

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ
С ЖИДКОСТЯМИ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2025

УДК 532.5:531.6(075.8)

ББК 22.236я73

М34

Авторы

А.Г. Исламова, А.Е. Пискунова, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак

Математическая обработка и обобщение результатов экспериментальных исследований быстропротекающих процессов с жидкостями : учебное пособие / А.Г. Исламова, А.Е. Пискунова, М.В. Пискунов и др. ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2025. – 116 с.

ISBN 978-5-4387-1229-9

В пособии приведены рекомендации по проведению математической обработки результатов экспериментов и их обобщению с целью получения базы данных, позволяющей прогнозировать параметры характеристик взаимосвязанных физико-химических процессов с фазовыми превращениями и химическим реагированием в многофазных системах. Рассмотрены современные методы изучения свойств различных жидкостей и твердых материалов.

Предназначено для использования в учебном процессе магистрантов и аспирантов, обучающихся по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», а также по научным специальностям 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы», 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и 1.3.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

УДК 532.5:531.6(075.8)

ББК 22.236я73

Рецензенты

Доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник лаборатории физических основ
энергетических технологий

Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

М.В. Дулин

Доктор технических наук
заместитель директора по научной работе
Томского научного центра СО РАН

А.С. Мазной

ISBN 978-5-4387-1229-9

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2025

© Исламова А.Г., Пискунова А.Е.,

Пискунов М.В., Стрижак П.А., 2025

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	6
1.1. Теневая оптическая методика.....	6
1.2. Высокоскоростная видеорегистрация данных.....	7
1.3. Метод PIV	9
1.4. Метод LIP	11
1.5. Метод PLIF	14
1.6. Съёмка процесса взаимодействия капли с плоской стенкой под разными углами.....	17
1.7. Нагрев поверхности взаимодействия и исследуемой жидкости	18
1.8. Воздушная микрофлюидика	21
1.9. Метод приготовления биотоплива с помощью наномембранного реактора.....	25
1.10. Метод исследования распыления, горения и анализа вредных выбросов.....	28
1.10.1. Характеристики распыления.....	31
1.10.2. Характеристики горения	32
1.10.3. Газоанализ.....	34
2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ВЕЩЕСТВ.....	36
2.1. Реология жидкостей.....	36
2.1.1. Определение плотности.....	36
2.1.2. Вязкость жидкости.....	38
2.2. Поверхностные характеристики жидкости	46
2.2.1. Коэффициент поверхностного натяжения.....	46
2.2.2. Коэффициент межфазного натяжения	50
2.3. Характеристики биодизельного топлива.....	55
2.3.1. Цетановое число	55
2.3.2. Температура вспышки в закрытом тигле.....	56
2.3.3. Удельная теплота сгорания	58
2.3.4. Коррозия на медной пластине	59
2.3.5. Масс-спектрометрия	60

2.4.	Характеристики эмульсий/микроэмульсий.....	61
2.4.1.	Термодинамическая стабильность	61
2.4.2.	Размер капель дисперсной фазы эмульсий.....	62
2.5.	Характеристики суспензий	64
2.5.1.	Приготовление суспензий	64
2.5.2.	Размер твердых частиц	65
2.5.3.	Статическая стабильность.....	66
2.5.4.	Средняя скорость осаждения твердых частиц	68
2.5.5.	Текучесть	69
2.6.	Характеристики поверхности	69
2.6.1.	Свойства смачиваемости	69
2.6.2.	Шероховатость поверхности и размер пор.....	75
2.6.3.	Средний диаметр волокон.....	77
2.6.4.	Пористость материала	77
2.6.5.	Свободная поверхностная энергия твердого тела	78
3.	МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ.....	83
3.1.	Методы цифровой обработки	83
3.1.1.	Цифровая обработка изображений в ПО Mathematica	83
3.1.2.	Метод фильтрации Калмана	83
3.2.	Методы математической обработки	85
3.2.1.	Определение влияющих факторов	85
3.2.2.	Размерные и безразмерные величины, критерии подобия	85
3.2.3.	Анализ размерностей и Пи-теорема.....	87
3.2.4.	Физическое моделирование на основе уравнений сохранения энергии. Подходы к сравнению экспериментальных и прогнозируемых результатов и определению надежности прогнозирования	90
3.2.5.	Физическое моделирование растекания капель жидкости по твердым поверхностям	99
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
	ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	105
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	107

ВВЕДЕНИЕ

Процессы взаимодействия капель жидкостей с различными поверхностями реализуются в ряде технических приложений, например в противообледенительных технологиях, при создании самоочищающихся поверхностей, распылении пестицидов, закалке металлов, в энергетических турбинах, двигателях внутреннего сгорания, топочных камерах, контактных теплообменниках и др. [1–3]. В частности, от условий и характеристик взаимодействия капель воды с поверхностями труб и теплообменников существенно зависят интегральные характеристики теплообмена. Состав и реологические свойства жидкости влияют на процессы распыления и последующего сжигания капель топлива в двигателях внутреннего сгорания и в топочных камерах. Свойства смачиваемости и шероховатость поверхности оказывают влияние на процессы испарения/конденсации в теплообменных устройствах и обледенения линий электропередач, тросов, самолетов [4].

В связи с этим актуальность приобретают экспериментальные и теоретические исследования физических и химических свойств жидкостей и поверхностей [5, 6]. Понимание реологии жидкостей, а также приповерхностных свойств твердых тел позволит расширить коллоидную теорию, что в свою очередь приведет к интенсификации технологических процессов, таких как теплообмен и горение.

В настоящем пособии приведены методы проведения и обработки экспериментальных результатов взаимодействия капель различных жидкостей с твердыми и пористыми поверхностями. Рассмотрены методы высокоскоростной регистрации быстропотекающих процессов (столкновение капель с твердыми поверхностями, испарение), методы регистрации полей скоростей, температур и концентраций в капле жидкости. Также приведены типичные методики исследования свойств жидкостей и твердых поверхностей. Представлены способы определения плотности, вязкости и поверхностного натяжения жидкостей, а также межфазного натяжения. Описан поэтапный план действий по проведению экспериментальных исследований. Представлены методы цифровой и математической обработки экспериментальных результатов быстропотекающих процессов, связанных с жидкостью и поверхностью.

1. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Теневая оптическая методика

Метод теневой видеосъемки (*SP – Shadow Photography*) – оптический метод, позволяющий определять размеры и форму объектов исследования на монохромных изображениях.

Область применения:

- определение параметров пузырьковых, аэрозольных потоков и потоков с твердыми частицами;
- изучение процессов взаимодействия фаз в многофазных потоках.

Экспериментальный стенд

При применении метода SP используется следующее оборудование (рис. 1.1): высокоскоростная CMOS-видеокамера 1 Phantom Miro M310 (скорость съемки до $6 \cdot 10^5$ кадров/с, разрешение 1280×800 пикселей); подложка 2; система генерации капель 3, состоящая из набора микронасосов, шприцев и полых игл; система освещения 4 с диффузором 5; персональный компьютер (ПК) 6 с программным обеспечением (ПО) Phantom Camera Control application (PCC) [1–3].

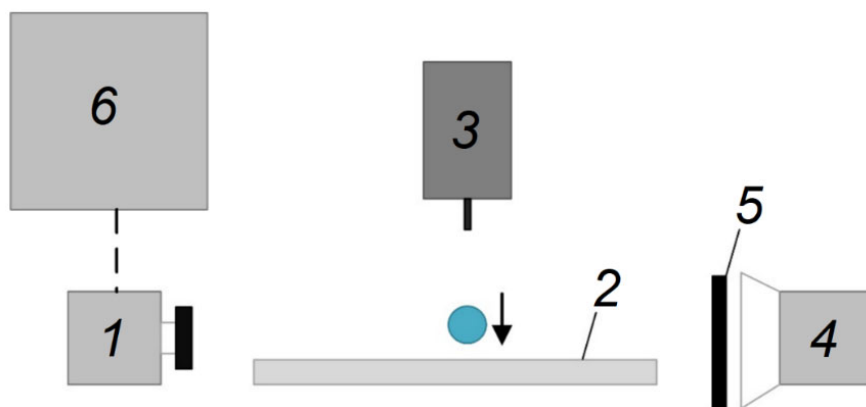


Рис. 1.1. Схема экспериментального стенда:

1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – подложка; 3 – система генерации капель;
4 – система освещения; 5 – диффузор; 6 – ПК

Техническое использование метода

Суть метода заключается в том, что источник света располагается напротив видеокамеры за исследуемым объектом, что позволяет получить четкие теневые изображения контура объекта. Для рассеивания света используется диффузор. Для обработки и анализа данных используется персональный компьютер с предустановленным программным обеспечением РСС, которое позволяет непрерывно контролировать принимаемую каплей форму, размеры, скорость движения, ускорение [1–3].

Пример использования метода

На рис. 1.2 приведено изображение капли, полученное с помощью метода теневой видеосъемки.

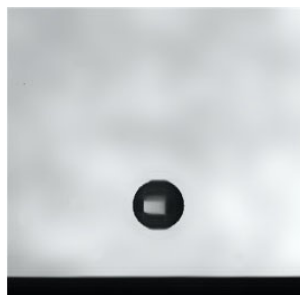


Рис. 1.2. Изображение, полученное с помощью метода SP

1.2. Высокоскоростная видеорегистрация данных

Метод высокоскоростной видеорегистрации данных предназначен для определения характеристик статических (форма, размеры) и динамических (скорость, ускорение) объектов (например, частиц дисперсной фазы в многофазных потоках, капель и т. д.) в быстропротекающих процессах.

Область применения:

- системы впрыска и подачи топлива;
- водоструйные установки;
- автомобильная, авиационная и космическая промышленность;
- биомеханика;
- и многие другие.

Экспериментальный стенд

При применении метода высокоскоростной видеорегистрации данных используется следующее оборудование (рис. 1.1): высокоскоростная CMOS-видеокамера 1 Phantom Miro M310 (скорость съемки до $6 \cdot 10^5$ кадров/с, разрешение 1280×800 пикселей); подложка 2; система генерации капель 3, состоящая из набора микронасосов, шприцев и полых игл; система освещения 4 с диффузором 5 для рассеяния света; персональный компьютер (ПК) 6 с программным обеспечением (ПО) *Phantom Camera Control application (PCC)*.

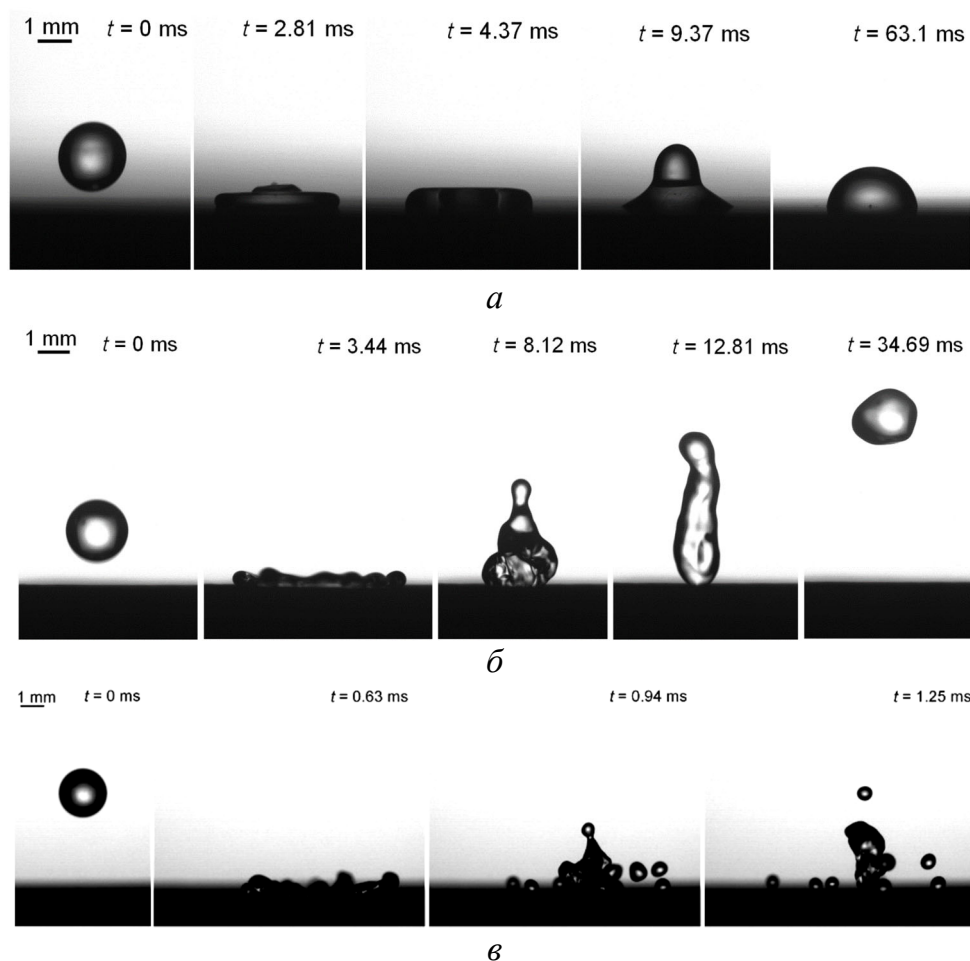
Техническое использование метода

В основе метода высокоскоростной видеорегистрации данных лежит использование высокоскоростных CMOS-видеокамер, например Phantom Miro M310. Видеокамера оснащена матрицей CMOS 1280×800 пикселей, что на 25 % по площади больше, чем у большинства моделей. С размером пикселя в 20 микрон камера обладает высокой светочувствительностью, что немаловажно при съемках в условиях низкой освещенности.

Минимальное время экспозиции – 1 мкс – устраняет размытость изображения и позволяет разглядеть мельчайшие детали. При регистрации движения частицы на больших скоростях область фиксации становится тёмной. Для решения этой проблемы используется осветительное оборудование (прожекторы). Обработка и анализ данных осуществляются с помощью персонального компьютера с предустановленным программным обеспечением Phantom Camera Control application (PCC), которое позволяет непрерывно контролировать принимаемую каплей форму, размеры, скорость движения, ускорение [1–3].

Пример использования метода

На рис. 1.3 приведены видеок cadры процесса взаимодействия капли с поверхностью, полученные методом высокоскоростной видеорегистрации данных.



*Рис. 1.3. Видеок cadры процесса взаимодействия капли с поверхностью, полученные методом высокоскоростной видеорегистрации данных при реализации различных режимов взаимодействия:
а – растекание, б – отскок, в – дробление*

По результатам анализа высокоскоростной видеосъемки удара капли жидкости о твердую поверхность в основном выделяют такие режимы, как осаждение (растекание), всплеск, разрушение капли, отскок [4]. Возможные сценарии столкновения капель с твердыми поверхностями рассмотрены в обзорных работах [5, 6].

1.3. Метод PIV

Метод цифровой трассерной визуализации (*PIV – Particle Image Velocimetry*) – оптический метод измерения полей скоростей жидкости или газа в выбранном сечении потока. Суть метода *PIV* заключается во введении в поток жидкости или газа частиц (трассеров).

Особенности метода:

- бесконтактные измерения;
- регистрация полей мгновенной скорости;
- невозмущающий характер измерений;
- широкий диапазон измеряемых скоростей – от долей миллиметра в секунду до сверхзвуковых.

Область применения:

- гидро- и аэродинамика лабораторных течений;
- физическое моделирование технологических процессов в энергетике и химической промышленности;
- диагностика обтекания реальных и модельных объектов в авиационном и автомобилестроении и т. д.

Экспериментальный стенд

При применении метода PIV используется следующее оборудование (рис. 1.4): цифровая кросс-корреляционная камера 1 ImperX B2020M, макрообъектив 2 Nikon (фокусное расстояние 200 мм), светофильтр 3 для нейтрализации избыточного лазерного излучения, трассеры (например, индикаторный нанопорошок TiO_2), двухимпульсный Nd:YAG-лазер 4 Quantel EverGreen 70 (532 нм), лазерный нож 5 для формирования лазерного слоя с углом раскрытия 8° , персональный компьютер (ПК) 6 с программным пакетом Actual Flow и форсуночное устройство 7 для впрыска трассеров. Лазерный слой формируется с помощью двухимпульсного лазера с частотой 4...10 Гц вдоль оси капли. Частота импульсов измеряется в соответствии с условиями эксперимента. Толщина светового слоя составляет 100 мкм. Для синхронизации лазерных импульсов, видеозаписи и модуля перемещения используется синхронизатор 8.

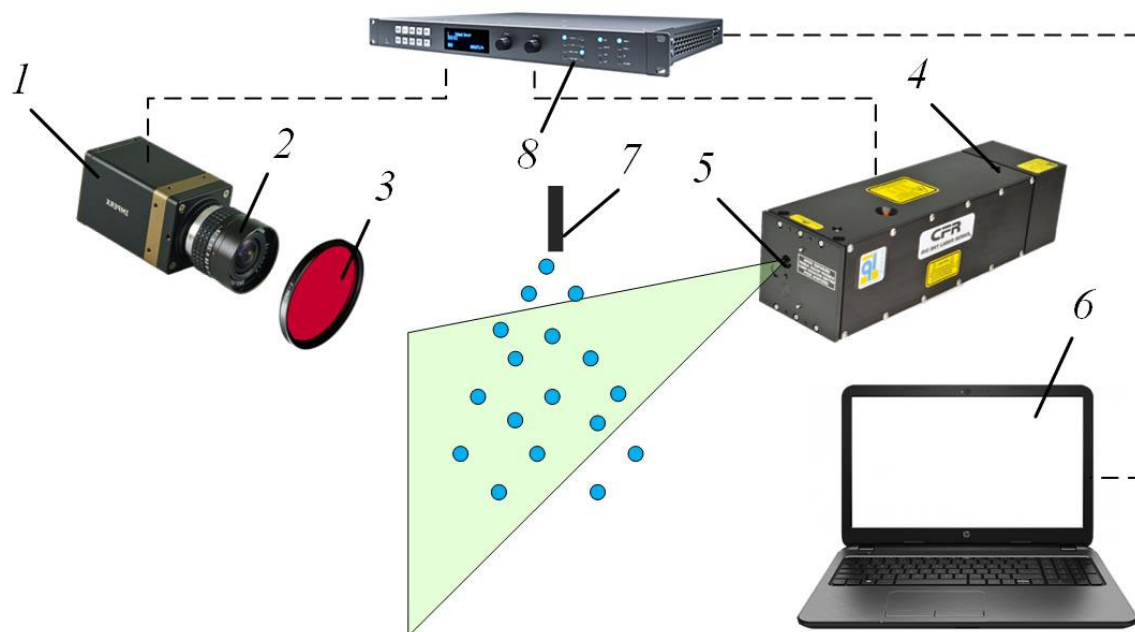


Рис. 1.4. Схема экспериментального стенда при применении метода PIV:
 1 – кросс-корреляционная камера; 2 – макрообъектив; 3 – светофильтр;
 4 – двухимпульсный лазер; 5 – лазерный нож; 6 – ПК; 7 – форсуночное устройство;
 8 – синхронизатор

Техническое использование метода

Импульсный лазер создает тонкий световой нож и освещает трассеры (мелкие частицы индикаторного нанопорошка TiO_2), впрыснутые в исследуемый поток. Положения частиц в момент двух последовательных вспышек лазера регистрируются в виде двух кадров цифровой камерой. Скорость потока определяется расчетом перемещения, которое совершают частицы за время между вспышками лазера. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинкам с использованием регулярного разбиения на элементарные области. Затем происходит определение мгновенной и средней скоростей воздушного потока в окрестности капли. Погрешность определения скорости с помощью метода PIV составляет не более 0,05 м/с [7–9].

Пример использования метода

На рис. 1.5 приведено двумерное поле скоростей потока газообразных продуктов сгорания, полученное методом PIV [7]. Направление движения потока продуктов сгорания показано стрелками. Поле является неоднородным, скорость газообразных продуктов сгорания изменяется примерно от 0,9 до 2,1 м/с.

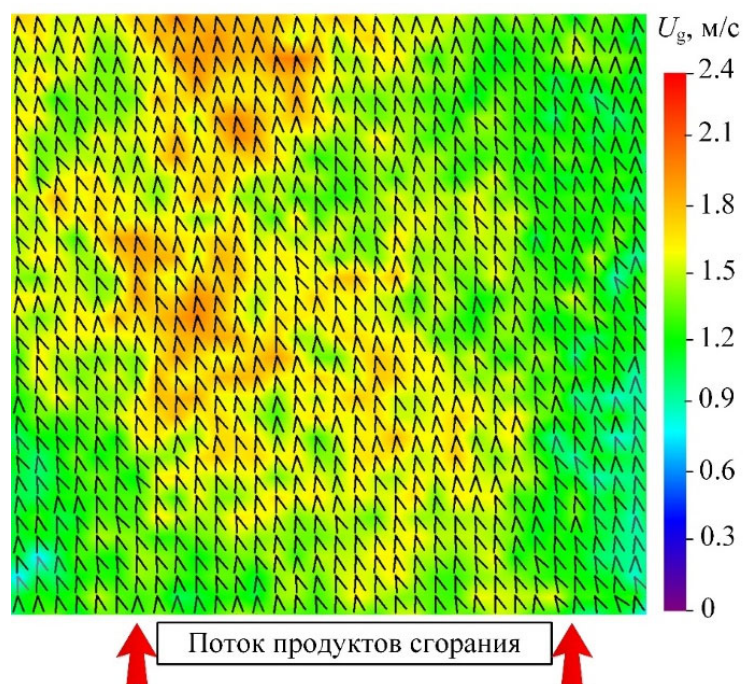


Рис. 1.5. Двумерное двухкомпонентное поле скорости конвекции газообразных продуктов сгорания

1.4. Метод LIP

Метод лазерной индуцированной фосфоресценции (LIP – Laser Induced Phosphorescence) – оптический метод измерения, предназначенный для определения полей температуры в газовых потоках в определенный момент времени. В основе метода LIP лежит явление зависимости излучения люминофоров от температуры.

Особенности метода:

- бесконтактные измерения;
- регистрация полей температуры в определенный момент времени в выбранном сечении потока;
- не возмущающий характер измерений;
- простая комбинация с методами измерения скорости PIV и Stereo PIV.

Область применения:

- теплоперенос и теплообмен в потоках жидкости;
- конвекция;
- теплоперенос и теплообмен в микроканалах;
- теплообменники;
- охлаждение;
- оптимизация теплообмена и теплового режима в других устройствах.

Экспериментальный стенд

При применении метода LIP для определения температурных полей в капле жидкости используется следующее оборудование (рис. 1.6): включает следующее оборудование: персональный компьютер (ПК) 1 с программным пакетом Actual Flow; импульсный Nd:YAG-лазер 2 Quantel Q-smart 450 (длина волны 355 нм, частота повторения 10 Гц, максимальная энергия импульса 130 МДж); две высокочувствительные CCD-камеры 3 Imager M-lite 2 M (разрешение 1920×1280 пикселей, скорость съемки 10 кадров/с, разрядность 12 бит); устройство сбора данных 4; линейное координатное устройство 5 с закрепленной термопарой 6 типа К, расположенной под углом 30° относительно подложки; два оптических объектива 7 Nikon (фокусное расстояние 200 мм) с прикрепленными к ним интерференционными фильтрами нулевого порядка (один объектив оснащен фильтром 420 нм, а другой – фильтром 455 нм); подложка 8; нагревательная плита 9; коллиматор 10 для формирования вертикальной лазерной плоскости, пересекающей каплю; синхронизатор 11 для синхронизации лазерных импульсов и видеозаписи; оптический светоделитель 12, оснащенный дихроичным зеркалом; капля исследуемой жидкости с добавлением частиц BaMgAl₁₀O₁₇:Eu (BAM:Eu) 13.

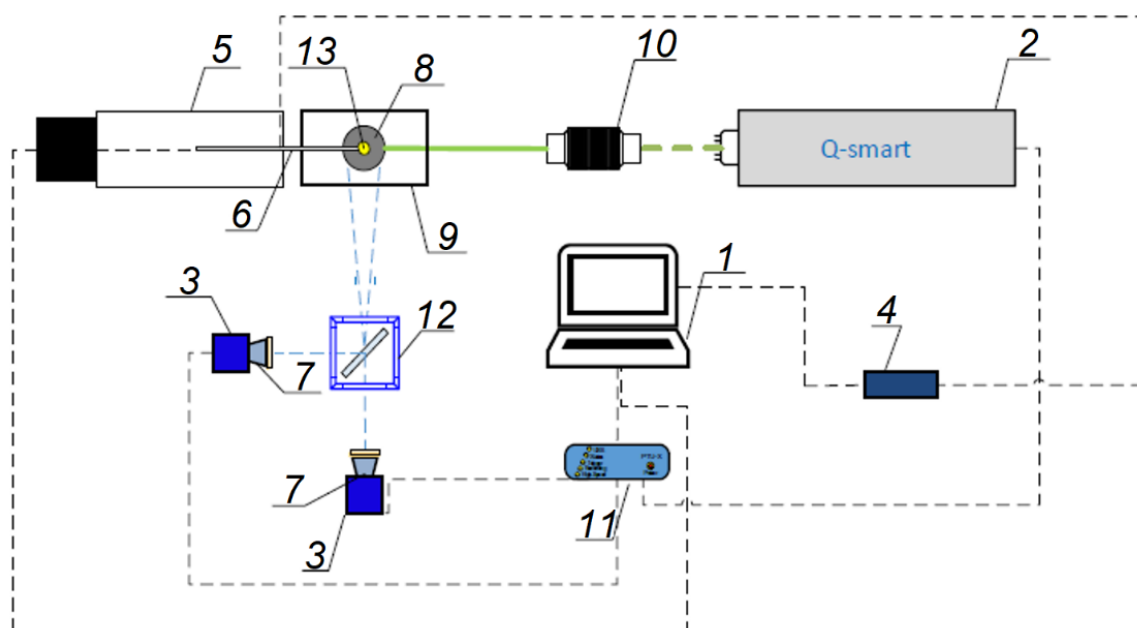


Рис. 1.6. Экспериментальный стенд

для определения температурных полей в капле:

- 1 – ПК; 2 – лазер; 3 – кросс-корреляционная камера; 4 – устройство сбора данных;
5 – линейное координатное устройство; 6 – термопара; 7 – объектив;
8 – подложка; 9 – нагревательная плита; 10 – коллиматор; 11 – синхронизатор;
12 – светоделитель; 13 – исследуемая капля

Использование двух каналов регистрации обусловлено особенностями метода, позволяющего контролировать различные участки спектра излучения частиц ВМ:Eu [10].

Техническое использование метода

Исследование включает в себя два этапа. Первый этап заключается в регистрации характеристик нагрева исследуемой капли на основе измерений термопарой для калибровки используемого оптического метода. При помощи электронного дозатора капля подвешивается на термопару, которая затем перемещается по направлению к подложке. Регистрация температуры производится с шагом 0,1 с до полного испарения капли. Калибровочная кривая, построенная по результатам термопарных измерений, затем используется с помощью метода LIP для регистрации температуры внутри капель.

Вторым этапом исследования является регистрация температуры капли жидкости. Капля «разрезается» лазерным ножом вдоль оси симметрии в вертикальной плоскости. Процесс испарения капли одновременно регистрируется с помощью двух видеокамер до тех пор, пока капля исследуемой жидкости полностью не испарится. Для каждого случая следует проводить не менее пяти экспериментов. После видеорегистрации испарения капель данные обрабатываются в ПО Actual Flow [10–12].

Пример использования метода

На рис. 1.7 приведены температурные поля капли микроэмульсии, полученные методом LIP [10].

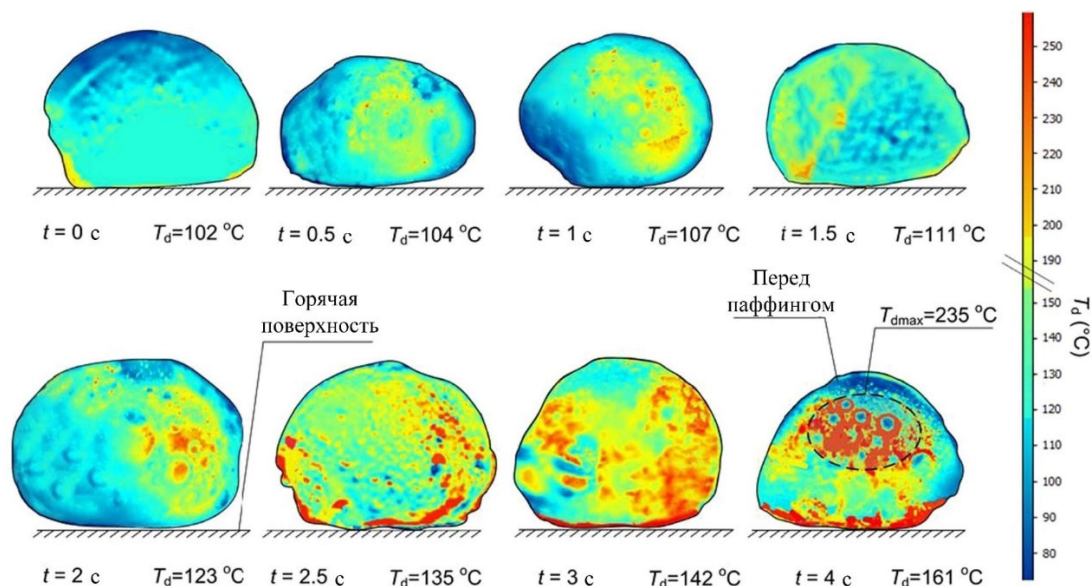


Рис. 1.7. Изменение температурного поля капли микроэмульсии при температуре поверхности нагрева 380 °C, зафиксированное с помощью метода LIP

Температура поверхности нагрева составляет 380 °С. Температурные поля капли регистрируются в течение 4 с. Поскольку нижняя часть капли касается нагретой стенки, она имеет максимальную температуру. На рис. 1.7 хорошо видно, что температурное поле капли является неоднородным. Разница температур на свободной поверхности жидкости достигает более 100 °С. Это способствует возникновению интенсивного поверхностного течения Марангони, в результате которого образуются большие вихри. Из-за этого в центре капли формируются локальные области с температурой, близкой к пристеночной.

1.5. Метод PLIF

Метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF – Planar Laser Induced Fluorescence) – оптический метод измерения, позволяющий регистрировать распределение температуры и концентрации жидкости в определенный момент времени в плоском сечении потока. Метод PLIF основан на естественной флуоресценции молекул флуорофора (органического пигмента), индуцируемой лазерным излучением. Обычно применяются следующие флуорофорные композиции: Родамин В, Родамин 6G и сульфородамин В.

Особенности метода:

- бесконтактные измерения
- регистрация пространственных распределений температуры жидкости в определенный момент времени во внутреннем сечении потока;
- характерный диапазон измеряемых температур +10...+170 °С (определяется свойствами красителя);
- погрешность измерения не более 1 °С;
- характерный размер кадра, в котором регистрируется поле температуры, 500×500 пикселей значений (зависит от параметров камеры);
- работает в оптически прозрачных средах;
- простая комбинация с методами измерения скорости PIV и Stereo PIV;
- измерительная система является расширением PIV-системы.

Область применения:

- теплоперенос и теплообмен в потоках жидкости;
- конвекция;
- теплоперенос и теплообмен в микроканалах;
- теплообменники;
- охлаждение;
- оптимизация теплообмена и теплового режима в других устройствах.

Экспериментальный стенд

При применении метода PLIF для исследования процесса испарения подвешенной капли жидкости используется следующее оборудование (рис. 1.8): цифровая кросс-корреляционная камера 1 ImperX B2020M, макрообъектив 2 Nikon (фокусное расстояние 200 мм), светофильтр 3 для нейтрализации избыточного лазерного излучения, флуоресцентный краситель (Родамин В, растворенный в воде), двухимпульсный Nd:YAG-лазер 4 Quantel EverGreen 70 (532 нм), лазерный нож 5 для формирования лазерного слоя с углом раскрытия 8° , персональный компьютер (ПК) 6, оснащенный программными пакетами Actual Flow и PLIF Kit. Нагрев капли в потоке горячего воздуха обеспечивается с помощью нагревателя 7 Leister CH 6060 (мощность 11 кВт, максимальная выходная температура 1250 К) и воздуходувки 8 Leister LE 5000 HT (мощность 0,25 кВт, максимальный расход воздуха 1200 л/мин).

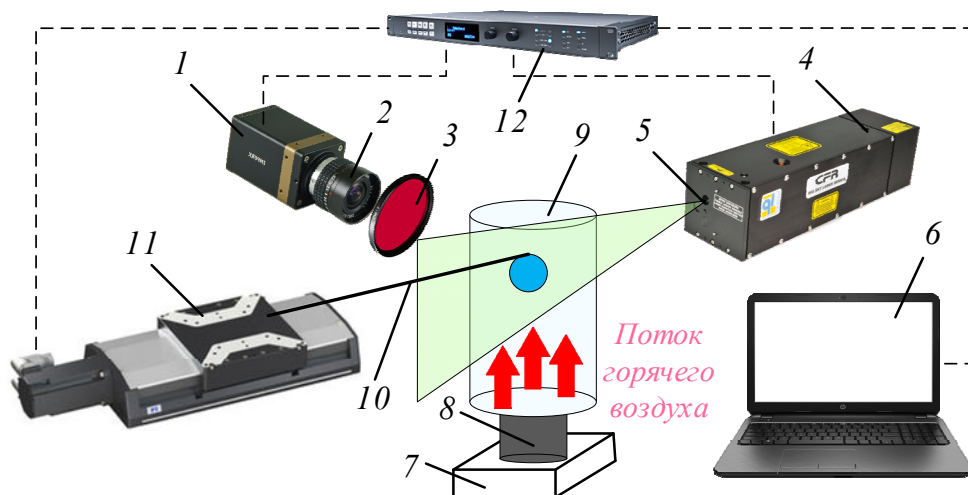


Рис. 1.8. Схема экспериментального стенда при использовании метода PLIF:

- 1 – кросс-корреляционная камера; 2 – макрообъектив; 3 – светофильтр;
4 – двухимпульсный лазер; 5 – лазерный нож; 6 – ПК; 7 – нагреватель;
8 – воздуходувка; 9 – кварцевый цилиндр; 10 – керамический стержень;
11 – линейное координатное устройство; 12 – синхронизатор

В качестве нагревательной камеры используется полый цилиндр 9 из термостойкого кварцевого стекла. Высота цилиндра составляет 500 мм. Внутренний и внешний диаметры – 96 и 100 мм соответственно. Для введения капли в цилиндр в последнем имеется отверстие диаметром 10 мм. Термопары типа S (диапазон измерений 233...1773 К, точность $\pm 1,5$ К, толщина соединения 0,05 мм, время срабатывания не более 0,1 с) измеряют температуру воздуха в нагревательной камере. Устройство NI 9219 собирает данные с термопар и передает на ПК. Капли вводятся в поток горячего воздуха

с помощью тонкого керамического стержня 10. Для этого применяется линейное координатное устройство 11 с минимальным шагом 0,05 мм, точностью 0,008 мм и скоростью движения 0,05 м/с.

