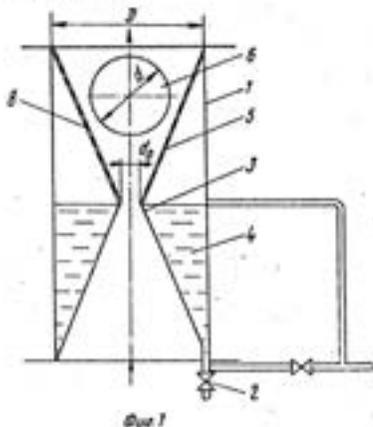
где  $\varphi = \operatorname{arch}[(0,5(\rho/3))^{-1,5}]$

$$\rho = \frac{D/d)^2 - 1}{(\rho/d) \cdot \sin^2 \theta}$$

$\theta$  - угол наклона радиус-вектора  $r$  к продольной оси трубы Вентури;

$D$  - выходной диаметр трубы Вентури;

$d$  - диаметр регулирующего шара.



Редактор З.Харина	Составитель О.Беккер Техред М.Моргентал	Корректор З.Саяко
Заказ 4473	Тираж	Подписное
ВНИИПИ Государственного комитета по изобретениям и открытиям при ГНТ СССР 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., 4/5		

Произведено издательский комбинат "Патент", г. Ужгород, ул. Гагарина, 101

## Приложение 2

### Дж. Раскин. «Окрыленный эффектом Коанда»

*Автор предлагаемой читателям статьи Джеф Раскин — профессор Калифорнийского университета в Сан-Диего, один из разработчиков компьютера Macintosh. Он не является ни профессиональным физиком, ни механиком. Тем не менее, статья показалась нам интересным примером того, как неутомимая любознательность и стремление разобраться в явлениях окружающего мира привели автора к необходимости изучить и критически осмыслить колоссальное количество литературных источников, поставить разнообразные простые и остроумные эксперименты и выработать, наконец, свое видение проблемы (хотя и не совсем полное и корректное).*

*Мы надеемся, что эта статья пробудит у читателей желание провести свои самостоятельные изыскания.*

*Для знакомства с более последовательными объяснениями физической сущности подъемной силы рекомендуем обратиться, например, к таким книгам; А. Л. Стасенко, «Физика полета» (Библиотечка «Квант», вып. 70); С. Э. Хайкин, «Физические основы механики».*

*Статья перепечатывается (со значительными сокращениями) из журнала «Quantum» (сентябрь/октябрь 1994 г.).*

*Перевод с английского В. Меццякова.*

Разумное объяснение явления аэродинамической подъемной силы было представлено спустя два десятилетия после первого полета братьев Райт (под большим влиянием работы Людвига Прандтля<sup>1</sup>), но в элементарных учебниках и популярных статьях даже сегодня наиболее общее объяснение подъемной силы остается неясным. Приведем типичный пример этого.

Рисунок П. 1 основывается на материале введения в популярную книгу Д. Макоулея «Особенности работы технических устройств»: по-

---

<sup>1</sup> Людвиг Прандтль (1875–1953) — немецкий физик, часто называемый «отцом аэродинамики». Его знаменитая книга по теории крыла была опубликована в 1918 г. (Русский перевод под названием «Теория несущего крыла» появился в 1931 г. — Прим. ред.)

перечное сечение крыла имеет форму, называемую аэродинамическим профилем. При движении воздух обтекает крыло. Профиль крыла искривлен так, что поток воздуха, обтекающий крыло сверху, движется быстрее, чем поток воздуха, обтекающий крыло снизу. Быстро движущийся воздух имеет более низкое давление, чем медленно движущийся. Поэтому давление воздуха под крылом более высокое, чем над ним. Эта разность давлений создает силу, которая вынуждает крыло подниматься вверх. Такую силу называют подъемной силой.

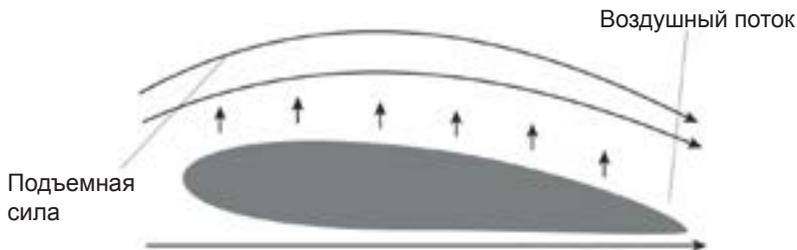


Рис. П.1. Поток воздуха, обтекающий крыло

Данное рассуждение полностью согласуется с законом Бернулли, который устанавливает, что чем быстрее воздух движется вдоль некоторой поверхности тела, тем ниже его давление на эту поверхность.

Сегодня, когда большинство самолетных крыльев имеет значительно большую кривизну профиля сверху, чем снизу, такому объяснению, казалось бы, можно поверить. Но еще в детстве я обнаружил, что оно сталкивает меня с загадкой: как же тогда самолет может летать перевернувшись «вверх ногами» (нечто подобное я видел на авиационных шоу)?

Когда я пристал с этим вопросом к учителю, он сначала стал отвергать, что самолет может летать перевернутым, а потом попытался продолжить лекцию. Но когда я, расстроенный, стал доказывать, что такое может быть, он закричал мне: «Заткнитесь, Раскин!». О том, что произошло после этого, я и собираюсь рассказать в этой статье.

Через несколько лет мне удалось уже самостоятельно выполнить некоторые расчеты на основе общепринятого объяснения работы крыла. Используя технические характеристики модели самолета, я обнаружил, что вычисленная подъемная сила составляет только 2% от силы, необходимой для его полета. Полагая, что уравнение Бернулли является правильным (действительно, оно представляет одну из форм закона сохранения энергии), я столкнулся со второй загадкой: что является основным источником подъемной силы?

Рассмотрим в качестве примера летящий в воздухе вращающийся мяч. Пытаясь разобраться в том, почему искривляется полет мяча и как форма крыла влияет на подъем, мы увидим, как общепринятое объяснение может ввести в заблуждение даже известных ученых.

**Вращающийся мяч.** Траектория мяча, закрученного вокруг вертикальной оси и движущегося в воздухе, отклоняется вправо или влево от первоначально заданного направления. Опыт показывает, что этот эффект зависит, во-первых, от закрученности мяча и, во-вторых, от наличия среды (воздуха). Незакрученные мячи или закрученные в вакууме движутся по прямой. Но прежде чем продолжить, может вы сами захотите решить, в какую сторону будет отклоняться мяч, закрученный, например, против часовой стрелки (если смотреть сверху).

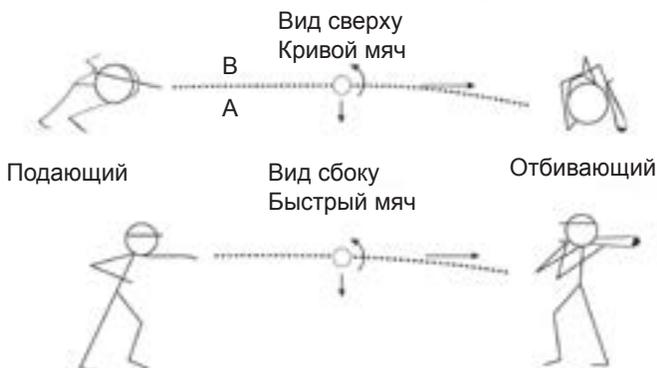


Рис. П.2. Поддача кривого мяча

Давайте посмотрим, что говорят об этой задаче книги: от тех, которые пишутся физиками и на которые все ссылаются как на авторитетные источники, до тех, которые подобны книге футбольного тренера моего сына, описывающей технику ударов по мячу. Начнем с физика Дж. Трефила, который в книге «Ученый на морском побережье» пишет: «Прежде чем закончить обсуждение эффекта Бернулли, я бы хотел указать на еще одну область, где его следствия должны быть обязательно изучены и которая несколько неожиданно проявляется в бейсболе.

Рассмотрим, например, подачу «кривого мяча». Это особый тип подачи, при которой мяч бросают так, что при движении вперед он закручивается вокруг своей оси, как показано на рисунке П.2, изображающем вид сверху. Из-за шероховатости поверхности мяча действие сил трения приводит к возникновению тонкого слоя воздуха, вращающегося вместе с этой поверхностью.

Рассматривая рисунок, можно понять, что воздух в точке, обозначенной буквой А, будет двигаться быстрее, чем воздух в точке В, потому что в первом случае скорость вращательного движения точек поверхности мяча складывается со скоростью мяча вдоль траектории, а во втором — вычитается. В результате этого возникает «подъемная сила», которая стремится переместить мяч в указанном на рисунке направлении.

Трефил затем показывает схему движения «быстрого мяча», отклоняющегося вниз, когда он закручивается так, что нижняя поверхность мяча вращается по направлению его движения. Это то же явление, что и в предыдущем случае, с тем лишь отличием, что ось вращения мяча повернута на 90 градусов.

В книге «Физика бейсбола» Р. Адзэр рассматривает мяч, брошенный так, что он вращается против часовой стрелки, как это показано на рисунке Трефила. Направление влево от подающего называется первой базой, вправо от подающего — третьей. Адзэр пишет: «Мы можем тогда полагать, что давление воздуха на третьебазовой стороне мяча, которая движется быстрее, будет больше, чем давление на первобазовой стороне, которая движется медленнее. Вследствие чего мяч будет отклоняться в сторону первой базы».

Выводы Адзара и Трефила прямо противоположны, хотя они согласны в том, что сторона мяча, вращающаяся по направлению его перемещения к принимающему игроку, движется быстрее, чем противоположная сторона. Тем не менее, мы усвоили из этих двух источников, что давление воздуха на одной из сторон мяча либо увеличивается, либо уменьшается в зависимости от скорости этой стороны. Но я не буду пока вставать на одну из сторон этого спора.

