



П. П. Пивнев
С. П. Тарасов
А. П. Волощенко

МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД. ЖИДКОСТИ И ГАЗЫ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-технологическая академия

П. П. ПИВНЕВ
С. П. ТАРАСОВ
А. П. ВОЛОЩЕНКО

**МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД
ЖИДКОСТИ И ГАЗЫ**

Учебное пособие

Ростов-на-Дону – Таганрог
Издательство Южного федерального университета
2019

УДК 532(075.8)

ББК 22.253я73

ПЗ2

Печатается по решению кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (протокол № 21 от 7 февраля 2018 г.)

Рецензенты:

главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино,
доктор технических наук *В. И. Каевищер*

кандидат технических наук, генеральный директор
ООО «УльтранК» *И. Г. Деренский*

Пивнев, П. П.

ПЗ2 Механика сплошных сред. Жидкости и газы : учебное пособие / П. П. Пивнев, С. П. Тарасов, А. П. Волощенко ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2019. – 137 с.

ISBN 978-5-9275-3096-0

Учебное пособие «Механика сплошных сред. Жидкости и газы» посвящено актуальным вопросам механики сплошных сред.

Излагаются основные положения механики сплошных сред, основанные на применении уравнений гидродинамики для описания процессов движения твердых, жидких и газообразных материальных тел, а также управление движением деформируемых тел.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 12.03.01 – «Приборостроение», 17.03.01 – «Корабельное вооружение» и специальности 26.05.04 – «Применение и эксплуатация технических систем надводных кораблей и подводных лодок».

УДК 532(075.8)

ББК 22.253я73

ISBN 978-5-9275-3096-0

© Южный федеральный университет, 2019

© Пивнев П. П., Тарасов С. П., Волощенко А. П., 2019

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ПРЕДМЕТ, МЕТОДЫ И ГИПОТЕЗЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ	7
1.1. Задачи дисциплины «Механика сплошных сред».....	7
1.2. Методы изучения механики сплошных сред.....	11
1.3. Основные подходы к исследованиям в механике сплошных сред.....	12
Контрольные вопросы.....	14
2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ	15
2.1. Теория сплошности.....	15
2.2. Пространство.....	16
2.3. Время.....	17
2.4. Описание физических величин: Эйлеровы и Лагранжевы формы.....	18
2.5. Система отчета.....	23
2.6. Метод Эйлера.....	25
Контрольные вопросы.....	30
3. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ	31
3.1. Уравнение непрерывности (неразрывности).....	31
3.2. Примеры и задачи для решения.....	35
Контрольные вопросы.....	38
4. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЭЙЛЕРА	39
4.1. Решение уравнения Эйлера.....	39
4.2. Примеры и задачи для решения.....	43
Контрольные вопросы.....	48
5. ГИДРОСТАТИКА И ОТСУТСТВИЕ КОНВЕКЦИИ	49
5.1. Гидростатика.....	49
5.2. Условие отсутствия конвекции.....	52
Контрольные вопросы.....	54

6. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ. ПОТОК ИМПУЛЬСА	55
6.1. Вывод уравнения Бернулли.....	55
6.2. Поток энергии.....	58
6.3. Поток импульса.....	60
6.4. Примеры и задачи для решения.....	63
Контрольные вопросы.....	70
7. СОХРАНЕНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ СКОРОСТИ.	
ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ	71
7.1. Циркуляция и уравнения движения.....	71
7.2. Задача об обтекании тела.....	75
7.3. Понятие потенциальной функции.....	81
Контрольные вопросы.....	84
8 НЕСЖИМАЕМАЯ ЖИДКОСТЬ	85
8.1. Определение несжимаемой жидкости.....	85
8.2. Применение уравнений гидродинамики к несжимаемой жидкости.....	86
Контрольные вопросы.....	90
9 ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ	91
9.1. Общие понятия и свойства гравитационных волн.....	91
9.2. Вывод уравнения движения для гравитационных волн.....	92
9.3. Примеры и задачи для решения.....	97
Контрольные вопросы.....	101
10. ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ	102
10.1. Общие понятия и свойства внутренних волн.....	102
10.2. Вывод уравнения движения для внутренних волн.....	102
Контрольные вопросы.....	106
11. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	107
11.1. Общие понятия потока жидкости.....	107
11.2. Вывод уравнения движения вязкой жидкости.....	109
Контрольные вопросы.....	121

12. КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ	122
12.1. Определение кинетической энергии несжимаемой жидкости.....	122
12.2. Течение вязкой несжимаемой жидкости.....	124
12.3. Закон подобия в гидродинамике.....	129
Контрольные вопросы.....	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	135

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Механика сплошных сред», как известно [1–4, 6, 7, 12, 16–20], представляет собой раздел теоретической физики, посвященной движению газообразных, жидких и твердых деформируемых тел. В дополнение к методам теоретической механики, в которой основным объектом исследования являются дискретная материальная точка, а также системы таких точек и абсолютно твердые тела, механика сплошной среды изучает движение таких материальных тел, заполняющих пространство непрерывно, сплошным образом, при этом в процессе движения расстояния между точками среды меняются.