Лазерный слой формируется с помощью двухимпульсного лазера с частотой 4...10 Гц вдоль оси капли. Частота импульсов измеряется в соответствии с условиями эксперимента. Толщина светового слоя составляет 100 мкм. Для синхронизации лазерных импульсов, видеозаписи и модуля перемещения используется синхронизатор [13].

Техническое использование метода

Эксперименты проводятся в два этапа. Первый этап заключается в получении калибровочной кривой, показывающей зависимость между температурой и флуоресценцией красителя (например, родамина В), выраженную в единицах яркости. Измерительная система калибруется с помощью быстродействующей термопары и капли воды без каких-либо добавок. Второй этап включает регистрацию температурного поля испаряющейся исследуемой капли при одновременном изменении температуры воздушного потока. Температура определяется по интенсивности свечения растворенного в рабочей жидкости флуоресцентного красителя, освещаемого лазерным ножом. CCD-изображения капли генерируются кросс-корреляционной камерой и обрабатываются с помощью программного обеспечения Actual Flow [14–16].

Пример использования метода

На рис. 1.9 приведены температурные поля двухкомпонентной капли «вода-нефть», полученные методом PLIF [15].

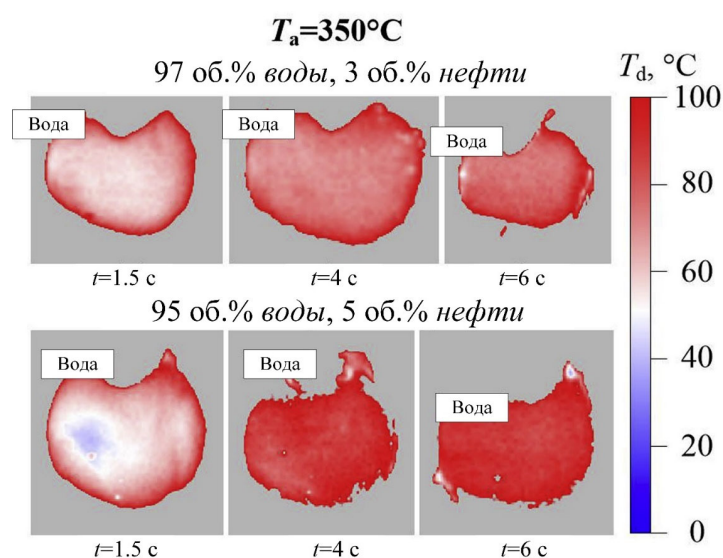


Рис. 1.9. Температурные поля при перегреве двухкомпонентных капель «вода-нефть» при концентрациях воды 97 и 95 об. %, полученные методом PLIF

Концентрация воды составляет 97 и 95 об. %. Температура внутри капли достигает температуры кипения. В случае более низкой концентрации воды больший объем этого компонента нагревается до температуры кипения. При увеличении концентрации воды только локальные области нагреваются до такой высокой температуры. Однако этого достаточно для зарождения и роста пузырьков, наполненных водяными парами. Разрушение этих пузырьков приводит к взрывному распаду капель.

1.6. Съемка процесса взаимодействия капли с плоской стенкой под разными углами

Экспериментальный стенд

Видеорегистрация процесса взаимодействия капли с плоской стенкой под разными углами осуществляется с помощью следующего оборудования (рис. 1.10): линейное координатное устройство 1; система генерации капель 2; подложка 3; две высокоскоростные CMOS-видеокамеры 4, 5 (Phantom Miro M310 для съемки снизу: скорость съемки 10^4 кадров/с, разрешение 768×304 пикселей; Phantom Miro M110 для съемки сбоку под углом 90° относительно оси перемещения капли: скорость съемки $1,9 \cdot 10^3$ кадров/с, разрешение 640×480 пикселей); система освещения 6 с диффузором 7; координатный столик 8 и перистальтический насос 9 LongerPump BT100-1F (установленный объем дозирования 0,01 мл) [17].

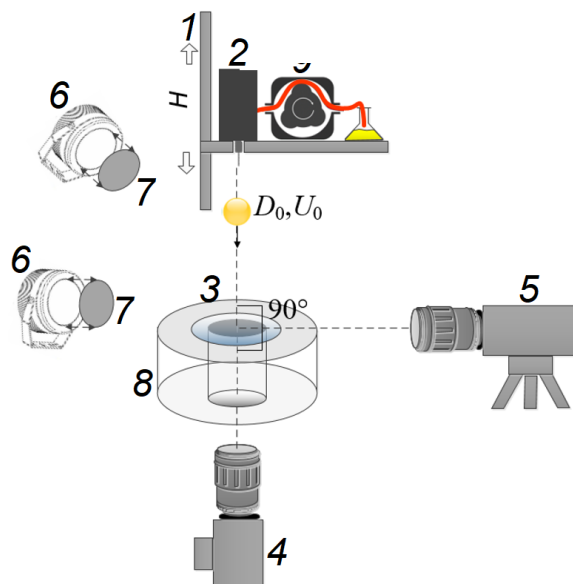


Рис. 1.10. Экспериментальный стенд для видеорегистрации процесса взаимодействия капли с плоской стенкой под разными углами:

- 1 – линейное координатное устройство; 2 – система генерации капель;*
- 3 – сапфировая подложка; 4, 5 – высокоскоростная видеокамера;*
- 6 – система освещения; 7 – диффузор; 8 – координатный столик;*
- 9 – перистальтический насос*

Техническое использование метода

Использование двух высокоскоростных камер обусловлено необходимостью определения количественных характеристик процесса разрушения капли (камера вида сверху) и режимов удара капли и кипения (камера вида сбоку) [17–19].

Пример использования метода

С помощью видеорегистрации получены данные о гидродинамическом разрушении капель микроэмульсионного топлива, взаимодействующих с нагретой горизонтальной стенкой (рис. 1.11) [17].

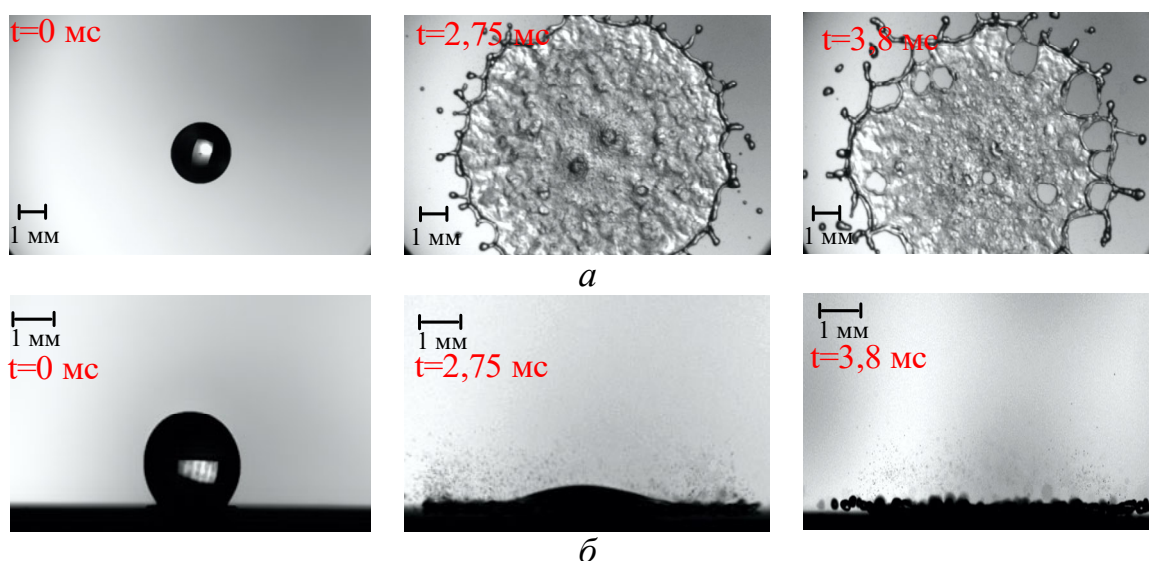


Рис. 1.11. Кадры процесса взаимодействия капли с плоской стенкой при съемке под разными углами: а – снизу; б – сбоку

Съемка сверху позволяет провести более детальный анализ растекания, быстрого выплеска и разрыва «пальцев», а также разрушения в центральной области капельной пластинки с образованием ячеек, нитей и «пальцев» (рис. 1.11, а). При съемке сбоку возможно выделить такие режимы взаимодействия, как прилипание, быстрый всплеск, коронный всплеск, распространение, перебирание пальцами, разрыв пальца и отскок (рис. 1.11, б).

1.7. Нагрев поверхности взаимодействия и исследуемой жидкости

При исследовании взаимодействия капель с поверхностью следует учитывать как температуру поверхности, так и температуру исследуемой жидкости до взаимодействия. Оба этих параметра могут влиять на свойства жидкости в капле и, как следствие, на растекание вдоль поверхности.

Экспериментальный стенд

При применении данного метода используется следующее оборудование (рис. 1.12): две высокоскоростные видеокамеры 1, 2 (Phantom Miro M110: скорость съемки $1,9 \cdot 10^3$ кадров/с, разрешение 640×480 пикселей; Phantom Miro M310: скорость съемки 10^4 кадров/с, разрешение 768×304 пикселей); персональный компьютер (ПК) 3 с программным обеспечением (ПО) Phantom Camera Control application (PCC); система освещения 4, 5 (блок питания GSVITEC MultiLED G8 и два прожектора GSVITEC MultiLED QT с диффузорами для рассеяния света), используемая для получения теневых изображений процесса взаимодействия капли с поверхностью снизу и сбоку; сапфировая подложка 6; нагревательный элемент 7; контроллер температуры 8 (шаг 1°C , диапазон рабочих температур нагрева $+40 \dots +500^\circ\text{C}$, максимальное отклонение температуры от заданного значения $\pm 2^\circ\text{C}$); термостатируемая рубашка с соплом 9 (иглолки с тупым наконечником с внутренним диаметром $0,184$ мм); дозирующий перистальтический насос 10 LongerPump BT100-1F (установленный объем дозирования $0,01$ мл) с подающей трубкой Tygon F4040-A для перекачивания углеводородных жидкостей (внутренний диаметр $2,03$ мм); термостат жидкостный 11 КРИО-ВТ-12-01 (диапазон рабочих температур $-30 \dots +200^\circ\text{C}$, точность поддержания температуры $\pm 0,1^\circ\text{C}$, рабочая жидкость – Тосол А-40,) с внешним контуром 12 и линейное координатное устройство 13.

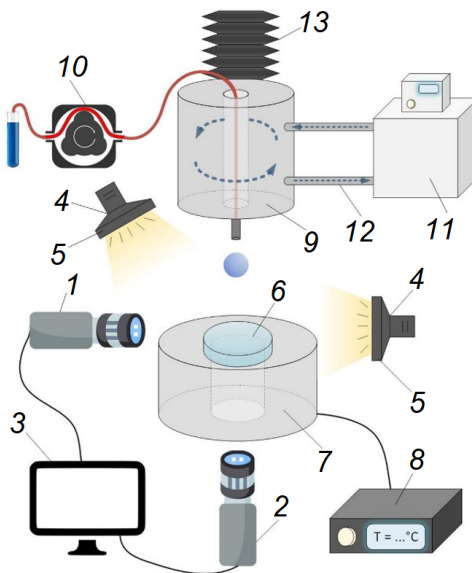


Рис. 1.12. Схема экспериментального стенда с возможностью нагрева поверхности взаимодействия и исследуемой жидкости:

- 1, 2 – высокоскоростные видеокамеры; 3 – ПК; 4, 5 – система освещения;
6 – сапфировая подложка; 7 – нагревательный элемент; 8 – контроллер температуры; 9 – термостатируемая рубашка с соплом;
10 – перистальтический насос; 11 – термостат жидкостный;
12 – внешний контур термостата; 13 – линейное координатное устройство

Техническое использование метода

Нагрев сапфировой подложки (толщиной 5 мм и диаметром 25 мм) проводится снизу с использованием нагревательного элемента до температур $T_S = 20, 40, 60, 80$ °С. Температура нагревательного элемента T_H задается с помощью контроллера температуры с ПИД-регулятором. Отклонение реальной температуры подложки от заданной на контроллере не превышает 25 %. Нагревательный элемент имеет сквозное отверстие в центре для регистрации процесса взаимодействия снизу. Температура подложки T_S контролируется термоэлектрическим преобразователем типа К Omega Engineering (диапазон измерения $0...+480$ °С, погрешность измерений $\pm 0,1$ °С) и тепловизором Testo 885-2 (диапазон измерения температур $-30...+1200$ °С, температурная чувствительность <30 мК, Testo, погрешность измерений ± 2 °С, AG) с предустановленной степенью черноты сапфирового стекла 0,96); отклонения показаний термопары от тепловизора не превышает 2,5 °С.

Для нагрева жидкости до температур $T_L = 20, 40, 60, 80$ °С спроектирована термостатируемая рубашка, представляющая металлическую камеру с отверстием под сопло, внутри которой циркулирует теплоноситель, подаваемый из термостата. Температура теплоносителя T_C вблизи иглы измеряется внешним датчиком температуры (ВТ-Д, диапазон измерения температур $-50...+450$ °С, максимальное отклонение $\pm 0,25$ °С), подключенным к термостату. Для построения калибровочной кривой реальная температура капли жидкости T_L на выходе из сопла измеряется термопарой типа К Omega Engineering. Отклонение реальной температуры жидкости от заданной на блоке управления термостатом не превышает 15 % [17, 20, 21].

Пример использования метода

На рис. 1.13 приведены кадры, демонстрирующие разницу в процессе растекания при взаимодействии не нагретой и нагретой капли с нагретой поверхностью [21]. Температура поверхности $T_S = 40$ °С (рис. 1.13, а, б), а температура жидкости $T_L = 20$ °С (рис. 1.13, а) и $T_L = 40$ °С (рис. 1.13, б). Таким образом, в одном случае присутствует градиент температур между жидкостью и поверхностью, а в другом – нет. Как показано на рис. 1.13, предварительный нагрев жидкости способствует снижению максимального диаметра растекания и диаметра короннообразной структуры.

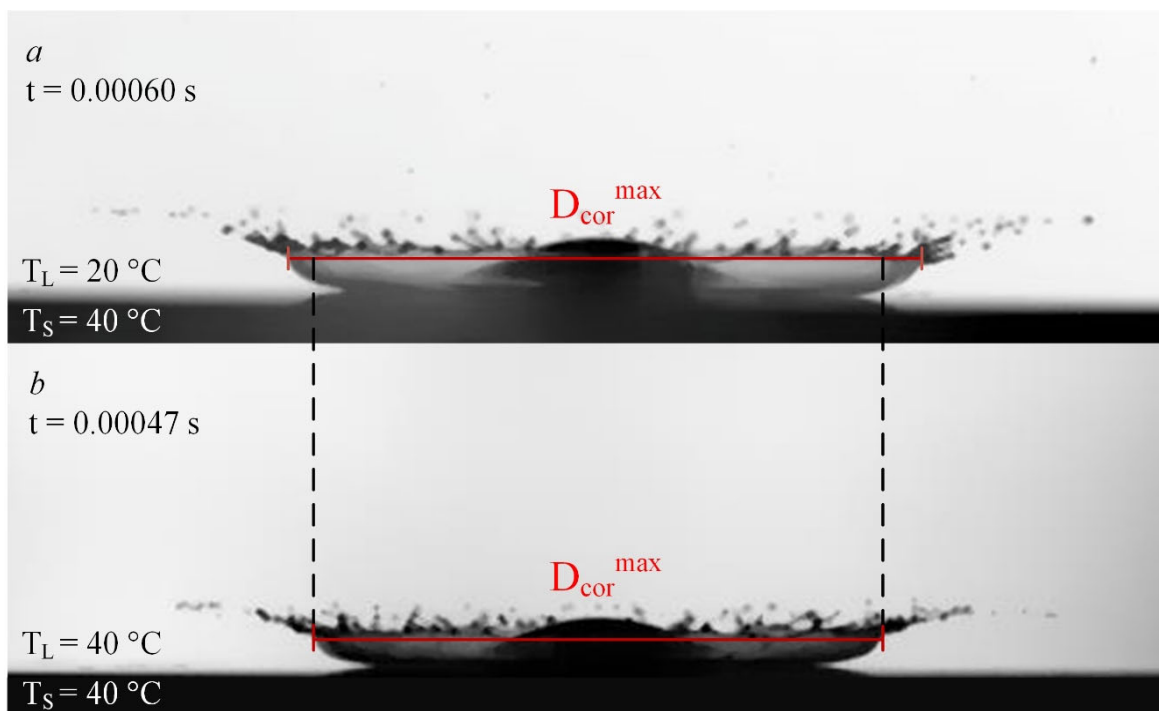


Рис. 1.13. Кадры процесса взаимодействия не нагретой (а) и нагретой (б) капли жидкости с нагретой поверхностью

1.8. Воздушная микрофлюидика

Воздушная микрофлюидика – метод формирования гетерогенных капель и частиц в воздухе при взаимодействии потоков жидких микроструй. В отличие от канальной, воздушная микрофлюидика исключает влияние стенок и использование микроканалов в целом. Сформированные капли/частицы осаждаются на поверхности в трехмерные конструкции модульной внутренней архитектуры. Последнее возможно, например, благодаря использованию полимерных и биополимерных растворов, микрокапли которых при взаимодействии склонны к частичной (частицы Януса [22]) или полной (структуры типа «ядро-оболочка» [23]) инкапсуляции, а также полимеризации и отверждению. Полученные таким образом частицы микрогеля широко используются в клинических и терапевтических целях [24].

Область применения:

- безопасный транспорт лекарств и живых клеток;
- биопроизводство тканей;
- одностадийное производство трехмерных биоматериалов, наполненных живыми клетками.

Экспериментальный стенд

Для формирования микрогелевых частиц с помощью метода воздушной микрофлюидики разработана система генерирования сдвоенного потока жидкостей (рис. 1.14) [25].

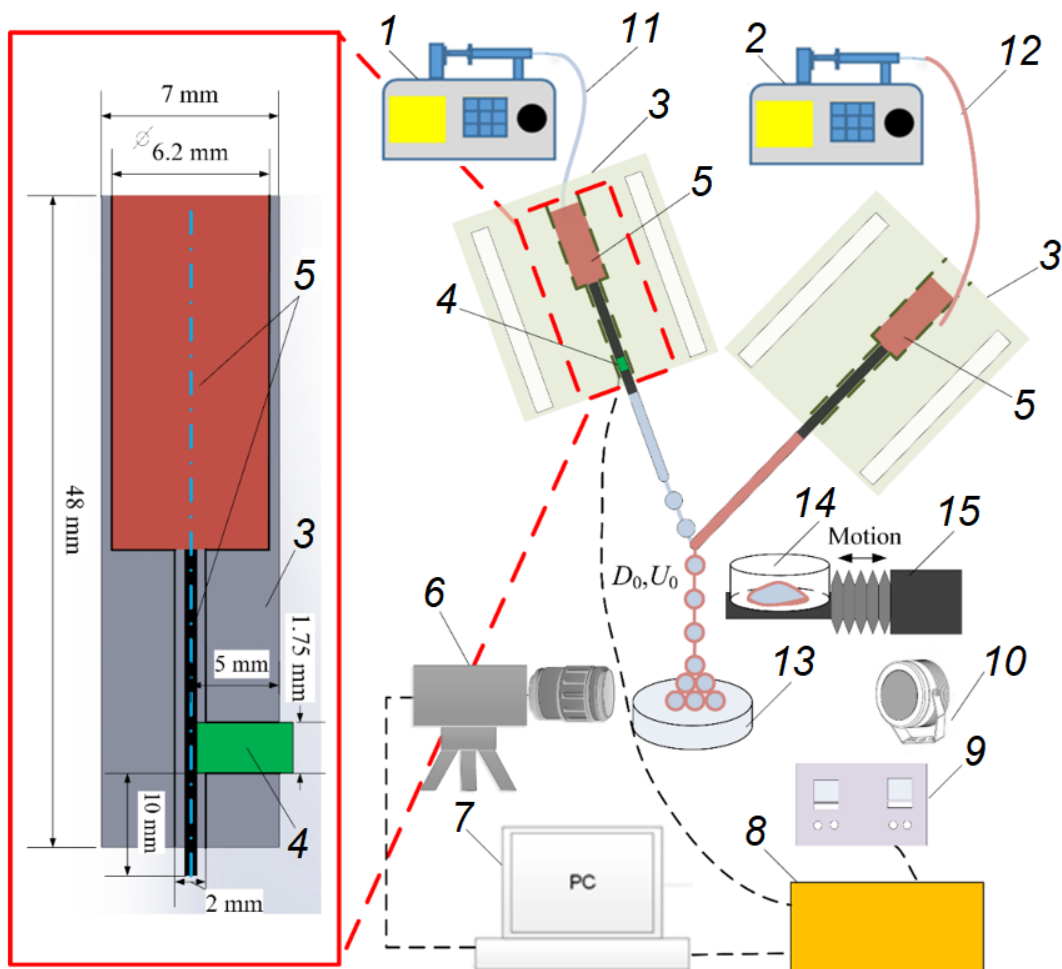


Рис. 1.14. Схема экспериментального стенда при использовании метода воздушной микрофлюидики:

1 – шприцевой насос для подачи раствора полимера; 2 – шприцевой насос для подачи раствора кросслинкера; 3 – каркас для крепления иглы; 4 – пьезоактюатор; 5 – шприцевая игла; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – персональный компьютер; 8 – источник питания; 9 – система подачи сигнала и его усиления; 10 – система освещения; 11 – шланг для подачи раствора полимера; 12 – шланг для подачи раствора кросслинкера; 13 – твердая стенка; 14 – емкость для сбора отработавшей жидкости; 15 – линейное координатное устройство

При применении этого метода используется следующее оборудование: шприцевой насос 1 SPLab02 с возможностью установки шприцов с соединением по типу Луер Лок для подачи потока полимера 11; шприцевой насос 2 Cole Parmer EW-74905-39 с возможностью варьирования рас-

хода от 5 до 212 мл/мин (точность $\pm 0,35$ %, установленный расход кросслинкера 8 мл/мин) для подачи раствора кросслинкера 12; каркас 3 для крепления пьезоактюатора 4 и шприцевых игл 5; высокоскоростная видеокамера 6 Phantom Miro M310 (скорость съемки 28000 кадров/с, разрешение 320×304 пикселей); персональный компьютер (ПК) 7 с программным обеспечением (ПО) Phantom Camera Control application (PCC); источник питания 8; система подачи сигнала и его усиления 9; система фоновой подсветки 10 для обеспечения высокоскоростной «теневого» видеосъемки, состоящая из прожектора GSVITEC MultiLED QT с диффузорами для рассеяния света; емкость для сбора отработавшей жидкости 14 и линейное координатное устройство 15.

Техническое использование метода

Результирующий поток микрогелевых частиц формируется в результате взаимодействия в воздухе микроструйных потоков биополимера и кросслинкера. Поток полимера представляет структуру «бусины-на-нити» [26–28]. Между каплями формируются тонкие жидкостные мосты. Подача двух жидкостей осуществляется с помощью шприцевых стальных игл 27G с тупым наконечником 5 (внутренний диаметр 0,21 мм). Для крепления игл разработаны и напечатаны на 3D-принтере специальные каркасы 3 с необходимыми технологическими отверстиями. Пластмассовые части игл вставляются в пазы каркаса для надежной фиксации, а сами иглы помещаются в канал с сечением 2×2 мм. Каркас под иглу, предназначенную для генерации капель раствора полимера, содержит также сквозное отверстие квадратного сечения со стороной 1,75 мм под пьезоактюатор 4.

Формирование частиц микрогеля одинакового размера и формы, соединенных жидкостными мостами, осуществляется с использованием многослойного пьезоэлектрического привода размерами 1,75×1,75×5 мм (максимальный ход рабочей части 0...3,8 мкм, диапазон рабочих напряжений $U = 0...100$ В). Для подачи сигнала управляющего воздействия на пьезоэлемент и его усиления использовалась система 9, состоящая из модуля АЦП, усилителя напряжения и буферного усилителя напряжения.

При включении насосов требуется некоторое время, чтобы установились номинальные расходы жидкости и взаимодействующие потоки растворов полимера и кросслинкера стабилизировались и сформировали результирующий поток частиц микрогеля. Для того, чтобы поверхность взаимодействия оставалась сухой во время стабилизации потоков, над нею помещается емкость для сбора жидкости 14. После стабилизации потоков емкость 14 смещается с помощью линейного координатного устройства 15, позволяя потоку частиц микрогеля взаимодействовать с поверхностью.

Использование внешнего вибрационного воздействия относительно потока раствора полимера обусловлено необходимостью формирования структур «бусины-на-нити». Расстояние между каплями в потоке является равноудаленным, их размер является практически одинаковым, а форма близка к сферической (рис. 1.15). Такой подход впоследствии позволяет контролировать и количественно анализировать процесс формирования результирующего потока частиц микрогеля, происходящий в результате взаимодействия возмущенного потока раствора полимера с микроструйным потоком раствора кросслинкера [29].

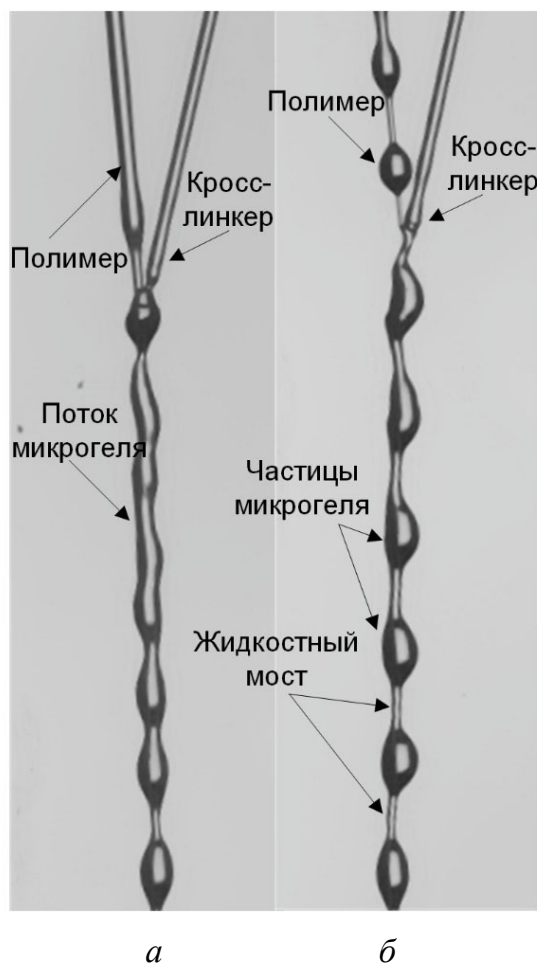


Рис. 1.15. Процесс формирования микрочастиц геля в виде структуры «бусины-на-нити» в результате взаимодействия растворов полимера (расход жидкости 9 мл/мин) и кросслинкера (расход жидкости 8 мл/мин): а – без воздействия пьезоактюатора; б – при воздействии пьезоактюатора (частота тока 1200 Гц, напряжение 30 В)

Микроструйный поток раствора кросслинкера обволакивает капли раствора полимера, соединенные жидкостными мостами, в результате чего происходит движимая за счет градиента поверхностного натяжения инкапсуляция и формирование частиц микрогеля (рис. 1.15) [25, 30, 31].

Пример использования метода

На рис. 1.16 показаны частицы микрогеля, сформированные с помощью метода воздушной микрофлюидики, т. е. при взаимодействии в воздухе двух потоков жидкостей. Сформированные частицы имеют одинаковый размер и движутся на равном расстоянии друг от друга. Однако между микрочастицами формируются тонкие жидкостные мосты (рис. 1.16). Такая структура называется «бусины-на-нити».

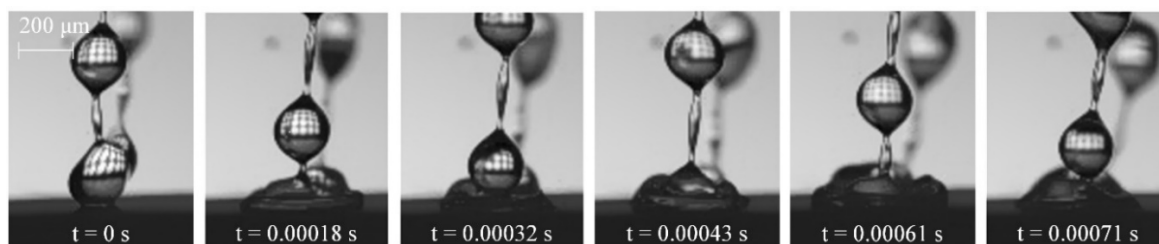


Рис. 1.16. Видеокадры сформированных методом воздушной микрофлюидики частиц микрогеля, взаимодействующих с поверхностью

Микрочастицы в структуре «бусины-на-нити» имеют эллипсоидную форму, вытянутую с двух концов из-за жидкостных мостов [25].

1.9. Метод приготовления биотоплива с помощью наномембранного реактора

В данном разделе предложен метод лабораторного производства биотоплива на основе рапсового масла с использованием мембранного реактора из поливинилиденфторида и сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом, в котором реализуется реакция переэтерификации и пассивная нанофильтрация через поры в стенках мембраны, делая производство более экологически устойчивым за счет исключения ряда технологических стадий, характерных для классического производства биотоплива.

Область применения: производство биодизельного топлива.

Материалы

Для производства метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК) используется три компонента: рафинированное рапсовое масло, метиловый спирт (химически чистый) и едкий калий (химически чистый) в качестве катализатора. Выбор веществ связан с тем, что метиловые эфиры, в отличие от этиловых, демонстрируют более высокую выходную мощность и вращающий момент в испытаниях на двигателях [32, 33]. При использовании этанола возникают проблемы при промывке биодизеля от избытков спирта, так как этанол формирует устойчивую водную эмульсию. Метиловые эфиры также гораздо дольше хранятся, по сравнению с этиловыми. В качестве катализатора используется едкий калий (KOH), так как основные

катализаторы предпочтительнее кислотных катализаторов из-за более высокой активности и более низких температур проведения процесса [33].

Изготовление наномембранного реактора

Для изготовления мембран используется прядильный раствор, представляющий собой смесь N, N-диметилформамида и ацетона, взятых в соотношении 15/85 мас. %, к которым добавляются поливинилиденфторид (PVDF) и сополимер винилиденфторида с тетрафторэтиленом (VDF-TeFE), взятых в соотношение 50/50 мас. % при общем соотношении полимеров в растворе 8 мас. %. Полученная смесь помещается в стеклянную колбу, оснащенную обратным холодильником, где в течение 6 часов при температуре 80 °С и постоянном перемешивании осуществляется растворение полимеров до получения однородной прозрачной вязкой жидкости. Изготовление мембран для мембранного реактора осуществляется на установке многоканального электроформования NIKE-1, разработанной в Томском политехническом университете (рис. 1.17). Для получения мембран установка оснащается цилиндрическим алюминиевым сборочным коллектором длиной 150 мм и диаметром 100 мм. Формирование мембраны осуществляется с использованием двух каналов подачи прядильного раствора таким образом, чтобы инжекторы были расположены друг напротив друга (рис. 1.17, а).



а

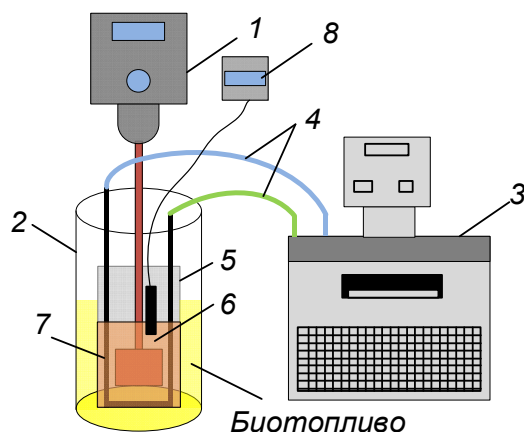


б

Рис. 1.17. Процесс изготовления мембраны методом электроспиннинга (а); сформированная полимерная мембрана для мембранного реактора (б)

Экспериментальный стенд

Для приготовления биотоплива используется следующее оборудование и материалы (рис. 1.18): верхнеприводная мешалка 1 US-8100 (диапазон скорости вращения вала 100...3000 об/мин; точность поддержания скорости вращения $\pm 2\%$); бак для сбора биотоплива 2; термостат жидкостный 3 КРИО-ВТ-12-01 (диапазон рабочих температур $-30...+200\text{ }^{\circ}\text{C}$, точность поддержания температуры $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, рабочая жидкость – Тосол А-40) с внешним контуром 4; наномембранный реактор 5 цилиндрической формы с дном (рис. 1.17, б); смесь исходных компонентов 6; спиралевидный нагревательный элемент 7; лабораторный термометр 8 LTA/С-В (погрешность $\pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $0...+100\text{ }^{\circ}\text{C}$).