«Британская энциклопедия» вносит в дискуссию иные рассуждения, основывающиеся на введении концепции вязкого трения: «Трение стороны мяча, поворачивающейся в воздухе в направлении перемещения мяча, замедляет воздушный поток, в то время как на другой стороне трение ускоряет воздушный поток. Большее давление на стороне, где воздушный поток замедлен, толкает мяч в направлении области низкого давления на противоположной стороне мяча, где возникает относительное увеличение потока воздуха». Ну вот, теперь уже мы выяснили, что вращающийся мяч заставляет воздух двигаться быстрее или медленнее по одну или другую сторону мяча. И еще — что быстро движущийся воздух увеличивает или уменьшает давление в зависимости от вашего выбора, какому авторитетному источнику следовать.

И вновь о книге тренера моего сына. Тренер — всего-навсего футболист международного класса Дж. Лямпти. Он не дает теоретического обоснования, но мы можем быть достаточно уверены, что Лямпти неоднократно проводил опыт с мячом и должен поэтому правильно описывать направление поворота мяча. Он пишет: «Банановый удар является более или менее смещенным от центра мяча энергичным ударом подъемом ноги, который придает вращение футбольному мячу. Удар, смещенный от центра мяча вправо, искривляет траекторию мяча влево. Удар, смещенный от центра мяча влево, искривляет траекторию мяча вправо. В итоге изгибы траектории футбольного мяча зависят от скорости вращения». Как вы можете видеть на рисунке П.3, Лямпти, подобно Адэару, говорит о высоком давлении на стороне мяча, вращающейся по направлению его полета.



Рис. П.3. Мяч искривляет траекторию влево

Я не буду касаться других мнений, которые принимают тот или иной способ поворота мяча. Некоторые объяснения зависят от авторской интерпретации эффекта Бернулли, некоторые связаны с вязкостью, некоторые — с трением, некоторые — с турбулентными явлениями в воздухе.

Позже мы вернемся к теме закручивания мячей, а сейчас продолжим обсуждение проблем с общепринятым мнением о подъемной силе.

**Другие парадоксы.** Традиционное объяснение работы крыла приводит нас к заключению, например, о том, что крыло, которое имеет слегка вогнутый низ (рис. П.4), будет всегда испытывать, при прочих равных условиях, меньшую подъемную силу по сравнению с плоскодонным крылом.

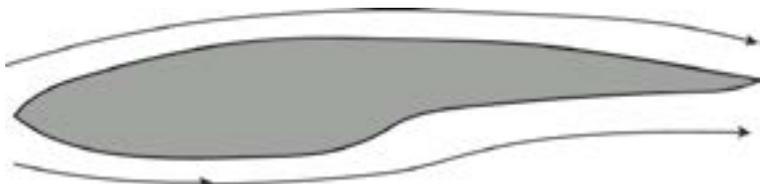


Рис. П.4. Крыло с вогнутым низом

Ведь у вогнутого снизу крыла путь воздуха вдоль нижней части профиля длиннее, чем у плоскодонного (на рисунке П.1). Поэтому подъемная сила меньше. Правильно? Неправильно!

Кроме того, мы теперь вправе спросить: как тогда плоское крыло, подобное тому, которое имеет бумажный планер, без каких бы то ни было искривлений может обеспечить подъемную силу? Заметим, что плоское крыло расположено под углом к направлению движения планера. Этот наклон называется «углом атаки» и является необходимым для создания подъемной силы плоского крыла. Позже мы вернемся к этой теме.

Формы поперечных сечений авиационных крыльев называются «аэродинамическими профилями». Очень эффективным профилем крыла для небольших медленно летающих моделей является кусок какого-либо листового материала, изогнутый в виде арки.

Однако из общепринятого объяснения вообще неясно, как такое крыло, у которого верх и низ профиля имеют одинаковые длины, может создавать хоть какую-нибудь подъемную силу. Если бы общепринятый взгляд был корректным, мы должны были бы делать верх крыльев даже более криволинейным по сравнению с тем, как его делают сегодня. В этом случае воздух двигался бы еще быстрее, и мы получили бы еще большую подъемную силу.

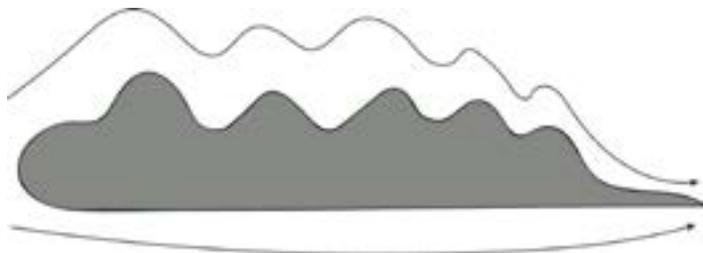


Рис. П.5. Волнообразное крыло

---

На рисунке П.5 волнистость крыла сильно преувеличена (ниже мы встретимся с более реалистичными примерами). Если мы сделаем верхнюю поверхность крыла подобно тому, как показано на рисунке П.5, то воздух будет двигаться вдоль нее быстрее (так как воздух проходит больший путь), чем в случае крыла обычного типа.

Возможно, вы придете к заключению, что такой вид профиля должен иметь избыток подъемной силы. В действительности же он может привести к катастрофе. Достаточно примеров.

Несмотря на то, что уравнение Бернулли является правильным, его применение к решению вопросов об аэродинамической подъемной силе вносит значительную путаницу в выводы, основанные на использовании общепринятых представлений. Правильно примененное или нет, это уравнение предлагает не очень удобный образ того, что связывает форму профиля крыла с его подъемной силой, и ничего не говорит о силе вязкого трения. Эта трудность, объединенная с повсеместным существованием правдоподобно звучащего общепринятого мнения, вероятно, объясняет, почему даже некоторые превосходные физики были введены в заблуждение.

**Крыло Эйнштейна.** Мой друг Йессо, который работает в авиационной промышленности, выступил с предложением улучшить профиль крыла. Рассуждая в рамках обычных представлений, он предложил добиться большей подъемной силы переделкой верхней части профиля способом, показанным на рисунке П.6.



Рис. П.6. Глыбообразное крыло

Это глыбообразное крыло и есть как раз «разумная» версия волнистого профиля, который был рассмотрен ранее. Идея Йессо была, конечно, основана на концепции, что более длинная верхняя поверхность могла бы давать большую подъемную силу. Когда я был готов сказать Йессо, почему его замысел не будет работать, мне посчастливилось поговорить с Е. Скофом, который разрабатывал авиационные проекты для фирмы «Сааб» в Швеции.

Он рассказал мне о горбатом профиле крыла (рис. П.7), спроектированном Альбертом Эйнштейном во время Первой мировой войны.



Рис. П.7. Профиль крыла Альберта Эйнштейна

Обоснование такого профиля было тем же самым, что и рассуждения, которые использовал Йессо.

Но это крыло не имело аэродинамических преимуществ. Вместо того чтобы убежать Йессо в бесперспективности его затеи, я сказал, что он придумал модернизированную версию эйнштейновской ошибки! (Эйнштейн сам впоследствии ругал себя за бестолковость).<sup>2</sup>

**Эксперименты.** Если это аргумент, что профили крыльев создают подъемную силу исключительно потому, что поток воздуха у поверхности понижает давление на эту поверхность, то при искривлении поверхности не имеет значения, является ли она прямой, вогнутой или выпуклой. Общепринятое объяснение дает зависимость только от скорости потока, параллельного поверхности.

Есть несколько опытов, которые вы можете легко воспроизвести для проверки этого утверждения.

*Опыт 1.* Возьмите полоску писчей бумаги размером приблизительно 5×25 см. Держите ее перед губами так, чтобы она высовывалась из пальцев и обвисала, делая верхнюю поверхность выпуклой. Когда вы подуете поверх бумаги, она поднимется (рис. П.8а).

Много книг приписывают этот эффект понижению воздушного давления наверху из-за эффекта Бернулли.

Теперь с помощью пальцев придайте бумаге такую форму, чтобы ее верхняя поверхность стала слегка вогнутой вдоль всей длины, и вновь подуйте поверх полоски. Бумага теперь движется вниз (рис. П.8б).

---

<sup>2</sup> Е.Скоф пишет: «В течение Первой мировой войны Альберт Эйнштейн временно работал в LVG (Luft-Verkehrs-Gesellschaft) в качестве консультанта.

В LVG он спроектировал профиль крыла с резко выраженным горбом в середине хорды профиля — новшество, предназначенное увеличить подъемную силу. Крыло было тестировано в Гёттингенской аэродинамической трубе, а также на реальном самолете, и в обоих случаях было установлено, что оно не оправдывает возлагавшихся на него надежд. В 1954 г. Эйнштейн писал: «Хотя это, вероятно, правда, что первооснова полета может быть наиболее просто объяснена этим способом [по Бернулли], однако совсем не умно конструировать крыло в такой манере».

