

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ .....</b>	<b>12</b>
1.1. Основные понятия.....	12
1.2. Силы массовые и поверхностные.....	14
1.3. Ламинарное и турбулентное течение.....	15
1.4. Основные уравнения гидрогазодинамики .....	20
1.4.1. Уравнение непрерывности .....	21
1.4.2. Равновесие жидкости. Основное уравнение гидростатики и гидростатическое давление.....	21
1.4.3. Уравнение Эйлера .....	23
1.4.4. Уравнение Навье — Стокса и особенности системы УНС .....	24
1.5. Понятие о пограничном слое .....	25
1.6. Хорошо обтекаемые тела .....	28
1.7. Силы и моменты в аэродинамике.....	29
1.8. Понятие аэроупругости. Явления аэродинамической неустойчивости .....	31
1.8.1. Дивергенция .....	35
1.8.2. Вихревое возбуждение .....	35
1.8.3. Галопирование .....	36
1.8.4. Изгибо-крутильный (классический) флаттер.....	37
1.8.5. Срывной флаттер.....	38
1.8.6. Бафтинг .....	38
<b>2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПОДХОД ИЗУЧЕНИЯ ЯВЛЕНИЙ И ЗАДАЧ МЕХАНИКИ.....</b>	<b>42</b>
2.1. Понятия модели и моделирования .....	42
2.2. Классификация моделей.....	43
2.3. Свойства моделей.....	45
2.4. Основные этапы моделирования .....	46
2.5. Основы анализа размерностей и теории подобия .....	48
2.6. Применение теории подобия и анализа размерностей к моделированию задач механики .....	54
2.7. Критерии подобия в аэродинамике .....	62
2.8. Понятие об автомодельности.....	66
2.9. Экспериментальные методы моделирования.....	67
2.9.1. Характеристика эксперимента.....	67
2.9.2. Классификация экспериментальных исследований .....	70
2.9.3. Особенности проведения измерительных работ.....	71

<b>3. КОНСТРУКЦИИ В ВЕТРОВОМ ПОТОКЕ .....</b>	<b>73</b>
3.1. Свойства ветрового потока	
в приземном слое атмосферы.....	73
3.2. О турбулентности ветра в приземном слое	
атмосферы.....	75
3.3. Ветровые системы.....	77
3.4. Действие одиночных порывов ветра	
на конструкции.....	79
3.5. Алгоритм расчётов на статическое действие	
равномерного ветрового потока .....	83
3.6. Приближенные динамические расчёты	
на продольно-поперечные пульсации ветрового потока .....	84
3.7. О резонансных реакциях супергибких конструкций	
вдоль турбулентного ветрового потока .....	85
3.8. Влияние орографии местности и препятствий	
с наветренной стороны сооружений .....	86
<b>4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ</b>	
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>87</b>
4.1. Сведения об аэродинамических трубах .....	87
4.2. Подготовка к проведению аэродинамических	
экспериментальных исследований .....	90
4.2.1. Распределение ответственности между заказчиком	
и исполнителем.....	90
4.2.2. «Формуляр» Заказчика .....	91
4.2.3. Программа исследований .....	92
4.3. Задачи, особенности и этапы проведения испытаний	
по исследованию аэродинамики строительных конструкций.....	92
4.4. Макетирование .....	94
4.5. Проведение экспериментальных исследований .....	95
4.5.1. Контроль за характеристиками потока .....	95
4.5.2. Дренажные испытания.....	96
4.5.3. Весовые испытания .....	98
4.5.4. Визуализация и исследование обтекания	
исследуемого объекта .....	100
4.6. Компьютерное моделирование	
(вычислительный эксперимент) .....	102
4.6.1. Общие замечания .....	102
4.6.2. Технологии верификации вычислительного	
эксперимента.....	104
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>113</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>115</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние аэрогидромеханики как одного из фундаментальных разделов механики можно с определенной степенью достоверности охарактеризовать как кризис развития последних двух десятилетий. Практически все известные на данный момент явления, возникающие при взаимодействии потока газа или жидкости с различными телами, уже достаточно изучены. Описаны критерии их возникновения и условия существования. Установлены параметры упругих тел, такие как динамическая жесткость, геометрические формы и размеры, соответствующие им диссипативные свойства и ряд других, которые управляют механизмами аэроупругих реакций.