Как научная дисциплина «Механика сплошных сред» рассматривает не только твердые, жидкие и газообразные материальные тела, также предметом исследования этой дисциплины являются поля различной физической природы, такие как электромагнитное поле, поле давления, температурные поля, гравитационное поле и т.д.

Изучение и описание движения твердых, жидких и газообразных материальных тел, а также управление движением деформируемых тел требует не только эмпирических знаний, полученных на основе простых опытов, но и применения специальных теоретических методов описания, а также проведения экспериментальных исследований. Совокупность теоретических и экспериментальных исследований послужила основой создания в области физики такого научного направления, как «Механика сплошных сред».

1. ПРЕДМЕТ, МЕТОДЫ И ГИПОТЕЗЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

1.1. Задачи дисциплины «Механика сплошных сред»

Ряд задач о движении твердых, жидких и газообразных материальных тел, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни имеют достаточно тривиальные, легко определяемые решения [1–4, 6, 7, 12, 16–20].

Например, задача о том, как перелить жидкость из одного резервуара в другой, или как сохранить температуру газообразной среды внутри замкнутого объема. Можно привести еще целый ряд подобных примеров.

В процессе исследований движения твердых, жидких и газообразных материальных тел возникают и более сложные вопросы, связанные с теми же, тривиальными на первый взгляд задачами, рассмотренными выше. Эти вопросы затрагивают количественные характеристики параметров движения твердых, жидких и газообразных материальных тел, и ответы на них можно получить только на основе специальных знаний.

Например, из задачи о переливании жидкости из одного резервуара в другой вытекает задача определения скорости течения жидкости в трубе, соединяющей два резервуара. С задачей о сохранении температуры газообразной среды внутри замкнутого объема непосредственно связана задача об определении скорости вытекания газа в случае, если в замкнутом объеме появится отверстие. При этом дальнейшее развитие процесса движения газообразной среды, определенно потребует ответа на вопрос об изменении поля давления газа внутри этого объема.

Даже в наше время нерешенными остается большое число задач, связанных с областью изучения движения твердых, жидких и газообразных материальных тел, на которые известны теоретиче-

ские методы исследований не в состоянии дать достоверную информацию, необходимую для анализа и описания исследуемых процессов.

Только перечисление наиболее актуальных задач в области научной дисциплины механика сплошной среды занимает очень большой объем. Наиболее важными задачами, развитие которых связано с актуальными техническими проблемами современного этапа развития физики и техники являются следующие:

1. Исследование воздействия и влияния жидких и газообразных сред, а также других деформируемых сред, на движение в подобных средах материальных тел.

Актуальность такого класса научных и технических задач вызвана решением проблем, связанных с движением в воздушной среде летательных аппаратов, движением кораблей и подводных аппаратов в водной среде, влиянием больших скоростей в плотных слоях атмосферы на температуру поверхности летательных аппаратов.

Помимо перечисленного с этой проблемой связаны решения задач по разработке движителей динамических объектов в жидких и газообразных средах.

2. Исследование особенностей движения жидкостей и газов в ограниченных объемах. В основу решения этой проблемы положены законы взаимодействия ламинарного и турбулентного потоков с твердыми границами, ограничивающими объем. Одной из характеристик, оказывающих влияние на исследуемый процесс, является величина сопротивления твердых стенок.

Практическое значение решения этой проблемы связано с повышением эффективности и коэффициента полезного действия различных классов технических объектов, таких как гидравлические машины, насосы, турбины, трубопроводы для транспортиро-

вания не только нефти и газа, но и других технологических жидких и газообразных сред.

3. Исследование движения жидких и газообразных сред, а также многофазных сред через пористые среды, образованные твердыми материалами.

На практике решение этой проблемы позволяет решить задачу не только создания эффективных методов добычи сланцевой нефти и газа, но и разработку новых методов гемодиализа.

4. Исследование волновых движений, возникающих не только при распространении в твердых телах, а также в жидких и газообразных средах, но волн, возникающих на поверхности жидких сред.

Решение проблемы, связанной с движением поверхностных волн в жидкости позволяет описать целый ряд физических процессов, таких как формирование волн, вызванных движением корабля, возникновение приливов и цунами, а также распространение волн в каналах и реках.