а



б

Рис. 1.18. Схема (а) и фото (б) экспериментального стенда для производства биотоплива с помощью наномембранного реактора: 1 – верхнеприводная мешалка; 2 – бак для сбора биотоплива; 3 – термостат жидкостный; 4 – внешний контур термостата; 5 – наномембранный реактор; 6 – смесь исходных компонентов; 7 – спиралевидный нагревательный элемент; 8 – лабораторный термометр

Наномембранный реактор 5 помещается в бак для сбора биотоплива 2. Затем в реактор устанавливается спиралевидный нагревательный элемент 7, на внешней части которого механически закрепляется мембрана. К нагревательному элементу подключается внешний контур 4 термостата 3. Также внутри наномембранного реактора размещаются верхнеприводная мешалка 1 и лабораторный термометр 8.

Техническое использование метода

Рапсовое масло заливается в наномембранный реактор 5 и нагревается до 65 °С с помощью спиралевидного нагревательного элемента 7. Данный нагреватель поддерживает постоянную температуру реагирующей смеси внутри мембранного реактора 5. Жидкость циркулирует по внешнему контуру с предустановленной постоянной температурой 65 °С. Из-за большого размера молекул рапсовое масло не просачивается через наноразмерные поры наномембранного реактора 5. К рапсовому маслу добавляется метиловый спирт, в котором растворены кристаллы едкого калия, в результате чего начинается реакция переэтерификации. Температура топливной смеси во внутреннем контуре мембранного ректора контролируется электронным лабораторным термометром 8. Перемешивание реагирующей смеси 6 осуществляется верхнеприводной мешалкой 1 при заданной скорости вращения 650 об/мин. Нагрев при перемешивании помогает уменьшить долю воды в растворе и ускорить реакцию. Также нагрев необходим для того, чтобы уменьшить вероятность образования эмульсии воды с биодизелем и мыла. Наличие мыла в продукте реакции приводит к увеличению вязкости, образованию геля и препятствует отделению глицерина от эфиров жирных кислот. Мыло в камере сгорания приводит к образованию нагара, смол, а также засорению топливного фильтра. Время протекания реакции переэтерификации составляет 1 час, в течение которого получаемые в ходе реакции молекулы метиловых эфиров жирных кислот просачиваются через наноразмерные поры наномембранного реактора 5 и собираются в баке для сбора биотоплива 2. Свободные триглицериды, глицерин и другие побочные продукты задерживаются внутри наномембранного реактора 5 [34, 35].

1.10. Метод исследования распыления, горения и анализа вредных выбросов

Анализ концентраций химических веществ, содержащихся в отработанных газах, при сжигании биотоплива является важным аспектом, позволяющим обосновать целесообразность использования биотоплива и эффективность работы энергетической установки [36].

Материалы

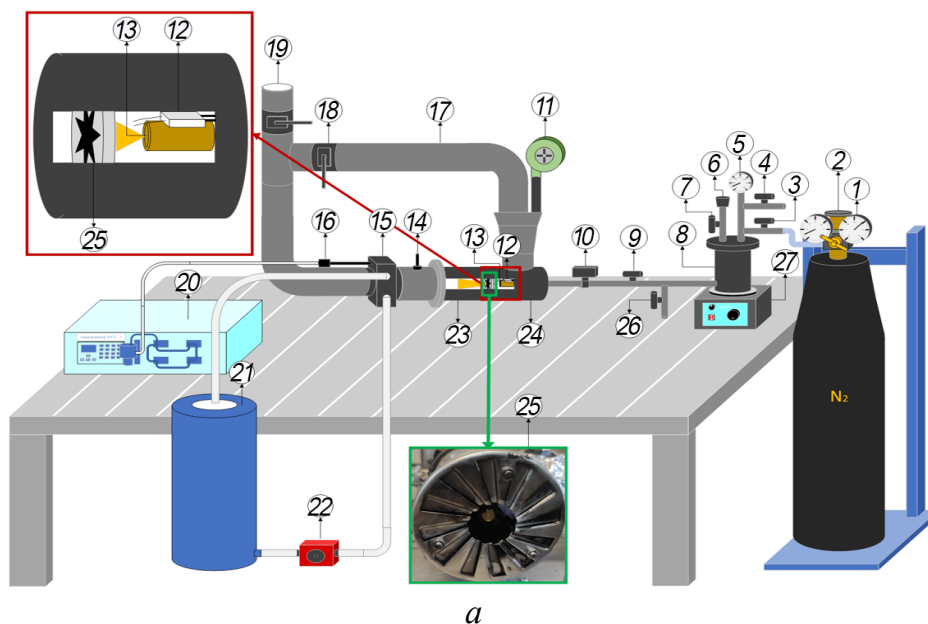
В исследовании применяются метиловые эфиры жирных кислот (МЭЖК) рапсового масла (В100), полученные путем экологически устойчивого подхода – переэтерификации и нанофильтрации в наномембранном реакторе (метод описан в п. 1.8), а также смеси МЭЖК с дизельным топливом В6 и В12 (примесь МЭЖК составляет 6 и 12 мас. % соответственно от массы дизеля).

Экспериментальный стенд

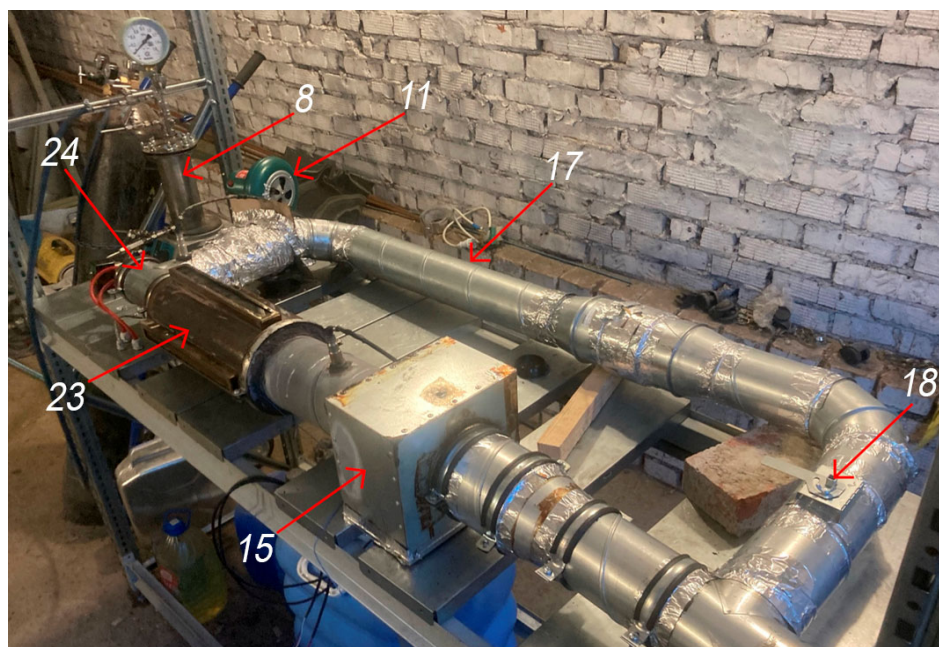
Для определения характеристик распыления (количество, размеры, скорости и траектории движения капель жидкости), горения (температура и структура пламени) и газоанализа (концентрации CO, NO, CO₂, O₂) жидкого топлива разработана испытательная установка с вихревой горелкой, оборудованная камерой сгорания с оптическим доступом и системой рециркуляции выхлопных газов (ERG) (рис. 1.19).

Резервуар для хранения исследуемого топлива 8 представляет металлический стакан, в верхней части которого установлены: манометр 5, узел загрузки топлива 6, патрубок выпуска газа в атмосферу с регулирующим клапаном 4 и патрубок для заполнения резервуара газом с регулирующим клапаном 3. Заполнение резервуара газом осуществляется с помощью газового баллона 2, заправленного азотом, и редуктора 1. Подача топлива осуществляется непосредственно через дизельную форсунку Danfoss 0,4×60 S 030F6904 с углом распыла 60° 13, над которой установлены электроды воспламенения 12 для формирования искры. Для контроля подачи топлива в камеру сгорания используются электрический клапан 10 и шаровой кран 9. Перед камерой сгорания 23 установлен аксиально-лопаточный завихритель газожидкостного потока 25, предназначенный для дополнительного перемешивания топлива с потоком воздуха (см. вставку на рис. 1.19, а). После камеры сгорания установлен датчик концентрации кислорода 14, показывающий соотношение воздух/топливо ALR. Регулирование данного соотношения осуществляется с помощью шибера центробежного вентилятора 11.

Для снижения температуры отработавших газов применяется водяной теплообменник газового котла Navien ACE Coaxil, Deluxe 15 с мощностью 13...24 кВт (материал изготовления – нержавеющая сталь, вид конструкции – спиральный). Данный теплообменник охлаждает отработанные газы путем теплопередачи между нагретой средой (газы) и холодной средой (вода). Рециркуляция воды из бака 21 по теплообменнику осуществляется с помощью циркуляционного насоса 22 с максимальной объемной подачей 2,5 м³/ч. После охлаждения отработавшие газы через патрубок 19 выпускаются в атмосферу. Однако в случае, когда необходима работа системы EGR открывается дроссель-клапан 18.



a



б

Рис. 1.19. Схема (а) и фотография испытательной установки (б):

1 – азотный редуктор газового баллона; 2 – газовый баллон;
 3, 4, 26 – регулирующий клапан; 5 – манометр; 6 – узел загрузки топлива;
 7, 9 – шаровой кран; 8 – резервуар для хранения топлива; 10 – электрический
 клапан; 11 – центробежный вентилятор; 12 – электроды воспламенения;
 13 – дизельная форсунка; 14 – датчик концентрации кислорода; 15 – первичный
 теплообменник; 16 – зонд-щуп газоанализатора; 17 – тракт рециркуляции;
 18 – дроссель-клапан; 19 – патрубок выпуска отработавших газов в атмосферу;
 20 – газоанализатор; 21 – бак; 22 – циркуляционный насос; 23 – камера сгорания
 с оптическим доступом; 24 – горелочное устройство; 25 – завихритель потока;
 27 – магнитная мешалка

Для определения компонентного состава газовой смеси используется газоанализатор 20, предназначенный для измерения концентраций отдельных ее компонентов и зонд-щуп 16, установленный в кожух теплообменника 15. Место расположения зонда зависит от скорости потока отработавших газов; для наиболее достоверного измерения необходимо место расположения с наименьшей скоростью потока. Следовательно, наиболее подходящее место расположения зонда – кожух теплообменника.

1.10.1. Характеристики распыления

Техническое использование метода

Исследования характеристик распыления топлива на установке (рис. 1.19) проводятся при давлении (P) на впрыске 0,6 и 1,2 МПа. Скорость движения воздушного потока варьируется в диапазоне от 11 до 13 м/с. Регистрация процесса распыления проводится методом теневой видеосъемки на расстоянии 7 см от сопла форсунки в центральной части смотрового окна. Видеорегистрация осуществляется с помощью высокоскоростной видеокамеры (масштабный коэффициент 0,0248 мм/пкс, скорость съемки 25000 кадров/с, разрешение 384×288 пикселей) с объективом (фокусное расстояние 200 мм, диафрагма 11), прожектора и компьютера с ПО для обработки и постобработки отснятого видеоматериала.

Постобработка полученного изображения проводится в программном комплексе Matlab при помощи кода, реализующего метод фильтрации Калмана (см. п. 3.1.2).

Пример использования метода

На рис. 1.20 представлен фрагмент распыленного потока и осредненное поле скорости. Размер анализируемой области для осредненного поля скорости составляет 2,232×2,248 мм. По полю скорости можно оценить скорость отдельных капель.

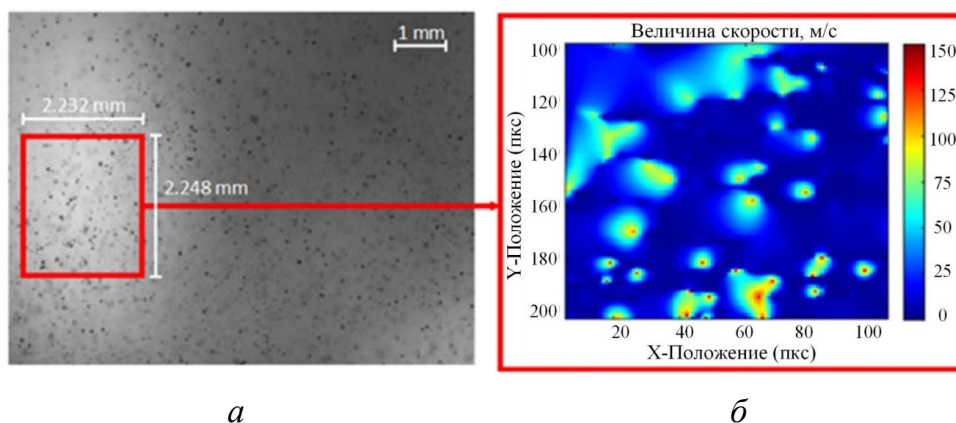


Рис. 1.20. Кадр распыленного потока (а) и осредненное поле скорости для капель (б): биодизель В6, $P = 0,6$ МПа, без завихрителя газожидкостного потока

1.10.2. Характеристики горения

Техническое использование метода

Измерение характеристик горения (температура пламени в камере сгорания T), а также визуализация пламенного горения биодизельного топлива с завихрением газожидкостного потока проводятся на испытательной установке (рис. 1.19) при давлении P на впрыске 0,6 и 1,2 МПа; скорость воздушного потока варьируется в диапазоне от 11 до 13 м/с. Температура пламени T измеряется в камере сгорания с помощью многофункционального термометра GM1312 (погрешность $\pm 1,5\%$, условия эксплуатации $0 \dots 40^\circ\text{C}$, диапазон измерения температур $-250 \dots +1767^\circ\text{C}$) и температурного щупа ТТД-01 (тип щупа ТХА (К), диапазон измерения температуры $-200 \dots +1372^\circ\text{C}$). Перед каждым измерением камера сгорания охлаждается до комнатной температуры. Структура пламенного горения топлив фиксируется на расстоянии 7 см от сопла топливной форсунки в центральной части смотрового окна с помощью высокоскоростной цветной камеры (скорость съемки 4200 кадр/с, разрешение 1280×800 пикселей) с объективом (фокусное расстояние 200 мм, диафрагма 11) и компьютера с ПО для обработки и постобработки видеоданных.

Под временем задержки газофазного (диффузионного) зажигания, t_{delay} , подразумевается временной интервал от начала теплового воздействия на образец до реализации пламенного горения парогазовой оболочки вокруг капли топлива. Изучение времени задержки зажигания рассматриваемых топлив проводится на экспериментальном стенде, который состоит из следующих элементов: трубчатая муфельная печь (максимальная температура нагрева до 1100°C , внутренний диаметр муфельной трубы 30 мм), высокоскоростная видеокамера (тип изображения – монохромное; максимальное разрешение 1280×800 пикселей; минимальное время экспозиции 1 мкс; максимальная разрядность изображения 12 бит) с объективом (фокусное расстояние 50 мм, диафрагма 2,8); роботизированный координатный механизм. При проведении экспериментов капля топливной смеси диаметром $2 \pm 0,2$ мм подается с помощью координатного механизма в муфельную печь, с противоположной стороны устанавливается высокоскоростная камера для регистрации процесса зажигания топлив.

Пример использования метода

Для определения стехиометрической смеси в камере сгорания, при которой коэффициент эквивалентности $\lambda = 1$, измерены массовые расходы топлива Q_m и воздуха Q_v . Измеренные значения приведены на рис. 1.21.

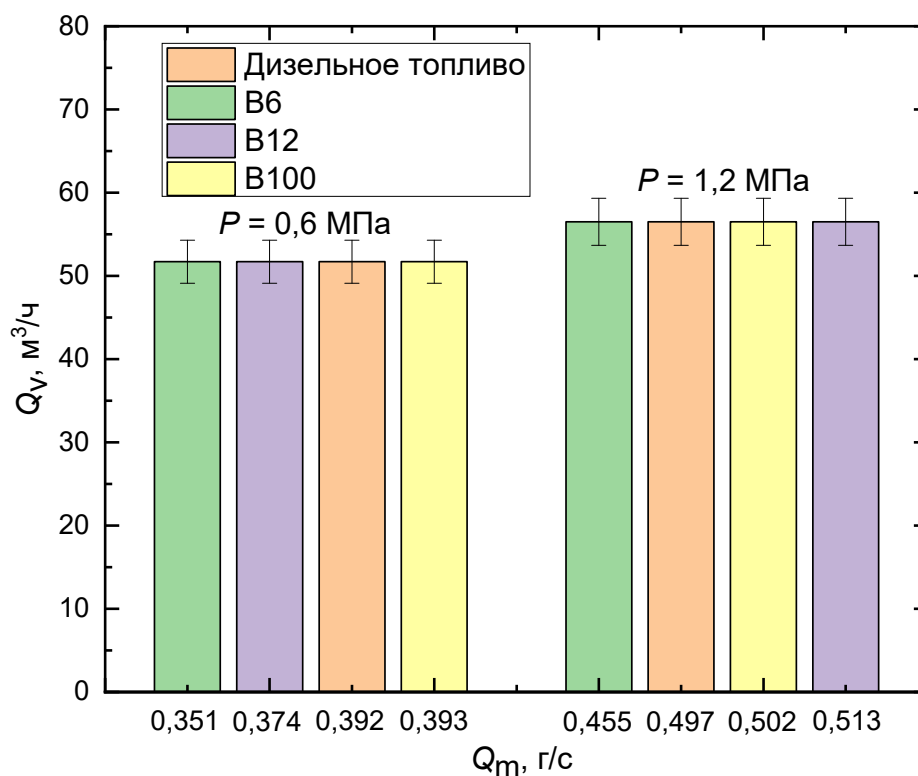


Рис. 1.21. Связь массового расхода воздуха (Q_v) с массовым расходом топлива (Q_m)

На рис. 1.22 показана структура пламени при горении топливной композиции В6 в камере сгорания при давлении на впрыске 1,2 МПа в условиях возмущенного и невозмущенного газожидкостного потока.

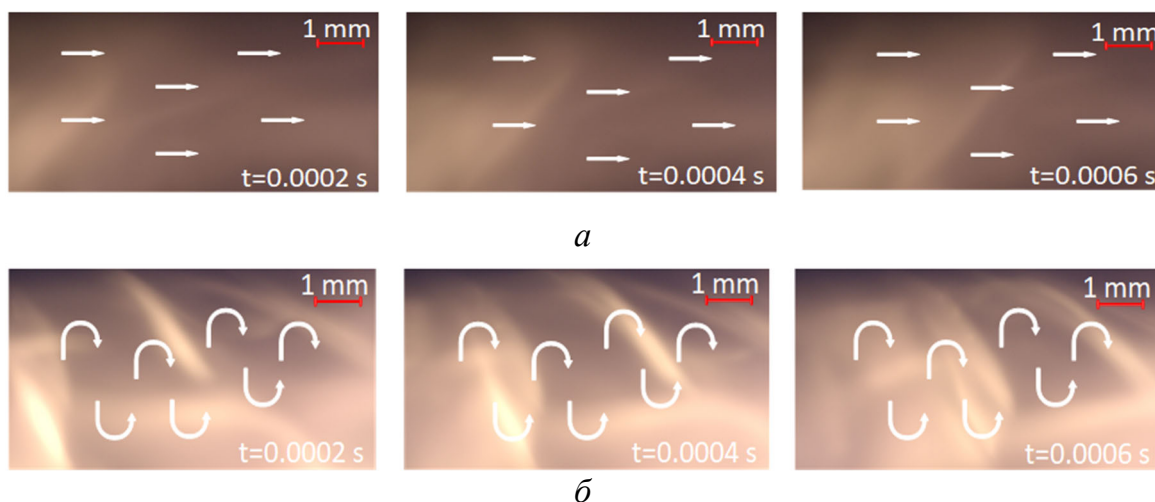


Рис. 1.22. Структура пламени в режиме квазистационарного горения топлива В6 ($P = 1,2$ МПа, $Q_v = 18,83$ г/с):
а – без завихрителя газожидкостного потока;
б – с завихрителем газожидкостного потока

1.10.3. Газоанализ

Техническое использование метода

Испытания по газоанализу продуктов сгорания топлива проводятся на испытательном стенде (см. рис. 1.19) с включенной системой EGR и без неё. Давление на впрыске составляет 0,6 и 1,2 МПа. Система EGR представляет устройство, которое позволяет вернуть часть отработанных газов в камеру сгорания для смешивания с воздухом и топливом. В результате снижаются концентрации оксидов азота (NO_x), что способствует снижению их выбросов в атмосферу [37–39]. В составе стенда (см. рис. 1.19) роль системы EGR выполняет дроссель-клапан и тракт рециркуляции. При открытии дроссель-клапана часть отработанных газов по тракту подается в камеру сгорания для повторного использования. Для анализа компонентов отработавших газов используется газоанализатор (точность измерений $\pm 5\%$, время срабатывания датчика 5...15 с). Используются следующие датчики: электрохимические для O_2 ($\pm 0,2$ об. %, 0...25 %) NO (0...2000 ppm, $\pm 5\%$) и NO_2 (0...500 ppm, $\pm 7\%$), а также оптические для CO_2 (0...30 %, $\pm 2\%$) и CO (0...50 %, $\pm 5\%$). Зонд-щуп газоанализатора располагается в кожухе теплообменника. При проведении опытов газоанализатор в реальном времени строит кривые изменения компонентов отработанных газов. В качестве датчика состава топливовоздушной смеси используется UEGO V2 (универсальный широкополосный лямбда-зонд) Bosch 4.9 LSU 30-4110 АЕМ диаметром 52 мм с диапазоном измерения 11...17. Он располагается на выходе из камеры сгорания. С его помощью отслеживается идеальное стехиометрическое соотношение. Во время проведения испытаний коэффициент отношения воздуха к топливу ALR поддерживается на постоянном значении – около 14,5. При таком соотношении обеспечивается полное сгорание дизельного топлива в соответствии с заключением из работы.

Пример использования метода

Для оценки влияния таких параметров, как давление на впрыске, массовая доля МЭЖК в составе топлива и EGR, представлены осредненные значения концентраций компонентов при квазистационарном режиме горения при $P = 0,6$ МПа и $P = 1,2$ МПа (рис. 1.23).

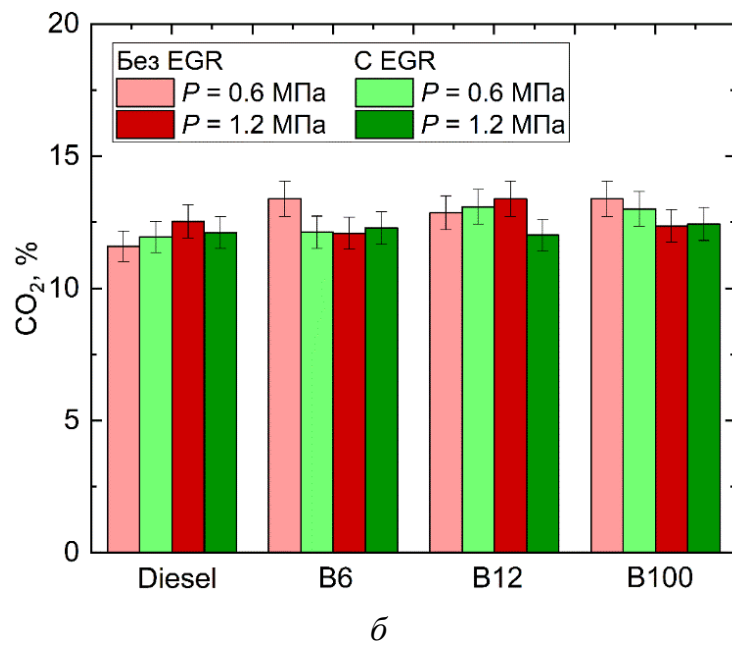
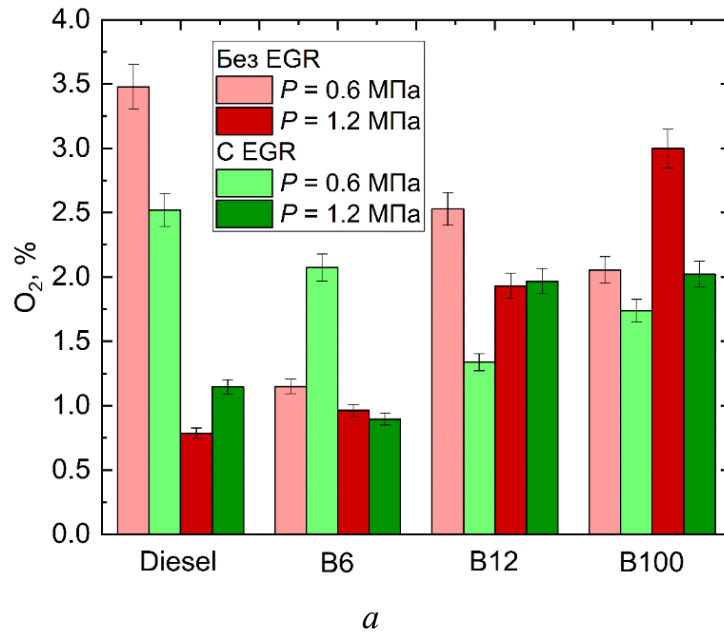


Рис. 1.23. Средние значения концентраций компонентов отработавших газов в условиях EGR и без нее при коэффициенте эквивалентности $\lambda = 1$: а – O_2 ; б – CO_2

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ВЕЩЕСТВ

2.1. Реология жидкостей

2.1.1. Определение плотности

Ареометрический метод

Ареометрический метод является самым быстрым и нетрудоемким, однако позволяет проводить измерения плотности только при температурах исследуемой жидкости $+20$ и $+15$ °С. Точность определения плотности при помощи ареометра составляет $0,005$ г/см³ для высоковязких нефтепродуктов и $0,001$ г/см³ для маловязких.

Оборудование

Плотность определяется с помощью ареометра, представляющего собой лабораторный стеклянный прибор цилиндрической формы. В верхней части прибора располагается измерительная шкала, по которой определяется уровень плотности в молоке, в нижней – балластные вещества в виде свинцовой дроби или ртути (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Внешний вид ареометра

Балласт необходим для правильного расположения ареометра в исследуемой жидкости. При погружении в жидкость прибор должен плавать строго вертикально. Большинство ареометров снабжают термометром для определения температуры исследуемой жидкости.

Техническое использование метода

Определение плотности жидкости ареометром основано на законе Архимеда, согласно которому на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, направленная вертикально вверх и равная весу вытесненной жидкости в объеме погруженной части ареометра. До начала испытания исследуемый образец выдерживается при определенной температуре в течение 15...20 минут. Затем ареометр опускается в стеклянный цилиндр, который предварительно заполняется исследуемой средой, при этом его держат за верхний конец. После окончания колебаний прибора значение плотности фиксируется по верхнему краю мениска.

Пикнометрический метод

Наиболее точным методом измерения плотности является пикнометрический метод (точность до $0,00001$ г/см³). Его преимуществом

является использование малого количества анализируемого сырья, возможность определения плотности любых видов нефтепродуктов, а также широкий диапазон температур исследуемой жидкости.



Рис. 2.2. Внешний вид пикнометра

Оборудование

Плотность жидкости определяется с помощью пикнометра. Стандартный пикнометр представляет собой стеклянную колбу с высоким узким горлом и крышкой-колпачком (рис. 2.2).

В верхней части прибора находится метка. Пикнометр можно использовать для определения показателя плотности различных веществ, в том числе и жидкостей. Диапазон температур, при которых можно проводить исследования, очень широкий, так как прибор изготовлен из термостойкого стекла. Этим он отличается от обычных мензурок.

Техническое использование метода

Определение плотности жидкостей данным методом основано на измерении отношения массы определенного объема исследуемого вещества к массе дистиллированной воды, взятой в таком же объеме. Масса сухого пикнометра определяется с помощью аналитических высокоточных весов (например, Vibra AF 225DRCE). Пустой сосуд и дистиллированная вода нагреваются до той температуры, при которой будет измеряться плотность исследуемой жидкости. Затем нагретый пикнометр заполняется нагретой дистиллированной водой до метки, после чего определяется его масса вместе с чистой водой. Далее он опустошается и высушивается в специальной печи. После этого исследуемая жидкость, нагретая до той же температуры, что и чистая вода, наливается в пикнометр до метки и определяется масса сосуда вместе с исследуемой жидкостью. Таким образом, обеспечивается равенство объема исследуемой жидкости объему чистой воды при любой температуре.

Плотность исследуемой жидкости $\rho_{\text{жидк}}$ (кг/м³) определяется следующим образом:

$$\rho_{\text{жидк}} = \frac{m_2 - m}{m_1 - m} \cdot \rho_{\text{воды}},$$

где m – масса пикнометра, кг; m_1 – масса пикнометра с водой, кг; m_2 – масса пикнометра с исследуемой жидкостью, кг.

2.1.2. Вязкость жидкости

Вязкость жидкости – это ее способность оказывать сопротивление перемещению одного «слоя» жидкости относительно другого. Работа, затрачиваемая на перемещение, рассеивается в виде тепла.

На практике такой параметр, как кинематическая и динамическая вязкость, используется при гидравлических расчетах трубопроводов, в частности для определения числа Рейнольдса.

Кинематическая вязкость

Кинематическая вязкость – это соотношение коэффициента динамической вязкости и плотности (при нагревании молекулы смещаются дальше друг от друга).

Оборудование

Для измерения кинематической вязкости используется капиллярный вискозиметр Ubbelohde (диапазон измерений 20...100 сСт, погрешность 0,2 %) (рис. 2.3) и термостат жидкостный Termex КРИО-ВТ-12-1 (диапазон рабочих температур $-30...+200$ °С, точность поддержания температуры $\pm 0,1$ °С, рабочая жидкость – Тосол А-40).

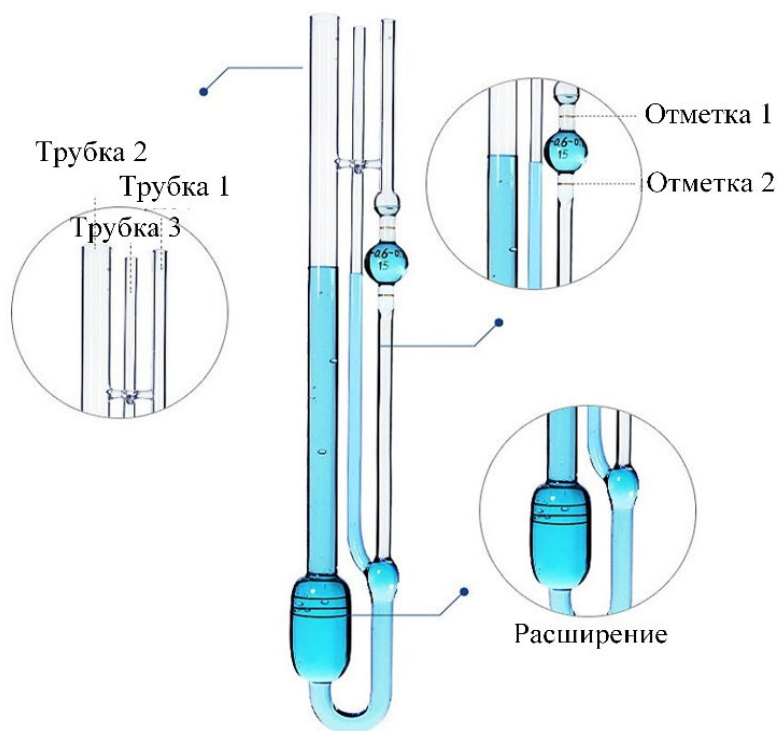


Рис. 2.3. Внешний вид капиллярного вискозиметра

Техническое использование метода

Принцип измерения кинематической вязкости основан на подсчёте времени протекания заданного объёма жидкости через узкое отверстие или трубку при заданной разнице давлений. Капиллярный вискозиметр

заполняется исследуемым образцом, помещается в термостат и закрепляется в держателе таким образом, чтобы капилляры были расположены вертикально. Вискозиметр термостатируется в термостате в течение 30 минут. После этого с помощью подсоса или давления высота столбика образца устанавливается приблизительно на 7 мм выше первой отметки. При этом в образце не должны образовываться пузырьки воздуха. При свободном течении образца через капилляр определяют время истечения – время перемещения мениска жидкости между метками, для которых определена постоянная вискозиметра. Важно, чтобы течение жидкости в приборе осуществлялось только под действием силы тяжести. В противном случае измеряется не кинематическая вязкость, а динамическая.

Кинематическая вязкость ν (мм²/с) определяется по формуле

$$\nu = C \cdot t \cdot \left(\frac{g}{g_n} \right) \cdot \Delta \nu,$$

где C – постоянная вискозиметра, мм²/с²; t – время истечения, с; g – ускорение свободного падения в месте определения кинематической вязкости, м/с²; g_n – нормальное ускорение свободного падения, равное 9,8 м/с²; $\Delta \nu$ – поправка на кинетическую энергию.

Ускорение свободного падения в месте определения кинематической вязкости можно определить как

$$g = 9,780318 \left(1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi \right) - 2 \cdot 10^{-6} h,$$

где φ – географическая широта места, °; h – высота над уровнем моря, м.