В то же время отсутствует точное решение уравнения Навье — Стокса, описывающее движение вязкой ньютоновской жидкости. Однако современные достижения компьютерного моделирования уже позволяют (пока ограниченно) анализировать аэроупругое поведение различных тел в потоке жидкости или газа для конкретных тел при вполне определенных условиях обтекания, а также учитывать параметры сопротивления среды с учетом их изменения в зависимости от временных, геометрических и механических характеристик внешнего воздействия, состояния и поведения самого исследуемого объекта.

Одновременно с этим приближенные аналитические решения позволили создать пространство параметров конструкций и потока, устанавливающее причинно-следственные связи, а аэродинамические физические экспериментальные исследования — устанавливать диапазоны изменений параметров упругих тел и потока, влияющих на нестационарные процессы поведения конструкций.

Несмотря на отмеченный выше «кризис жанра» в теории аэрогидромеханики, в прикладных направлениях, особенно относящихся к аэроупругим реакциям гибких конструкций на ветровые воздействия в приземном слое атмосферы, продолжается поиск новых научно достоверных моделей пульсаций турбулентного потока и новых моделей пространственно-временных продольно-поперечных пульсаций.

Не все явления аэроупругого поведения гибких конструкций различного назначения при взаимодействии с ветровым потоком изучены в достаточной мере для того, чтобы иметь достоверные и научно обоснованные критериальные оценки механизмов их возникновения и условий существования. В частности, серьезного изучения ожидают такие явления, как:

- реакции тентовых и надувных конструкций на действие равномерного и турбулентного потока с учетом цикличности суточных, сезонных и годовых перепадов температуры;

- акустические эффекты, сопровождающие обтекание струйными течениями архитектурных форм высотных зданий, пylonов, мостов, антенно-мачтовых сооружений при наличии конструктивных особенностей;

- эффекты «хлыста» в реакциях антенно-мачтовых конструкций в поле градиентного ветрового потока;
- реакции высотных сооружений типа мачт, башен, высоких пилонов мостов на мезоструйные течения в нижнем слое атмосферы;
- реакции гибких протяженных и высотных конструкций на действие одиночных порывов ветра в шквалах.

Особое внимание при проектировании, строительстве и эксплуатации гибких конструкций большой протяженности и высоты необходимо уделять таким проблемам, как:

1) взаимодействие с одиночным порывом ветра, например по модели Фёршинга [55]:

- на вершину пилона висячего или вантового моста, башни и т. п.;
- на конец консоли максимального вылета в процессе навесного способа монтажа балочных, арочных, висячих и вантовых мостов;

2) характер фронтального распределения ветрового давления  $w_0$  вдоль большепролетных мостов ( $L > 700\text{--}800\text{ м}$ ) с учетом реально возможного фронта ветрового потока при фактическом рельефе (орографии) местности.

Эволюция развития современного мостостроения ставит новые вопросы перед прикладной аэрогидродинамикой. Сформулируем задачи ближайшего десятилетия:

1) уточнение динамических параметров пролетных строений мостов с учетом реологических свойств грунтов для аэродинамических и сейсмических расчетов более высокого уровня достоверности;

2) изучение влияния неравномерной осадки опор, особенно для мостов вантовых и арочных расчетных схем, с точки зрения их чувствительности к ветровым воздействиям и воспроизведения в аэродинамических компьютерных и физических экспериментальных исследованиях;

3) развитие расчетных алгоритмов взаимодействия гибких конструкций с турбулентным ветровым потоком на основе альтернативных моделей пространственно-временных корреляций продольно-поперечных пульсаций скорости ветрового потока;

4) анализ температурных деформаций верхнего строения пути неразрезных пролетных строений железнодорожных мостов, особенно на сверхскоростных магистралях при скорости движения выше 300 км/ч, с учетом податливости опор при расчетных скоростях ветра.