Проблема волновых движений в твердых телах, жидких и газообразных средах связана также с исследованием особенностей формирования и распространения звуковых колебаний. Одним из прикладных направлений решения этой задачи является определение источников шума в различных средах.

5. Исследование неустановившегося движения сред с химическими и физическими превращениями.

Практическое значение решения этой проблемы актуально при описании различных по своей природе взрывов в различных средах, процессов горения и детонации. Прикладными направлениями решения этого класса задач являются химические технологии.

6. Исследования движения в ионизированных средах, а также управление процессом плазменных течений, основанных на их вза-

имодействии с магнитным полем, позволяют решить проблемы безопасности термоядерного синтеза энергии и создания принципиально новых движителей для летательных и космических аппаратов.

7. Исследование движения сжатых под очень большим давлением жидкостей и газов, и учет при этом влияния высоких температур на физические свойства жидких и газообразных средах позволили создать новые технологические процессы, такие как изготовление искусственных алмазов и штамповка различных конструкционных материалов с применением направленных и ненаправленных взрывов.

8. Исследования движения воздушных масс в атмосфере Земли являются важной частью метеорологических исследований и позволяют повысить точность прогнозов циркуляции атмосферных вихрей и циклонов.

Можно перечислить еще много проблем, успешное решение которых тесно связано с таким разделом физики, как механика сплошной среды.

Задачи по определению коэффициента сопротивления кузова автомобиля набегающему воздушному потоку и сопротивлений воздухопроводов в системах вентиляции зданий и раздаточных устройств в системах водоснабжения, процессы литья металлов и пластмасс в форму, моделирование процессов горения при сжигании топлива в котлах энергоснабжения и горения топлива в камере сгорания автомобильного двигателя, процессов в химических и биологических реакторах, моделирование распространения загрязнений в атмосфере и водных бассейнах и многое другое, также имеют прямое отношение к дисциплине механика сплошной среды.

1.2. Методы изучения механики сплошных сред

Изучение дисциплины механика сплошных сред базируется на математических методах исследования и моделирования движения тел с учетом их реальных свойств. Такие методы основаны на ряде постулатов, понятий, определений и гипотез [1–4, 6, 7, 12, 16–20].

1. В дисциплине «Механика сплошных сред» вводится ряд понятий, которые однозначно определяют параметры как самих сред, так и характеристик, применяемых для исследования и моделирования движения твердых, жидких и газообразных материальных тел. Примером таких понятий являются поля различной физической природы (поле температуры, давления, скорости и т.п.), понятие сплошной среды, понятия пространства и мерности пространства и целый ряд других.

2. Математический аппарат дисциплины «Механика сплошных сред» предполагает подход к изучению движения деформируемых сред, который заключается в переходе от реальных деформируемых сред к их идеализированному представлению и использует символическое описание при решении задач различного уровня сложности с целью определения числовых значений функций при помощи математических операций.

3. Определяющей целью дисциплины «Механика сплошных сред» является определение основных свойств и установление закономерностей движения деформируемых твердых, жидких и газообразных материальных тел. Основные законы дисциплины базируются на установлении связи между давлением и скоростью движения, между нагрузками и возникающими при этом деформациями.

4. Само решение конкретных задач дисциплины путем математических операций также обычно относится к механике сплошной среды. Это, в основном, связано с тем, что решения задачи механи-

ки сплошной среды традиционными математическими методами, как правило, являются трудными и неразрешимыми эффективно. Поэтому на практике широко применяются упрощающие предположения, которые, с учетом видоизменения в постановке задач, позволяют получать приближенные решения, основанные на различных математических гипотезах.

5. Под влиянием дисциплины «Механика сплошных сред» ряд отраслей математики получил большое развитие. Например, «Механика сплошных сред» оказала большое влияние на развитие теории функции комплексного переменного, краевых задач для уравнений с частными производными, интегральных уравнений.

1.3. Основные подходы к исследованиям в механике сплошных сред

Известно, что сплошная среда представляет собой физическую субстанцию, которая состоит из большого числа малых частиц. Совокупность частиц непрерывно, сплошным образом заполняет область пространства, относящуюся к твердому, жидкому или газообразному материальному телу, независимо от его агрегатного состояния. При этом сами физические тела могут быть не только твердыми, жидкими или газообразными материальными телами, но и ионизированными субстанциями, которые состоят из элементарных частиц, таких как электроны, ионы и нейтральные частицы [1–4, 6, 7, 12, 16–20].

Данные об элементарных частицах известны из курса общей физики. А количественные параметры элементарных частиц и их характеристики широко представлены в справочниках.

Сравнение размеров, массы, объемов элементарных частиц и твердого, жидкого или газообразного тела, независимо от его агрегатного состояния, показывает объем, занимаемый материальным