Поправка на кинетическую энергию $\Delta \nu$ (мм/с) учитывается только в случаях определения кинематической вязкости менее 10 мм²/с или времени истечения менее 200 с:

$$\Delta \nu = \frac{E}{t^2},$$

где E – коэффициент кинетической энергии, мм²·с.

В остальных случаях поправка на кинетическую энергию пренебрежительно мала, и ее принимают равной нулю.

Коэффициент кинетической энергии E :

$$E = \frac{0,0166 V^{3/2}}{L \cdot (C \cdot D)^{1/2}},$$

где V – объем измерительного резервуара, мм³; L – длина капилляра, мм; D – диаметр капилляра, мм.

Динамическая вязкость

Динамическая вязкость определяет величину сопротивления текучести жидкости при перемещении ее слоя площадью 1 см^2 на расстояние в 1 см со скоростью 1 см/с . В СИ (Международной системе единиц) данный показатель измеряется в $\text{Па}\cdot\text{с}$. Чем выше вязкость жидкости, тем больше время ее истечения. С точки зрения физики динамическая вязкость обозначает потерю давления за единицу времени. У жидкостей данный параметр снижается при росте температуры и повышается при увеличении давления.

Оборудование

Для измерения динамической вязкости используется следующее оборудование (рис. 2.4): ротационный вискозиметр 1 Brookfield DV3T-LV (диапазон измерений $1 \dots 6 \cdot 10^6 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, точность $\pm 1 \%$), термостат жидкостный 2 Termex КРИО-ВТ-12-1 (рабочая жидкость – Тосол А-40, диапазон рабочих температур $-30 \dots +200 \text{ }^\circ\text{C}$, точность поддержания температуры $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$) и персональный компьютер 3 с программным обеспечением Brookfield Rheocalc T. Исследуемая жидкость наливается в емкость 4.



*Рис. 2.4. Внешний вид оборудования для измерения динамической вязкости:
1 – ротационный вискозиметр; 2 – термостат жидкостный; 3 – ПК;
4 – емкость с исследуемым образцом; 5 – SSA-адаптер; 6 – шпindelь;
7 – внешний контур термостата; 8 – термопара*

Емкость 4 помещается в Small Sample Adapter (SSA-адаптер) 5, предназначенный для измерения вязкости на образцах малого объема, от 2 до 16 мл, с помощью шпинделя 6 SC4-18. Для поддержания постоянной температуры образца к SSA-адаптеру подключается внешний контур 7 термостата 2. Контроль температуры обеспечивается с помощью встроенной в SSA-адаптер термопары 8 (диапазон рабочих температур $-15 \dots +100 \text{ }^\circ\text{C}$).

Техническое использование метода

В ПО Brookfield Rheocalc T задаются следующие параметры измерений: диапазон частот вращения шпинделя, количество измеряемых точек, время и количество измерений при одной частоте вращения. Диапазон скоростей сдвига подбирается индивидуально для каждого образца так, чтобы крутящий момент находился в диапазоне 10...100 %. Ротационный вискозиметр Brookfield DV3T-LV использует стандартный принцип ротационной вискозиметрии. Шпиндель вращается в исследуемой жидкости с постоянной скоростью. Вязкое трение жидкости о шпиндель определяется по закручиванию калибровочной пружины. Угол поворота пружины измеряется датчиком угла вращения. Измерение вязкости осуществляется посредством автоматического пересчета крутящего момента, необходимого для вращения шпинделя прибора с постоянной скоростью при погружении его в исследуемую жидкость.

Пример использования метода

Различают ньютоновские и неньютоновские жидкости (рис. 2.5).

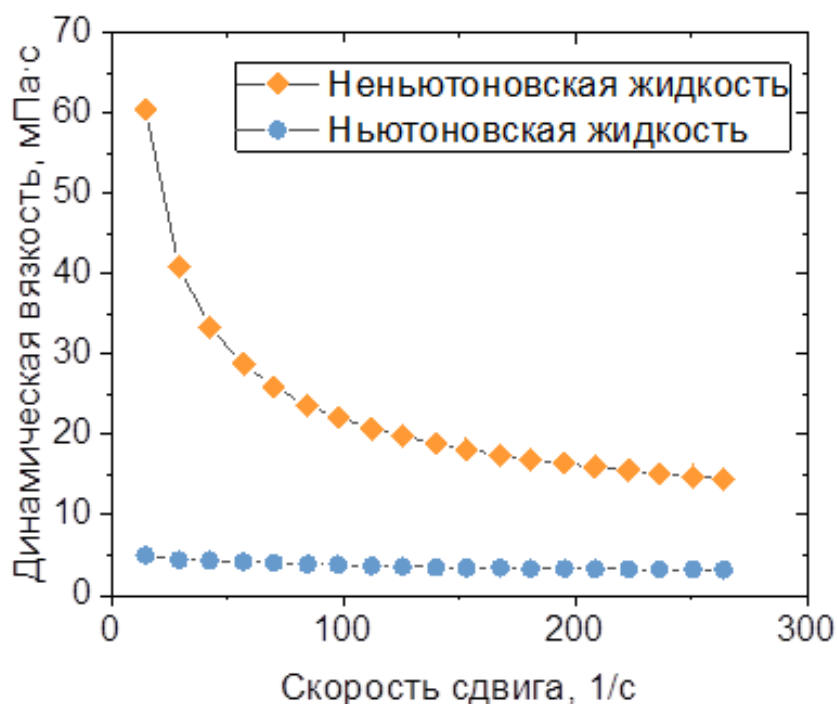


Рис. 2.5. Поведение ньютоновской и неньютоновской жидкости при изменении скорости сдвига

Ньютоновская жидкость характеризуется постоянным значением вязкости при изменении скорости сдвига. В свою очередь, для неньютоновской жидкости характерна вязкости от градиента скорости сдвига (подробнее о ньютоновских и неньютоновских жидкостях см. в п. 2.1.2).

Напряжение сдвига

Напряжение сдвига – это сила, прикладываемая к верхнему слою ламинарно текущей жидкости, вызывающая смещение нижележащих слоев относительно друг друга в направлении прикладываемой силы.

Оборудование

Для измерения напряжения сдвига используется следующее оборудование (рис. 2.4): ротационный вискозиметр 1 Brookfield DV3T-LV (диапазон измерений $1 \dots 6 \cdot 10^6$ мПа·с, точность ± 1 %), термостат жидкостный 2 Termex КРИО-ВТ-12-1 (рабочая жидкость – Тосол А-40, диапазон рабочих температур $-30 \dots +200$ °С, точность поддержания температуры $\pm 0,1$ °С) и персональный компьютер 3 с программным обеспечением Brookfield Rheocalc T. Исследуемая жидкость наливается в емкость 4, которая помещается в Small Sample Adapter (SSA-адаптер) 5, предназначенный для измерения вязкости на образцах малого объема, от 2 до 16 мл, с помощью шпинделя 6 SC4-18. Для поддержания постоянной температуры образца к SSA-адаптеру подключается внешний контур 7 термостата. Контроль температуры обеспечивается с помощью встроенной в SSA-адаптер термопары 8 (диапазон рабочих температур $-15 \dots +100$ °С).

Техническое использование метода

В ПО Brookfield Rheocalc T задаются следующие параметры измерений: диапазон частот вращения шпинделя, количество измеряемых точек, время и количество измерений при одной частоте вращения. Диапазон скоростей сдвига подбирается индивидуально для каждого образца так, чтобы крутящий момент находился в диапазоне 10...100 %.

Пример использования метода

Все реальные жидкости характеризуются вязкостью, сжимаемостью, сопротивлением, растягивающим и сдвигающим усилиями и достаточной подвижностью, т. е. наличием сил трения и касательных напряжений. По особенностям проявления своих свойств жидкости подразделяются на ньютоновские и неньютоновские. На рис. 2.6 представлены так называемые кривые течения – графики зависимости между напряжением сдвига и скоростью сдвига для разных типов жидкости. С помощью кривой течения нагляднее всего представлять реологические модели.

Для ньютоновской жидкости (рис. 2.6, кривая 4) вязкость, по определению, зависит только от температуры и давления (а также от химического состава, если жидкость не является беспримесной) и не зависит от сил, действующих на неё. К ньютоновским жидкостям относятся однородные чистые жидкости (и их смеси) с низкой молекулярной массой, например пресная и морская вода, дизельное топливо, минеральные и синтетические масла. Ньютоновские жидкости подчиняются в своём

течении закону вязкого трения Ньютона, описываемому следующим уравнением:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}, \quad (2.1)$$

где τ – касательное напряжение, вызываемое жидкостью (напряжение сдвига), Па; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; du/dy – градиент скорости в направлении, перпендикулярном направлению сдвигу (скорость сдвига), с^{-1} .

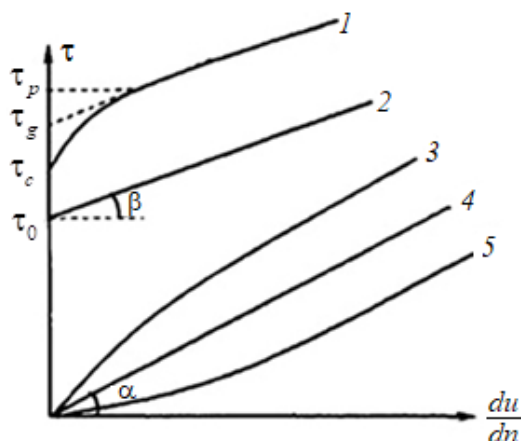


Рис. 2.6. Кривые течения жидкостей:

1 – вязкопластичная; 2 – бингамовская; 3 – псевдопластичная;
4 – ньютоновская; 5 – дилатантная

Если жидкости не подчиняются закону вязкого трения Ньютона, т. е. если касательное напряжение, вызываемое жидкостью, не пропорционально градиенту скорости относительного движения жидкости и выражается более сложными зависимостями, чем уравнение (2.1), то такие жидкости называют неньютоновскими. Такие жидкости обладают пределом текучести (начальное напряжение сдвига $\tau_0 \neq 0$). Неньютоновскими являются многокомпонентные жидкости, которые содержат в своём составе компоненты, значительно изменяющие вязкость жидкости и даже кардинально меняющие саму природу внутреннего трения. Среди неньютоновских жидкостей принято выделять вязкопластичные, псевдопластичные и дилатантные жидкости.

Вязкопластичные (рис. 2.6, кривая 1) и бингамовские (рис. 2.6, кривая 2) жидкости характеризуются тем, что под воздействием небольшого внешнего напряжения ведут себя как твердые тела. При приложении напряжения, превышающего предел текучести, поведение данных жидкостей становится похоже на поведение ньютоновской жидкости. Причиной такого поведения является то, что они имеют пространственную жёсткую внутреннюю структуру, сопротивляющуюся любым внутренним напряжениям, меньшим критической величины. При превышении напряжением

критического значения структура вязкопластичной жидкости разрушается, и она ведет себя как ньютоновская жидкость. При снижении напряжения ее структура восстанавливается. Вязкопластичные жидкости характеризуются уменьшением эффективной вязкости с возрастанием скорости сдвига. К такого типа жидкостям относятся густые суспензии: буровой раствор, масляная краска, зубная паста, глинистые и цементные растворы с добавками, торфяная масса и т. п. В составе могут присутствовать высокомолекулярные соединения (вязкопластичная жидкость) или твердые частицы (бингамовская жидкость). Уравнение течения бингамовской и вязкопластичной жидкости имеет одинаковый линейный вид:

$$\tau = \tau_d + \eta \gamma,$$

где τ_d – динамическое напряжение сдвига, Па; η – пластическая вязкость, Па·с; γ – скорость сдвига, с⁻¹.

Псевдопластичные жидкости (рис. 2.6, кривая 3), в отличие от вязкопластичных, не обнаруживают предела текучести. Они проявляют ньютоновское поведение при самых малых значениях напряжения сдвига. Для этих жидкостей вязкость постепенно снижается с ростом скорости сдвига. К псевдопластичным жидкостям относятся концентрированные растворы и расплавы многих полимеров с длинными цепями. В состоянии покоя цепи беспорядочно спутаны. Когда же суспензия начинает двигаться, цепи имеют тенденцию выстраиваться параллельно направлению течения, что приводит к снижению вязкости, причем эта тенденция усиливается с повышением скорости сдвига.

Дилатантные жидкости (рис. 2.6, кривая 5), как и псевдопластичные, не обнаруживают предела текучести. В то же время у этих жидкостей, в отличие от псевдопластичных, вязкость повышается с ростом скорости сдвига. Дилатантный эффект наблюдается в суспензиях с большим содержанием твердой дисперсной фазы. Такие суспензии при низких скоростях сдвига слоёв относительно друг друга действуют как смазки, способны легко перетекать. Однако при высоких скоростях жидкая фаза суспензий не успевает заполнять свободные пространства, образующиеся между движущимися частичками, поэтому трение между частичками сильно возрастает, что приводит к увеличению вязкости. Такой эффект можно наблюдать, например, в крахмальном клейстере.

Уравнение течения псевдопластичных и дилатантных жидкостей описывается уравнением степенного закона:

$$\tau = K \gamma^n,$$

где K – коэффициент консистенции, Па·с ^{n} ; n – показатель степенной зависимости (показатель нелинейности).

Значение показателя n указывает на степень неньютоновского поведения жидкости в данном диапазоне скоростей сдвига. Чем меньше n , тем больше истончается жидкость под воздействием сдвига в данном диапазоне скоростей сдвига и тем менее нелинейным является график зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига. В зависимости от значения n можно выделить три различных типа реологического поведения жидкости:

- 1) $n < 1$: псевдопластинная жидкость, «разжижается» при сдвиге;
- 2) $n = 1$: ньютоновская жидкость, следовательно, $K = \mu$.
- 3) $n > 1$: дилатантная жидкость, загустевает при сдвиге.

Степенная модель имеет преимущества в учёте нелинейных составляющих, но она недостаточно хорошо описывает реологические свойства буровых растворов при низких скоростях сдвига, потому что не предсказывает существование характерного для буровых растворов предела текучести. Для учета напряжения, необходимого для инициации движения жидкости (предела текучести), можно использовать модифицированный степенной закон, а именно модель Гершеля–Балкли. Математически модель Гершеля–Балкли записывается следующим образом:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n,$$

где τ_0 – начальное напряжение сдвига, Па; K – коэффициент консистенции, Па·с ^{n} ; n – показатель степенной зависимости (показатель нелинейности) [3, 40–43].

Измерение реологических характеристик при разных температурах

Техническое использование метода

Для измерения реологических характеристик на термостате Termex КРИО-ВТ-12-1 задается необходимая температура, если она отличается от комнатной (см. рис. 2.4). Перед непосредственным измерением образцы выдерживают в SSA-адаптере в течение 10 минут для установления желаемой температуры. Цилиндрический корпус SSA-адаптера сконструирован таким образом, чтобы создавать изотермическую среду вокруг исследуемого образца и изменять его температуру. В боковую стенку SSA-адаптера встроены два фитинга для подсоединения шлангов внешнего контура термостата. Подача из термостата осуществляется через нижний патрубок до полного заполнения внутренней полости SSA-адаптера теплоносителем заданной температуры. После заполнения полости SSA-адаптера теплоноситель возвращается в ванну термостата через верхний патрубок [17, 20, 44].

2.2. Поверхностные характеристики жидкости

2.2.1. Коэффициент поверхностного натяжения

Метод кольца Дю Нуи

Преимущества метода кольца Дю Нуи:

- большое количество международных стандартов для измерения поверхностного и межфазного натяжения методом кольца;
- большое количество литературных данных, полученных на основе метода кольца, что позволяет использовать данный метод для сравнения;
- длина смачивания кольца больше, чем у пластины, в результате при работе с кольцом на весы действует бóльшая сила, следовательно, точность измерения выше. Этот эффект не влияет на результаты измерения поверхностного натяжения, но небольшие значения межфазного натяжения могут быть измерены более точно методом кольца;
- некоторые вещества, например катионные поверхностно-активные вещества (ПАВ), показывают низкие смачивающие свойства на пластине. В таких случаях контакт между кольцом и поверхностью более очевиден, чем между пластиной и поверхностью.

Оборудование

Для измерения коэффициента поверхностного натяжения методом кольца Дю Нуи используется следующее оборудование (рис. 2.7): тензиометр 1 Kruss K20 (диапазон измерений 1...999 мН/м; разрешение 0,01 мН/м), термостат жидкостный 2 Termex КРИО-ВТ-12-1 (диапазон рабочих температур –30...+200 °С, точность поддержания температуры $\pm 0,1$ °С, рабочая жидкость – Тосол А-40) и кольцо Дю Нуи 3. Исследуемая жидкость наливается в сосуд для образцов 4 SV20. Сосуд 4 помещается на столик 5, который может перемещаться вверх-вниз с помощью регулятора уровня 6. Для поддержания постоянной температуры образца емкость 4 помещается в термостатируемую рубашку 7. К термостатируемой рубашке 7 подключается внешний контур 8 термостата 2. Контроль температуры обеспечивается с помощью встроенной в SSA-адаптер термопары 9 (диапазон рабочих температур –15...+100 °С).



Рис. 2.7. Внешний вид оборудования для измерения поверхностного и межфазного натяжения методом кольца Дю Нуи:

- 1 – тензиометр; 2 – термостат жидкостный; 3 – кольцо Дю Нуи;
 4 – сосуд для образцов; 5 – подвижный столик;
 6 – регулятор уровня; 7 – термостатируемая рубашка;
 8 – внешний контур термостата; 9 – термопара

Техническое использование метода

1. Опустить столик для образца вниз.
2. Аккуратно закрепить очищенное кольцо на крюке датчика силы.
3. Налить жидкость в очищенный сосуд для образцов и поместить последний на столик.
4. В основном меню выбрать метод кольца Дю Нуи (*Du Nouy Ring*).
5. Проверить и откорректировать, при необходимости, текущие параметры: *Id.-Number*, *Reading limit*, *Stage Speed*, *St.-Dev.*, *Density Diff.*, *Correction Harkins&Jordan*.
6. Поднять столик для образца вручную вверх, чтобы максимально быстро сократить расстояние между кольцом и поверхностью жидкости, и затем с помощью кнопок отрегулировать нужное положение, так, чтобы кольцо оказалось точно над поверхностью жидкости (смотреть зеркальное отражение). Перед следующим шагом необходимо подождать, пока кольцо перестанет двигаться, а поверхность жидкости успокоится. Кольцо не должно касаться поверхности жидкости.

7. Нажать кнопку *Tare* для обнуления веса кольца на воздухе. Подождать, пока в правом верхнем углу дисплея вес не станет 0,0000 г. После завершения данной процедуры перемещение столика выполняется вручную путем вращения регулятора уровня столика.

8. Повернуть вручную внутреннее кольцо так, чтобы метка совпала с нулем на шкале.

9. Путем вращения внешней ручки поднимать столик с сосудом, пока кольцо не будет погружено в жидкость приблизительно на 3 мм (ориентироваться по шкале вращаемой ручки), тем самым обмокнув кольцо в жидкость.

10. Путем вращения регулятора уровня опустить столик приблизительно на 3 мм, так, чтобы на поверхности жидкости был виден контур кольца.

11. Нажать *Start* для измерения поверхностного натяжения жидкости. Процесс измерения запускается автоматически и представляет собой серию измерений. После измерения на дисплее высветятся среднее значение поверхностного натяжения и стандартное отклонение.

12. Сохранить результаты можно нажатием кнопки *Save*.

13. Нажать кнопку *OK*.

Примечание. Кнопка *Memory*, расположенная в правом нижнем углу, может использоваться для вызова сохраненных измерений.

Метод пластины Вильгельма

Преимущества метода пластины Вильгельма:

- не нужно вводить поправку на измеренное значение;
- не нужно знать плотность жидкости для получения результата;
- при измерении межфазного натяжения пластина должна только коснуться поверхности жидкости, а не погрузиться в нее, как в методе кольца, в результате не происходит перемешивания системы;
- метод пластины – статическое измерение, пластина не движется после соприкосновения с жидкостью.

Оборудование

Для измерения поверхностного и межфазного натяжения методом пластины Вильгельма используется следующее оборудование (рис. 2.8): тензиометр 1 Kruss K20 (диапазон измерений 1...999 мН/м; разрешение 0,01 мН/м), термостат жидкостный 2 Termex КРИО-ВТ-12-1 (диапазон рабочих температур –30...+200 °С, точность поддержания температуры ±0,1 °С, рабочая жидкость – Тосол А-40) и пластина Вильгельма 3. Исследуемая жидкость наливается в сосуд для образцов 4 SV20. Сосуд помещается на столик 5, который может перемещаться вверх-вниз с помощью регулятора уровня 6. Для поддержания постоянной температуры

образца емкость 4 помещается в термостатируемую рубашку 7. К термостатируемой рубашке подключается внешний контур 8 термостата 2. Контроль температуры обеспечивается с помощью встроенной в SSA-адаптер термопары 9 (диапазон рабочих температур $-15...+100\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Рис. 2.8. Внешний вид оборудования для измерения поверхностного и межфазного натяжения методом пластины Вильгельма:
 1 – тензиометр; 2 – термостат жидкостный; 3 – пластина Вильгельма;
 4 – сосуд для образцов; 5 – подвижный столик; 6 – регулятор уровня;
 7 – термостатируемая рубашка; 8 – внешний контур термостата; 9 – термопара

Техническое использование метода

1. Опустить столик для образца вниз.
2. Аккуратно закрепить очищенную пластину на крюке датчика силы.
3. Налить жидкость в очищенный сосуд для образцов и поместить последний на столик.
4. В основном меню выбрать метод пластины Вильгельма (Wilhelmy Plate).
5. Проверить и откорректировать при необходимости текущие параметры: *Id.-Number*, *Reading limit*, *Stage Speed*, *St.-Dev.*, *Interval*, *Wetted Len*.
6. Поднять столик для образца вручную вверх, чтобы максимально быстро сократить расстояние между пластиной и поверхностью жидкости, и затем с помощью кнопок отрегулировать нужное положение так, чтобы пластина оказалась точно над поверхностью жидкости (смотреть

зеркальное отражение). Перед следующим шагом необходимо подождать, пока пластина перестанет двигаться, а поверхность жидкости успокоится. Пластина не должна касаться поверхности жидкости.

7. Нажать кнопку *Tare* для обнуления веса пластины на воздухе. Подождать, пока в правом верхнем углу дисплея вес не станет 0,0000 г. После выполнения данной процедуры перемещение столика выполнять вручную только при вращении регулятора уровня столика. Нажать кнопку *Surface Detect*. На дисплее появится надпись «Surface detecting is on progress...». Столик автоматически будет двигаться вверх до тех пор, пока пластина не соприкоснется с поверхностью. В момент контакта столик остановится.

8. Повернуть вручную внутреннее кольцо так, чтобы метка совпала с нулем на шкале.

9. Путем вращения внешней ручки поднимать столик с сосудом, пока пластина не будет погружена в жидкость приблизительно на 3 мм (ориентироваться по шкале вращаемой ручки).

10. Путем вращения регулятора уровня вернуть столик в нулевое положение, т. е. так, чтобы метка на внутреннем кольце снова совпала с нулем на шкале.

11. Нажать *Start* для измерения поверхностного натяжения жидкости. Процесс измерения запускается автоматически и представляет собой серию измерений. В конце на дисплее высветится среднее значение поверхностного натяжения, стандартное отклонение и установки.

12. Сохранить результаты можно нажатием кнопки *Save*.

13. Нажать кнопку *OK*.

Примечание. Кнопка *Memory*, расположенная в правом нижнем углу, может использоваться для вызова сохраненных измерений.

2.2.2. Коэффициент межфазного натяжения

Метод кольца Дю Нуи

Оборудование

Для измерения поверхностного и межфазного натяжения методом кольца Дю Нуи используется следующее оборудование (рис. 2.7): тензиометр 1 Kruss K20 (диапазон измерений 1...999 мН/м; разрешение 0,01 мН/м), термостат жидкостный 2 Термех КРИО-ВТ-12-1 (диапазон рабочих температур –30...+200 °С, точность поддержания температуры ±0,1 °С, рабочая жидкость – Тосол А-40) и кольцо Дю Нуи 3. Исследуемая жидкость наливается в сосуд для образцов 4 SV20. Сосуд помещается на столик 5, который может перемещаться вверх-вниз с помощью регулятора уровня 6. Для поддержания постоянной температуры образца емкость 4 помещается в термостатируемую рубашку 7. К термостатируемой рубашке подключается

внешний контур 8 термостата 2. Контроль температуры обеспечивается с помощью встроенной в SSA-адаптер термопары 9 (диапазон рабочих температур $-15...+100^{\circ}\text{C}$).

Техническое использование метода

1. Опустить столик для образца вниз.
2. Аккуратно закрепить очищенное кольцо на крюке датчика силы.
3. Налить жидкость в очищенный сосуд для образцов и поместить последний на столик.
4. В основном меню выбрать метод кольца Дю Нуи (*Du Nouy Ring*).
5. Проверить и откорректировать, при необходимости, текущие параметры: *Id.-Number*, *Reading limit*, *Stage Speed*, *St.-Dev.*, *Density Diff.*, *Correction Harkins&Jordan*. Ввести разность плотностей тяжелой и легкой фаз в строку *Density Diff.*
6. Поднять столик для образца вручную вверх, чтобы кольцо погрузилось в легкую фазу (примерно на 3 мм). Перед следующим шагом необходимо подождать, пока поверхность жидкости успокоится.
7. Нажать кнопку *Tare* для обнуления веса пластины в легкой фазе. Подождать, пока в правом верхнем углу дисплея вес не станет 0,0000 г. После выполнения данной процедуры перемещение столика выполнять вручную только при вращении регулятора уровня столика.
8. Опустить платформу для образца и удалить сосуд с легкой фазой. Снять кольцо с крюка и очистить его. Затем вновь закрепить кольцо на крюке.
9. Наполнить очищенный сосуд для образца на одну треть тяжелой фазой и поместить на столик.
10. Поднять столик вверх так, чтобы кольцо погрузилось на 2...3 мм в тяжелую фазу. Перед следующим шагом необходимо подождать, пока кольцо перестанет двигаться, а поверхность жидкости успокоится. Кольцо не должно касаться поверхности жидкости.
11. Далее аккуратно налить в сосуд легкую фазу поверх тяжелой. Уровень заполнения должен составлять около 2 мм.
12. Нажать *Start* для измерения межфазного натяжения жидкости. Процесс измерения запускается автоматически и представляет собой серию измерений. В конце на дисплее высветятся среднее значение межфазного натяжения и стандартное отклонение.
13. Сохранить результаты нажатием кнопки *Save*.
14. Нажать кнопку *OK*.

Примечание. Кнопка *Memory*, расположенная в правом нижнем углу, может использоваться для вызова сохраненных измерений.

Метод пластины Вильгельма

Оборудование

Для измерения поверхностного и межфазного натяжения методом пластины Вильгельма используется следующее оборудование (рис. 2.8): тензиометр 1 Kruss K20 (диапазон измерений 1...999 мН/м; разрешение 0,01 мН/м), термостат жидкостный 2 Termex КРИО-ВТ-12-1 (диапазон рабочих температур $-30...+200$ °С, точность поддержания температуры $\pm 0,1$ °С, рабочая жидкость – Тосол А-40) и пластину Вильгельма 3. Исследуемая жидкость наливается в сосуд для образцов 4 SV20. Сосуд помещается на столик 5, который может перемещаться вверх-вниз с помощью регулятора уровня 6. Для поддержания постоянной температуры образца емкость 4 помещается в термостатируемую рубашку 7. К термостатируемой рубашке подключается внешний контур 8 термостата 2. Контроль температуры обеспечивается с помощью встроенной в SSA-адаптер термопары 9 (диапазон рабочих температур $-15...+100$ °С).

Техническое использование метода

1. Опустить столик для образца вниз.
2. Аккуратно закрепить очищенную пластину на крюке датчика силы.
3. Налить жидкость в очищенный сосуд для образцов и поместить последний на столик.
4. В основном меню выбрать метод пластины Вильгельма (Wilhelmy Plate).
5. Проверить и откорректировать, при необходимости, текущие параметры: *Id.-Number*, *Reading limit*, *Stage Speed*, *St.-Dev.*, *Interval*, *Wetted Len.*
6. Поднять столик для образца вручную вверх, чтобы пластина полностью погрузилась в легкую фазу (при выполнении нескольких серий экспериментов глубина погружения должна быть одинаковой во всех измерениях). Перед следующим шагом необходимо подождать, пока поверхность жидкости не успокоится.
7. Нажать кнопку *Tare* для обнуления веса пластины в легкой фазе. Подождать, пока в правом верхнем углу дисплея вес не станет 0,0000 г. После выполнения данной процедуры перемещение столика выполнять вручную только при вращении регулятора уровня столика.
8. Опустить платформу для образца и удалить сосуд с легкой фазой. Снять пластину с крюка и очистить ее. Затем вновь закрепить пластину на крюке.
9. Наполнить очищенный сосуд для образца на одну треть тяжелой фазой и поместить на столик.
10. Поднять столик вручную вверх, чтобы максимально быстро сократить расстояние между пластиной и поверхностью жидкости, и затем

с помощью кнопок отрегулировать нужное положение так, чтобы пластина оказалась точно над поверхностью тяжелой фазы (смотреть зеркальное отражение). Перед следующим шагом необходимо подождать, пока пластина перестанет двигаться, а поверхность жидкости успокоится. Пластина не должна касаться поверхности жидкости.

11. Нажать кнопку *Surface Detect*. На дисплее появится надпись «Surface detecting is on progress...». Столик автоматически будет двигаться вверх до тех пор, пока пластина не соприкоснется с поверхностью. В момент контакта столик остановится.

12. Повернуть ручную внутреннее кольцо так, чтобы метка совпала с нулем на шкале.

13. Путем вращения внешней ручки поднимать столик с сосудом, пока пластина не будет погружена в жидкость приблизительно на 3 мм (ориентироваться по шкале вращаемой ручки).

14. Аккуратно налить в сосуд легкую фазу поверх тяжелой. Уровень заполнения зависит от глубины погружения пластины во время предыдущей процедуры обнуления, т. е. если при обнулении массы пластины в легкой фазе уровень заполнения был выше верхней грани пластины, то и добавление легкой фазы поверх тяжелой следует выполнять так, чтобы уровень заполнения легкой фазы был выше верхней грани пластины.

15. Путем вращения регулятора уровня вернуть столик в нулевое положение, т. е. так, чтобы метка на внутреннем кольце снова совпала с нулем на шкале.

16. Нажать *Start* для измерения межфазного натяжения жидкости. Процесс измерения запускается автоматически и представляет собой серию измерений. В конце на дисплее высветится среднее значение межфазного натяжения, стандартное отклонение и установки.

17. Сохранить результаты нажатием кнопки *Save*.

18. Нажать кнопку *OK*.

Примечание. Кнопка *Memory*, расположенная в правом нижнем углу, может использоваться для вызова сохраненных измерений.

Метод вращающейся капли

Метод вращающейся капли применяется для определения сверхнизкого межфазного натяжения (<1 мН/м), характерного для органических систем, например нефтепродуктов. В этом случае методы кольца и пластины не подходят, так как силы взаимодействия очень малы, а межфазная поверхность нестабильна. Поэтому межфазную поверхность разрушают до такой степени, чтобы можно было легко определить результирующие силы. Для метода вращающейся капли против сил поверхностного натяжения используют центробежные силы.

Оборудование

Для измерения межфазного натяжения методом вращающейся капли используется тензиометр SDT Spinning Drop Kruss (диапазон измерений $10^{-6} \dots 2000$ мН/м, разрешение 10^{-6} мН/м) (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Внешний вид тензиометра SDT Spinning Drop Kruss для измерения межфазного натяжения методом вращающейся капли

Техническое использование метода

Межфазное натяжение на границе раздела фаз жидкость–жидкость определяется методом вращающейся капли с использованием тензиометра SDT Spinning Drop, Kruss при 25 °С. Капля легкой фазы (обычно масло) вводится с помощью капилляра в толщу тяжелой фазы. Капилляр вращается вдоль своей оси с определенной частотой. При частоте 0 Гц капля будет иметь форму шара. При увеличении частоты молекулы межфазного слоя будут подвергаться воздействию центробежных сил, направленных перпендикулярно оси вращения капилляра. Силы межфазного натяжения равны (но точки приложения отличаются) центробежной силе, а молекулы в межфазном слое двигаются по определенной траектории радиусом r . Благодаря этому факту капля вытягивается вдоль оси вращения до достижения равновесия. На основе частоты вращения капилляра, плотностей фаз и радиуса вытянутой капли программное обеспечение тензиометра рассчитывает межфазное натяжение σ_{LL} (Н/м) по уравнению Воннегута:

$$\sigma_{LL} = \frac{\Delta\rho\omega^2 R^3}{4},$$

где $\Delta\rho$ – разница плотностей двух жидких фаз, кг/м³; ω – угловая скорость, рад/с; R – радиус вытянутой капли, м [3].

2.3. Характеристики биодизельного топлива

2.3.1. Цетановое число

Цетановое число биодизельного топлива указывает на углеродные цепи жирных кислот и насыщенные молекулы, присутствующие в биодизельном топливе. Низкое значение цетанового числа способствует увеличению задержки зажигания при впрыске топлива в цилиндр [45]. Из-за задержки зажигания топливо накапливается, что приводит к увеличению давления в цилиндре. Также установлено, что низкие значения цетанового числа приводят к снижению максимального крутящего момента двигателя [46].

Оборудование

Для определения цетанового числа используется портативный октанометр ОКТАН-ИМ (диапазон измерений 30...60 ед., предел допускаемой абсолютной погрешности измерений $\pm 2,0$ ед.), рис. 2.10.