Одним из интенсивно развивающихся направлений исследований аэrodинамики инженерных сооружений, особенно в течение последних двух десятилетий, следует назвать взаимодействие конструкций с **грозовым фронтом (thunderstorm)**.

В наиболее полной мере обзор и анализ исследований ветровых нагрузок на гибкие сооружения в разнородных климатах, исключая тропические циклоны и торнадо, даны Дж. Солари (G. Solari) в [82]. В данном обзоре обсуждается новый возможный сценарий более рациональной схемы расчета конструкций с целью достижения их безопасности.

Исследования взаимодействий ветрового потока с конструкциями транспортного назначения, такими как балочные, висячие, вантовые, разводные мосты и трубопроводные переходы, за последние 50 лет позволили получить о них системные представления в части физических моделей и расчетных алгоритмов.

Вместе с тем существует огромный класс инженерных конструкций и сооружений, который требует серьезного анализа поведения в ветровом потоке, в том числе за пределами пограничного слоя Земли. К таким объектам относятся:

1) высотные сооружения башенного типа — высоковольтные линии электропередачи, ветроэнергетические установки, дымовые трубы, вытяжные башни;

2) надшахтные копры, купола, газгольдеры;

3) несущие конструкции систем технологических трубопроводов промышленных предприятий энергетики, нефтяного, металлургического, химического, газового секторов;

4) антенно-мачтовые сооружения, памятные монументы, стеллы оригинальной архитектуры, билборды;

5) радиорелайные системы, параболические и сферические антенны;

6) морские стационарные и погружные платформы для добычи нефти и газа;

7) пучки труб теплообменников тепловых, электрических и атомных станций;

8) стартовые ракетные комплексы: монтажно-испытательные комплексы для сборки и предпусковой подготовки ракетоносителей; диверторы (грозоотводы), а также существующие стационарные морского (Sea Launch) и мобильного базирования; перспективные эстакадного типа для горизонтального разгонного старта;

9) оффшорные системы (райзеры) для глубоководной добычи железо-, кобальтомарганцевых концентратов, полиметаллических сульфидов со дна океанских провинций;

10) гибкие шланги для заправки самолетов в воздухе;

11) панельный флаттер корпуса ракетоносителей большого диаметра на участке разгона в плотных слоях атмосферы.

Допустимо ожидать обнаружение новых явлений, процессов, физических моделей и расчетных алгоритмов в перечисленных направлениях исследований, например панельного флаттера разводных мостов в раскрытом состоянии, подвижных пролетных строений. Эволюция развития новых конструктивных форм сооружений в различных средах может порождать новые вызовы и риски как для сооружений, так и для человека и окружающего мира. К таким вызовам, например, можно отнести:

а) новые сочетания нагрузок и воздействий как в системе «мост — сверхскоростная подвижная нагрузка — ветровой поток», так и на пересечении с большими реками [25];

б) новые комбинированные системы сооружений:

– по назначению — ресторан на пилоне моста;

– по материалу конструкций — сталь — углепластик, сталь — стекло, сталь — алюминий, алюминий — дерево;

в) акустические эффекты, сопровождающие обтекание ветровым потоком сооружений оригинальной архитектурной формы при возникновении струйных течений (аэроакустика) и др.

Особо актуальной и принципиально важной является задача обеспечения устойчивости движения железнодорожного транспорта на высокоскоростных (свыше 350 км/ч) магистралях при пересечении с большими реками в поле ветровых воздействий (см. п. а). Эта качественно новая проблема существенно изменяет физические процессы взаимодействия пролетных строений мостов различных расчетных схем и длин пролетов со сверхскоростным поездом при экстремальных (расчетных) скоростях ветрового потока.