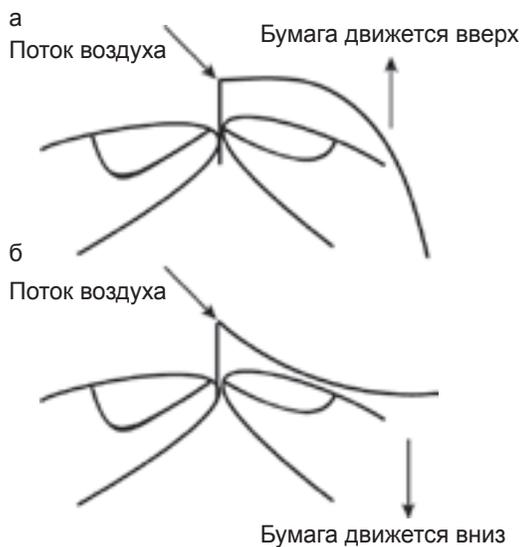


Рис. П.8. Опыт 1

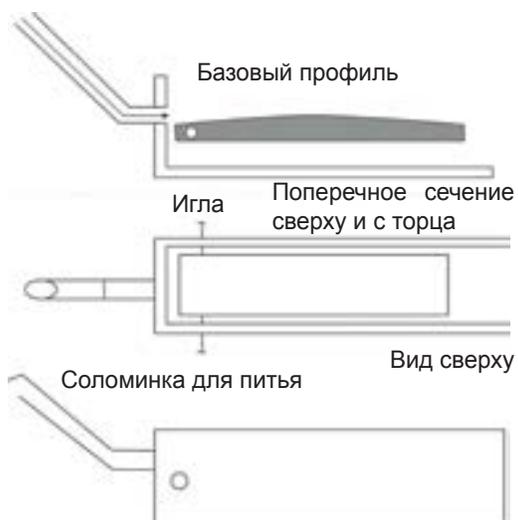


Рис. П.9. Опыт 2

*Опыт 2.* Как показано на рисунке П.9, сделайте коробку из тонкой фанеры или картона с помещенным внутрь бальсовым крылом, удерживаемым парой игл, которые позволяют ему свободно откидываться вверх или вниз, а воздух вводится через соломинку для питья. Одна из приятных особенностей в науке та, что вы можете не принимать чье-либо слово за «истину в последней инстанции». Вы можете проверить его сами!<sup>3</sup>

В этой аэродинамической трубе воздух протекает только поперек модели. Я сделал другую, в которой пылесос дует вдоль верхней и нижней поверхностей крыла, и получил те же результаты; но сооружение такой конструкции требует большего усилия, а модели крыла нуждаются в повышенном качестве передней и задней кромок. В связи с этим я пытался убедить компанию, которая изготавливает научное демонстрационное оборудование, включить этот прибор в их каталог. Но они оказались не заинтересованными, потому что «он не дает правильных результатов». «Тогда как он работает?» — спросил я. «Не знаю», — ответил главный конструктор. Эксперимент может быть трудным в интерпретации, но если нет мошенничества, он не может давать неправильных результатов.

Когда воздух начинает продуваться через соломинку, крыло со стандартным профилем (рис. П.10) немедленно отрывается от дна коробки и поднимается. Когда продувка прекращается, крыло падает вниз. Это и есть то, что все ожидают.

Теперь рассмотрим вогнутую форму. Форма кривой здесь та же самая, как у первого крыла, хотя обращена выпуклостью вниз. Если общепринятое объяснение было бы верным, тогда надо было бы ожидать, что это крыло тоже поднимется, так как длина кривой та же самая, как и в «стандартном» примере. В любом случае воздушный поток вдоль поверхности должен иметь пониженное давление, приводящее к появлению подъемной силы. Однако вогнутое крыло остается неподвижным внизу. Если вы поставите прибор вертикально, то увидите, что крыло будет двигаться прочь от воздушного потока.

Другими словами, часто цитируемый опыт, который обычно используется как демонстрация общепринятого объяснения подъемной силы, не годится на роль демонстрации — какой-то другой эффект оказывается гораздо сильнее.

---

<sup>3</sup> В некоторых областях, например, в изучении субатомных частиц, вам могут потребоваться миллионы долларов и штат из тысяч сотрудников для построения ускорителя, чтобы сделать независимую проверку, но указанная особенность тем не менее остается.

Ради забавы, попытайтесь предугадать направление движения для остальных профилей (см. рис. П.10), прежде чем вы поставите их в прибор.

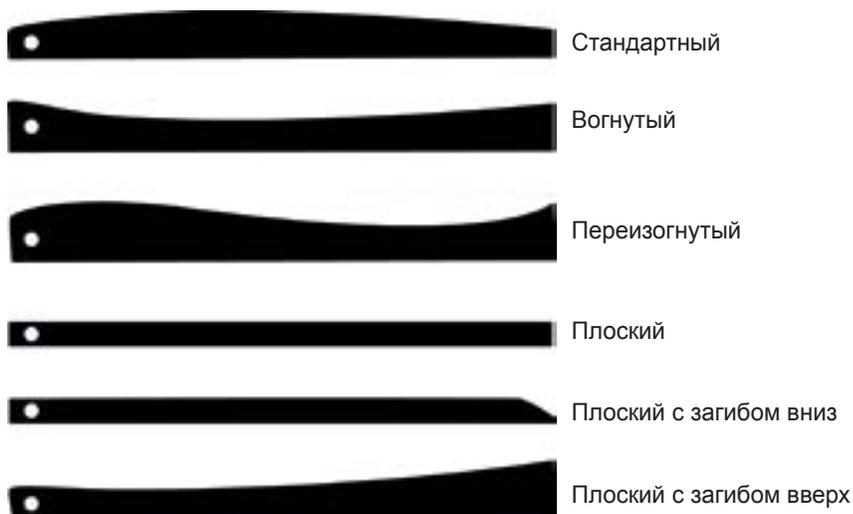


Рис. П.10. Профили крыла

Дж. Глейк как-то заметил, что «прогресс в науке происходит тогда, когда опыты противоречат теории». Хотя наука в нашем случае давно известна и опыт противоречит не аэродинамической теории, а часто преподаваемому общепринятому мнению, тем не менее, даже если наука не прогрессирует, прогрессировать может индивидуальное понимание. Еще один простой опыт приведет нас к лучшему пониманию аэродинамических эффектов.

**Эффект Коанда**<sup>4</sup>. Если струя воды течет вдоль поверхности твердого тела, которая слегка искривлена в сторону струи, вода имеет тенденцию следовать этой поверхности. Это одно из проявлений эффекта Коанда, которое легко демонстрируется, например, с помощью ложки и тонкой струйки воды из водопроводного крана (рис. П.11).

Если держать ложку так, чтобы она могла качаться, и приблизить ее к струе, то можно почувствовать, как ложка дернется по направлению

<sup>4</sup> В 1930-х годах аэродинамик из Румынии Анри Мари Коанда (1885–1972) наблюдал, что поток воздуха, выходящий из сопла, имеет тенденцию следовать вдоль искривленной или плоской поверхности, если кривизна или угол, который поверхность образует с потоком, не являются слишком резкими.

к потоку воды. Это — проявление третьего закона Ньютона: если ложка притягивает струю, то и струя должна притягивать ложку. Эффект имеет границы. Если вы используете сферу вместо ложки, то обнаружите, что вода будет следовать только части пути. К тому же, если поверхность резко искривлена, вода не будет следовать ей, а будет только немного изгибаться и сразу же отрываться от поверхности.



Рис. П.11. Эффект Коанда

**Качественное представление подъемной силы.** Описанные ранее эксперименты с миниатюрной аэродинамической трубой без труда объясняются с точки зрения эффекта Коанда: изогнутое вниз крыло (со стандартным профилем) увлекло воздушный поток вниз, следовательно, по третьему закону Ньютона, на крыло со стороны воздуха действовала сила противодействия, направленная вверх. Изогнутое вверх крыло (с вогнутым профилем) увлекло воздушный поток вверх, и результатом была сила, направленная вниз.

Эффект Коанда помогает нам мысленно вообразить, почему угол атаки (крыла с равным наклоном во всю длину) является решающе важным; почему самолеты могут летать перевернутыми; почему «действуют» плоское и тонкое крылья; почему опыт 1 с выпуклой и вогнутой полосками бумаги показывает то, что можно было увидеть своими глазами.

Все, что было до сих пор представлено, никоим образом не является завершенным объяснением подъемной силы, а лишь указывает путь к установлению полезной картины явления. Воспользуемся этим путем для разумного рассмотрения проблемы вращающегося мяча.

**Почему искривляется траектория вращающегося мяча.** Посмотрим по-другому на рисунок П.2. Эффект Коанда говорит нам, что воздух увлекается поверхностью мяча. Рассмотрим сторону А, которая

---

вращается в направлении полета, причем сделаем это в системе отчета, в которой мяч неподвижен, а воздух движется и обтекает мяч. Сторона А стремится увлечь воздух своим вращением. Это действие противопоставлено надвигающемуся воздуху. Поэтому увлечение воздуха вокруг мяча на этой стороне должно сначала замедлять надвигающийся воздух и затем ускорять его в противоположном направлении. На стороне В, которая вращается в направлении, противоположном полету, воздух уже движется (относительно мяча) в направлении надвигающегося воздуха и поэтому более легко увлекаем. Воздух с большей готовностью следует изгибу около В-стороны и приобретает скорость в направлении А-стороны. Поэтому мяч движется в направлении В-стороны противодействием со стороны воздуха.

Самое время вновь обратиться к простому опыту. Затруднительно экспериментировать с бейсбольными мячами, потому что их сила тяжести велика в сравнении с аэродинамическими силами, действующими на них, и очень трудно контролировать величину угловой скорости и направление вращения.

Поэтому рассмотрим случай, где аэродинамические эффекты легче увидеть.

Возьмем дешевый надувной пляжный мяч (дорогой мяч сделан из более тяжелого материала и хуже показывает аэродинамические эффекты). Брошенный с достаточным вращением (низ мяча движется вперед), такой мяч взмывает вверх по кривой по мере продвижения вперед. Подъемная сила благодаря вращению может быть настолько сильной, что оказывается больше, чем направленная вниз гравитационная сила! Вскоре сопротивление воздуха останавливает и вращение мяча, и его движение вперед, и он падает, но не раньше, чем продемонстрирует, что объяснение Трефила, как вращение влияет на полет мяча, является неправильным.

Появление подъемной силы, возникающей благодаря вращению тела во время движения в воздухе, обычно называют эффектом Магнуса.<sup>5</sup>

Некоторые книги обсуждают «ротор Флеттнера», который является давно заброшенной попыткой использовать эффект Магнуса для разработки эффективного корабельного паруса. (Флеттнер предлагал заменить паруса на судах парой вращающихся вертикальных цилиндров, развивающих, при наличии ветра, боковую силу тяги.)

---

<sup>5</sup> Г. Магнус (1802—1870) — немецкий физик и химик, демонстрировавший этот эффект в 1853 г.