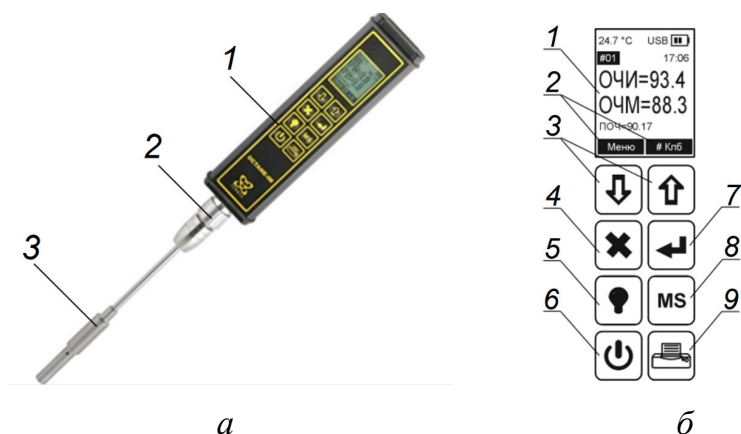


Рис. 2.10. Внешний вид октанометра ОКТАН-ИМ (а):

1 – электронный блок; 2 – кожух; 3 – датчик;

лицевая панель электронного блока (б):

1 – жидкокристаллический дисплей; 2 – пиктограммы, обозначающие функциональное назначение кнопок 3; 3 – функциональные кнопки, их назначение определяется пиктограммами; 4 – кнопка отмены текущего действия; 5 – кнопка включения/выключения подсветки дисплея; 6 – кнопка включения / выключения октанометра; 7 – кнопка подтверждения текущего действия; 8 – кнопка записи результатов измерений в память октанометра / сохранения калибровки / сохранения даты; 9 – кнопка печати текущих результатов измерений / содержимого журнала / данных калибровки

Перед началом работы следует соединить датчик октанометра 3 с электронным блоком 1. Для этого необходимо совместить ключи на разъеме электронного блока с его ответной частью датчика и вставить до щелчка разъем датчика вглубь разъемного соединения электронного блока. Затем положение датчика фиксируется с помощью резьбового соединения кожуха 2.

Техническое использование метода

Для включения октанометра нажать кнопку 6 (рис. 2.10). Октанометр включится при условии, что аккумуляторная батарея имеет достаточный уровень заряда. Для измерения цетанового числа необходимо выбрать соответствующий режим измерений. Для этого следует войти в меню нажатием кнопки *Вниз* 3 и выбрать пункт меню «Выбор типа измерения: октан/цетан». Нажатием кнопки 7 войти в подменю и кнопками 3 установить курсор на тип измерений *цетан*. Нажатием кнопки 7 подтвердить выбор.

Для выполнения измерений датчик октанометра погружается в пробирку с образцом биотоплива минимум на 90 мм. Необходимо сделать несколько вертикальных возвратно-поступательных движений для заполнения датчика. Результат измерения отобразится на дисплее 1 в графе «ЦЧ = ...». После проведения измерений датчик необходимо продуть сжатым воздухом для удаления остатков образца.

2.3.2. Температура вспышки в закрытом тигле

Температура вспышки в закрытом тигле – это минимальная температура, при которой над поверхностью топлива образуются пары в концентрации, необходимой для самовозгорания топлива при наличии внешнего источника, т. е. искры или пламени. Температура вспышки биотоплива обычно выше, чем у дизельного топлива, из-за присутствия метиловых или этиловых эфиров жирных кислот, которые являются нелетучими [47]. Это делает биотопливо более безопасным при хранении, транспортировке и использовании.

Оборудование

Для определения температуры вспышки в закрытом тигле используется аппарат полуавтоматический ПЭ-ТВЗ (рис. 2.11).

Техническое использование метода

Определение температуры вспышки в закрытом тигле производится по методу Пенски–Мартенса. Испытуемый образец нефтепродукта предварительно перемешивается в течение 5 минут и наливается в испытательный тигель 1 аппарата до метки. Тигель закрывается крышкой, в отверстие которой помещается термометр ТН 1-1 5. В запальное устройство 3 продевается жгут и наливается масло ГОСТ 8808-2000, после чего запальное устройство зажигается. С помощью кнопок управления мощностью нагревателя 8 устанавливается необходимая мощность, обеспечивающая нагрев продукта на 5...6 °С за 1 минуту. При этом перемешивающее устройство 4 вращается со скоростью 100 об/мин. Испытуемый образец нагревается таким образом, чтобы при непрерывном перемешивании происходило постоянное повышение температуры. Значение температуры испытуемого образца отображается на дисплее 7.



Рис. 2.11. Внешний вид аппарата полуавтоматического ПЭ-ТВЗ для определения температуры вспышки в закрытом тигле:

1 – испытательный тигель с крышкой; 2 – ручка тигля; 3 – запальное устройство; 4 – перемешивающее устройство; 5 – измерительный термометр; 6 – устройство поворота крышки; 7 – графический жидкокристаллический дисплей; 8 – кнопки управления мощностью нагревателя; 9 – индикатор подключения к электрической сети; 10 – индикатор работы мешалки; 11 – индикатор работы нагрева электрического нагревателя; 12 – кнопка сброса; 13 – кнопка опускания горящего запального устройства

Испытания на вспышку проводятся оператором через равные интервалы времени при повышении температуры испытуемого образца на 1 °С. Следует проводить испытания на вспышку при достижении температуры на 17 °С ниже предполагаемой температуры вспышки. Для проведения испытания нажимается кнопка опускания горящего запального устройства 13. При этом перемешивание прекращается, срабатывает устройство поворота крышки 6 и запальное устройство 3 опускается через отверстие в крышке тигля в паровое пространство на 1 секунду. Самую низкую температуру, при которой запальное устройство вызывает возгорание паров испытуемого образца нефтепродукта, а пламя распространяется по поверхности жидкости, регистрируют как температуру вспышки при фактическом барометрическом давлении. По завершении испытания нажимается кнопка сброса 12: мощность нагревателя сбрасывается до нуля, прекращаются нагрев и перемешивание. Необходимо погасить запальное устройство и извлечь тигель с испытательным образцом.

Зарегистрированную температуру необходимо привести к стандартному атмосферному давлению с помощью уравнения

$$T_{\text{в}} = T_0 + 0,25 \cdot (101,3 - p),$$

где $T_{\text{в}}$ – температура вспышки при атмосферном давлении, °С; T_0 – температура вспышки при барометрическом давлении окружающей среды, °С; p – барометрическое давление окружающей среды, кПа.

За результат испытаний следует принимать среднеарифметическое значение результатов трех измерений, округленное до целого числа, выраженное в градусах Цельсия.

2.3.3. Удельная теплота сгорания

Оборудование

Для определения удельной теплоты сгорания биотоплива используется следующее оборудование (рис. 2.12): адиабатический бомбовый калориметр АБК-1В (рис. 2.12, а), устройство заправки кислородом УЗК-30м (рис. 2.12, б), аналитические высокоточные весы Vibra AF 225DRCE и ПК.



а



б

Рис. 2.12. Внешний вид адиабатического бомбового калориметра АБК-1В (а) и устройства заправки кислородом УЗК-30м (б)

Техническое использование метода

При помощи аналитических весов определяются массы тигля, помещаемого в калориметрическую бомбу, топливного образца и запальной х/б нити. Масса топлива, помещаемого в тигель, может варьироваться в диапазоне 0,6...1,7 г. Для калорийных материалов (масла, нефтепродукты, дизельное топливо и др.) масса составляет около 0,6 г. Для поглощения продуктов сгорания на дно калориметрической бомбы добавляется 1 см³ дистиллированной воды. После помещения тигля с топливом в калориметрическую бомбу в нее закачивается кислород при помощи

УЗК-30м. Подача кислорода автоматически прекращается при достижении давления в бомбе 30 бар. После закачки кислорода калориметрическая бомба устанавливается в калориметр и начинается измерение.

2.3.4. Коррозия на медной пластине

Коррозионная активность и совместимость с неметаллическими материалами характеризует способность топлива вызывать коррозионные поражения металлов, набухание, разрушение или изменение свойств резиновых уплотнений, герметиков и других материалов. Это эксплуатационная характеристика позволяет оценить содержание коррозионно-активных веществ в топливе и стойкость различных металлов, резин и герметиков при контакте с ним.

Оборудование

Для анализа коррозии на медной пластине используется комплект приспособлений ТМП-К-6321 (рис. 2.13), предназначенный для размещения в термостате жидкостном ТМП (диапазон рабочих температур +20...+200 °С, точность поддержания температуры $\pm 0,1$ °С, рабочая жидкость – Тосол А-40).



Рис. 2.13. Внешний вид комплекта приспособлений для анализа коррозии на медной пластине

Техническое использование метода

Подготовленная медная пластина погружается в пробирку с образцом биодизельного топлива. Пробирка помещается в штатив из комплекта приспособлений ТМП-К-6321, опущенный в ванну термостата жидкостного ТМП, нагревается до 50 °С и выдерживается в течение трех часов. По истечении данного времени пластину вынимают, промывают и сравнивают с эталонами степени коррозии. Для каждого испытуемого об-

разца проводят не менее двух параллельных определений. Топливо считают не выдержавшим испытание, если хотя бы при одном определении на пластине образовался налет или пятна черного, коричневого или серо-стального цвета.

2.3.5. Масс-спектрометрия

Оборудование

Для проведения масс-спектрометрии используется следующее оборудование (рис. 2.14): ИК Фурье-спектрометр 1 Cary 630 (спектральный диапазон $7000 \dots 350 \text{ см}^{-1}$, спектральное разрешение $< 2 \text{ см}^{-1}$) и персональный компьютер 2 с программными пакетами Agilent MicroLab и SpectraGryph.

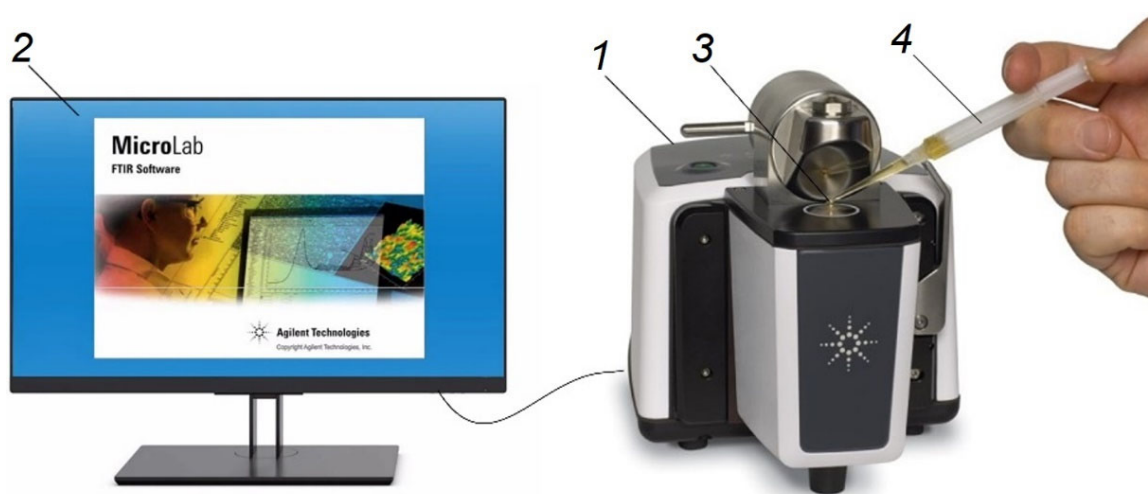


Рис. 2.14. Внешний вид оборудования для получения ИК-спектров:
1 – спектрометр; 2 – ПК; 3 – кристалл алмазный; 4 – пипетка

Техническое использование метода

Метод масс-спектроскопии основан на ионизации атомов и молекул, входящих в состав измеряемой жидкости, и регистрации спектра масс образовавшихся ионов. Проводить измерения с помощью ИК Фурье-спектрометра Cary 630 необходимо в соответствии с пошаговыми инструкциями, которые даются в ПО Agilent MicroLab. Первый шаг – очистка кристалла 3 с помощью спирта и ватного диска. После этого для подтверждения готовности системы к измерению спектрометром 1 выполняется проверка чистоты кристалла. Затем на кристалл 3 с помощью пипетки 4 опускается капля образца. Необходимо ввести название образца и запустить измерение. Измерение проводится автоматически и длится несколько минут. Результат измерения сохраняется в виде двух файлов с разрешениями .src и .a2r, которые могут быть открыты в ПО SpectraGryph для просмотра и редактирования.

Пример использования метода

Результатом измерений является инфракрасный спектр (ИК-спектр), который представляет собой графическое изображение зависимости величины пропускания инфракрасного излучения от длины волны (рис. 2.15). По ИК-спектру можно качественно и количественно оценить компонентный состав органических или неорганических веществ. По оси X располагаются длины волн, которые соответствуют различным компонентам. По оси Y – коэффициент пропускания, с помощью которого определяется концентрация компонента.

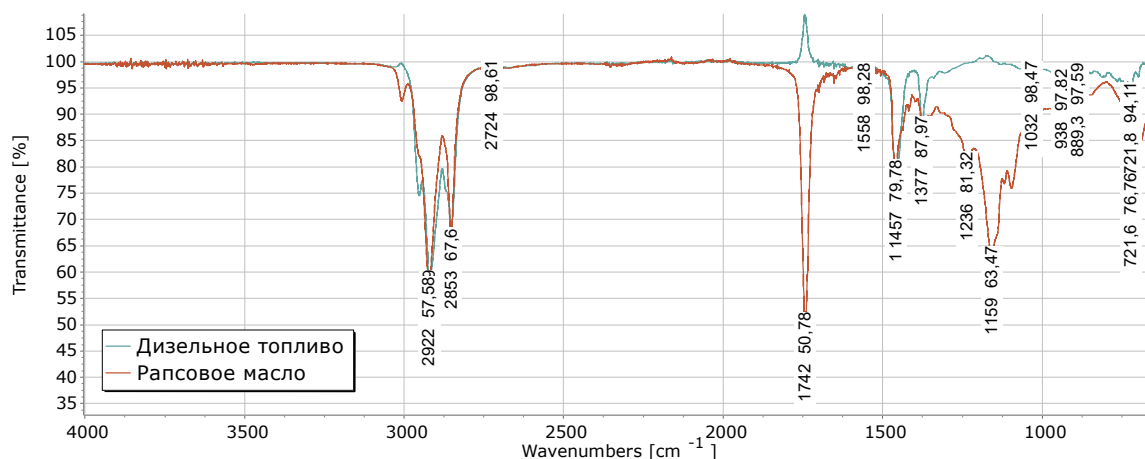


Рис. 2.15. Изображение ИК-спектра, полученное методом масс-спектрометрии

2.4. Характеристики эмульсий/микроэмульсий

2.4.1. Термодинамическая стабильность

Для изучения стабильности микроэмульсий, зависящей от температуры, применяется метод длительного выдерживания образцов при постоянных температурах.

Оборудование

Для проведения испытаний на термодинамическую стабильность микроэмульсий используется следующее оборудование: жидкостный термостат Termex КРИО-ВИС-Т-06-01 (диапазон рабочих температур $-30...+100$ °С, точность поддержания температуры $\pm 0,1$ °С, рабочая жидкость – Тосол А-40) и лабораторный термометр LT-300 (диапазон измерений $-50...+300$ °С, погрешностью $\pm 0,05$ °С).

Техническое использование метода

Пробирки с образцами микроэмульсий погружаются в ванну термостата Termex КРИО-ВИС-Т-06-01. Образцы выдерживаются при определенной температуре не менее 5 дней с шагом изменения температуры

1...5 °С. Температуры рабочей жидкости термостата и микроэмульсий контролируются с помощью лабораторных термометров LT-300. После каждого эксперимента фазовое состояние образцов микроэмульсий идентифицируется визуально и фиксируется для определения фазовых переходов. Соответствующие пороговые температуры представляют верхнюю (T_1) и нижнюю (T_2) точки помутнения микроэмульсий. При данных температурах образцы становятся непрозрачными. Это означает, что капли дисперсной фазы визуально становятся больше и происходит переход системы из однофазной в двухфазную (из микроэмульсии в эмульсию). Таким образом, температурный диапазон между точками T_1 и T_2 характеризует однофазное состояние микроэмульсий [48–50].

Пример использования метода

На рис. 2.16 приведены результаты проведения испытаний на термодинамическую стабильность микроэмульсий: термодинамически стабильный образец микроэмульсии (рис. 2.16, а) и образцы эмульгированного топлива с укрупняющимися (от нм до мкм) частицами дисперсной фазы (рис. 2.16, б, в).

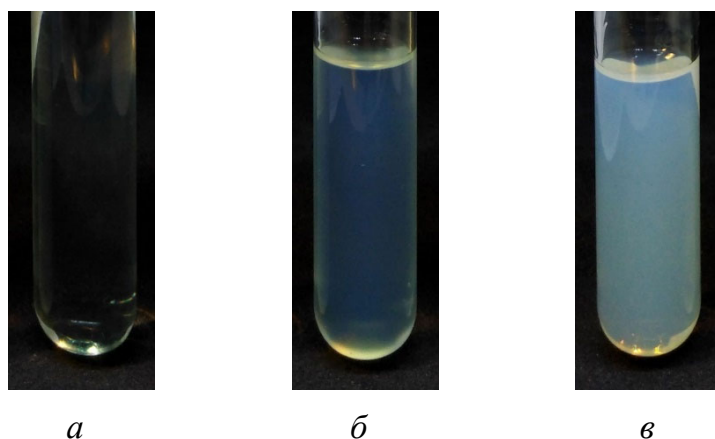


Рис. 2.16. Термодинамически стабильный образец микроэмульсии (а) и образцы эмульгированного топлива с укрупняющимися (от нм до мкм) частицами дисперсной фазы (б, в)

2.4.2. Размер капель дисперсной фазы эмульсий

Экспериментальный метод динамического рассеяния света (DLS) (или фотонная корреляционная спектроскопия) позволяет измерять размеры наночастиц и субмикронных частиц в жидких средах (например, размер частиц в суспензии или капель дисперсной фазы эмульсии), а также определять коэффициент диффузии дисперсных частиц в жидкости путем анализа корреляционной функции флуктуаций интенсивности рассеянного света. Зная коэффициент диффузии, можно рассчитать радиус наночастиц.

Броуновское движение дисперсных частиц или макромолекул в жидкости приводит к флуктуациям локальной концентрации частиц. Результатом этого являются локальные неоднородности показателя преломления и, соответственно, флуктуации интенсивности рассеянного света при прохождении лазерного луча через такую среду. Коэффициент диффузии частиц обратно пропорционален характерному времени релаксации флуктуаций интенсивности рассеянного света. Это характерное время, в свою очередь, есть время затухания экспоненциальной временной корреляционной функции рассеянного света, которая измеряется с помощью цифрового коррелятора.

Оборудование

Для определения профилей распределения размеров капель воды дисперсной фазы используется анализатор размера частиц Zetasizer Nano ZS (диапазон размеров частиц от 0,3 нм до 10 мкм) (рис. 2.17).



Рис. 2.17. Внешний вид анализатора размера частиц Zetasizer Nano ZS

Техническое использование метода

Профили распределения размеров капель воды дисперсной фазы определяются методом DLS при температуре 25 °С. Измерение производится сразу после изготовления эмульсий [3].

Пример использования метода

Полученные профили распределения размеров содержат информацию о максимальном ($D_{\max}$) и среднем диаметре по Заутеру (d_{32}) капель воды.

Средний диаметр по Заутеру – это диаметр капли, которая имеет такое же отношение объема к площади поверхности, что и общий объем всех капель по отношению к их общей площади поверхности. Как правило, в исследованиях величина d_{32} принимается за D_w – средний диаметр капель воды дисперсной фазы эмульсии [3].

2.5. Характеристики суспензий

2.5.1. Приготовление суспензий

Материалы

Для приготовления водоугольных суспензий используется следующее сырье. В качестве основной жидкой фазы (среды-носителя) суспензий используется дистиллированная вода (ДВ) с удельной электропроводностью не более 5 мкСм/см. В качестве твердых частиц используются коксующийся уголь и угольный шлам, представляющий собой сухие углеродсодержащие отходы флотации коксующегося угля после извлечения угольного концентрата.

В качестве функциональных добавок могут быть использованы: лигнитовый полимер EctaFlo SPHN – средство для снижения потерь жидкости при высоких температурах и регулятор реологических свойств бурового раствора; пирофосфат кислоты натрия – неорганический дефлокулянт и разбавитель, изготовленный в соответствии с ГОСТ 31686–2012; реагент на фосфат угля, представляющий собой композицию триполифосфата натрия и натриевых солей гуминовых кислот; модификатор поверхности частиц, представляющий собой вещество, изготовленное в соответствии с ТУ 2186-002-01538612-2004; эмульгатор прямых эмульсий Neonol AF 9-12, представляющий собой изононилфенол с 12 молями окиси этилена; вспомогательное вещество ОР-7, представляющее собой смесь моно- и диалкилфенолов с окисью этилена.

Приготовление

Перед смешиванием компонентов суспензии твердые частицы высушиваются в сушильной камере при температуре 105 °С в течение 2,5 ч. Высушенные твердые частицы измельчаются в высокоскоростной роторной мельнице Pulverisette 14 (конечная степень измельчения составляет 0,08...6,00 мм в зависимости от установленного сита; частота вращения ротора 6000...20 000 об/мин) в течение 1,5 мин. Для получения требуемой дисперсности измельченные частицы просеиваются на вибрационном сите ANALYSETTE 3 SPARTAN в течение 3...20 мин (диапазон измерения крупности 20...90 мкм в зависимости от используемых сит).

Суспензии готовятся в несколько этапов. На первом этапе в среду-носитель подмешиваются поверхностно-активные вещества и добавки, регулирующие физико-химические свойства. Смешивание водного раствора с добавками осуществляется с помощью магнитной мешалки AIBOTE ZNCLBS-2500 при температуре перемешивания 25 ± 2 °С, скорости вращения магнитного стержня 1500 об/мин и времени перемешивания 7 мин. Затем твердые частицы постепенно добавляются к перемешиваемому объему раствора,

чтобы предотвратить образование агломератов и получить более однородную структуру, при следующих условиях: температура во время перемешивания 25 ± 2 °С, скорость вращения магнитного стержня 1500 об/мин, время перемешивания 15 мин [44, 51].

2.5.2. Размер твердых частиц

Оборудование

Для установления распределения твердых частиц суспензии по размерам используется оптическая система (рис. 2.18), а также персональный компьютер с программным обеспечением Actual Flow [52].

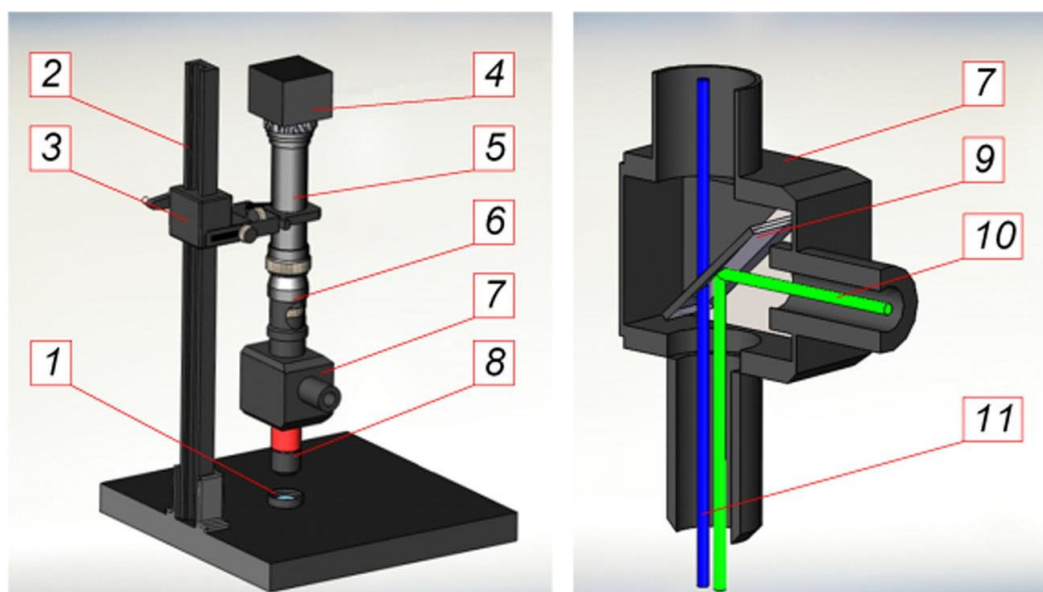


Рис. 2.18. Внешний вид оборудования для определения распределений твердых частиц суспензии по размерам:

- 1 – исследуемый образец; 2 – стойка оптической системы; 3 – крепление оптики;
4 – высокоскоростная видеокамера; 5 – адаптер; 6 – 6,5X UltraZoom;
7 – светодетектор; 8 – объектив; 9 – дихроичное зеркало;
10 – падающий световой луч; 11 – отраженный световой луч

Техническое использование метода

Распределение твердых частиц по размерам определяется с помощью теневого метода макроизображения (подробности метода описаны в п. 1.1). Для каждого из исследованных образцов твердого порошка проводится не менее трех экспериментов (продолжительность эксперимента составляет 250 с, общее количество кадров – 1000). Видеоизображения обрабатываются с использованием ПО Actual Flow. Для анализа размеров твердых частиц берется средний размер частиц (D_{50} , м) [31, 32], который определяет диаметр сферы вокруг частицы. Эта характеристика рассчитывается в соответствии с принятым стандартом (ISO 9276-2:2014, «Гранулометрический анализ. Представление результатов. Часть 2. Расчет средних

размеров/диаметров частиц и моментов по распределению частиц по размерам») с использованием формулы

$$D_{50} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{\infty} n_i D_i^5}{\sum_{i=1}^{\infty} n_i} \right]^{\frac{1}{5}},$$

где D_i – диаметр i -й частицы, м; n_i – количество i -х частиц [44, 51, 52].

Пример использования метода

На рис. 2.19 показана область регистрации видеоизображения исследуемого образца, обрабатываемая в ПО Actual Flow (рис. 2.19, а), и результат обработки (рис. 2.19, б), представленный в виде распределения частиц по размерам [52]. Размер частиц образца 1 варьируется в диапазоне 0,012...0,08, а размер частиц образца 2 – в диапазоне 0,032...0,14.

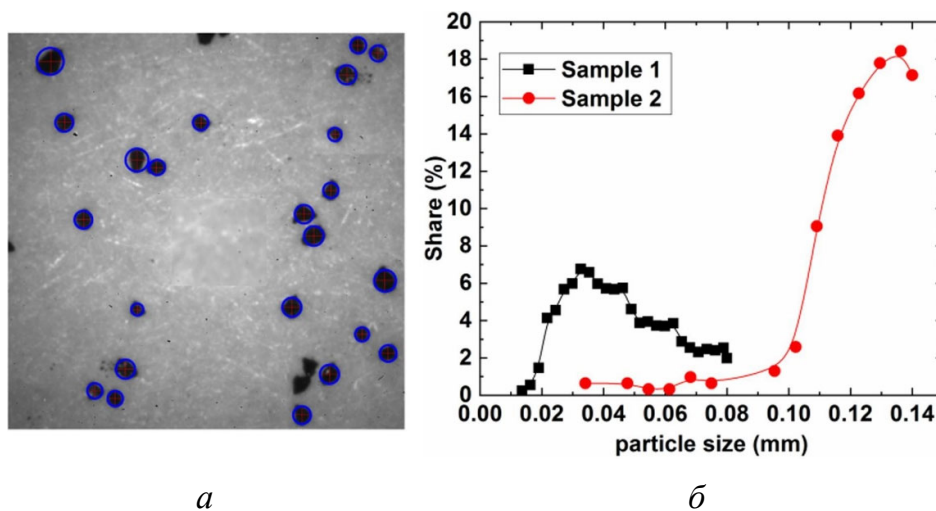


Рис. 2.19. Область регистрации видеоизображения исследуемого образца (а) и результат обработки (б)

2.5.3. Статическая стабильность

Осаждение твердых частиц в суспензиях является причиной их фазового разделения. Это обычное явление для водоугольных суспензий.

Метод определения коэффициента отделения воды (WSR)

Данный подход является самым простым и эффективным. Он используется во многих экспериментальных исследованиях стабильности водно-угольных композиций.

Техническое использование метода

Статическая стабильность суспензий оценивается с использованием коэффициента отделения воды (WSR), который определяется по формуле (2.2) как массовое отношение воды, отделившейся в результате разделения фаз, к общему количеству воды в образце суспензии во время

его статической выдержки в течение 96 ч при температуре 25 ± 2 °C (рис. 2.20).



Рис. 2.20. Внешний вид суспензии при применении метода WSR

$$WSR = \frac{M_s}{M_0} \cdot 100 \%, \quad (2.2)$$

где M_s – масса воды, выделившаяся в результате фазового разделения суспензии, г; M_0 – общая масса воды в суспензии, г.

Более высокие значения WSR означают более выраженное разделение фаз и характерны для менее стабильных суспензий [44, 51, 53].

Метод «проникающего стрежня»

Определение параметра WSR позволяет оценить только последствия процесса неустойчивости осаждения. Для определения стабильности в аспекте образования твердого осадка из твердых частиц в объеме суспензии используется метод «проникающего стержня».

Техническое использование метода

Суспензия статически выдерживается в течение 72 ч при (25 ± 1) °C, (5 ± 1) °C, (0 ± 1) °C, (-5 ± 1) °C. Затем в пробирку с суспензией помещается стеклянный стержень длиной 100 мм (рис. 2.21).

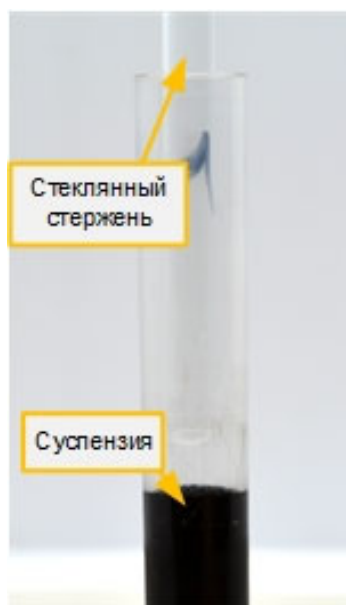


Рис. 2.21. Внешний вид суспензии при использовании метода «проникающего стержня»

По мере того, как твердые частицы оседают на дно контейнера, стрижню становится все труднее проникать в нижние слои суспензии без приложения внешних сил. Седиментационная стабильность водоугольной суспензии с помощью этого метода определяется как разница между общей длиной стержня и длиной его погруженной части [44, 53, 54].

2.5.4. Средняя скорость осаждения твердых частиц

На основе метода «проникающего стрижня» (см. п. 2.5.3) предложен продвинутый метод расчета средней скорости осаждения твердых частиц.

Техническое использование метода

Пробирки с образцами суспензий в закрытом состоянии термостатируются при температурах $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$, $(5 \pm 1)^\circ\text{C}$, $(0 \pm 1)^\circ\text{C}$ и $(-5 \pm 1)^\circ\text{C}$ в течение 72 ч. На рис. 2.22 показан внешний вид суспензии в пробирке перед проведением измерений методом расчета средней скорости осаждения. Показано снижение концентрации твердых частиц в верхних слоях суспензии [44].



Рис. 2.22. Внешний вид суспензии при использовании метода расчета средней скорости осаждения твердых частиц

После термостатирования каждая пробирка поворачивается на 180° . Объем жидкой смеси, вытекающей из пробирки в течение 3 с, взвешивается для определения ее массы. Этот объем в течение суток высушивается естественным путем, а затем еще 60 минут в сушильной камере при температуре 100°C . Эти манипуляции необходимы для определения

концентрации твердых частиц в сухом остатке. Средняя скорость осаждения твердых частиц ν_d (%/сутки) рассчитывается по формуле

$$\nu_d = \frac{a_1 \cdot (c_0 - c_1)}{3 \cdot a_0 \cdot (100 - c_0)} \cdot 100 \%,$$

где a_0 – масса суспензии в пробирке, кг; a_1 – масса суспензии, вытекшей из пробирки, кг; c_0 – исходная концентрация твердых частиц в суспензии, %; c_1 – концентрация твердых частиц в вытекшем объеме суспензии, % [44].

2.5.5. Текучесть

Такие технологические процессы, как транспортировка [55] и распыление [56], зависят от текучести водоугольных суспензий, т. е. способности жидкости течь под влиянием самых малых сдвигающих усилий.

Техническое использование метода

Текучесть суспензий определяется визуально. Суспензия переливается из цилиндрической пробирки в другую емкость. Как показано на рис. 2.23, суспензия может образовывать непрерывный поток (рис. 2.23, а), прерывистый (рис. 2.23, б) или вообще не образовывать потока (рис. 2.23, в).

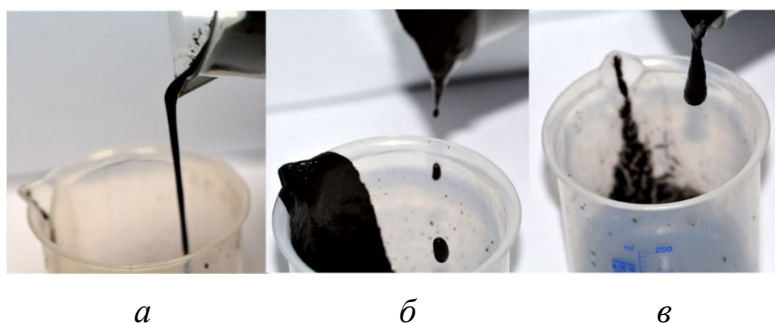


Рис. 2.23. Внешний вид суспензий, демонстрирующий различия классов текучести образцов: а – класс А; б – класс В; в – класс С

В зависимости от вида потока различают три класса текучести суспензии – А, В или С [44, 57].