Возникающая триединая система «поезд — мост — ветер» создает неразрывную цепь проблем, из которых самыми важными для мостовых сооружений являются:

1) влияние расчетной скорости ветра на предельно допустимую горизонтальную поперечную жесткость пролетных строений мостов и на предельно допустимый горизонтальный профиль рельсового пути по критерию недопустимости отрыва колеса от рельса, обезгруживания тележек и рессор подвешивания подвижного состава. Эти риски обусловлены невозможностью создавать превышение головки одного рельса над другим, смежным с ним, чтобы обеспечить равновесие центробежных и центростремительных сил, действующих на высокоскоростные поезда при кривизне рельсового пути при расчетных ветрах;

2) влияние предельно допустимого вертикального профиля мостового полотна на мостах больших пролетов в поле воздействий подвижного состава и ветрового потока с точки зрения обеспечения вертикальной устойчивости движения высокоскоростных поездов и комфорта пассажиров;

3) предельно допустимая длина основного пролета моста при учете ползучести рельсового пути на высокоскоростных магистралях, вызванной движением поезда на большой скорости при высокой сезонной дневной температуре окружающей среды;

4) квазиударные воздействия на гибкие элементы пролетных строений решетчатых мостов (ферм) вследствие «поршневого эффекта» перед движущейся носовой секцией и значительного «разрежения» воздуха с пульсационным эффектом за кормовой секцией высокоскоростного подвижного состава («контейнерный эффект»);

5) создание комплексной «кольцевой» системы мониторинга и диспетчеризации движения высокоскоростного железнодорожного состава на искусственных сооружениях для обеспечения продольно-поперечной устойчивости состава и надежности элементов конструкций моста при любой скорости ветрового потока.

Эффективность системы мониторинга и диспетчеризации обуславливает наличие прямых и обратных связей между тремя взаимосвязанными подсистемами «поезд», «мост» и «ветер» в рамках глобального мониторинга и управления поведением и моста, и поезда [25].

Еще одной из новелл современного мостостроения является тенденция устраивания на мостах **шумозащитных экранов** (ШЗЭ). Доминирующее функциональное назначение ШЗЭ связывают с экологической защитой от шума жизненного пространства населения в **непосредственной близости** от мостов.

Увлечение подобными ограждающими конструкциями на мостах содержит в себе масштабные риски, игнорировать которые недопустимо в силу их **дестабилизирующего** влияния как на несущие конструкции авто- и железнодорожных, пешеходных и трубопроводных мостов, так и непосредственно на ШЗЭ.

К неизученным или малоизученным следует отнести следующие проблемы:

- 1) повышение ветрового давления (иногда более чем двухкратное) на пролетные строения;
- 2) разнообразие отрывного обтекания ШЗЭ различных конструктивных форм и трансформация эпюр давления (изобар) возмущенного потока в следе на различных расстояниях в пределах проезжей части мостов;
- 3) снижение критической скорости явлений аэроупругой неустойчивости мостов как в незагруженном состоянии, так и при движении колонн автобусов, автофургонов, железнодорожного пассажирского, грузового и наливного составов;
- 4) образование на проезжей части мостов снежных заносов, которые препятствуют их безопасной эксплуатации;
- 5) обеспечение прочности, надежности и долговечности элементов и узлов, соединений несущих конструкций мостов, равно как и ШЗЭ;
- 6) обеспечение устойчивости железнодорожного движения составов (особенно наливных);
- 7) создание конструкций ШЗЭ с назначенной долговечностью, предусматривающих их ремонтопригодность и возможность замены отдельных панелей.