## Приложение 3

В. И. Меркулов

### Динамические эффекты в жидкости и газе

В том случае, если жидкость движется с некоторой постоянной скоростью  $v$ , единичный объем ее будет обладать кинетической энергией, а закон сохранения энергии запишется следующим образом:

$$p + \rho gz + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const.}$$

Полученное выражение является основным уравнением гидродинамики и называется уравнением Бернулли.

Следует отметить, что закон сохранения энергии в таком виде, как мы его записали, точно выполняется только для жидкости, полностью лишенной вязкости (идеальной жидкости). Реальная жидкость всегда обладает вязкостью, благодаря которой часть механической энергии превращается в тепловую, нарушая этим справедливость уравнения Бернулли. Однако в том случае, если вязкость среды мала, как, например, у воды, воздуха, это уравнение выполняется достаточно точно. Легко понять, что уравнение Бернулли, выражающее закон сохранения энергии, одинаково справедливо как в неподвижной системе координат, так и в любой равномерно движущейся системе

### Вода вытекает из сосуда

Прежде всего определим скорость истечения жидкости из отверстия в резервуаре (рис. 24). Давление под крышкой резервуара на уровне свободной поверхности обозначим  $p_1$ , а атмосферное давление —  $p_0$ . В общем случае эти давления будут различными. Расстояние от отверстия до свободной поверхности обозначим  $Y$ . Допустим, что площадь поперечного сечения резервуара во много раз больше отверстия. Это условие позволяет нам считать, что скорость опускания свободной поверхности

$V = 0$ . Давление на уровне свободной поверхности равно  $p$ . Сам уровень обозначим  $z$ . У самого отверстия давление равно  $p_0$ , искомая скорость истечения  $V_0$ , а уровень  $Z_0$ . Очевидно, что  $z - z_0 = H$ . Тогда

$$p_1 + \rho g z_1 = p_0 + \rho g z_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2,$$

откуда

$$v_0 = \sqrt{2gH + \frac{p_1 - p_0}{\rho}}.$$

В том случае, если давление под крышкой равно внешнему давлению, т. е.  $p = D_0$ , эта формула упрощается и принимает следующий вид:

$$v_0 = \sqrt{2gH}.$$

В этом случае скорость истечения жидкости совпадает со скоростью тела при его свободном падении с высоты  $H$ .

Мы уже говорили о приближенном характере уравнения Бернулли. Чтобы учесть возникающую из-за вязкости погрешность, формулу для скорости истечения записывают таким образом:

$$v_0 = \zeta \sqrt{2gH + \frac{p_1}{\rho} - \frac{p_0}{\rho}},$$

где  $\zeta$  — экспериментально определяемый коэффициент, зависящий от величины  $H$  и  $p$ . Для круглого отверстия этот коэффициент лежит в пределах  $0,95 - 0,99$ , т. е. мало отличается от 1.

## Кипит холодная вода

Рассмотрим течение жидкости (воды) в горизонтально расположенном трубопроводе переменного сечения. В этом случае потенциальная энергия  $\rho g z$  будет мало меняться для всех точек жидкости и уравнение Бернулли несколько упростится:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2.$$

Первую точку отсчета выберем в широкой части трубы, где площадь поперечного сечения  $S$ . Вторую точку выберем в самом узком сечении

площадью  $S_2$ . Если через трубу протекает в секунду некоторое количество жидкости  $Q$ , то скорости соответственно равны.

$$v_1 = \frac{Q}{S_1}, \quad v_2 = \frac{Q}{S_2}.$$

Запишем уравнение Бернулли

$$p_1 + \frac{\rho Q^2}{2S_1^2} = p_2 + \frac{\rho Q^2}{2S_2^2}$$

и определим давление в узкой части:

$$p_2 = p_1 - \frac{\rho Q^2}{2} \left[ \frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right],$$

откуда следует, что давление уменьшается по мере сужения трубопровода и может обратиться в нуль. Это приведет к кипению холодной воды. Такое явление наблюдается не только в трубах, но и при работе многих гидравлических машин. Когда мы будем рассказывать о работе гидротурбины, то остановимся на этом явлении более подробно. Здесь же только отметим, что эффект снижения давления в узкой части трубопровода используется при создании элекционных насосов, в пульверизаторах. Кроме того, измеряя давления  $p_1$  и  $D_2$ , легко вычислить расход воды  $Q$ . На этом принципе построены некоторые конструкции расходомеров.

## Измерение скорости потока

Наиболее широко применяемые приборы для измерения скорости движения жидкости также основаны на использовании связи между давлением и скоростью, которая следует из уравнения Бернулли.

Поставим в поток соосно вставленные друг в друга две трубки, как это изображено на рис. 25.

Записав уравнение Бернулли для двух точек, одна из которых находится в отверстии внешней трубки, а другая — на срезе внутренней трубки, где жидкость останавливается и скорость становится равной нулю, получаем

---

$$p + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2.$$

Уровень водяного столба в первой трубке будет равняться давлению  $p$ , а во второй трубке —  $p_2$ . Разность уровней  $h$  равна кинетической энергии потока, по которой и вычисляется скорость потока.

## Столкновение кораблей

Приведем здесь описание трех крупных морских катастроф, объяснение которым можно найти опять-таки с помощью уравнения Бернулли.

В октябре 1911 г. на внешнем рейде Саутгемптона в Англии произошла одна из крупнейших аварий. Катастрофа произошла следующим образом. Пассажирский пароход «Олимпик» водоизмещением 52 тыс. т, длиной 260 м, шириной около 30 м, с осадкой 10 м шел в одном направлении с английским крейсером «Хаук» (водоизмещение 7500 т, длина 110 м, ширина 18,3 м, осадка 7,2 м). «Хаук», обгоняя «Олимпик», имел скорость около 34 км/ч, а «Олимпик» — 25 км/ч. Расстояние между судами не превышало 110 м. После того как передняя часть крейсера «Хаук» сравнялась с кормой «Олимпика», крейсер быстро отклонился в сторону парохода и ударил его в правый борт, несмотря на то, что руль должен был повернуть его в противоположную сторону. Оба корабля получили серьезные повреждения.

На маневрах французского военного флота тоже в начале XX века в Средиземном море с эскадренного броненосца «Бреннус» (водоизмещение 11 395 т, скорость 35 км/ч) вызвали флажными сигналами один из миноносцев, чтобы дать ему словесные указания. Миноносец, проходя на большой скорости и на небольшом расстоянии от «Бреннуса» с правого его борта, вдруг неожиданно резко изменил направление движения в сторону броненосца и, попав под форштевень, был разрезан пополам и утонул.

В октябре 1942 года лайнер «Куин Мери» (водоизмещение 81 тыс. т, длина 314 м) шел из США в Англию, имея на борту около 15 тысяч американских солдат. Лайнер следовал под конвоем крейсера «Кюрасоа» (водоизмещение 4290 т, длина 137 м) и шести эскадренных миноносцев. Внезапно крейсер «Кюрасоа», шедший параллельным курсом, резко по-

вернул влево, подставил себя под форштевень лайнера, и был разрезан на две части.

На всех этих судах плавали очень опытные капитаны и стояли внимательные штурвалы, так что искать объяснение этим катастрофам в их поведении нельзя. Причину следует искать в законах гидромеханики.

Рассмотрим картину течения воды возле двух кораблей (рис. 26). Что видит наблюдатель, стоящий на одном из них? Вдали от кораблей скорость воды всюду постоянная, неизменным будет и давление в любой горизонтальной плоскости. Между кораблями жидкость, стесненная бортами, будет вынуждена двигаться быстрее. Запишем уравнение Бернулли для двух точек, лежащих вблизи свободной поверхности жидкости. В обеих точках давление будет одинаково и равно атмосферному давлению. Поэтому

$$gz_1 + \frac{v_1^2}{2} = gz_2 + \frac{v_2^2}{2}.$$

Следовательно, в той точке, где скорость больше, уровень воды будет меньше. Разность уровней с внешней и внутренней сторон кораблей и вызовет их стремительное сближение.

Пусть средний уровень воды между кораблями понизился всего на 20 см. При длине корабля 137 м это приведет к появлению боковой силы, равной 274 000 Н. Ясно, что попытка отвернуть нос корабля с помощью рулей в этом случае приводит к появлению дополнительной силы, сближающей корабли. Поэтому представляет интерес рекомендация, содержащаяся в старинных руководствах по мореплаванию: если нельзя избежать столкновения, то толкай первым.

Конечно, авторы этой рекомендации исходили прежде всего из того факта, что именно тот корабль, который толкает своим форштевнем борт другого корабля, имеет наибольшие шансы сохраниться. С точки зрения гидромеханики интересно то обстоятельство, что выполнить рекомендацию старинного руководства легче, чем избежать столкновения. При сильном сближении двух кораблей соотношение гидродинамических сил таково, что корабль послушается руля, если его разворачивать носом к борту другого корабля.

Что касается новых руководств для капитанов, то они, конечно, не отменяют законов гидромеханики, а исходят из них, накладывают ограничения на скорость и допустимое сближение идущих параллельным курсом кораблей.

---

## Шарик висит в воздухе

С помощью уравнения Бернулли можно дать объяснение еще одному любопытному факту. Предлагаем читателю проделать следующий опыт, для которого ему не понадобится ничего, кроме куска аптекарской резиновой трубки длиной 20 — 25 см и шарика для игры в пинг-понг

Наденьте один конец трубки на водопроводный кран, частично зажмите другой ее конец и поднимите его вверх. Постепенно открывая кран, добейтесь, чтобы у вас получился небольшой фонтанчик, подобный питьевому. На струйку фонтана осторожно опустите шарик. Что с ним произойдет? Можно ожидать, что шарик не удержится на вершине струи, соскользнет вбок и упадет. На самом деле какая-то, непонятная пока сила не позволяет шарiku отклоняться в сторону от струи. А располагаясь над струей, он не может ни опуститься вниз, так как подпирает струя, ни подняться вверх, так как его тянет вниз сила тяжести. Так и висит этот шарик, медленно вращаясь вокруг своей оси. Этот опыт будет еще более эффектным, если воспользоваться узкой струей воздуха, направленной вертикально вверх. Такую струю можно получить, например, с помощью пылесоса, на котором предварительно нужно переставить шланг со стороны всасывания на сторону нагнетания, а отверстие в шланге частично закрыть пальцем.