2.6. Характеристики поверхности

2.6.1. Смачиваемость

Статический контактный угол

Одним из основных параметров, описывающих свойства поверхности, является смачиваемость. Мерой смачиваемости, в свою очередь, являются статические контактные углы (краевые углы). Контактный угол – это угол, образованный на границе раздела «жидкость – воздух – твердое

тело». Статические контактные углы измеряются в том случае, когда капля жидкости находится в неподвижном состоянии на твердой поверхности.

Оборудование

Для измерения статического контактного угла (СКУ) используется следующее оборудование (рис. 2.24): прибор 1 Kruss DSA25 (диапазон измерений $1 \dots 180^\circ$; разрешение $0,1^\circ$) и персональный компьютер 2 с программным обеспечением ADVANCED. Прибор DSA25 включает в себя столик 3 для исследуемых образцов, регулируемый по уровню, систему дозирования 4, видеокамеру 5 и систему освещения 6. Программа ADVANCED позволяет управлять оборудованием для проведения научных исследований. С помощью нее возможно полностью автоматизировать процесс измерения статического контактного угла.



Рис. 2.24. Внешний вид оборудования для измерения краевого угла смачивания методом лежащей капли:

- 1 – прибор для измерения краевого угла смачивания; 2 – ПК;
3 – столик для образцов; 4 – система дозирования; 5 – видеокамера;
6 – система освещения; 7 – наклонное основание*

Техническое использование метода

Статический контактный угол определяется методом лежащей капли. Исследуемый образец (поверхность/материал) помещается на столик 3. Процесс дозирования капли жидкости (объем капли и скорость) производится в автоматическом режиме в программном обеспечении ADVANCE. Видеокамера 5 и система освещения 6 позволяют получить теневые изображения лежащей капли.

Программное обеспечение ADVANCED позволяет определить линию контакта жидкости с поверхностью образца (базовую линию) автоматически или вручную. Выбор способа определения базовой линии

зависит от характеристик поверхности образца (шероховатость, отражательная способность). После нахождения базовой линии автоматически запускается анализ теневого изображения капли (рассчитываются значения контактных углов, диаметра и объема). Определение СКУ в ПО ADVANCED возможно пятью методами: Тангенциальный 1, Тангенциальный 2, Юнга–Лапласа, метод Круга и метод Высоты/Ширины. Погрешность определения СКУ зависит от формы капли и методики определения [58]. Установлено, что для метода Тангенциальный 1 относительная погрешность определения СКУ может достигать 23 %, Тангенциальный 2 – 27,3 %, Юнга–Лапласа – 5 %. Выбор метода зависит от величины контактного угла и подбирается оператором в ручном режиме для лучшего распознавания контура капли и более точного определения СКУ.

Пример использования метода

На рис. 2.25 показан результат измерения краевого угла смачивания методом лежащей капли.

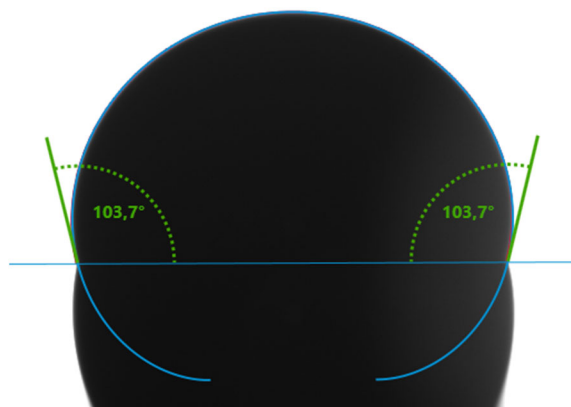


Рис. 2.25. Результат измерения статического контактного угла методом лежащей капли

В левом верхнем углу видеокadra приведен масштабный коэффициент, рядом с каплей автоматически измеренные значения краевого угла θ с левой и правой сторон. Результирующее значение краевого угла смачивания рассчитывается как среднее значение.

Динамические контактные углы

Динамические углы контакта (ДКУ) описывают процессы на границе твердое тело/жидкость во время увеличения объема капли (наступающий угол) или уменьшения объема капли (отступающий угол), т. е. во время смачивания и осушения. Динамический угол контакта измеряется в том случае, когда граница раздела фаз движется и происходит изменение статического угла контакта во времени. Погрешность определения ДКУ, как и в случае СКУ, зависит от формы капли и выбранного метода измерения.

Метод наклонной поверхности

Оборудование

Для измерения статического контактного угла используется следующее оборудование (рис. 2.24): прибор Kruss DSA25 1 (диапазон измерений $1^\circ \dots 180^\circ$; разрешение $0,1^\circ$), персональный компьютер 2 с программным обеспечением ADVANCED и наклонное основание 7 PA4020 (скорость наклона от $0,1^\circ$ до $9,0^\circ$, угол наклона до 90°). Прибор DSA25 включает в себя столик 3 для исследуемых образцов, регулируемый по уровню, систему дозирования 4, видеокамеру 5 и систему освещения 6.

Техническое использование метода

Схема определения ДКУ методом наклонной поверхности представлена на рис. 2.26.

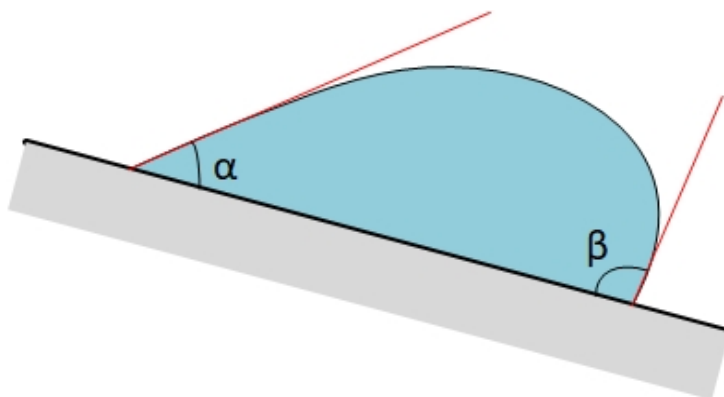


Рис. 2.26. Измерение динамического контактного угла методом наклонной поверхности

Динамический угол контакта бывает двух типов – наступающий и отступающий. Наклонный метод предполагает одновременное определение как наступающего, так и отступающего углов контакта. Капля помещается на исследуемую подложку, которая крепится к столику для образцов 3, затем в ПО ADVANCED задается скорость и угол наклона наклонного основания 7 (рис. 2.24). Базовая линия (место соприкосновения капли с твердой поверхностью) определяется в программном обеспечении ADVANCED. После этого запускается программа автоматизации движения наклонного основания. В момент начала движения (скольжения) капли по поверхности измеряются наступающий угол (натекания) в нижней части капли (рис. 2.26, угол β) и отступающий угол (оттекания) в верхней части капли (рис. 2.26, угол α).

Метод bottom-up

Оборудование

Для определения динамических контактных углов методом bottom-up используется следующее оборудование (рис. 2.27): шприцевой насос 1 Cole Parmer EW-74905-04 со шприцем объемом 1 мл и подложка 2, соединенные медным каналом диаметром 1 мм; гониометр 3; телецентрическая труба 4 и система генерации света 5, высокоскоростная видеокамера 6 FastVideo 500M с макрообъективом Sigma 105 мм f/2,8G IF-ED AF-S 9; прозрачный бокс 7 [59].

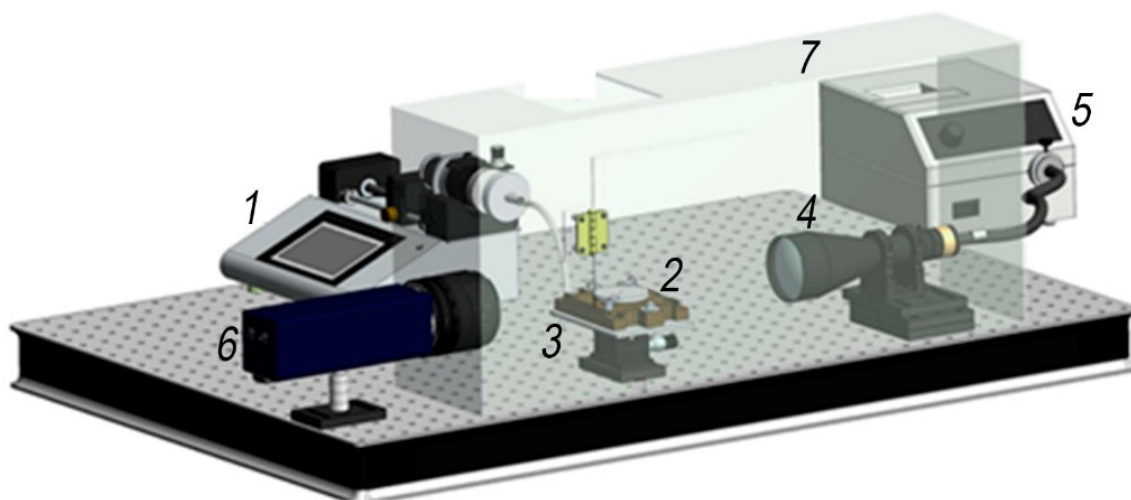


Рис. 2.27. Внешний вид экспериментального стенда для измерения динамического контактного угла методом bottom-up:

1 – шприцевой насос; 2 – подложка; 3 – гониометр; 4 – телецентрическая труба; 5 – источник света; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – прозрачный бокс

Техническое использование метода

Динамические контактные углы (натекания и оттекания) определяются с помощью принудительной «накачки» и «откачки» жидкости на поверхность подложки 2 системой, состоящей из высокоточного электронного шприцевого насоса 1 и медного канала. Капля жидкости объемом 30 мкл генерируется через отверстие в подложке диаметром 0,4 мм. Скорость линии контакта зависит от скорости потока жидкости, которая устанавливается при помощи насоса 1 (рекомендуемая скорость для определения динамических контактных углов 5 мкл/мин). При подаче жидкости формируется наступающий динамический контактный угол, при откачке воды – отступающий динамический контактный угол. Теневые изображения капли в момент подачи/откачки жидкости получены с помощью высокоскоростной видеокамеры [59]. На рис. 2.28, а представлена схема, иллюстрирующая процесс определения динамических углов (натекания и оттекания).

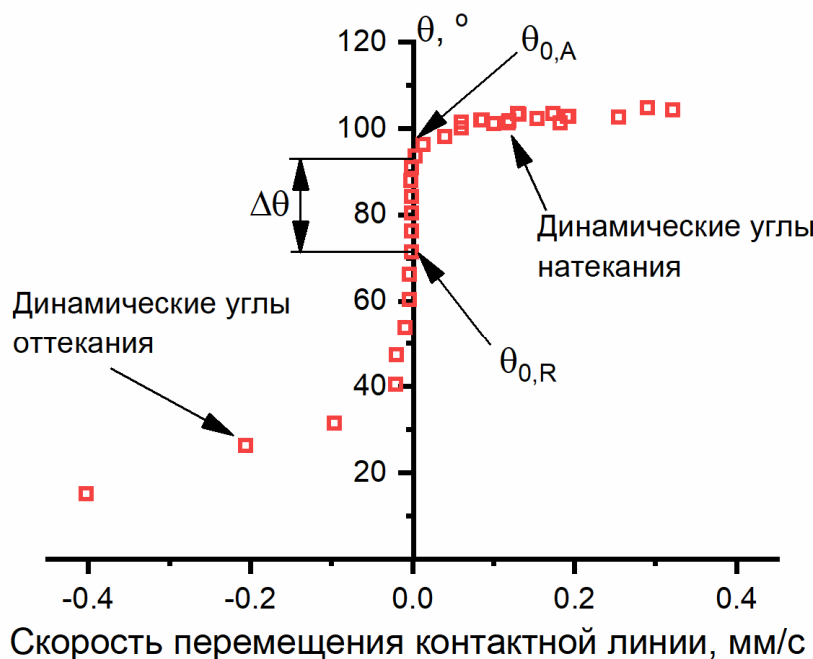
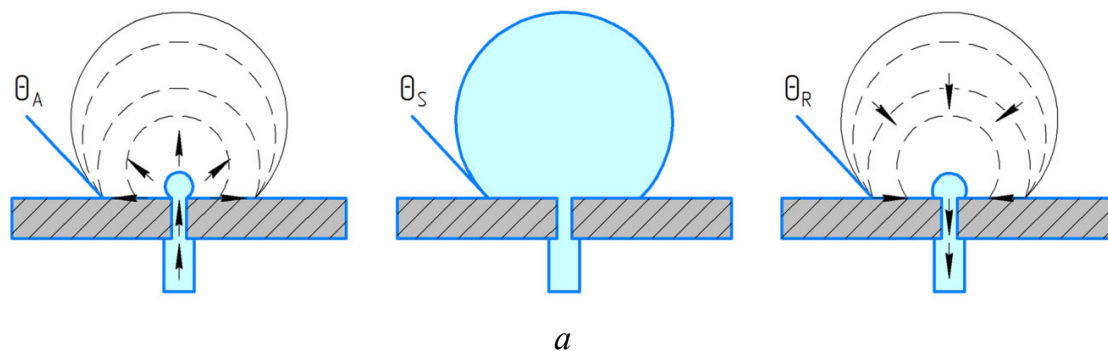


Рис. 2.28. Схема последовательных состояний капли при применении метода bottom-up (а) и петля гистерезиса (б)

По результатам обработки теневых изображений рассчитываются значения скорости перемещения контактной линии трехфазного контакта (ЛТК) в каждый момент времени откачки и накачки жидкости. Затем строится график зависимости динамических контактных углов от скорости перемещения ЛТК (рис. 2.28, б). Когда скорость перемещения ЛТК равняется нулю, выделяют динамические углы натекания и оттекания при постоянной площади смачивания. Гистерезис контактного угла определяется по формуле

$$\Delta\theta = \theta_{0,A} - \theta_{0,R},$$

где $\theta_{0,A}$ – динамический угол натекания; $\theta_{0,R}$ – динамический угол оттекания.

Метод «иглы сверху» (needle method)

Техническое использование метода

При определении динамических углов натекания и оттекания методом «иглы сверху» по аналогии с методом bottom-up используется установка, представленная на рис. 2.27. Различие состоит только в том, что дозирование капли производится сверху при помощи иглы (рис. 2.29).

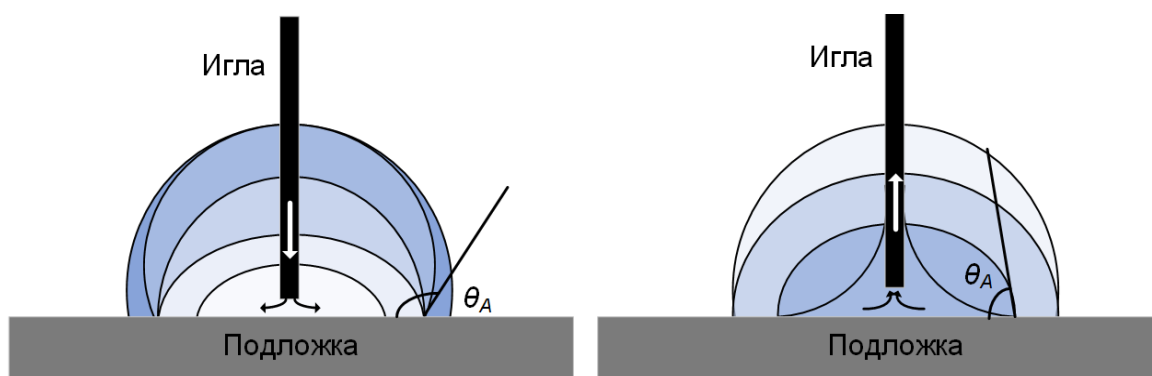


Рис. 2.29. Углы натекания (θ_A) и оттекания (θ_R), измеряемые методом «иглы сверху»

Игла подводится близко к поверхности подложки, затем при помощи шприцевого насоса производится накачка и откачка жидкости. При определенном размере капли угол контакта становится постоянным, именно в этот момент можно проводить измерения. С увеличением объема капли в момент, когда линия контакта начинает свое продвижение (рост контактного диаметра капли), определяется угол натекания (θ_A). При откачке жидкости в момент, когда контактный диаметр капли начинает уменьшаться, определяется угол оттекания (θ_A) [59].

2.6.2. Шероховатость поверхности и размер пор

Оборудование

Для определения шероховатости поверхности и размера пор используется следующее оборудование (рис. 2.30): сканирующий зондовый атомно-силовой микроскоп Ntegra Prima и персональный компьютер с программным обеспечением Gwyddion 2.62. Для проведения исследований микроскоп оснащается сканирующим зондом марки HA_HR/W2C+ с резонансной частотой 380 кГц и жесткостью 34 Н/м.

Техническое использование метода

Исследование шероховатости и микроструктуры поверхностей проводится методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактном режиме работы микроскопа по методу Кельвина [60]. В ПО Gwyddion 2.62

по полученным АСМ-изображениям происходит автоматическое определение нескольких значений шероховатости, после чего рассчитывается средняя шероховатость образца R_a [25].

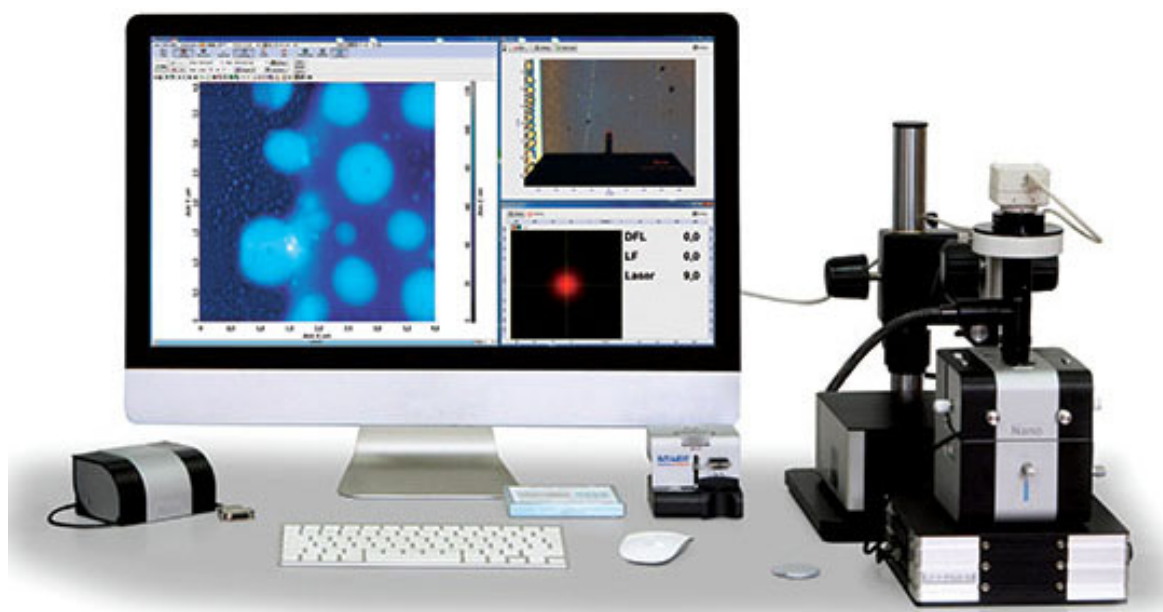


Рис. 2.30. Внешний вид оборудования для определения шероховатости поверхности и размера пор

Пример использования метода

На рис. 2.31 приведены АСМ-изображения исследуемых поверхностей [25].

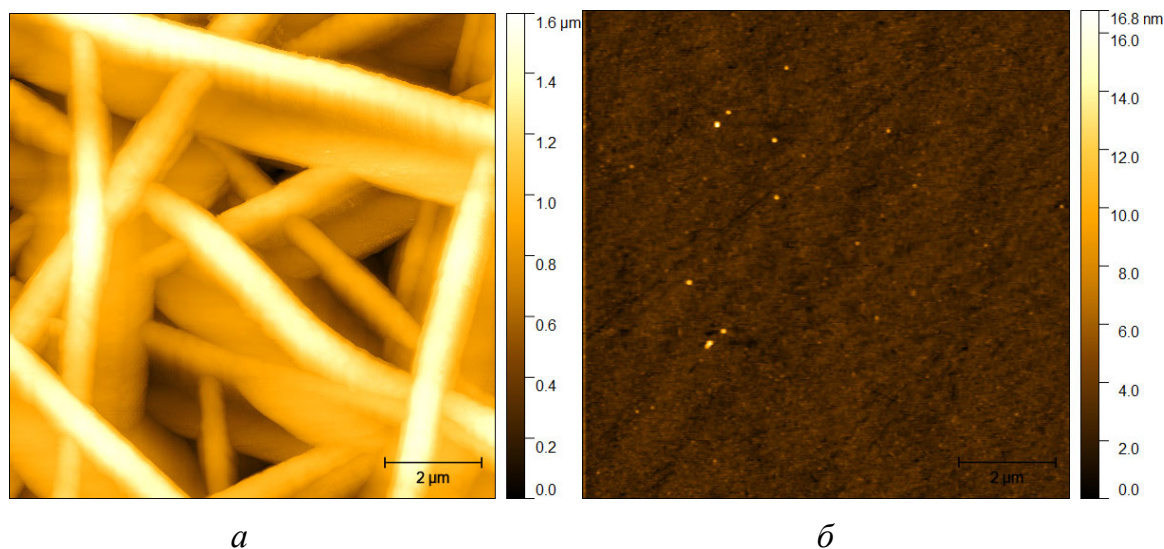


Рис. 2.31. АСМ-изображения: а – мембранного нетканого материала; б – гладкой поверхности сапфирового стекла

2.6.3. Средний диаметр волокон

Оборудование

Для определения среднего диаметра волокон используется следующее оборудование (рис. 2.32): сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA 3 SBH и персональный компьютер с программным обеспечением ImageJ. Для улучшения качества SEM-изображений поверхность мембран покрывается тонким слоем золота с помощью магнетронной распылительной системы Nano-Structured Coatings Co.



Рис. 2.32. Внешний вид оборудования для определения среднего диаметра волокон

Техническое использование метода

Исследование среднего размера волокон проводится методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

2.6.4. Пористость материала

Оборудование

Для определения пористости поверхности используются аналитические весы Sartorius CP225D (цена деления 0,01 мг), оснащенные специальной подвесной системой для гидростатического взвешивания (рис. 2.33).

Техническое использование метода

Пористость мембран оценивается методом гидростатического взвешивания по методике, предложенной в [61]. Сухой вес мембран, а также вес мембран, погруженных в жидкость, измеряется с помощью аналити-

ческих весов Sartorius CP225D. Объем вытесненной жидкости определяется с использованием закона Архимеда. В качестве жидкости для оценки пористости могут быть использованы гексан, изопропанол и вода, так как они не вызывают набухания мембран.



Рис. 2.33. Внешний вид оборудования для определения пористости

2.6.5. Свободная поверхностная энергия твердого тела

Свободная поверхностная энергия (СПЭ) твердого тела возникает в результате молекулярных взаимодействий на границе раздела «воздух – твердое тело». Она не может быть определена непосредственно, расчеты поверхностной энергии основаны на измерении контактных углов различными жидкостями.

Техническое использование метода

Существует ряд методов по определению СПЭ:

1. Метод Зисмана основан на предположении о том, что свободная поверхностная энергия твердого тела пропорциональна поверхностному натяжению жидкости, полностью смачивающей эту поверхность [62]. При определении СПЭ этим методом на исследуемой поверхности измеряются статические контактные углы для не менее чем трех жидкостей (с различным поверхностным натяжением σ_l) согласно методике, представленной в п. 2.6.1. Затем строится зависимость $\cos(\theta) = f(\sigma_l)$, которая аппроксимируется линейной кривой. При $\cos(\theta) = 1$, где $\theta = 0^\circ$, поверхностное натяжение жидкости равно величине СПЭ.

2. Метод Фоукса оценивает взаимодействия между жидкостью и твердым телом с точки зрения дисперсионных (вандерваальсовых) и полярных взаимодействий [63]. Полную свободную поверхностную энергию твердого тела можно выразить как

$$\sigma_s = \sigma_s^d + \sigma_s^p,$$

где σ_s^d и σ_s^p – дисперсионная и полярная составляющие СПЭ соответственно.

Тогда работу адгезии между жидкостью и твердым телом можно выразить как

$$W_{sl} = 2 \left(\sqrt{(\sigma_l^d \cdot \sigma_s^d)} + \sqrt{(\sigma_s^p \cdot \sigma_l^p)} \right), \quad (2.3)$$

где σ_l^d и σ_l^p – дисперсионная и полярная составляющие поверхностного натяжения жидкости соответственно.

В то же время работу адгезии можно определить из уравнения Юнга–Дюпре:

$$W_{sl} = \sigma_l (1 + \cos(\theta)). \quad (2.4)$$

Объединив уравнения (2.3) и (2.4), получим уравнение Фоукса:

$$\sqrt{(\sigma_l^d \cdot \sigma_s^d)} + \sqrt{(\sigma_s^p \cdot \sigma_l^p)} = 0,5 \cdot (1 + \cos(\theta)). \quad (2.5)$$

Перед расчетом СПЭ требуется определить статические углы смачивания для как минимум двух жидкостей – полярной и дисперсной. Статические контактные углы определяются методом лежащей капли согласно методике, представленной в п. 2.6.1. Рекомендуется в качестве дисперсной жидкости использовать дийодметан, так как он не обладает полярной составляющей из-за молекулярной симметрии ($\sigma_s^p = 0$). Тогда уравнение (2.5) можно сократить:

$$\sigma_s^d = 0,25 \cdot (1 + \cos(\theta))^2.$$

Отсюда можно рассчитать дисперсную составляющую СПЭ.

Затем проводятся измерения статического угла для жидкости с известными дисперсионными и полярными составляющими (обычно используется вода). Подставляя известные величины θ , σ_l^d и σ_l^p в уравнение (2.5), можно рассчитать σ_s^p .

3. Метод Оуэнса–Вендта–Рабель и Кельбле (ОВРК) [64] базируется на методе Фоукса, но учитывает эффекты полярных связей в выражении межфазного натяжения с применением правила среднего геометрического для всех членов (уравнение (2.6)). Метод позволяет проводить

анализ свойств смачиваемости поверхности в условиях растекания жидкости с неизвестным поверхностным натяжением по значению статического контактного угла.

Межфазное натяжение «твердое тело – жидкость» определяется как

$$\sigma_{sl} = \sigma_l + \sigma_s - 2 \cdot \left(\sqrt{\sigma_s^p \cdot \sigma_l^p} + \sqrt{\sigma_s^d \cdot \sigma_l^d} \right), \quad (2.6)$$

где σ_l, σ_s – поверхностное натяжение жидкости и поверхностная энергия твердого тела.

При подстановке выражения (2.6) в уравнение Юнга для поверхностной энергии твердого тела ($\sigma_s = \sigma_{sl} + \sigma_l \cdot \cos \theta$) получено модифицированное уравнение Юнга:

$$(1 + \cos \theta) \cdot \sigma_l = 2 \cdot \left(\sqrt{\sigma_s^p \cdot \sigma_l^p} + \sqrt{\sigma_s^d \cdot \sigma_l^d} \right). \quad (2.7)$$

Уравнение (2.7) можно преобразовать к виду

$$\frac{(1 + \cos \theta) \cdot \sigma_l}{2 \cdot \sqrt{\sigma_l^d}} = \frac{\sqrt{\sigma_s^p \cdot \sigma_l^p}}{\sqrt{\sigma_l^d}} + \sqrt{\sigma_s^d}.$$

Для определения величин $\frac{\sqrt{\sigma_l^p}}{\sqrt{\sigma_l^d}}$ и $\frac{(1 + \cos \theta) \cdot \sigma_l}{2 \cdot \sqrt{\sigma_l^d}}$ измеряются стати-

ческие контактные углы образца набором жидкостей (не менее двух) с известными дисперсными и полярными составляющими поверхностного натяжения (обычно вода и дийодметан) [65]. Затем строится графическая зависимость

$$\left(\frac{(1 + \cos \theta) \cdot \sigma_l}{2 \cdot \sqrt{\sigma_l^d}} \right) = f \left(\frac{\sqrt{\sigma_l^p}}{\sqrt{\sigma_l^d}} \right) \quad (\text{рис. 2.34}).$$

Точка А на рис. 2.34 соответствует рассчитанным значениям для дийодметана, точка Б – воде. Через точки А и Б строят аппроксимационную линию до пересечения с осью ординат. Дисперсная составляющая СПЭ определяется как квадрат величины $\frac{(1 + \cos \theta) \cdot \sigma_l}{2 \cdot \sqrt{\sigma_l^d}}$ в точке В, лежа-

щей на пересечении линии АВ с осью ординат. Полярная компонента определяется как квадрат тангенса угла γ наклона прямой АВ (рис. 2.34). Для некоторых жидкостей значения полярной и дисперсных составляющих можно найти в литературе, а также в программном обеспечении ADVANCED. В случае, если данных для исследуемой жидкости нет, то следует провести эксперименты с поверхностями, у которых известны

значения σ_s^p и σ_s^d . Для этих целей рекомендуется использовать тефлоновую поверхность, так как у нее нет полярной составляющей.

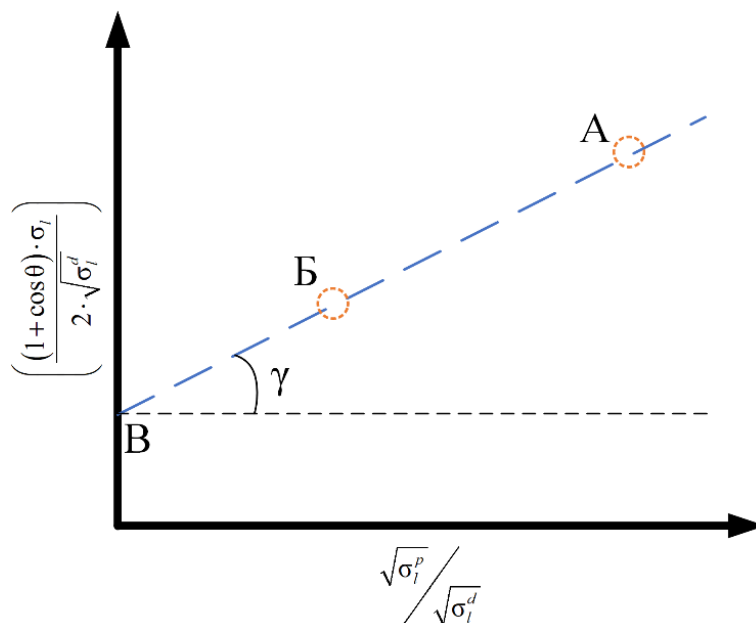


Рис. 2.34. Определение СПЭ графически

4. Метод Оусса и Гуда основан на предположении, что поверхностная энергия содержит дисперсную и полярную составляющие [66]. Различие состоит в том, что она учитывает кислотно-основные взаимодействия. Полярную составляющую разделяют на две компоненты – кислоты Льюиса (σ^+) и основания (σ^-). Кислотный компонент характеризует способность поверхности взаимодействовать с основной жидкостью (т. е. той, которая может жертвовать электронную плотность) посредством полярных взаимодействий, таких как диполь-дипольная связь и водородная связь. Основной компонент показывает, может ли твердая поверхность выступать в качестве акцептора электронов (например, взаимодействие с электроноакцепторной кислой жидкостью).

Уравнение Оусса и Гуда:

$$(1 + \cos(\theta)) \cdot \sigma_l = \sigma_s + \sigma_l - 2 \left(\sqrt{\sigma_l^d \cdot \sigma_s^d} + \sqrt{\sigma_s^+ \cdot \sigma_l^-} + \sqrt{\sigma_s^- \cdot \sigma_l^+} \right). \quad (2.8)$$

При использовании настоящего метода для расчета СПЭ требуется не менее трех жидкостей. Если выбрать жидкость, содержащую только дисперсный компонент, например дийодметан или циклогексан, выражение (2.8) сводится к уравнению:

$$(1 + \cos(\theta)) \cdot \sigma_l = 2 \left(\sqrt{\sigma_l^d \cdot \sigma_s^d} \right). \quad (2.9)$$

Из уравнения (2.9) можно определить дисперсную составляющую поверхности. Определив значения контактных углов (в соответствии с методикой, описанной в п. 2.6.1) для жидкости без кислотного компонента (например, тетрагидрофуран), уравнение (2.8) можно переписать следующим образом:

$$(1 + \cos(\theta)) \cdot \sigma_l = \sigma_s + \sigma_l - 2 \left(\sqrt{\sigma_l^d \cdot \sigma_s^d} + \sqrt{\sigma_s^+ \cdot \sigma_l^-} \right). \quad (2.10)$$

По уравнению (2.10) можно вычислить кислотную составляющую поверхности σ_s^+ . При определении контактного угла для жидкости без основного компонента (например, хлороформ) можно определить основную компоненту σ_s^- . Оставшийся компонент можно определить из уравнения (2.8).

Так как все эти методы основаны на измерении статических контактных углов смачивания поверхностей различными жидкостями, возможная погрешность измерения связана с выбором метода измерения СКУ (п. 2.6.1), вида используемых жидкостей, а также количеством измерений. С целью минимизации погрешности по определению СПЭ рекомендуется использовать метод ОВРК (как самый распространенный) с измерением СКУ (с использованием не менее чем трех жидкостей).

3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

3.1. Методы цифровой обработки

3.1.1. Цифровая обработка изображений в ПО *Mathematica*

Программное обеспечение *Mathematica* позволяет оценивать средний диаметр d_s и количество N вторичных фрагментов, образующихся в результате гидродинамического распада. Для этого разработана специальная программа, позволяющая анализировать результирующий распад капель топливной микроэмульсии. Порог бинаризации устанавливается индивидуально для каждого обрабатываемого изображения. Программа идентифицирует элементы и определяет их размеры (d_s) в пикселях. При этом вычитается фон изображения, а элементы, находящиеся на границе изображения, не учитываются. В случае, если подложка имеет зеркальную поверхность, отражение фрагментов стирается во время обработки кадра.