**Комментарий 1.** Подтверждением реальности описанных рисков (перечень которых не ограничен) может служить, например, следующий случай [87]. На мосту Ё Сун-син (Yi Sun-sin, Южная Корея) в октябре 2014 г. в течение 1,5 ч наблюдались колебания по единой форме с ограниченной амплитудой, идентифицированные как аэроупругие автоколебания вихревого возбуждения. По этому поводу даже было отмечено возмущение населения. Тем не менее при проектировании сооружения и проведении тщательных аэродинамических исследований и расчетов не были обнаружены явления неустойчивости вихревого возбуждения и флаттера. Анализ причины возникновения аэроупругой неустойчивости вихревого возбуждения установил влияние временно оборудованных экранов, подобных ШЗЭ, на перилах моста для сохранения температурного режима укладки эпоксидного покрытия при ремонте проезжей части моста именно на участке наблюдавшихся автоколебаний.

**Комментарий 2.** Применение ШЗЭ нельзя рассматривать в отрыве от снежных заносов (метлевых переносов снега) в любой точке планеты, где за зиму выпадает значительное количество снега. Наличие снежного покрова на

автомобильных и железнодорожных путях может не только препятствовать безопасному движению транспортных средств, но и вызвать катастрофическую ситуацию. Обычно отсутствие ШЗЭ благодаря дефляции, возникающей под действием воздушного потока над проезжей частью при движении любых транспортных средств, способствует ее очистке от снега, по крайней мере при слабых и умеренных снегопадах, и препятствует аккумуляции снега. При сильных снегопадах, когда вдоль проезжей части моста образуются значительные снежные заносы, ШЗЭ требуют создания новой техники и новых технологий для обеспечения безопасной эксплуатации транспортных средств и безопасности пассажиров, в том числе их эвакуации в экстренных ситуациях. Это обстоятельство Заказчик должен осознавать в полной мере. Есть объективные основания полагать, что устройство ШЗЭ на мостах потребует значительного (в несколько раз) увеличения бюджета на зимнее содержание мостов, особенно с учетом требований обеспечения защиты окружающей среды. Перечисленные проблемы существенны в случае обледенения несущих и ограждающих конструкций, в том числе ШЗЭ, на мостах больших пролетов, когда удаление снега и наледи с помощью абразивов (песка) с добавками современных химических реагентов крайне нежелательно.

Обзор перспективных исследований на ближайшие несколько десятилетий авторы завершают фундаментальной нерешенной проблемой системного характера.

Вызванный известными физическими процессами в приземном слое атмосферы турбулентный ветровой поток порождает ветровые (поверхностные) волны на поверхности крупномасштабных замкнутых и открытых водоемов — озер, рек, морей и океанов. Длина и высота этих волн зависят от энергии ветрового потока над поверхностью водоемов и свободной длины нагона. Этими двумя видами кинематических воздействий, обладающих огромным уровнем кинетической энергии, не ограничивается взаимодействие с гибкими сооружениями типа морских платформ, гидротехнических и мостовых сооружений, имеющих глубоководные свайные основания.

В этих случаях на динамические пространственные реакции сооружений оказывают влияние и три важнейших фактора:

- 1) донные и срединные течения в зоне сооружений и их физические свойства — скорость и направление таких течений относительно главных осей инерции глубоководных свайных оснований, а также их температурные режимы;
- 2) реологические свойства подстилающих грунтов, влияющие на возможность их «разжижения» и размывов;
- 3) сейсмическая активность в зоне подобных сооружений.

Перечисленные физические воздействия создают в совокупности «большую и сложную систему», реакции которой следует относить к трудно разрешаемой проблеме классического хаоса как непредсказуемого процесса.

Важным аспектом является рассмотрение описанных выше вопросов с точки зрения всего жизненного цикла рассматриваемого здания, сооружения, объекта транспортной инфраструктуры и тому подобного с одновременной

увязкой с действующими нормативно-техническими документами. Этапы проектирования, строительства, эксплуатации в различных режимах, выполнения ремонтных работ, реконструкции и демонтажа требуют различного подхода как с точки зрения расчетных моделей, так и с точки зрения действующей нормативно-правовой документации.

Структура такой системы предполагает для ее описания, изучения и создания достоверной концепции безопасного функционирования привлечение достижений многих современных научных направлений, в том числе компьютерных технологий более высокого уровня, например «универсальных компьютеров Тьюринга» [14].