Вначале шарик нужно положить на струю воздуха, направленную вертикально вверх. После этого вы можете раскачивать струю в довольно широких пределах — шарик, как привязанный, будет следовать за струей. Чтобы понять, какие силы удерживают шарик в воздухе, рассмотрим картину течения воздушной струи при несимметричном расположении шарика (рис. 27). Шарик стесняет поток со своей левой стороны и вызывает увеличение скорости струи. Увеличение скорости приводит к уменьшению давления в этом месте по сравнению с остальными участками струи, где оно равно атмосферному. Благодаря этому и появляется сила, направленная к оси струи, которая не дает шарiku оторваться от воздушной струи.

## Эффект Магнуса

Все теннисисты и игроки в пинг-понг хорошо знают, что закрученный мяч подвергается действию значительной аэродинамической силы, которая сильно изменяет траекторию полета мяча, затрудняя игру про-

тивника. Этот эффект носит имя Магнуса. Указанное явление можно наблюдать на следующем простом опыте. Возьмите лист плотной бумаги, сверните его в трубку и заклейте край. Если теперь такую трубку заставить скатиться с наклонной поверхности, то можно заметить, что при падении трубка значительно отклонится от обычной траектории и совершит планирующий полет в направлении, противоположном ожидаемому.

Рассмотрим картину течения воздуха, обусловленную падением вращающейся трубки. Движение воздуха удобно рассматривать в системе координат, связанной с цилиндром. В такой системе ось цилиндра будет неподвижна, а воздух будет набегать на него.

В качестве иллюстрации можно воспользоваться тем же рис. 27, который пояснял течение возле шарика.

Левая сторона цилиндра вращается в сторону движения воздуха и тем самым увеличивает его скорость. Правая сторона цилиндра вращается навстречу основному потоку, и в этом месте скорость течения уменьшается. Согласно уравнению Бернулли давление слева будет меньше, чем справа. Это и приведет к появлению силы, которая обуславливает эффект Магнуса. Величина этой силы определяется следующей формулой:

$$P = \frac{1}{2} \pi d v \Gamma_{\text{д}} \rho l,$$

где  $d$  — диаметр цилиндра,  $l$  — его длина,  $v$  — скорость набегающего потока,  $\Gamma_{\text{д}}$  — окружная скорость вращения цилиндра,  $\rho$  — плотность среды.

Эта формула получена в предположении, что окружающая среда лишена вязкости. Однако экспериментальные результаты оказываются близкими друг к другу для значений скорости вращения цилиндра, не превышающей четырех скоростей набегающего потока. В этом предельном случае подъемная сила

$$P = 2\pi d l v^2 \rho.$$

Для воздуха эта формула примет вид

$$P = 8,1 v^2 d l,$$

где сила измеряется в ньютонах, длина — в метрах.

Интересно сравнить подъемную силу, создаваемую обычным крылом и вращающимся цилиндром.

---

Подъемная сила крыла определяется по формуле

$$Y = \frac{1}{2} c_y \rho v^2 S,$$

где  $S$  — площадь крыла,  $c_y$  — экспериментальный коэффициент (для наиболее совершенных крыльев этот коэффициент не превосходит 1,2). Для сравнения выберем цилиндр с той же площадью диаметрального сечения. Тогда получим

$$\frac{P}{Y} = \frac{4\pi}{c_y} \approx 10.$$

т. е. оказывается, что вращающийся цилиндр при равных условиях создает силу в 10 раз большую, чем крыло.

## Парус Флеттнера

Первая попытка использовать описанное преимущество ротора была сделана Флеттнером, который предложил использовать вращающиеся цилиндры вместо парусов.

Для этой цели он переоборудовал большой парусный корабль водоизмещением 778 т. Вместо парусов были поставлены две роторные башни высотой 18,5 м и диаметром 2,8 м. Общая площадь их диаметральных сечений была в 10 раз меньше площади снятых с корабля парусов.

Как показали ходовые испытания, роторы Флеттнера по своим динамическим качествам не уступали парусам. В то же время по простоте обслуживания они значительно превосходили последние. Измерения показали, что на вращение роторов расходовалось в 50 раз меньше энергии, чем получалось от ветра (рис. 28). Чем же объяснить, что несмотря на такие большие достоинства, корабли с парусами Флеттнера не получили до сих пор распространения? Это объясняется тем, что парусный корабль был вытеснен теплоходом, движение которого в меньшей степени зависит от капризов природы. Хотя в последнее время в печати появляются сообщения о целесообразности использования энергии ветра для движения кораблей. И при этом вновь вспоминают об удачных опытах Флеттнера.

## Летающий автомобиль

Укажем еще на одно возможное применение вращающегося цилиндра. Расположенный горизонтально, такой цилиндр во встречном потоке воздуха создает большую подъемную силу.

Кто из нас не мечтал об автомобиле, который мог бы подниматься в воздух? Такой автомобиль обладал бы неоценимыми преимуществами как перед обычными «земными» автомобилями, так и перед современными самолетами. Стоял бы такой автомобиль не на специальном аэродроме, а во дворе дома или в гараже. В любой момент вы можете сесть в него и влиться в уличный поток машин. Но вот вы разгоняетесь до скорости 60 — 70 км/ч и отрываетесь от дороги. Теперь вам не нужна дорога, вы можете свернуть в поле, перелететь через реку, снега и болота.

Произведем расчет роторного крыла для такого автомобиля. Вес автомобиля примем равным 16000 Н, минимальную скорость  $v=18$  м/с, диаметр ротора 2 м. Подставляя эти данные в формулу для подъемной силы, найдем длину цилиндрического крыла  $\frac{3}{4}2$  м. Таким образом, размер цилиндра получается вполне приемлемым для конструирования автомобиля.

Мы намеренно выбрали небольшую скорость движения (18 м/с), что соответствует 65 км/ч. Так как расходуемая мощность, необходимая для движения, пропорциональна кубу скорости, для нашего автомобиля не понадобится большей мощности. Кроме того, автомобиль не будет нуждаться в специальном средстве создания тяги.

Конечно, такой автомобиль можно применять только для полетов на малой высоте.

Поскольку несущий цилиндр имеет большие поперечные размеры, его внутренность можно использовать как фюзеляж для размещения пассажиров, двигателя и багажа. В этом случае приводить во вращение можно не сам ротор, а цилиндрическую решетку, охватывающую несущий цилиндр.

## Метеор сгорает в воздухе

Августовскими вечерами часто можно видеть «падающие звезды». На черном бархате неба, усеянном алмазными блестками, вдруг появляется ослепительная огненная точка. Прочертив на небосводе короткую яркую полосу, она исчезает. Теперь каждый школьник знает, что это не

---

звезды, а метеоры или метеориты, которые на своем пути встречают атмосферу Земли.

Что же происходит, когда метеор с большой скоростью входит в плотные слои атмосферы? До сих пор мы рассматривали течение несжимаемой жидкости или такие движения в воздухе, которые почти не приводят к его сжатию. Чтобы ответить на поставленный вопрос и дать объяснение многим другим явлениям, нужно учесть свойство воздуха сжиматься, которое в этих случаях играет существенную роль.

Рассмотрим течение воздуха в сужающейся трубе. Так как через любое сечение за единицу времени протекает одно и то же количество воздуха, то по мере сужения трубы скорость воздуха увеличивается. В воде увеличение скорости приводит к понижению давления и кипению холодной воды. Воздуху эта опасность не угрожает. До какой величины можно увеличить скорость в окружающей трубе? Оказывается, только до величины, с которой распространяется звук в самом узком сечении трубы. Никакое увеличение давления не позволяет превзойти этот рубеж.

Самое удивительное, что нарастив трубу расширяющимся участком, можно без дополнительных усилий получить сверхзвуковую скорость газа. Такое устройство, полученное шведским инженером Лавалем в результате теоретических и экспериментальных исследований, называется «соплом Лавалея».

Когда какое-либо тело движется медленно, то воздух, как и вода, расступается перед ним, плавно огибает тело и за кормой смыкается в сплошной поток. А если тело движется со сверхзвуковой скоростью? Тогда возмущения, вносимые телом, не успевают отойти от него и воздух в носовой части сжимается. В этом процессе важную роль играет отношение скорости движения к скорости звука, которая при обычных условиях равна 340 м/с. Это отношение названо числом Маха, по имени немецкого исследователя.

При сжатии воздух, как известно, нагревается. Вычисления показывают, что при движении тела со скоростью звука температура воздуха повышается на 60° С. Для советского сверхзвукового самолета ТУ-144 нагрев воздуха достигает 400° С. А в том случае, если число Маха равно 10, нагрев доходит до 6000° С, т. е. до температуры, при которой испаряются все известные в природе вещества.

Эти цифры позволяют представить, что происходит, когда космические тела и корабли входят в плотные слои атмосферы. Малые метеоры

сгорают, не достигнув поверхности Земли. Крупные (их тогда называют, метеоритами) — расплавляются тем, что оставляют в воздухе свою большую часть.

Как же спасти космический корабль от действия столь высокой температуры? Напомним читателю, что эта проблема являлась серьезным препятствием на пути освоения космоса. Все первые искусственные спутники Земли существовали до тех пор, пока они находились достаточно далеко от границы атмосферы. Как только они приближались к Земле с намерением вернуться туда, откуда они вышли, Земля принимала их в свои настолько горячие объятия, что они тут же сгорали, послав свои последние радиосигналы: «бип, бип, бип...».