Количество вторичных фрагментов N рассчитывается путем деления начального объема капли диаметром D_0 на объем отдельного вторичного фрагмента со средним диаметром d_s [1].

3.1.2. Метод фильтрации Калмана

Фильтр Калмана позволяет отслеживать отдельные частицы в потоке, при этом определяя их количество, размеры и скорость движения согласно DIN SPEC 91325 [67], а также прогнозировать будущее местоположение объекта, используя уравнение движения.

Постобработка видеок кадров проводится в программном комплексе *Matlab* при помощи кода, реализующего метод фильтрации Калмана. Для осуществления постобработки с помощью фильтра Калмана исходная видеозапись, состоящая из 500 кадров, загружается в *Matlab*. В каждом видеок кадре происходит обнаружение частиц и присвоение им индивидуального трек-номера, который позволяет отслеживать обнаруженные капли на последующих видеок кадрах. Производится расчет площади S каждой капли, после чего рассчитывается диаметр капли d (пиксель) по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}},$$

где S – площадь идеальной сферической капли, пиксель².

Далее происходит пересчет диаметра из пиксельного значения в метровое путем умножения полученного значения на масштабный коэффициент (м/пиксель). После расчета диаметра капель на всех видеок кадрах

определяются средний диаметр (d_{10} , м), средний диаметр по Заутеру (d_{32} , м) и абсолютная (магнитуа) скорость движения частиц (U , м/с), оцениваемая при помощи уравнения

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2},$$

где U_x и U_y – скорость капли по координатам x и y соответственно, м/с.

Расчет d_{10} осуществляется по формуле

$$d_{10} = \frac{\sum d}{N},$$

где d – диаметр капли, м; N – общее количество капель.

Средний диаметр по Заутеру (d_{32}) – это диаметр капли, которая имеет такое же отношение объема к своей площади поверхности, что и общий объем всех капель по отношению к их общей площади поверхности, и рассчитывается как

$$d_{32} = \sum_i \frac{d_v^3}{d_s^2},$$

где d_s – поверхностный диаметр набора частиц, м; d_v – объемный диаметр набора частиц, м.

Значения d_s и d_v определяются по следующим формулам:

$$d_v = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$$d_s = \sqrt{\frac{A}{\pi}},$$

где V – общий объем всех капель, м³; A – общая поверхность капель, м².

Построение осредненных полей скорости и траекторий движения капель осуществляется также с помощью фильтра Калмана по видеофрагментам, состоящим из 10 последовательных кадров [68].

3.2. Методы математической обработки

3.2.1. Определение влияющих факторов

Актуальность исследований гидродинамического поведения соударяющихся со стенками капель жидкости растет ввиду появления вслед за технологическим прогрессом новых рабочих поверхностей и жидкостей и, соответственно, современных технологических решений и технических возможностей в изготовлении материалов, высокоточном анализе и постобработке данных испытаний и измерений. В современных исследованиях [25, 69, 70] течение жидкости вдоль межфазной границы после соударения капли с твердой поверхностью в основном определяется ее начальными параметрами (размер капли и скорость движения), свойствами жидкости (как правило, плотностью, вязкостью и поверхностным натяжением) и характеристиками поверхности в микро- и наномасштабе. В качестве поверхности взаимодействия могут выступать разнообразные материалы, обладающие различной смачиваемостью, шероховатостью, пористостью, поверхностной и внутренней структурой [71]. Создание микро- или наноструктуры является известным способом изменения смачиваемости поверхности [72–78]. Одной из задач при исследовании взаимодействия капли с неоднородной поверхностью (часто пористой) является изучение проникновения жидкости внутрь пор и смачивания их внутренних поверхностей [69, 79, 80]. Эти явления особенно характерны для технологий тканевой биоинженерии [81, 82] и безопасного транспорта лекарственных веществ и клеточных культур [83]. Особое внимание уделяется переходу из состояния Cassie, при котором поры поверхности заполнены газом и контакт жидкости со стенкой представляет собой гетерогенную межфазную границу «жидкость – твердое тело – газ», в состояние Wenzel, в котором все поры поверхности заполнены жидкостью [84]. Переход из одного состояния в другое может быть спровоцирован давлением внутри капли в процессе ее испарения [85, 86], размером капли [80, 87], капиллярными силами [88], колебаниями поверхности или ее геометрическими параметрами [71].

Таким образом, при исследовании характера течения жидкости в качестве влияющих факторов принято рассматривать начальные параметры течения (характерный размер капель жидкости и их скорость движения), включая условия окружающей среды, свойства жидкости и характеристики поверхности в микро- и наномасштабе. Как правило, важную роль играет планирование многофакторного исследования, определяющее варьируемые переменные и постоянные (неизменные) условия. От этого определения также напрямую будет зависеть количество влияющих факторов.

3.2.2. Размерные и безразмерные величины, критерии подобия

При моделировании течения жидкости во многих случаях используются не только размерные, но и безразмерные величины. Размерными считаются величины, значения которых зависят от принятой системы единиц измерения и могут изменяться при замене этой системы на другую. Такими величинами, например, считаются длина, масса, сила, время, момент силы, скорость, энергия и другие. Безразмерные же величины не связаны с системами единиц измерения и сохраняют свои численные значения в любой системе единиц измерения.

Суть моделирования течения жидкости заключается в том, чтобы на основе модельных (часто лабораторных) испытаний получить представления о протекании исследуемых явлений и процессов, которые бы максимально близко соответствовали натурным условиям. Основой моделирования в механике жидкости является следование концепции подобия сравниваемых течений. Два течения жидкости могут считаться подобными, если по характеристикам одного течения можно получить характеристики другого с использованием операции простого умножения характеристик течения на некоторый постоянный коэффициент, который часто называют коэффициентом подобия. Для двух течений жидкости существует геометрическое подобие в отношении характеристик самих течений или границ каналов, по которым они двигаются. Кроме того, подобие полей скорости обуславливает кинематическое подобие, а силовых полей – динамическое. Так, два течения жидкости или канала, по которым эти жидкости движутся, геометрически подобны, если характерные размеры двух объектов пропорциональны; кинематически подобны, если поля скоростей двух объектов в характерных точках пропорциональны при равенстве углов векторов скорости в этих точках; динамически подобны, если силы, действующие на два объекта, или элементы этих объектов, пропорциональны при равенстве углов векторов сил. Физическое (механическое) подобие двух течений достигается соблюдением этих перечисленных видов подобия. При этом геометрическое подобие является необходимым условием, а кинематическое и динамическое подобие – достаточным. Равенство некоторых безразмерных комплексов (критериев подобия) для сравниваемых течений позволяет достигнуть кинематического и динамического подобия. Количество критериев подобия определяется в ходе анализа размерностей с использованием функциональных соотношений, включающих характеризующие течение параметры.

3.2.3. Анализ размерностей и Пи-теорема

Функциональная зависимость – это зависимость между двумя переменными, при которой каждому значению независимой переменной соответствует единственное значение зависимой переменной. Различают параметры с независимыми размерностями (независимые параметры) и параметры с зависимыми размерностями (зависимые параметры). Группа независимых параметров – это группа параметров, в которой размерность ни одного параметра не может быть образована из размерностей других параметров, принадлежащих той же группе. Соответственно, группа зависимых параметров – группа параметров, в которой размерность параметров может быть образована из размерностей других параметров, принадлежащих той же группе.

При изучении вопросов моделирования гидравлических явлений обычно рассматриваются функциональные зависимости, параметры которых можно выразить через три основные размерности: масса $[M]$, длина $[L]$ и время $[T]$. Размерность любого члена уравнения может быть выражена произведением, состоящим из размерностей M, L, T в разных степенях. Определение Пи-теоремы: соотношение, не зависящее от выбора единиц измерения, между $(n + 1)$ размерными величинами $a, a_1, a_2, \dots, a_n, k$ из которых имеют независимые размерности, может быть представлено в виде соотношения между $(n + 1 - k)$ величинами $\Pi, \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}$, представляющими собой безразмерные комбинации $(n + 1)$ размерных величин.

Основной смысл Пи-теоремы состоит в том, что всякое физическое соотношение между размерными величинами можно сформулировать как соотношение между безразмерными величинами. Этот факт лежит в основе теоремы подобия, играющей важную роль в механике сплошной среды.

Пример использования метода

Запишем функциональную зависимость между диаметром внешней деформации $D_{\text{def}}^{\text{max}}$ и факторами, которые преимущественно его определяют в случае соударения капли раствора агара, наполненной частицами микрогеля, с двумя нановолокнистыми покрытиями: NM1 и NM2:

$$D_{\text{def}}^{\text{max}} = f(U_0, \sigma, \mu, \rho, D_0, g, \Delta P), \quad (3.1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; ΔP – разница между давлением смачивания и антисмачивания [70, 89–91], Па.

Исходя из [70], формула для определения параметра ΔP для случая с иерархически структурированной супергидрофобной поверхностью может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta P &= (P_D + P_H) - (P_{CM} + P_{CN}) = \\ &= (0,5\rho U_0^2 + 0,2\rho C U_0) - (-2\sqrt{2}\sigma \cos \theta / S_M - 2\sqrt{2}\sigma \cos \theta / S_N), \end{aligned}$$

где P_D – динамическое давление, обусловленное инерцией капли ($P_D = 0,5\rho U_0^2$); P_H – давление гидравлического удара, возникающее в результате внезапного сжатия капли при ударе ($P_H = 0,2\rho C U_0$, где C – скорость звука в жидкости) [92, 93].

Давление гидравлического удара P_H действует только в течение короткого промежутка времени – порядка $D_0 / C \sim 3$ мкс и на ограниченной площади масштаба – $\pi(D_0 U_0 / C)^2$ (м²) [70]. P_{CM} и P_{CN} – капиллярные давления, связанные с микро- (M) и наноструктурами материала (N), предотвращающие проникновение жидкости, и определяемые как $P_{CM} = -2\sqrt{2}\sigma \cos \theta / S_M$ и $P_{CN} = -2\sqrt{2}\sigma \cos \theta / S_N$, соответственно, где S_M и S_N – расстояние между соседними выступами микро- и наноструктур соответственно. В случае S_M используется средний диаметр волокна D_{av} , учитывая, что пористость структуры наномембран составляет около 50 %. Для оценки S_N применена характеристика D_N , условно характеризующая размер наноструктур. Значение контактного угла натекания на плоской поверхности используется при расчете капиллярного давления [70]. Для упрощения расчета можно использовать статический контактный угол θ .

Согласно Пи-теореме Бэкингема, общее количество аргументов функции составляет $n = 7$, а аргументы с независимыми размерностями k представлены в количестве трех (ρ, D_0, g), характеризующие основные физические единицы, используемые в большинстве задач гидродинамики, т. е. массу, длину и время. Анализ размерностей при переходе к безразмерной форме (уравнение (3.1)) позволяет подтвердить, что проникновение жидкости играет одну из определяющих ролей, наравне с начальной скоростью капли U_0 :

$$\beta_{\text{def}}^{\text{max}} = \frac{D_{\text{def}}^{\text{max}}}{D_0} = f(C_i \cdot Fr, Bo^{-1}, \sqrt{Fr}, Re \cdot \sqrt{Fr}). \quad (3.2)$$

Поскольку число Фруда ($Fr = U_0^2 / g D_0$) может быть выражено через We и число Бонда ($Bo = g D_0 \Delta \rho / \sigma$, где $\Delta \rho$ – разница плотностей жидкости и воздуха) как отношение We / Fr , функциональное выражение (3.2) можно переписать:

$$\beta_{\text{def}}^{\text{max}} = f\left(C_i \cdot \frac{We}{Bo}, Bo^{-1}, \sqrt{\frac{We}{Bo}}, Re \cdot \sqrt{\frac{We}{Bo}}\right) \sim f(C_i, U_0).$$

Можно сделать вывод, что в случае соударения капли раствора агара с NMs ее гидродинамическое поведение зависит только от U_0 и коэффициента впитывания C_i . Данный коэффициент рассчитывается аналогично числу Эйлера (Eu). Однако, в отличие от Eu , он определяется соотношением между силами давления смачивания и антисмачивания ΔP , характеризующими процесс впитывания жидкости в нановолокнистый материал, и инерционными силами:

$$C_i = \frac{\Delta P}{\rho U_0^2} = \frac{0,5\rho U_0^2 + 0,2\rho C U_0 - 2\sqrt{2}\sigma \cos\theta (D_{av}^{-1} + D_N^{-1})}{\rho U_0^2}.$$

Таким образом, P_D с учетом варьирования скорости U_0 составляет 64 Па – 2,5 кПа, а P_H – 120...730 кПа ($C \approx 1481$ м/с, как для воды при 20 °С [94], поскольку используется раствор агара с вязкостью, близкой к воде). В случае NM1 капиллярное давление, связанное с микро- и наноструктурами – P_{CM} and P_{CN} , составляет 20 кПа и 49 кПа соответственно. В случае NM2 аналогичные показатели составляют 65 кПа и 1,2 МПа. Для NM1 значения P_D всегда меньше P_{CM} , даже с учетом варьирования U_0 . Кроме того, значения P_H всегда выше P_{CM} , но P_{CN} во всех случаях ниже P_H . Из данных неравенств следует, что в районе точки контакта капли жидкости с NM1 происходит глубокое впитывание на уровне отдельных волокон и смачивание на уровне наноструктур в рамках каждого отдельного полимерного волокна (рис. 3.1, а, Область 1). В то время как во время растекания под соударяющейся каплей характерным является неполное (неглубокое) впитывание без смачивания наноструктур (рис. 3.1, а, Область 2). Для NM2 модель течения выглядит иначе. Ее характеризуют следующие неравенства: $P_D < P_{CM}$; $P_H > P_{CM}$; $P_{CN} > P_H$, исходя из которых можно заключить, что в районе точки контакта капли жидкости с NM2, так же как и в случае NM1, происходит глубокое впитывание на уровне отдельных волокон диаметром D_{av} . Однако не происходит смачивание наноструктур волокна. Более того, в случае NM2 значения P_{CM} в несколько раз выше, чем в случае NM1, что предполагает менее глубокое впитывание в NM2 (рис. 3.1, б, Область 1). Аналогично можно полагать, что проникновение жидкости на уровне волокон при растекании капли вдоль NM2 будет менее существенным, чем в случае NM1 (рис. 3.1, б, Область 2).

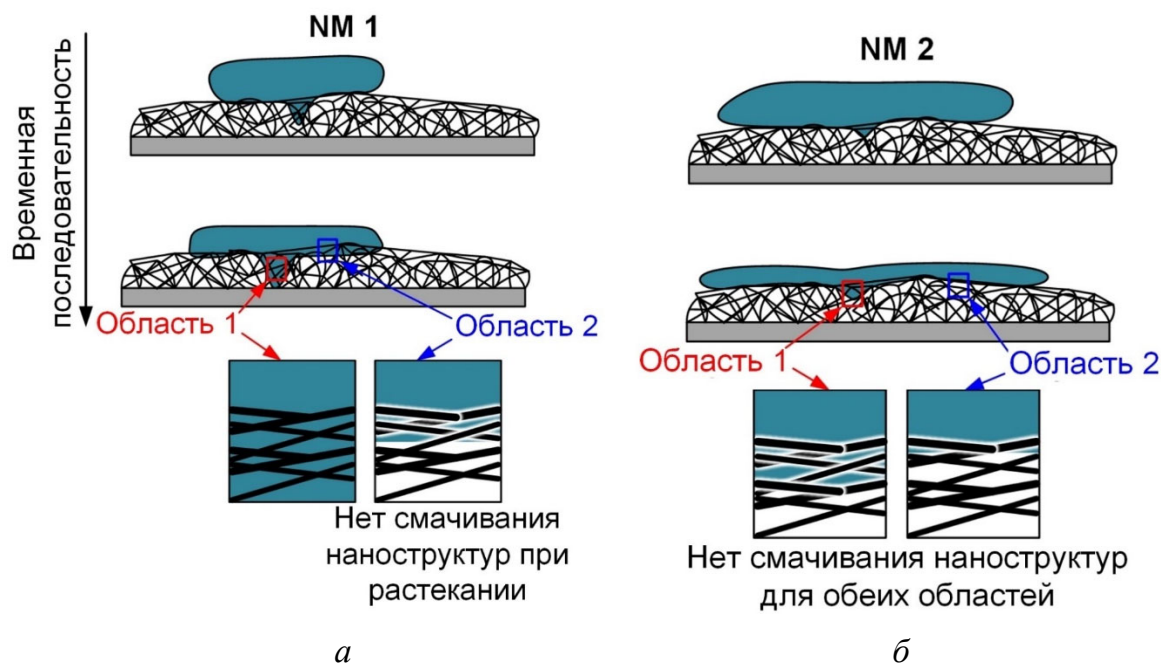


Рис. 3.1. Схематическое изображение течения жидкости под соударяющейся с NM1 (а) и NM2 (б) наполненной частицами геля каплей раствора агары: Область 1 располагается в нановолокнистом материале строго ниже центра масс капли, а Область 2 – ближе к периферии (в радиальном направлении) растекающейся капли

3.2.4. Физическое моделирование на основе уравнений сохранения энергии. Подходы к сравнению экспериментальных и прогнозируемых результатов и определению надежности прогнозирования

В теоретических исследованиях по соударению капли с сухой поверхностью часто используется уравнение энергетического баланса для оценки геометрических параметров растекающейся капли: средней высоты и максимального диаметра. Предполагается, что форма капли представляет собой диск в тот момент, когда диаметр капли достигает своего максимального значения. Кроме того, начальная кинетическая энергия капли приравнивается к поверхностной энергии, изменяющейся из-за деформации капли и работы, проделанной при преодолении вязкости жидкости во время удара [95].

Пример использования метода

Сравнение коэффициента максимального растекания $\beta_{\max}$ ($\beta_{\max} = D_{\max} / D_0$, где $D_{\max}$ – максимальный диаметр растекания капли, м, D_0 – начальный диаметр капли, м) для неньютоновских эмульсий с известными моделями $We^{1/4}$ и $Re^{1/5}$ демонстрирует явные различия (рис. 3.2).

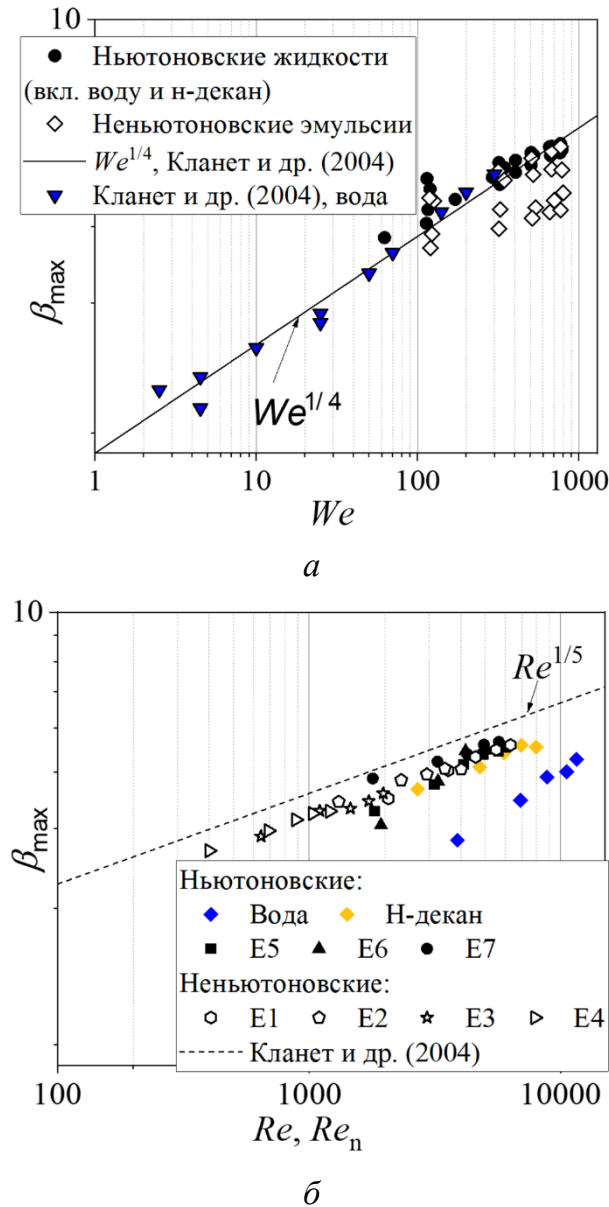


Рис. 3.2. График зависимости коэффициента максимального растекания $\beta_{\max}$ от We для ньютоновских и неньютоновских жидкостей (а) и Re или Re_n (б)

Так, невозможно описать, каким образом значения $\beta_{\max}$ зависят от соотношений между инерционным и капиллярным эффектами или инерционным и вязкостным эффектами по отдельности, хотя значения $\beta_{\max}$ для неньютоновских эмульсий достаточно близки к модели $Re^{1/5}$. Примечательно, что неньютоновское число Рейнольдса Re_n учитывает все реологические свойства пластичных жидкостей Бингама, за исключением предела текучести τ_0 [96].

Чтобы учесть все реологические свойства (включая влияние предела текучести) неньютоновских эмульсий, а также инерционный и капиллярный эффекты, $\beta_{\max}$ представлен как функция от $\hat{B}Re_n$ (рис. 3.3). При значениях $\hat{B} < 1$ отсутствует заметная зависимости углов контакта от предела текучести для гладкой поверхности. Коэффициент максимального растекания определяется следующим образом:

$$\beta_{\max} = 1,65 \left(\hat{B}Re_n \right)^{1/8}. \quad (3.3)$$

Погрешность между значениями $\beta_{\max}$, определенными экспериментально и рассчитанными по уравнению (3.3), равна 4,26 %.

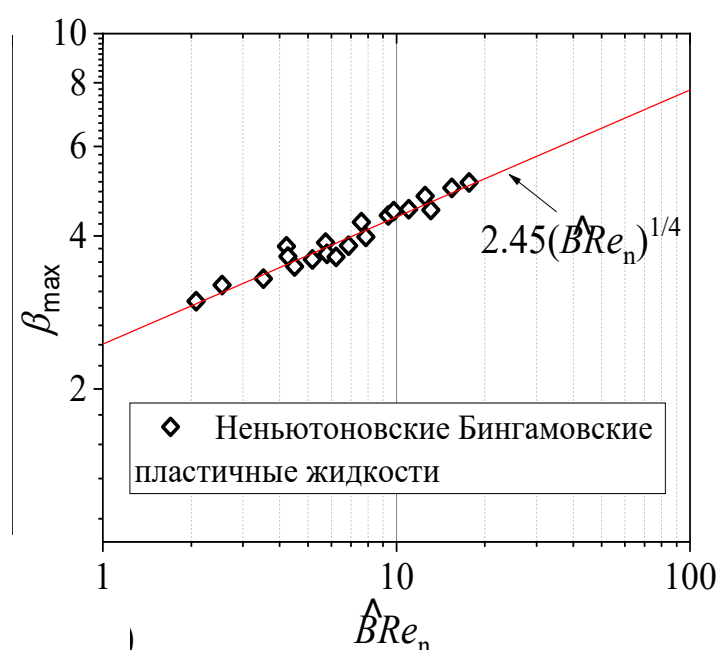


Рис. 3.3. График зависимости коэффициента максимального растекания $\beta_{\max}$ от комплексного параметра $\hat{B}Re_n$

Наибольшее влияние на процесс растекания при столкновении капли ньютоновской эмульсии с поверхностью оказывают капиллярные эффекты внутри капли (рис. 3.4), которые выражаются как поверхностное натяжение на границе раздела жидкость–жидкость. Хотя нет четкой зависимости между значениями σ_{LL} и изменением экспериментального значения $\beta_{\max}$, капиллярные эффекты, возникающие между каплями воды дисперсной фазы и жидкостью непрерывной фазы в эмульсии «вода-в-масле», безусловно, влияют на растекание с точки зрения общей поверхностной энергии и должны быть учтены при моделировании процесса растекания капель эмульсии.

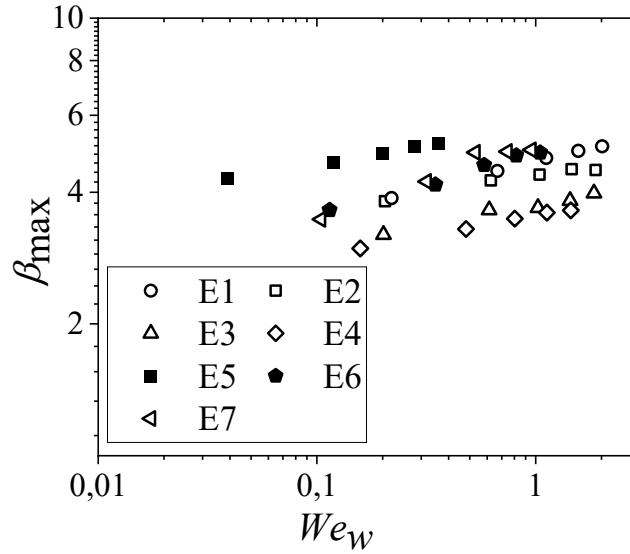


Рис. 3.4. Коэффициент максимального растекания β_{max} в зависимости от функции We_w

На основании недавнего исследования [97], рассматривающего влияние вязкости на процесс взаимодействия капель эмульсии с твердой поверхностью, и обзора существующих классических моделей для β_{max} , относящихся к ньютоновским жидкостям, выбрана только одна модель для сравнения с экспериментальным β_{max} . Это модель Ukiwe и Kwok [98] (уравнение (3.4)), основанная на их экспериментальных результатах, полученных при $18 < We < 370$ и $671 < Re < 9735$. При этом учитывается влияние поверхностной энергии на границе раздела капля – твердое тело и капля–воздух на степень растекания.

$$\left[3(1 - \cos \theta_Y) + 4 \frac{We}{\sqrt{Re}} \right] (\beta_{max}^{model})^3 - (We + 12) \beta_{max}^{model} + 8 = 0, \quad (3.4)$$

где θ_Y – угол смачивания Юнга, °, определенный в соответствии с [99]. В случае эмульсий на основе *n*-декана и *n*-декановой кислоты значения θ_Y пренебрежительно малы в экспериментальных условиях ($\theta_Y \approx 0^\circ$).

Однако модель Ukiwe и Kwok не учитывает поверхностную энергию, возникающую на границе раздела жидкость–жидкость. Возможно, из-за этого возникают расхождения между экспериментальными значениями β_{max} для ньютоновских и неньютоновских эмульсий с расчетными значениями (средняя относительная погрешность составляет 9,81 %, относительное стандартное отклонение – 17,79 % (рис. 3.5). Другие модели, рассмотренные в работе [97], в значительной степени недооценивают или переоценивают экспериментальные значения β_{max} .

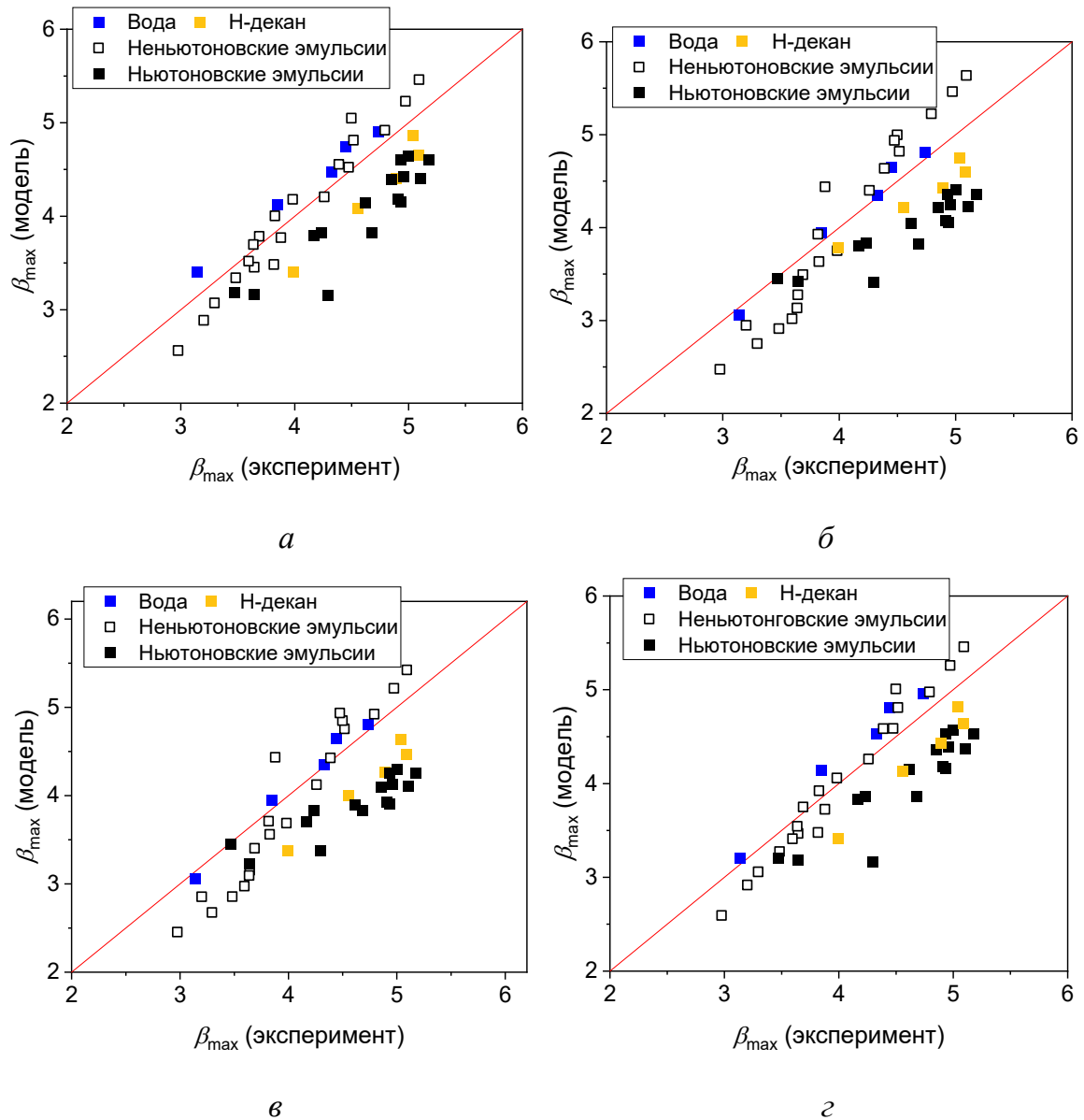


Рис. 3.5. Сравнение экспериментальных значений $\beta_{\max}$ со значениями, полученными на основе существующих моделей:

а – B.L. Scheller и D.W. Bousfield [100]; б – Ukiwe и Kwok [98];

в – Pasandideh-Fard и др. [101]; г – Roisman [95]

Модель Ukiwe и Kwok в значительной степени основана на модели Pasandideh-Fard и др. [101], протестированной для различных поверхностей и жидкостей в широком диапазоне чисел Вебера и Рейнольдса, а именно $26 < We < 641$ и $213 < Re < 35339$. Разница между моделями Pasandideh-Fard и др. и Ukiwe и Kwok заключается в том, что последняя модель учитывает поверхностную энергию при максимальном растекании.

На рис. 3.5, а, з показано сравнение моделей $\beta_{\max}$, представленных в [100] ((3.5) – эмпирическое выражение) и в [95] ((3.6) – полуэмпирическое выражение), с экспериментальными значениями $\beta_{\max}$.

$$\beta_{\max}^{\text{model}} = 0,61(Re^{1/2}We^{1/4})^{0,332} = 0,61(Re^2Oh)^{0,166}, \quad (3.5)$$

$$\beta_{\max}^{\text{model}} = 0,87Re^{1/5} - 0,40Re^{2/5}We^{-1/2}. \quad (3.6)$$

Модель Roisman I. и др. [95] и подтвержденная при $Re \approx 10...40000$ и $We \approx 10...7000$ может быть неадекватной в случае использования вязких жидкостей (например, вязких эмульсий), поскольку она не учитывает влияние вязких напряжений. Тем не менее установлено, что эта модель дает среднюю относительную погрешность 8,17 % и относительное стандартное отклонение 16,42 %. На самом деле расхождения между предсказанным и измеренным $\beta_{\max}$ при использовании модели Roisman I. и др. даже ниже, чем те, которые были получены при использовании Ukiwe и Kwok.

Сравнение экспериментального $\beta_{\max}$ с предсказанным экспериментальным выражением B.L. Scheller и D.W. Bousfield [100], первоначально протестированным для условий $19 < Re < 16400$ и $0,0020 < Oh < 0,58$, обеспечивает наименьшую приведенную погрешность среди протестированных моделей, а именно 8,16 %, и относительное стандартное отклонение 16,16 %. B.L. Scheller и D.W. Bousfield рассматривали базовую модель и модель свободного растекания для определения величины $\beta_{\max}$. Модель свободного растекания более подходит для сравнения, поскольку она предсказывает $\beta_{\max}$ при большом растекании капель. Установлено, что эта модель дает среднюю погрешность в 6,58 %. Однако модель сильно зависит от значений вязкости ньютоновских жидкостей из-за учета скорости линии контакта, которая связана с динамическим углом контакта и числом капиллярности, рассчитанным при растекании. Таким образом, несправедливо предсказывать $\beta_{\max}$, используя эту модель, для неньютоновских жидкостей, обладающих большим количеством реологических свойств (включая предел текучести), которые также следует принимать во внимание. Исходя из этого, все рассмотренные модели для ньютоновских жидкостей неточны для сравнения с экспериментальным $\beta_{\max}$ для неньютоновских эмульсий не только из-за реологических свойств, но и из-за их внутренней структуры, влияющей на общую поверхностную энергию до удара и во время растекания капли.