**Природу ни обмануть, ни победить нельзя!**

**Природу можно и нужно постигать!**

# 1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИКИ

## 1.1. Основные понятия

**Гидrogазодинамика** — наука, изучающая законы равновесия и движения жидкостей и газов и способы приложения этих законов к решению практических инженерных задач.

Одним из важных понятий гидрогазодинамики является **жидкость** — среда, действуя на которую малые силы могут вызывать конечные деформации [15].

Понятие «жидкость» включает в себя как несжимаемые капельные жидкости, так и сжимаемые газы.

Считается, что жидкость практически не изменяет свой объем под действием внешних сил, т. е. является несжимаемой. К несжимаемым жидкостям относятся все капельные жидкости: вода, нефть, мазут. В отличие от капельных жидкостей, газы (воздух, пропан, бутан и т. д.) легко изменяют объем под действием внешних сил, сжимаются, поэтому их называют сжимаемыми. Так, сжимаемость воздуха в 20 000 раз больше сжимаемости воды. Любая капельная жидкость может переходить в газообразное состояние при определенной температуре и давлении. Соответственно, газы при понижении температуры и повышении давления могут переходить в жидкое агрегатное состояние.

Сжимаемость газов проявляется при движении с большими скоростями. По мере увеличения скорости движения влияние сжимаемости газа постепенно нарастает. Обычно считают, что пренебрежение сжимаемостью газа начинает давать заметную ошибку, когда скорость движения газа превышает 1/3 скорости звука.

**Одной из основных задач** гидрогазодинамики является изучение полей скоростей и давлений, а также напряжений, возникающих при обтекании жидкостями тел или движении жидкости в каналах [15].

Рассматривать и математически описывать жидкость как совокупность огромного количества отдельных частиц, находящихся в постоянном непрограммированном движении, на современном уровне науки не представляется возможным. Поэтому в гидрогазодинамике используются **гипотезы сплошности** среды (впервые введена в науку Даламбером в 1744 г., а затем Эйлером в 1753 г.). Согласно этой гипотезе все жидкости и газы рассматриваются как **сплошные** среды — континуум, лишенный молекул и межмолекулярных пространств.

Критерием сплошности служит число **Кнудсена**, равное отношению длины свободного пробега молекул  $l$  к характерному размеру тела  $L$  [15]:

$$Kn = \frac{l}{L}. \quad (1.1)$$

Для сплошной среды  $Kn \ll 1$ .

В рамках гипотезы сплошности **состояние** движущейся среды в каждой точке потока можно охарактеризовать **макропараметрами** [15]:

- 1) вектором скорости  $\mathbf{u}(x, y, z, t)$ ;
- 2) давлением  $p(x, y, z, t)$ ;
- 3) температурой  $T(x, y, z, t)$ ;
- 4) плотностью  $\rho(x, y, z, t)$ ;
- 5) коэффициентом динамической вязкости  $\mu(x, y, z, t)$  или кинематической **вязкости**  $\nu(x, y, z, t)$ .

Коэффициенты динамической и кинематической вязкости имеют разные единицы измерения (Па·с и м<sup>2</sup>/с соответственно) и связаны между собой отношением

$$\mu = \rho\nu. \quad (1.2)$$

Вязкость является одним из важнейших свойств жидкостей, во многом именно вязкость определяет особенности течения. Вязкость характеризует способность жидкостей сопротивляться течению.

Для описания вязкого трения существует **закон вязкого трения Ньютона**: касательные напряжения, возникающие при движении между слоями, пропорциональны градиенту скорости по нормали к площадке скольжения одного слоя относительно другого:

$$\tau = \mu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial n}, \quad (1.3)$$

где  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости.

А сила вязкого трения

$$\mathbf{F} = \tau S, \quad (1.4)$$

где  $S$  — площадь соприкосновения слоев.