Вход в атмосферу стал возможен только после того, как были созданы настолько мощные ракеты, что они могли послать на круговую орбиту спутник большого веса, который имел на борту тормозные двигатели и запас топлива к ним. Кроме того, на корабле должна быть сложная система ориентации и система автоматического управления. По сигналу с Земли или по команде космонавта корабль поворачивается так, что сопла его тормозных двигателей направляются в сторону движения. После включения эти двигатели начинают затормаживать корабль. Так как для полной остановки корабля понадобилось бы столько же топлива, сколько и для разгона, то торможение осуществляется только на некоторую величину. При этом корабль сходит со своей околоземной орбиты и входит в атмосферу, имея уже несколько меньшую скорость. Однако космический корабль или капсула, отделившаяся от него, все равно подвергаются аэродинамическому нагреву до температур, превосходящих температуры испарения всех известных на Земле веществ.

Чтобы понять, как же всё-таки сохраняется корабль в таких условиях, сделайте следующий опыт. На слегка нагретый утюг капните водой. Капля плотно ляжет на поверхность утюга и через несколько секунд испарится. Теперь нагрейте утюг до самой высокой температуры, намного превосходящей температуру кипения воды. Казалось бы, что теперь капля испарится, едва коснувшись утюга. На самом деле она будет долго «бегать» по его поверхности.

Этот эффект объясняется тем, что между горячей поверхностью утюга и каплей воды появляется слой пара, который и защищает каплю от действия высокой температуры. Такой же способ защиты принят и для космических кораблей. Носовую часть корабля покрывают толстым слоем какого-либо вещества с малым коэффициентом теплопроводности,

---

высокой температурой испарения и большой скрытой энергией испарения. Применяемые покрытия при высоких температурах переходят из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу. Такое испарение называется абляцией. Покрытие своими испарениями защищает корабль от действия высокой температуры.

## Смерч—торнадо

Знает ли читатель, что такое смерч-торнадо?

Здесь нужно сказать несколько слов по поводу терминологии. В советской научной литературе употребляется термин «смерч» применительно к двум разным физическим процессам, которые имеют, правда, некоторое сходство. Первый — это процесс, вызываемый восходящими потоками воздуха над сильно нагретой поверхностью Земли. Некоторая начальная циркуляция воздуха на периферии смерча приводит к заметному вращению вблизи центра, создавая общее винтовое течение, направленное вверх. При этом воздух захватывает с земли пыль, что и обусловило его английское название *dust devil* (пыльный дьявол).

«Пыльный дьявол», несмотря на свое грозное имя, представляет собой безобидное явление, которое имеет хорошее физическое и математическое описание. Этого не скажешь о другом смерче, который в западной литературе называется «торнадо». О нем-то и пойдет речь ниже.

Торнадо зарождается из материнского или смерчевого облака, спускается вниз до Земли в виде длинного хобота, внутри которого воздух совершает быстрое вращательное движение со скоростью, иногда достигающей скорости звука.

Материнское облако, представляющее собой маленький тропический ураган, как и настоящий ураган, имеет так называемый глаз, в котором стоит мертвая тишина, и обладает спиральным строением. Если смерчевое облако имеет большие размеры, оно практически ложится на Землю, и мало отличается от циклона. Очень часто циклон приводит к появлению торнадо.

Средние размеры смерчевого облака невелики: в поперечнике 5—10 км, высота 4 — 5 км. Расстояние между Землей и верхним краем облака порядка нескольких сот метров, реже больше.

В смерчевом облаке, как правило, наблюдается горизонтальное вихревое облако с наклонным или вертикальным столбом самого смерча-торнадо.

Детальное описание внутренней полости смерча дал один фермер из штата Канзас [11]. Стоя во входе в убежище, он наблюдал за приближающимся по равнине смерчем. Вблизи от убежища конец воронки смерча поднялся над землей и прошел над фермером. «Большой лохматый конец воронки повис прямо над моей головой. Кругом все неподвижно. Из конца воронки шел скрипящий, шипящий звук. Я взглянул вверх и, к своему удивлению, увидел само сердце смерча. В его середине была полость диаметром 30—70 м, шедшая кверху на расстояние около километра. Стены полости были образованы вращающимися облаками, а сама она была освещена непрерывным блеском молний, зигзагом перескакивавших с одной стены на другую. Полость была совершенно пустой, и только туманные образования двигались вверх и вниз. Смерч двигался медленно, и у меня было время хорошо увидеть все внутри и снаружи».

Внутренняя полость смерча, как это показали многочисленные наблюдения и измерения, обладает резко пониженным давлением. Поэтому, когда она соприкасается с запертым домом с закрытыми окнами, дом буквально взрывается, и целые стены вываливаются наружу.

Резко ограниченные почти гладкие плотные стенки воронок представляют одно из важнейших и своеобразных свойств смерча. По-видимому, именно этим свойством смерча объясняются некоторые его проявления.

В Канзасе, этой стране смерчей, 9 октября 1913 г. смерч прошел по небольшому саду. Он вырвал с корнем большую яблоню и разорвал ее на отдельные куски. В метре от яблони стоял улей с пчелами,— он остался невредим.

Фермер ехал по проселочной дороге в телеге, запряженной двумя лошадьми. День был душный, жаркий, надвигалась гроза. Лошади шли шагом и фермер задремал. Проснулся он, когда раздался страшный грохот, налетел ужасный вихрь. Через несколько секунд вихрь ушел вперед, все прояснилось, стало тихо и солнечно. Телега и фермер на ней остались на месте, но оглобля и две лошади исчезли. Они были унесены смерчем.

В штате Небраска на ферме в коровнике сидела хозяйка и доила корову. Вдруг коровник и корова поднялись в воздух и улетели. Хозяйка осталась сидеть на стуле, рядом с ней ведро с молоком.

В штате Оклахома четырехкомнатный двухэтажный деревянный дом был унесен смерчем вместе с семьей фермера. Дом был разломан на мелкие куски, вся семья убита. В дом вела невысокая трехступенчатая

---

лестница. Рядом с ней к дому была прислонена скамейка. И лестница, и скамейка остались на месте. Мало этого: недалеко от лестницы стоял старенький фордик и под деревом на столе горевшая керосиновая лампа. У автомашины смерч вырвал два задних колеса, но кузов остался, Керосиновая лампа продолжала гореть, как будто рядом никакого бешеного вихря и не было.

В СССР во время смерча 23 августа 1953 г. в г. Ростове (Ярославской области) во дворе дома № 37 по Февральской улице у колодца снесло деревянный сруб, а стоявшее рядом ведро и деревянная кадка остались на месте.

Скорости движения воздуха в смерче столь велики, что ни один из существующих приборов для измерения скоростей не выдерживает, ломается, а чаще всего исчезает бесследно. Однако специалисты довольно точно высчитывали эти скорости по косвенным измерениям.

Далласский смерч 2 апреля 1957 г., пересекая железную дорогу, опрокинул несколько груженных, очень тяжелых вагонов. По их весу и форме специалисты определили, что скорость ветра достигала 210—225 км/ч, а порывами до 350 км/ч. Немного дальше от дороги была разрушена громадная и прочная подставка для объявлений: в этом месте скорость достигала 480 км/ч.

Американский метеоролог Файнли, детально изучивший многие сотни смерчей, еще в 1884 г. приводил цифру 1300 км/ч. Эту цифру он получил на основании следующего зарегистрированного факта: мелкая галька, увлекаемая смерчем, пробивала оконные стекла так же, как револьверные пули, — образуя круглые отверстия в целом стекле.

Знаменитый в Америке Ирвингский смерч, который появился 30 мая 1879 г. в штате Канзас, среди многих разрушений уничтожил новый железный мост длиной 75 м. Подняв громадное стальное сооружение, воронка в воздухе изогнула и закрутила его с невероятной силой. Вся структура моста превратилась в плотный сверток диаметром 1,5—2 м.

Перечисленные примеры свидетельствуют о сверхзвуковой скорости движения воздуха в воронке (1200 км/ч).

О большой скорости смерча свидетельствуют другие многочисленные факты.

После смерча стена одного деревянного дома оказалась проткнутой насквозь доской. Имеется много зарегистрированных случаев, когда соломинки протыкали толстые доски, щепки протыкали деревья (см. сделанный с фотографии рис. 29), а сосновая палка пробила лист железа

толщиной около сантиметра.

Точные измерения скорости вращения редки и дают разные результаты. Американский исследователь Брукс (Brooks, 1951) в своем обзоре смерчей называет максимальную скорость 720 км/ч. В более поздней работе (Abdullah, 1955) на основании кинограмм определяется скорость 1200 км/ч, равная скорости звука и выше. Интересны случаи, когда материнское облако опускается на Землю, воронка отсутствует совсем и облако медленно ползет по Земле.

Формы смерчей очень разнообразны, но при всем этом разнообразии можно выделить устойчивые особенности: четкая граница между смерчем и неподвижной атмосферой, что сильно отличает смерч от других воздушных образований; значительная длина и малый диаметр; преимущественно вертикальное положение. Тонкие изогнутые формы обычно характеризуют конечный период существования смерча.

Колонноподобные и воронкообразные смерчи наиболее многочисленны и типичны. Хотя и реже, но бывают смерчи с очень короткой колонкой, когда материнское облако практически катится по земле. Такой смерч отличается от циклона разве что размером, но в отличие от циклона обладает большой плотностью энергии (см. сделанный с фотографии рис. 30).

Раньше считалось, что смерч является чем-то обособленным, существующим независимо от материнского облака. Сейчас доказано, что смерч и облако представляют элементы единого вихревого движения.

Когда воронка касается Земли, у ее подножья почти всегда образуется облако или столб пыли или водяных брызг. Этот столб называют каскадом. Один из наблюдателей отметил, что пыль и мелкие предметы в каскаде поднимаются совершенно так же, как и при ударе воды из шланга при поливке улицы. Иногда каскад поднимается на несколько сот метров, как на воспроизводящем фотографии рис. 31. Только наличие внешнего вихревого течения может объяснить подъем воды в каскаде. Скорость перемещения и время существования смерчей весьма отличны от поведения материнского облака. Средняя скорость перемещения смерча равняется 40—60 км/ч. Время существования смерчей, зарегистрированных в Соединенных Штатах, колеблется от нескольких минут до 7 часов.