Вязкое трение (внутреннее трение) принципиально отличается от сухого трения. Во-первых, без движения жидкости нельзя обнаружить проявление вязкости или внутреннего трения, в то время как трение между твердыми телами может иметь место и при покое. Во-вторых, сила внутреннего трения жидкости находится в количественной зависимости от относительной скорости движения частиц, тогда как предельная скорость сухого трения находится в количественной зависимости прежде всего от давления между телами. В-третьих, полная сила внутреннего трения пропорциональна площади соприкосновения слоев, а предельная сила сухого трения не зависит от величины площади соприкосновения тел.

Жидкость, в которой отсутствует вязкость, называется **идеальной**. Для иллюстрации эффекта вязкости рассмотрим обтекание плоской твердой поверхности идеальной и вязкой жидкостью.

Как видно из рисунка 1.1, касательные напряжения в идеальной жидкости равны нулю, и идеальная жидкость не оказывает изменению формы никакого внутреннего сопротивления.



Рис. 1.1

Идеальная (*а*) и вязкая (*б*) жидкости

Гидрогазодинамика изучает движение **ニュтоновских жидкостей** — жидкостей, подчиняющихся в своём течении закону вязкого трения Ньютона (касательное напряжение и градиент скорости в такой жидкости линейно зависимы).

## 1.2. Силы массовые и поверхностные

В механике широко используется понятие сосредоточенной силы, т. е. силы, приложенной к одной точке. В случае с жидкостью этот прием вовсе не применим, поскольку вступает в противоречие с самой природой жидкости: вследствие текучести жидкости в ней принципиально не могут существовать сосредоточенные силы.

Силы, действующие на элементарный объем в жидкости, можно разделить на **массовые** и **поверхностные**.

**Массовые силы** пропорциональны массе жидкости, это силы, действие которых обусловлено внешним силовым полем (поле силы тяжести, магнитное и т. д.). Поле массовых сил является внешним по отношению к потоку, действие этих сил на данный объем не зависит от того, окружён ли этот объем другими жидкими объемами. Массовые силы **действуют одинаково на каждую материальную точку** жидкой частицы, поэтому не могут вызвать деформацию, а только ускорение (замедление) частицы [15].

Количественно характеризуется **вектором напряжения массовой силы** [15]:

$$\mathbf{f} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\mathbf{F}}{\Delta M}, [\text{м/с}^2], \quad (1.5)$$

$\mathbf{F}$  — главный вектор сил, действующих на массу  $\Delta M$  жидкости, заполняющей объем  $\Delta V$ .

В гидрогазодинамике чаще всего массовой силой является сила тяжести, в этом случае вектором напряжения массовой силы будет являться ускорение свободного падения  $\mathbf{g}$ . Силу, действующую на конечный объем  $V$ , можно вычислить интегрированием [15]:

$$\mathbf{F} = \iiint_V \mathbf{f} \rho dV. \quad (1.6)$$

**Поверхностные силы (давление и вязкость)** действуют лишь на поверхность выделенного объема и обусловлены действием соседних частиц жидкости, соприкасающихся с рассматриваемым объемом. Поверхностные силы описывают взаимодействие между различными областями жидкости.

Количественно характеризуются **вектором напряжения поверхности силы**

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{F_n}{\Delta S}, [\text{Н/м}^2], \quad (1.7)$$

$F_n$  — главный вектор поверхностных сил, приложенных к площадке  $\Delta S$ .

Главный вектор поверхностных сил, действующих на поверхность  $\sigma$ , можно найти как поверхностный интеграл:

$$F_\sigma = \iint_\sigma \tau d\sigma. \quad (1.8)$$

### 1.3. Ламинарное и турбулентное течение

Хаос: когда настоящее определяет будущее, но приблизительное настоящее не определяет будущее приблизительно.