Змееподобные смерчи обладают наименьшей шириной, иногда несколько метров. Средняя ширина воронкообразных смерчей равняется 350—400 м, а высота достигает несколько сот метров, иногда 1,5 км.

---

Интересно влияние смерчей на небольшие водные массы. Описывается ряд случаев, когда смерч высасывал до дна колодцы глубиной около 10 м, небольшие озера и ( болота осушались полностью. Их вода вместе с фауной и флорой поднимались в смерчевое облако и в горизонтальном вихре переносились на десятки километров и больше.

Пересекая большие реки или озера, смерч-торнадо образует в толще воды глубокую траншею. Именно такую картину наблюдали свидетели московского смерча 1904 года.

Своеобразной особенностью смерчей является их «прыгание». Пройдя некоторое расстояние по Земле, они поднимаются и перемещаются по воздуху, не касаясь Земли и не вызывая движения воздуха на поверхности. Именно в такие моменты проводились наблюдения и фотографирование внутренней полости смерча. Затем смерчи снова опускаются и продолжают движение, оставляя после себя пунктирную линию, образованную разрушениями.

Наиболее тщательная регистрация и изучение смерчей проводится в Соединенных Штатах. За период с 1916 по 1950 годы наблюдалось 5204 смерча. От них погибло 7961 человек. Материальные убытки составляют 0,5 миллиарда долларов. В более позднем обзоре проводятся данные вплоть до 1961 г. Количество зарегистрированных смерчей равняется 11 053. Среднегодовое количество смерчей в период с 1953 по 1963 годы равняется 595. Однако в 1957 г. их было 864, а в 1965 г.—927.

В странах, лежащих в более высоких широтах, в том числе в европейских и СССР, смерчи образуются реже, обладают меньшей разрушительной силой и регистрация их осуществляется не столь тщательно, как в США.

Даже из приведенных выше описаний можно видеть, что некоторые физические эффекты, сопровождающие торнадо, не укладываются в привычные представления механики жидкости и газа.

Действительно, каков механизм вращения воздушного столба с большой скоростью? Почему хобот спускается вниз, с силой ударяется о землю и воду и в то же время сосет эту же воду вверх? Почему существует резкая граница между вращающейся и неподвижной массой воздуха? Почему смерч «прыгает»?

Качественное объяснение этих эффектов на основе известнее нам законов гидродинамики кажется совершенно необходимым для душевного комфорта всякого специалиста. Человеку, далекому от науки, по-видимому, следует объяснить, что душевный комфорт ученого явля-

ется таким же побудительным мотивом научных исследований, как и потребности практики. Кстати, о последних. Выявление механизма торнадо, быть может, позволит найти средства воздействия для уменьшения его разрушительного действия. Искусственно созданный управляемый воздушный вихрь, способный всасывать и транспортировать сыпучие материалы, по-видимому, мог бы найти применение и в человеческой практике.

Попытаемся разобраться в механизме смерча-торнадо. Для этого обратимся к рис. 32, который мы взяли из книги Д. В. Наливкина [11].

Материальным и энергетическим источником смерча является смерчевое или, как его еще называют, материнское облако. Как и всякое облако, оно возникает благодаря восходящему потоку, который поднимает теплый влажный воздух. Отличие состоит лишь в том, что смерчевое облако обязательно вращается. Центральная часть его движется вверх, доходит до инверсионного слоя и растекается по горизонтали. Благодаря охлаждению и конденсации влаги плотность воздушных масс быстро увеличивается, и они начинают опускаться вниз. Так возникает нисходящий поток, который, встречаясь с восходящим, образует вращающиеся кучевые облака. Движение и форма смерчевого облака таковы, что некоторые исследователи их называют маленькими ураганами.

Вращающаяся тороидальная масса воздуха обладает достаточной устойчивостью, чтобы сохранять свою форму и положение. Однако обильная конденсация влаги может настолько увеличить плотность, что из облака начнут «проливаться» огромные струи. Естественно, что эти струи, как материальные носители завихренности, будут вращаться теперь уже вокруг вертикальной оси. Так возникает воронка смерча. В соответствии с законом сохранения момента количества движения окружная скорость в воронке растет по мере течения воздуха из ее широкой части в узкую обратно пропорционально диаметру. В соответствии с рис. 31, если скорость вращения в облаке равнялась 10 м/с, то у основания воронки она могла достигать 240 м/с. Таким образом, экстенсивный источник энергии восходящих потоков благодаря воронке вызывает интенсивное вращение некоторой части исходной массы.

Большая центробежная сила уравнивается разрежением воздуха, возникающим на оси смерча. Это условие естественным образом выполняется на всей длине смерча, кроме его конца, если он не лежит на земле. А как выполняются условия равновесия на нижнем конце воронки, почему она удлиняется?

---

Чтобы ответить на этот и другие вопросы, мы должны привлечь к рассмотрению один интересный факт, наблюдаемый в вихревых камерах. Такие камеры подвергаются интенсивному исследованию по причине особого практического интереса. На их основе делаются циклонные топки, центробежные сепараторы, вихревые холодильники и т. д. Условия движения в вихревой камере весьма близки к тем условиям, которые нас интересуют.

Подробные исследования структуры течения в вихревой камере позволили установить, что весь поток воздуха образован тонкими вихревыми нитями, вытянутыми вдоль основного течения. Однородной изотропной среде, какой является воздух, структурные образования в виде вихревых нитей придают новые неожиданные свойства.

Всем хорошо известно, что вращающееся тело обладает свойством сохранять направление оси вращения и препятствовать силам, которые пытаются наклонить ось. На этом принципе основаны гироскопические компасы, датчики угловых перемещений и детские волчки.

Вихревая нить представляет собой вытянутый объем быстровращающейся массы воздуха. Каждый отрезок нити можно рассматривать как маленький гироскоп, оба конца оси которого гибко соединены с осями смежных гироскопов.

Такая схема позволяет объяснить наблюдаемое поведение одиночной вихревой нити, когда она под действием боковых сил приобретает винтовую геометрию и вращается как твердое целое. Две или больше вихревых нитей благодаря взаимодействию вращаются вокруг общей оси — водят хоровод.

Подробные вычисления показывают, что воздушный столб, образованный набором отдельных вихрей, обладает упругостью и ведет себя как резиновый жгут. Момент, приложенный к одному концу, благодаря закрутке передается без изменения на другой

конец, угловая скорость тоже сохраняется. Граница раздела между быстро вращающейся массой смерча и неподвижной окружающей средой, обычно неустойчивая, будет сохраняться.

Сделав предположение, что столб смерча-торнадо состоит из набора вихревых нитей, мы можем дать объяснение некоторым его физическим особенностям, которые не поддавались объяснению.

Хотя мы ограничились рассмотрением смерча-торнадо, есть необходимость коснуться и смерча—пыльного дьявола. Дело в том, что исследователи торнадо неоднократно наблюдали, как навстречу опускающейся-

ся воронке, видимой благодаря конденсированной влаге материнского облака, поднимался от земли другой смерч — пыльный дьявол, видимый благодаря захваченной им пыли. Тем более такой смерч должен возникать при периодических отрывах торнадо от земли. Весь тот механизм торнадо, который мы описали выше, сохраняется и при наличии пыльного дьявола. Постоянное или периодическое присутствие пыльного дьявола в нижней части торнадо, по-видимому, является типичным состоянием. Именно этим можно объяснить каскад и чехол из пыли, в который иногда одевается столб. Некоторые изменения окружной и радиальной скоростей вблизи торнадо находятся в противоречии с другими данными о скачке окружной скорости, но хорошо объясняются, если принять, что нижняя часть была дополнена пыльным дьяволом.

Итак, мы нашли объяснение почти всем видимым проявлениям торнадо, используя известные нам законы гидромеханики. Мы говорим «почти», так как совершенно не остановились на термодинамических, электростатических и других /возможных процессах, сопровождающих торнадо. Более того, мы молчаливо предполагали, что неучтенные процессы не влияют на сделанные выводы.

Теперь самое время обратиться к возможному практическому применению наших знаний. Для людей, которые живут в зоне возникновения смерчей и подвергаются их разрушительному действию, по-видимому, самым главным практическим результатом было бы предотвращение или уничтожение торнадо.

Поскольку материальным и энергетическим источником торнадо является смерчевое облако, то его уничтожение предотвратило бы и возникновение смерча.

Обработка смерчевого облака подходящим реагентом, вызывающим конденсацию влаги и выпадение дождя, обеспечит достижение цели. Потребность в обработке больших объемов облаков, потенциальных родоначальников смерча, может оказаться существенным недостатком предлагаемого способа. Поэтому следует рассмотреть возможность воздействия на смерч после его формирования.

Из рассмотренного описания видно, что воронка смерча, через которую осуществляется передача энергии смерчевого облака, является самой нагруженной частью смерча.

Разрушение воронки смерча приведет к ликвидации крутящего момента и к остановке и исчезновению вихря. Такое разрушение можно обеспечить путем нарушения равновесия между центробежными си-

---

лами и градиентом давления. Для этого достаточно в центре воронки выпустить какое-то количество массы, тепла и радиального импульса путем сжигания топлива или взрыва. Для доставки топлива и взрывчатого вещества в устье воронки можно воспользоваться транспортирующей способностью смерча. Он сам всосет и поднимет нужное вещество, нам достаточно только осуществить дистанционное воспламенение или взрыв.

Физическая реализация механизма торнадо в малых масштабах позволила бы, по-видимому, сконструировать новый тип пылесоса, погрузочное и разгрузочное устройство для сыпучих материалов, хлопкоборочную машину большой производительности и тому подобные машины.

Даже одного рассмотренного смерча-торнадо достаточно, чтобы убедиться в бесконечном разнообразии физических эффектов в природе.