Э. Лоренц

В своем обычательском значении хаос означает отсутствие порядка или состояние беспорядка. Бытовое понятие хаоса<sup>1</sup> очень древнее, ассоциируется с беспорядочным и неуправляемым поведением людей. Хаос пугает. Чувство страха вызывают такие ситуации и события, когда законы и традиции перестают что-либо регулировать. Правда, всегда остается надежда узнать потенциальные силы и причины этого хаоса и объяснить, почему события оказываются непредсказуемыми.

О существовании хаотических и непредсказуемых движений, описываемых уравнениями классической физики, было известно еще выдающемуся французскому физику и математику, первому исследователю хаоса Анри Пуанкаре: «...иногда небольшая разница в первоначальном состоянии вызывает большое различие в окончательном явлении. Небольшая погрешность в первом вызвала бы огромную ошибку в последнем. Предсказание становится невозможным...» [34].

Приведенная выше цитата Пуанкаре отражает одну из фундаментальных характеристик хаоса — **чрезвычайную чувствительность к начальным условиям**. Одним из центральных понятий в математическом моделировании является **устойчивость** — в корректно поставленной задаче сколь угодно малые изменения начальных условий должны вызывать малые изменения решения. Хаотическое состояние же характеризуется **неустойчивостью**: сколь угодно малое изменение начальных условий может привести к кардинально отличному результату.

---

<sup>1</sup> Слово «хаос» происходит от греческого глагола, означающего «зиять», который часто использовался при описании первобытной пустоты Вселенной до возникновения вещества.

Данное свойство хаотических режимов — чувствительность к начальным условиям — широко известно под термином «**эффект бабочки**». Термин впервые введен Эдвардом Лоренцем в статье 1972 г. «Предсказуемость: вызывает ли взмах крыльев бабочки в Бразилии Торнадо в Техасе?» Крыло бабочки однозначно вносит небольшое отклонение от начальных условий системы, что, в свою очередь, вызывает принципиально непредсказуемую цепочку событий, приводящую к неизвестному результату. Не взмахи бабочки крылом — конечное состояние системы могло бы быть радикально иным. Другое свойство хаотических систем — **потеря информации о начальных условиях**.

Хаос упоминается в данном параграфе неслучайно: в контексте физики образцом хаотического явления остается **турбулентность**. Вихри за судном или крылом самолета дают наглядные примеры хаотического движения [34]. А ламинарное и турбулентное течения есть один примеров двух комплементарных понятий Вселенной — порядка и хаоса. Из чего следует, что свойства хаотических систем присущи и турбулентному течению.

Турбулентность по сей день остается одной из немногих нерешенных проблем классической физики. Может возникнуть логичный вопрос: «Если в хаотических системах невозможны предсказания, то разве в них может присутствовать порядок? Разве существует тогда принципиальная возможность создания физической теории турбулентности?» Ответ на этот вопрос утвердительный: **в хаосе есть внутренний порядок**, который обещает сделать возможным предсказание определенных свойств хаотических систем. Но этот оптимизм уже умерен сложностями хаотической динамики в термогидродинамических процессах, и на сегодняшней день физической **теории турбулентности не существует**.

Строгие определения гласят: **ламинарное** течение — это **упорядоченное** течение без перемешивания, при котором слои жидкости скользят относительно друг друга (то есть без беспорядочных быстрых изменений скорости и давления). Ламинарное течение характеризуется отсутствием обмена между слоями жидкости (доля частиц, двигающихся в поперечном направлении, составляет не более 1–3% от общего числа частиц).

**Турбулентное** течение — это **неупорядоченное** течение, при котором происходит интенсивный обмен частицами между слоями жидкости.

Английский физик Осборн **Рейнольдс** экспериментально установил (1876–1883) **критерий перехода** ламинарного режима течения в турбулентный: течение переходит в турбулентный режим, когда введенная Рейнольдсом безразмерная величина превышает некоторое критическое значение. Данная безразмерная величина называется **числом Рейнольдса** и занимает важнейшее место в гидрогазодинамике:

$$Re = \frac{VL}{\nu}, \quad (1.9)$$

где  $V$  — скорость течения;  $L$  — характерный размер задачи;  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости.

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)