## Список литературы

1. Калинин Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах. — М.: Машиностроение, 1982
2. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика. — М.: Наука, 1964 — 814 с.
3. Грабовский М. А., Млодзеевский А. В., Телеснин Р. В., Шаскольская М. П., Яковлев И. Я. Лекционные демонстрации по физике. — М.: Наука, 1965 — 572 с.
4. Идельчик И. Е. Некоторые эффекты и парадоксы в аэродинамике и гидравлике. М.: Машиностроение, 1982 — 96 с.
5. Кузов К. Мир без форм. М.: Мир, 1976 — 248 с.
6. Мальцев Л. И. Гидродинамика пристенных струй со свободными внешними границами. Эффект Коанда. Препринт АН СССР СО ИТФ № 119–84, 1984 — 35 с.
7. Reba I. Applications of the Coanda affect — Sci American, 1966, June, p. 84–92.
8. H. B. Keller: In: Applications of Bifurcation Theory, P. Rabinowitz (ed.), 359 (Academic Press, Inc., New York 1977).
9. Newman B. G. The deflexion of plane jets by adjacent boundaries Coanda affect. — Bound Layer flowcontrol Oxford ets Ed. Lachmann, 1961, v. 1, p. 232–264
10. Reynolds O. Suspension of ball by a jet of fluid — PracManch lit. Phil. Soc. 1870, v9, p. 114 and 133.
11. Metral A. Sum un Phenomene de Peviation des VeinesFluides at ses Applications. Effect Coanda — Cabinet Technique du Minictere de l'aim. 1938.
12. Вилле Р., Фернгольц Г. Сообщение о первом европейском коллоквиуме механиков, посвященном эффекту Коанда. — Механика, 1966, № 5, с. 61–80.
13. Савельев Ю. Л. Развитие полуограниченного турбулентного потока вблизи прямоугольного выступа. — Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1985, № 2, с. 103–107.
14. Соколова И. Н. Использование эффекта Коанда для уменьшения воздействия струи на преграду. — Уч. Зап. ЦАГИ, 1985, т. 16, № 3, с. 118–121.
15. Spranle R. S. Adderleg J. W., Robinson S. T. The Coanda effect — CIOS, SHAEF, Item № 5, 1944.
16. Glahn V. H. Use of the Coanda effect for jet deflection and vertical lift with multiple–float–plate and curred–plate deflection surfaces — NACA TN, 1958, № 4377.
17. Young D. W., Zonars D., Wing tunned test of the Coandaevind and nozzle USAF, TR 6199, 1950.

18. Гольдштик М. А., Сорокин В. Н. О вращении цилиндра на границе струи. — ПМТФ, 1966, № 1, с. 123–124.
19. Гольдштик М. А. Парадоксы вязких течений. — Новосибирск, 1986 — 37 с. (Преприн ИТФ, № 143–86).
20. Зайнуллин Л. А., Ратников Е. Ф., Марченко А. В. Гидравлические характеристики устройства и с гидродинамически подвешенным шаром. — Деп. ВИНИТИ, № 2966–76 — 15 с.
21. Ратников Е. Ф., Зайнуллин Л. А., Марченко А. В. Эффект гидродинамической подвески шара в канале. — Изв. Вузов. Энергетика, 1976, № 10, с. 84–88.
22. Марченко А. В. Эффект левитации тел вращения в стесненном потоке теплоносителя. — Теплоэнергетика, 1977, № 3, с. 51–54.
23. Зайнуллин Л. А. Исследование гидродинамической подвески шара применительно к измерению расхода теплоносителя в ядерных реакторах канального типа. — Автореферат дисс. на соиск. учен. степени к.т.н. — Свердловск, 1979 — 20 с.
24. Шкловер Г. Г., Коротков П. Ф., Лохин Н. И. Исследование левитации шара в цилиндрическом канале. — Теплоэнергетика, 1980, № 10, с. 69–70.
25. Шкловер Г. Г., Коротков П. Ф., Лохин Н. И. Экспериментальное исследование левитации шара в цилиндрическом канале. — Теплоэнергетика, 1982, № 5, с. 60–63.
26. Шкловер Г. Г., Гладышев Ю. А., Лохин Н. И. Гидродинамическая левитация шара в цилиндрическом канале — Сб. Теплообмен в энергооборудов. АЭС. Л., 1986, с. 55–64.
27. Шкловер Г. Г., Коротков П. Ф., Лохин Н. И., Кректунов О. П. Исследование проточной части расходомера с левитирующим ротором применительно к теплообменным аппаратам — Тр. ЦКТИ, 1979, вып. 173, с. 95–96.
28. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. — М., Наука, 1977 — 408 с.
29. Гольдштик М. А. Вихревые потоки. — Новосибирск: Наука, 1981 — 366 с.
30. Гольдштик М. А., Ханин В. М. Взаимодействие цилиндра со свободной поверхностью и струей. — МЖГ, 1977, № 5, с. 50–58.
31. Идельчик И. Е. Некоторые эффекты и парадоксы в аэродинамике. М., Машиностроение, 1982 — 97 с.
32. Вильгельми Т. А. О струйном обтекании шара. — ПМТФ, 1969, № 5, с. 76–80.
33. Кашеев В. П., Лебедев А. В., Сорокин В. Н. Исследование теплообмена между одиночным тепловыделяющим шаром и струей воздуха. — Изв. вузов.

Энергетика, 1985, № 9, с. 90–94.

34. Исатаев С. И., Жанабаев З. Ж. Теплоотдача шара при струйном обтекании. — ИФЖ, 1968, т. 14, № 4, с. 586–592.

35. Гольдштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое. — Новосибирск, 1984 — 163 с.

36. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М., Наука, 1969 — 742 с.

37. Eiffel G. Sur la resistance des spheres dans l'air en mouvement — Comptes Rendus, 1912, № 155, s. 1957.

38. Rrandtl L. Den Luftwiderstand von Kugeln — Nach. Ges. Wiss. Göttingen. Math Phys. Klasse 1914, s. 177–190.

39. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными суживающими устройствами. РД–50–213–80, М., Изд. стандартов, 1982 г.

40. Деменок С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М. Гидродинамика и теплообмен в шаровых укладках — Санкт–Петербург: Страта, 2012

41. Berman P. W. , Harvey J. K. Golf Ball Aerodynamics // Aeronautical Quarterly. — 1976. — V. 27, pt. 2 — P. 112 — 122

42. Щербаков М. А., Марчуков Е. Ю., Картовицкий Л. Л., Юн А. А. Способ пассивного воздействия на поток в компрессорной решетке // Авиационно–космическая техника и технология. — 2010. — №9 (76) — с.41–45.

43. Aoki K., Ohike A., Yamaguchi K. and Nakayama Y. Flying Characteristics and Flow Pattern of a Sphere with Dimples // Journal of Visualization. — 2003. — Vol.6. — №1. — PP. 67–76.

44. Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Алексеев В. В. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление. — М.: МЭИ, 2005. — 84 с.

45. А.с. 1467363 СССР, МКИ 5 F 28 F 13/12 Теплообменная труба / Б. В. Сударев, А. Н. Цуриков, В. В. Медведев, С. М. Сивуха, Д. В. Чистяков (СССР) — № 4292466/06; заявл. 03.08.87; опубл. 23.03.89, Бюл. № 11 — 2 с.

46. А.с. 1733899 СССР, МКИ 5 F28 F13/12. Теплообменная труба / Н. Н. Сунцов, Б. В. Сударев, С. Л. Деменок, В. В. Медведев, Ю. Н. Добрянская (СССР), — №4803101/06; заявл. 19.03.90; опубл. 15.05.92, Бюл. №18. — 3 с.

47. А.с. 1749614 СССР, МКИ 5 F22 G5/12. Впрыскивающий пароохладитель / Н. Н. Сунцов, Б. В. Сударев, С. Д. Деменок, В. В. Медведев, Б. А. Иваницкий (СССР). — №4882824/06; заявл. 16.11.90; опубл. 23.07.92, Бюл. №27. — 3 с.

48. Богоявленский Р.Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978. С. 81, 86

49. Куликов И. С., Б. Е. Тверковкин. прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов. М.: Наука и техника, 1984. С. 17

50. Авт. свид. 1782638, СССР, В 01 D 47/10. Устройство для очистки газа / С.Л. Деменок, М. З. Арысланова, В.В. Медведев, С. М. Сивуха и Д. В. Чистяков (СССР)

51. Авт. свид. 1719870, СССР, F 28 D 17/00. Регенеративный теплообменник / В. А. Чистяков, Б. В. Сударев, С. Л. Деменок, В. В. Медведев и Ю. Н. Добрянский (СССР)

52. Авт. свид. 286001, СССР / Тепловыделяющий элемент / Б. В. Сударев, А. Н. Цуриков, В. В. Медведев, С. М. Сивуха, Д. В. Чистяков (СССР) — № 3195520131 – 25; заявл. 20.02.88; опубл. 20.02.88

53. Авт. свид. 293222, СССР / Активная зона канального типа / Б. В. Сударев, С. Л. Деменок, В. В. Медведев, Д. В. Лавренов, Г. В. Григорьев (СССР) – №31955 19/35; заявл. 20.02.88; опубл. 22.02.88

54. Каплеуловитель / С. Л. Деменок, В. В. Медведев

55. Расходомер / Б. В. Сударев, Э. Г. Нарезный, С. Л. Деменок., В. В. Медведев, В. В. Мелентьев

Деменок Сергей Леонидович

# **ЛЕВИТАЦИЯ ШАРА В СТЕСНЕННОМ ПОТОКЕ**

Монография

Настоящее издание не имеет возрастных ограничений, предусмотренных Федеральным законом РФ «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию» (№ 436-ФЗ).  
Охраняется законом РФ об авторском праве.

Издательство «Страта»  
195112, Санкт-Петербург, Заневский пр., 65, корпус 5  
Тел.: +7 (812) 320-56-50, 320-69-60  
[www.strata.spb.ru](http://www.strata.spb.ru)

Подписано в печать 24.11.2017  
Доп. тираж 100 экз.