Чтобы учесть реологические свойства ньютоновских и неньютоновских эмульсий и поверхностную энергию на границах раздела твердое тело – жидкость, жидкость – воздух и жидкость – жидкость капель

эмульсии, были усовершенствованы теоретические модели для $\beta_{\max}$, разработанные Pasandideh-Fard и др. и Ukiwe и Kwok. Данные модели основаны на уравнении сохранения энергии, в котором учитывается энергия непосредственно перед ударом капли и при максимальном растекании. На рис. 3.6 схематично отражено, какие виды энергии задействованы в уравнении сохранения энергии. Основное отличие от моделей Pasandideh-Fard и др. и Ukiwe и Kwok заключается в модификации уравнений для определения величин поверхностной энергии перед ударом и при максимальном растекании, а также во введении неьютоновского числа Рейнольдса Re_n .

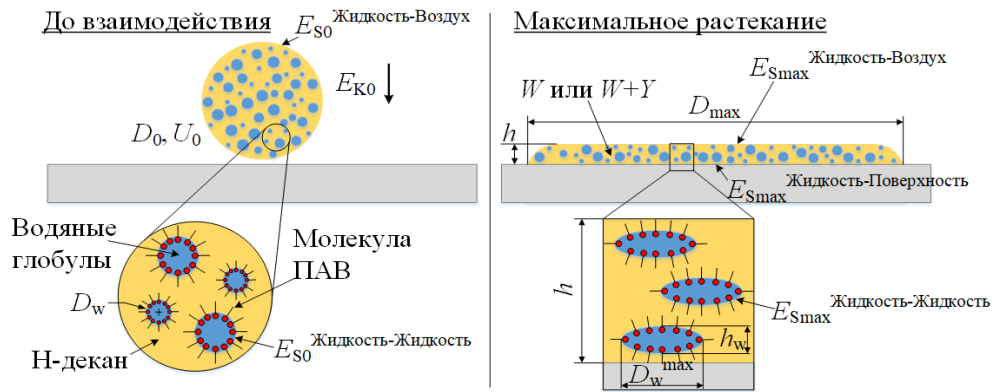


Рис. 3.6. Схема удара капли о твердую поверхность

Непосредственно перед ударом сферической капли о поверхность кинетическая энергия определяется следующим образом:

$$E_{K0} = \left(\frac{\rho U_0^2}{2} \right) \left(\frac{\pi D_0^3}{6} \right). \quad (3.7)$$

Начальная поверхностная энергия (E_{S0}) капли перед ударом помимо поверхностной энергии на границе «жидкость–воздух» $E_{S0}^{Liquid-Air} = \pi D_0^2 \sigma_{LA}$ должна включать поверхностную энергию на границе раздела «жидкость–жидкость» $E_{S0}^{Liquid-Liquid} = N \pi D_w^2 \sigma_{LL}$, где D_w – количество капель воды дисперсной фазы эмульсии, м, N – параметр, учитывающий долю дисперсной фазы (т. е. количество капель воды внутри капли эмульсии). Параметр N можно определить из соотношения

$$N = \frac{V_{wv}}{V_w} = \frac{V_0 \phi_w}{V_w}, \quad (3.8)$$

где V_{wv} – объем воды в капле эмульсии, м³; V_w – объем капли воды, м³; V_0 – объем капли эмульсии, м³; ϕ_w – объемная доля воды.

Объемы V_0 и V_w могут быть определены как объем сферы с использованием D_0 и D_w соответственно. Объемная доля может быть представлена с помощью массовой доли ω_w как $\phi_w = \omega_w \rho \rho_w^{-1}$, где ρ_w – плотность воды, кг/м³. Тогда уравнение (3.8) можно записать как

$$N = \left(\frac{D_0}{D_w} \right)^3 \left(\frac{\omega_w \rho}{\rho_w} \right). \quad (3.9)$$

Таким образом, поверхностную энергию капли сферической эмульсии до удара можно записать как

$$E_{S0} = \pi D_0^2 \sigma_{LA} + \frac{D_0^3 \omega_w \rho \pi D_w^2 \sigma_{LL}}{D_w \rho_w}. \quad (3.10)$$

После удара, в момент максимального растекания капли, кинетическая энергия равна нулю, в то время как общая поверхностная энергия состоит из двух составляющих: внутренней и внешней. Внешняя поверхностная энергия, то есть сумма энергий на границах раздела жидкость–воздух и жидкость – твердое тело:

$$E_{S\max}^{Liquid-Air} + E_{S\max}^{Liquid-Solid} = \pi \sigma_{LA} D_{\max} h + \pi \sigma_{LA} D_{\max}^2 \cdot (1 - \cos \theta_{\beta_{\max}}) / 4,$$

хорошо описана Ukiwe и Kwok [98] с помощью цилиндрической модели, которая принята в качестве предполагаемой формы при максимальном растекании с диаметром основания $D_{\max}$ и высотой $h = (2D_0^3) / (3D_{\max}^2)$. Модель Pasandideh-Fard и др., в которой наступающий контактный угол θ_a измеряется, как постоянная величина, почти до максимального разброса, предполагает использование значение $\beta_{\max}$ вместо θ_y при определении внешней поверхностной энергии. Внутренняя поверхностная энергия при максимальном растекании жидкости $E_{S\max}^{Liquid-Liquid}$ рассматривается на границе раздела жидкость–жидкость с использованием той же модели Ukiwe и Kwok и формы капель дисперсной фазы в эмульсии. Предполагается, что удар капли и истончение пленки при радиальном растекании капли способствуют незначительной деформации капель воды дисперсной фазы. Таким образом, максимальный диаметр (диаметр цилиндра) деформированной капли воды $D_w^{\max} = 2D_w$, а ее высота определяется как $h_w = (2D_0^3) / (3D_{\max}^2)$ аналогично h . Также предполагается, что «цилиндрические» капли воды дисперсной фазы контактируют с непрерывной средой эмульсии, тогда как их контакт с твердой поверхностью или между собой незначителен и не принимается во внимание. Тогда выражение (3.11)

для определения внутренней поверхностной энергии в момент максимального растекания капли эмульсии примет следующий вид:

$$E_{S\max}^{Liquid-Liquid} = \frac{2\pi}{3}\sigma_{LA}\frac{D_0^3}{D_{\max}} + \frac{\pi}{4}\sigma_{LA}D_{\max}^2(1 - \cos\theta_{\beta_{\max}}) + \frac{4}{3}\frac{D_0^3\omega_w\rho\pi\sigma_{LL}}{D_w\rho_w}. \quad (3.11)$$

Энергия, потерянная из-за вязкой диссипации W , определяется по формуле (3.12), впервые введенной в модели Pasandideh-Fard и др. Однако для капель неньютоновских эмульсий необходимо использовать Re_n . На самом деле, рассматривая вязкопластичные жидкости, следует учитывать вязкую и пластическую диссипацию $W + Y$. Предложенная модель была адекватно протестирована только для случая, когда число Бингама B_n , описывающее соотношение между пределом текучести и силой вязкости, близко к нулю. Это означает, что пластическая работа Y пренебрежимо мала.

$$W = \frac{\pi}{3}\rho U_0^2 D_0 D_{\max}^2 \frac{1}{\sqrt{Re_n}}. \quad (3.12)$$

После подстановки уравнений (3.7), (3.10) и (3.12) в формулу закона сохранения энергии $E_{K0} + E_{S0} = E_{S\max} + W$ получим выражение для коэффициента максимального растекания капли неньютоновской эмульсии:

$$\beta_{\max} = \frac{D_{\max}}{D_0} = \sqrt{\frac{12 + We + 4\frac{We}{We_w}\omega_w}{\frac{4We}{\sqrt{Re_n}} - 3(1 - \cos\theta_{\beta_{\max}})}}. \quad (3.13)$$

В случае ньютоновских эмульсий и n -декана значение W рассчитывается с использованием Re . Значения $\beta_{\max}$, полученные с использованием уравнения (3.13), сравниваются с экспериментальными значениями $\beta_{\max}$ в широком диапазоне чисел Вебера ($122 < We < 1219$), Рейнольдса ($502 < Re$ (или Re_n) < 15834) и характерного числа Вебера ($0,04 < We_w < 2,01$), связанного с диспергированными каплями воды для рассматриваемых эмульсий. На рис. 3.7 продемонстрировано минимальное расхождение между прогнозируемыми и измеренными значениями: средняя процентная ошибка составляет менее 8,88 %; относительное стандартное отклонение $\beta_{\max}^{model}$ составляет 15,84 %.

При условии, что $We \gg \sqrt{Re_n}$, контактный угол оказывает незначительное влияние на $\beta_{\max}^{model}$ и, следовательно, капиллярными эффектами при моделировании растекания можно пренебречь.

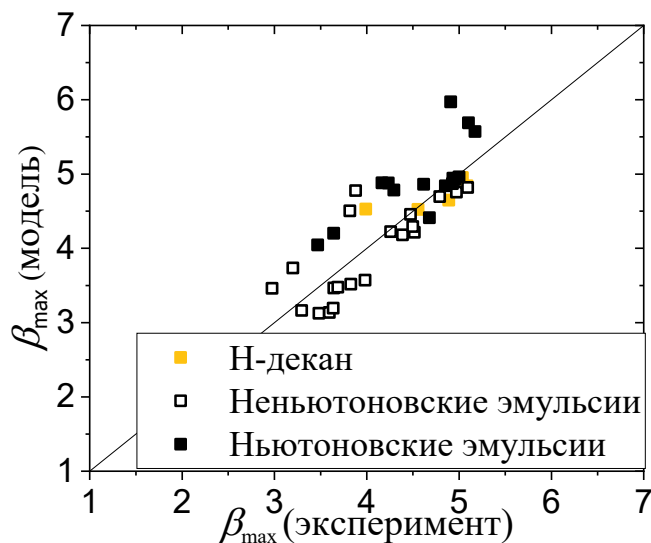


Рис. 3.7. Сравнение значений коэффициента максимального растекания, предсказанных с помощью уравнения (3.13), с экспериментальными данными

Для минимизации погрешностей в подобных исследованиях рекомендуется проведение убедительного (повышенного) количества опытов для надежного определения истинных значений искомых величин. Кроме того, важно следовать общеизвестным правилам округления чисел с отбрасыванием значащих цифр справа до определенного разряда с возможным изменением цифры этого разряда.

3.2.5. Физическое моделирование растекания капель жидкости по твердым поверхностям

Одной из основных трудностей в понимании кинетики смачивания является описание движения линии трехфазного контакта (ЛТК). При растекании капли ЛТК вытесняет газ с поверхности твердого тела, из чего следует, что условие прилипания жидкости, используемое в механике жидкости, нарушается. Основными характеристиками, используемыми для количественной оценки кинетики смачивания, являются скорость перемещения ЛТК и динамические контактные углы смачивания (рис. 2.28). При определении гистерезиса контактного угла (п. 2.6.1) перемещение контактной линии происходит принудительно вследствие приложения внешней силы (накачка/откачка жидкости). В таких условиях предполагается связь между динамическими углами смачивания и скоростью перемещения ЛТК. Разработано большое количество моделей по прогнозированию движения линии трехфазного контакта. Наиболее широко распространенными являются гидродинамическая и молекулярно-кинетическая модели.

В основе *гидродинамической модели* [102, 103] лежит предположение, что диссипация энергии происходит вследствие вязкого течения жидкости внутри капли, а изменение экспериментально наблюдаемых динамических углов смачивания (макроскопических) объясняется изгибом границы раздела жидкость–газ в мезоскопической области (рис. 3.8).

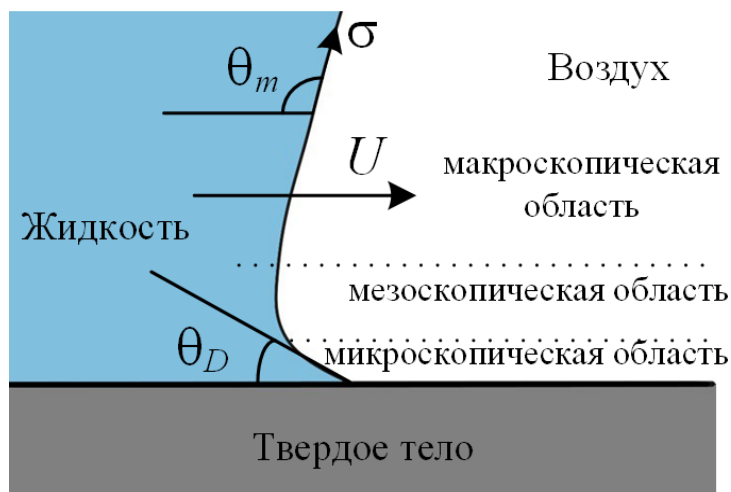


Рис. 3.8. Схематичное изображение механизма перемещения ЛТК капли согласно гидродинамической теории

Выражение, описывающее изменение динамического краевого угла, можно записать следующим образом [103]:

$$\theta_D^3 - \theta_m^3 = 9 \cdot \text{Ca} \cdot \ln \left(\frac{L}{L_m} \right), \quad (3.14)$$

где θ_D — динамический угол смачивания в макроскопической области (видимый); θ_m — микроскопический угол смачивания, при расчетах принимается допущение, что он равен статическому углу смачивания; Ca — число капиллярности; L и L_m — макроскопический и микроскопический масштабы длины соответственно.

В рамках *молекулярно-кинетической модели* [104, 105] перемещение ЛТК определяется статистической динамикой молекул внутри трехфазной зоны, где встречаются твердая, жидкая и газовая фазы (рис. 3.9).

Согласно этой модели скорость перемещения линии трехфазного контакта U можно определить как [105]

$$U = 2 \cdot \kappa_0 \lambda \sinh \left(\sigma (\cos(\theta) - \cos(\theta_D)) \lambda^2 / 2k_b T \right), \quad (3.15)$$

где κ_0 — равновесная частота случайных молекулярных перемещений, происходящих в области ЛТК, Гц; λ — длина свободного пробега молекул, м; k_b — постоянная Больцмана, Дж/К; T — абсолютная температура, К.

Величина $k_b T / \kappa_0 \lambda^3$ соответствует значению коэффициента трения ЛТК (ζ) при растекании. Размерность коэффициента трения соответствует размерности коэффициента вязкости. Однако экспериментальные значения ζ всегда превышают значения вязкости жидкости [59].

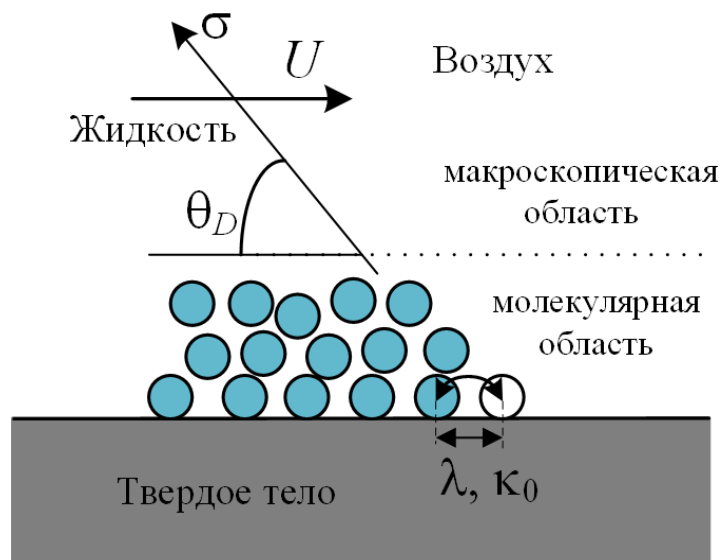


Рис. 3.9. Схематичное изображение механизма перемещения ЛТК капли согласно молекулярно-кинетической теории

В случае, если аргумент функции $\sinh$ мал, уравнение (3.15) сводится к линейному виду:

$$U = \kappa_0 \lambda^3 \sigma (\cos(\theta) - \cos(\theta_D)) / 2k_b T. \quad (3.16)$$

Пример математической обработки экспериментальных результатов моделями (3.14)–(3.16) представлен на рис. 3.10.

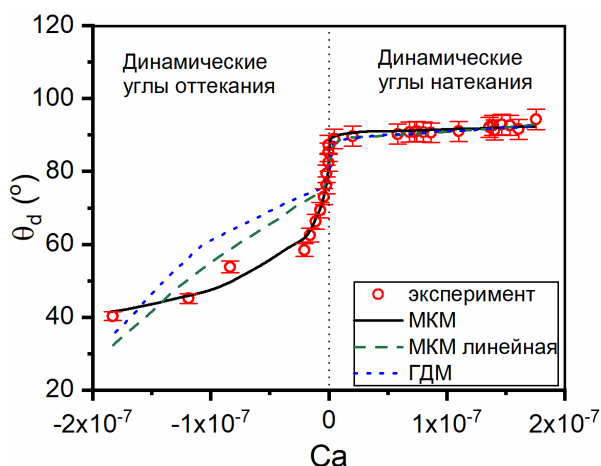


Рис. 3.10. Пример аппроксимации экспериментальных зависимостей динамических наступающих и отступающих контактных углов от скорости перемещения контактной линии гидродинамической (HDM), классической (МКМ) и линейной (МКМ line) молекулярно-кинетическими моделями

Величины λ , κ_0 , L и L_m следует рассматривать как регулируемые параметры и получать их экспериментально с помощью процедур аппроксимации кривой [106]. Несмотря на различия в физике процесса перемещения ЛТК, как гидродинамическая, так и молекулярно-кинетическая модели достаточно точно предсказывают результаты экспериментов по растеканию в ряде систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как уже было ранее отмечено, быстропротекающие процессы взаимодействия капель с твердыми поверхностями (удар, растекание, испарение и т. д.), распыления, горения и выхода летучих имеют принципиальное значение для решения самых разных практических задач. Например, такие процессы реализуются в камерах сгорания энергетических установок и двигателях внутреннего сгорания, распылительных системах при приготовлении многокомпонентных смесей или разделении компонентов, при термической и огневой сушке жидкостей с примесями, в испарительных и теплообменных системах, химических реакторах, при тушении пожаров и дымоосаждении, в пищевой промышленности, струйной печати, медицине и др. Во всех перечисленных приложениях на характеристики гидрогазодинамических и теплообменных процессов сильное влияние оказывает реология и поверхностное натяжение жидкостей, а также свойства твердых поверхностей [1–4].

Экспериментальные методы изучения свойств жидкостей и поверхностей весьма разнообразны. К способам изучения чистых жидкостей можно отнести определение их плотности, вязкости, поверхностного натяжения. Если в жидкости есть включения твердых частиц (суспензии) или капель другой жидкости (эмульсии), то количество методов по определению ее характеристик расширяется. Размер включений, скорость их осаждения, стабильность суспензии и эмульсии, текучесть, межфазное натяжение – для каждого свойства существует свой метод изучения, который приведен в пособии. В свою очередь, к основным характеристикам поверхности можно отнести ее смачиваемость, свободную поверхностную энергию, шероховатость и пористость. Представлены способы по определению статических и динамических контактных углов смачивания, а также гистерезиса. Рассмотрены методы определения шероховатости, пористости и свободной поверхностной энергии.

В последние десятилетия наблюдается активное развитие высокоскоростных способов регистрации быстропротекающих процессов, это связано с развитием техники и технологий. Современные видеокамеры способны получать изображения со скоростью до нескольких миллионов кадров в секунду. В пособии рассмотрены методы теневой оптической регистрации, цифровой трассерной визуализации, лазерной индуцированной флуоресценции, плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции и др. При помощи этих способов возможно установить геометрические характеристики исследуемого объекта, скорость движения, температурные, конвективные и концентрационные потоки в жидкостях и газах.

Также ведутся исследования и разработки альтернативных видов топлива с целью снижения негативного воздействия вредных выбросов на атмосферу и другие сферы жизни человека [36]. В пособии представлен метод приготовления биотоплива на основе рапсового масла с использованием мембранного реактора (поливинилиденфторид и сополимер винилиденфторида с тетрафторэтиленом), в основе которого лежат процессы переэтерификации и пассивной нанофильтрации. Производство горючего таким образом является более экологически устойчивым. Также в пособии рассмотрены экспериментальные методы исследования биотоплива, такие как определение цетанового числа, температуры вспышки в закрытом тигле, удельной теплоты сгорания, состава топлива (концентрации различных компонентов).

С целью понимания механизмов взаимодействия капель жидкостей с твердыми поверхностями приведены подходы к физическому и теоретическому моделированию процессов. Эти подходы основаны на положениях о сохранении диссипации энергии вблизи контактной линии (связанные с вязкими течениями и вандерваальсовыми взаимодействиями). Рассмотрены теоретические и полуэмпирические модели для прогнозирования коэффициента максимального растекания капель жидкостей (Roisman I. и др. , Ukiwe и Kwok, B.L. Scheller и D.W. Bousfield) и гидродинамическая модель движения контактной линии капли по твердой поверхности [102, 103], а также приведены примеры их реализации. В настоящий момент не представлена универсальная зависимость, которая бы полностью описывала поведение капель на поверхностях в различных условиях. До сих пор ведутся как экспериментальные, так и теоретические исследования по этой теме.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какой принцип лежит в основе метода теневой видеосъемки?
2. Назовите различия между методами цифровой трассерной визуализации и лазерной индуцированной фосфоресценции.
3. Опишите процедуру проведения исследования при помощи метода высокоскоростной видеорегистрации.
4. Что такое воздушная микрофлюидика? В чем ее отличия от канальной микрофлюидики?
5. Почему при приготовлении биотоплива используется метиловый спирт, а не другие?
6. Куда следует помещать датчик газоанализатора при проведении анализа отработанных газов? Почему?
7. Что такое время диффузионного зажигания?
8. Для чего необходим балласт в ареометре?
9. В чем состоит процедура измерения плотности ареометром?
10. Запишите формулу для определения плотности пикнометрическим методом.
11. Назовите разновидности вязкости, их единицы измерения и методы определения.
12. Запишите уравнение вязкого трения Ньютона.
13. Какие жидкости называют неньютоновскими? Приведите примеры (не менее 3).
14. При каких условиях вязкопластичная жидкость начинает вести себя как ньютоновская жидкость?
15. Назовите методы определения поверхностного натяжения? В чем их преимущества и недостатки?
16. Что такое цетановое число? При каких значениях цетанового числа происходит задержка зажигания топлива?
17. При какой температуре над поверхностью топлива образуются пары в концентрации, необходимой для самовозгорания при наличии искры?
18. Для чего используется метод Пенски–Мартенса? Опишите процедуру проведения исследования.
19. Что лежит в основе метода масс-спектропии?
20. Что такое фотонная корреляционная спектроскопия?
21. Когда можно наблюдать дилатантный эффект? Приведите пример.
22. Запишите выражение для определения коэффициента отделения воды.
23. В чем состоит физический смысл числа Бингмана?

24. Как определить стабильность образованного твердого осадка в суспензии?
25. Что такое контактный угол? В чем различие между статическими и динамическими контактными углами?
26. Для чего используется модель Гершеля–Балкли?
27. Какие виды поверхностей на основе свойств смачиваемости вы знаете?
28. В чем состоит различие методов «иглы сверху» и «bottom-up»?
29. Как можно оценить пористость материала?
30. Что такое свободная поверхностная энергия твердого тела?
31. В чем отличия между методами определения СПЭ Фоукса и ОВРК?
32. Запишите уравнение для определения работы адгезии.
33. На какие компоненты можно разделить полярную составляющую в методе Оусса и Гуда? Запишите основное уравнение этого метода.
34. В чем различия между размерными и безразмерными величинами?
35. При каких условиях достигается физическое подобие двух течений?
36. Каков физический смысл числа Бонда?
37. Какими методами возможно определить коэффициент максимального растекания?
38. При каких условиях смачиваемость поверхности не будет оказывать влияние на коэффициент максимального растекания?
39. В чем заключается физический смысл чисел Рейнольдса и Вебера?
40. Что лежит в основе гидродинамической модели?
41. В чем различия между линейной и классической молекулярно-кинетической моделями? Запишите уравнения для определения скорости перемещения линии трехфазного контакта для этих моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Secondary atomization of a biodiesel micro-emulsion fuel droplet colliding with a heated wall / A.E. Ashikhmin, N.A. Khomutov, M.V. Piskunov, V.A. Yanovsky // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2020. – Vol. 10, No. 2. – P. 685.
2. On the instability of water-in-oil emulsion drop lamella and rim moving over a heated surface in the film boiling regime / M. Piskunov, A. Semyonova, A. Ashikhmin et al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 202. – P. 123724–123724.
3. Effect of rheology and interfacial tension on spreading of emulsion drops impacting a solid surface / M. Piskunov, A. Semyonova, N.A. Khomutov, et al. // *Physics of Fluids*. – 2021. – Vol. 33, No. 8. – P. 83309–83309.
4. Droplet collision with hydrophobic and superhydrophobic surfaces: Experimental studies and numerical modeling / D.V. Antonov, A.G. Islamova, E.G. Orlova, P.A. Strizhak // *Surfaces and Interfaces*. – 2024. – Vol. 48. – P. 104264.
5. Droplet impact on superhydrophobic surfaces: A review of recent developments / D. Khojasteh, M. Kazerooni, S. Salarian, R. Kamali // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2016. – Vol. 42. – P. 1–14.
6. Mohammad Karim A. Physics of droplet impact on various substrates and its current advancements in interfacial science: A review / Karim A. Mohammad // *Journal of Applied Physics*. – 2023. – Vol. 133. – P. 030701.
7. Legros J.C. Evaporation of water droplets with metallic inclusions / J.C. Legros, M.V. Piskunov // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2018. – Vol. 102. – P. 64–76.
8. Unsteady temperature fields of evaporating water droplets exposed to conductive, convective and radiative heating / G.V. Kuznetsov, M.V. Piskunov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 131. – P. 340–355.
9. Impact of holder materials on the heating and explosive breakup of two-component droplets / D. Antonov, J. Bellettre, D. Tarlet et al. // *Energies*. – 2018. – Vol. 11. – No. 12. – P. 3307.
10. Convective heat transfer in droplets of fuel microemulsions during conductive heating / N. Khomutov, S. Misyura, M. Piskunov et al. // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2021. – Vol. 120. – P. 110258–110258.
11. Volkov R.S. Temperature and velocity fields of the gas-vapor flow near evaporating water droplets / R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2018. – Vol. 134. – P. 337–354.
12. Voytkov I.S. Temperature and velocity of the gas-vapor mixture in the trace of several evaporating water droplets / I.S. Voytkov, R.S. Volkov,

P.A. Strizhak // Journal of Heat Transfer. – 2019. – Vol. 141. – No. 1. – P. 011502.

13. Volkov R.S. Planar laser-induced fluorescence diagnostics of water droplets heating and evaporation at high-temperature / R.S. Volkov, P.A. Strizhak // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 127. – P. 141–156.

14. Evaporation, boiling and explosive breakup of oil–water emulsion drops under intense radiant heating / P.A. Strizhak, M.V. Piskunov, R.S. Volkov, J.C. Legros // Chemical Engineering Research and Design. – 2017. – Vol. 127. – P. 72–80.

15. Antonov D.V. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions / D.V. Antonov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak // International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – Vol. 142. – P. 30–41.

16. Piskunov M. Experimental and numerical studies on the temperature in a pendant water droplet heated in the hot air / M. Piskunov, P. Strizhak, R. Volkov // International Journal of Thermal Sciences. – 2021. – Vol. 163. – P. 106855.

17. Effects of wall temperature and temperature-dependent viscosity on maximum spreading of water-in-oil emulsion droplet / M. Piskunov, A. Ashikhmin, N. Khomutov, A. Semyonova // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – Vol. 185. – P. 122442.

18. Secondary atomization of water-in-oil emulsion drops impinging on a heated surface in the film boiling regime / M. Piskunov, J. Breitenbach, J.B. Schmidt et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 165. – P. 120672.

19. Nucleate boiling heat transfer during water–IN–oil emulsion drop impact onto a heated solid surface / A. Ashikhmin, A. Semyonova, V. Fedorov et al. // International Journal of Thermal Sciences. – 2023. – Vol. 184. – P. 107989.

20. Unsteady convective flow of a preheated water-in-oil emulsion droplet impinging on a heated wall / M. Piskunov, N. Khomutov, A. Semyonova et al. // Physics of Fluids. – 2022. – Vol. 34, No. 9. – P. 93311.

21. Dynamic and kinematic characteristics of unsteady motion of a water-in-oil emulsion droplet in collision with a solid heated wall under conditions of convective heat transfer / A. Semyonova, N. Khomutov, S. Misyura, M. Piskunov // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2022. – Vol. 137. – P. 106277.

22. Seiffert S. Janus Microgels Produced from Functional Precursor Polymers / S. Seiffert, M.B. Romanowsky, D.A. Weitz // Langmuir. – 2010. – Vol. 26, No. 18. – P. 14842–14847.

23. In-air microfluidics enables rapid fabrication of emulsions, suspensions, and 3D modular (bio)materials / C.W. Visser, T. Kamperman, L.P. Karbaat et al. // *Science Advances*. American Association for the Advancement of Science. – 2018. – Vol. 4, No. 1. – P. 1–8.
24. Alzanbaki H. Engineered Microgels—Their Manufacturing and Biomedical Applications / H. Alzanbaki, M. Moretti, C.A.E. Hauser // *Micromachines*. – 2021. – Vol. 12. – P. 45.
25. Microgel Particle Collision with Smooth and Nanofiber Hydrophobic Surfaces during Three-Dimensional Printing of a Biopolymer Layer / M. Piskunov, N. Khomutov, A. Semyonova et al. // *Langmuir*. – 2023. – Vol. 39, No. 25. – P. 8841–8854.
26. Christanti Y. Effect of fluid relaxation time of dilute polymer solutions on jet breakup due to a forced disturbance / Y. Christanti, L.M. Walker // *Journal of Rheology*. – 2002. – Vol. 46, No. 3. – P. 733–748.
27. Li J. Drop dynamics on the beads-on-string structure for viscoelastic jets: A numerical study / J. Li, M.A. Fontelos // *Physics of Fluids*. American Institute of Physics. – 2003. – Vol. 15, No. 4. – P. 922–937.
28. Sattler R. The final stages of capillary break-up of polymer solutions / R. Sattler, S. Gier, J. Eggers, C. Wagner // *Physics of Fluids*. American Institute of Physics. – 2012. – Vol. 24, No. 2. – P. 23101.
29. In-air microfluidics enables rapid fabrication of emulsions, suspensions, and 3D modular (bio)materials / C.W. Visser, T. Kamperman, L.P. Karbaat et al. // *Science Advances*. American Association for the Advancement of Science. – 2018. – Vol. 4. – P. eaao1175.
30. Features of the Destruction of a Microjet of a Diluted Polymer Solution into Main and Satellite Microdrops under the Action of an External Vibrational Impact / N.A. Khomutov, A.E. Semyonova, M.V. Belonogov et al. // *Technical Physics*. – 2023. Vol. 93. – P. 37–47.
31. Особенности разрушения микроструи разбавленного полимерного раствора на основные и спутниковые микрокапли под действием внешнего вибрационного воздействия / Н.А. Хомутов, А.Е. Семенова, М.В. Белоногов и др. // *Журнал технической физики*. – 2023. – Т. 93, № 1. – С. 37–47.
32. Alalwan H.A. Promising evolution of biofuel generations. Subject review / H.A. Alalwan, A.H. Alminshid, H.A.S. Aljaafari // *Renewable Energy Focus*. – 2019. – Vol. 28. – P. 127–139.
33. Review of biodiesel composition, properties, and specifications / S.K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – Vol. 16. – P. 143–169.

34. Biodiesel from Rapeseed and Sunflower Oil: Effect of the Transesterification Conditions and Oxidation Stability / E. Khan, K. Ozaltin, D. Spagnuolo et al. // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, No. 2. – P. 657.
35. Alternative Liquid Fuels for Power Plants and Engines for Aviation, Marine, and Land Applications / G. Kuznetsov, D. Antonov, M. Piskunov et al. // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 24. – P. 9565.
36. Santhoshkumar A. Chapter 12. Performance, combustion, and emission characteristics of DI diesel engine using mahua biodiesel / A. Santhoshkumar, V. Thangarasu, R. Anand // *Advanced Biofuels: Applications, Technologies and Environmental Sustainability*. – 2019. – P. 291–327.
37. Review of biodiesel composition, properties, and specifications / S.K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – Vol. 16. – P. 143–169.
38. Combustion characteristics and soot distributions of neat butanol and neat soybean biodiesel / H. Liu, C. F.F. Lee, M. Huo, M. Yao // *Energy and Fuels*. – 2011. – Vol. 25, No. 7. – P. 3192–3203.
39. Thangaraja J. Biodiesel NOx penalty and control measures – A review / J. Thangaraja, K. Anand, P.S. Mehta // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 61. – P. 1–24.
40. Неньютоновские жидкости // *Современные технологии производства*. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://extxe.com/14430/nenjutonovskie-zhidkosti/>, свободный.
41. Реологические модели // *Гидроаэромеханика*. – Электрон. дан. – Режим доступа: http://bngs.samgtu.ru/sites/bngs.samgtu.ru/files/zanyatie_3_reologichskie_modeli.pdf, свободный.
42. Multiple Drop Impact onto a Dry Solid Substrate / I.V. Roisman, B. Prunet-Foch, C. Tropea, M. Vignes-Adler // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2002. – Vol. 256, No. 2. – P. 396–410.
43. Roisman I.V. Normal impact of a liquid drop on a dry surface: model for spreading and receding / I.V. Roisman, R. Rioboo, C. Tropea // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2002. – Vol. 458. – P. 1411–1430.
44. Piskunov M. Stability and rheology of carbon-containing composite liquid fuels under subambient temperatures / M. Piskunov, D. Romanov, P. Strizhak // *Energy*. – 2023. – Vol. 278. – P. 127912.
45. John Panneer Selvam D. The effects of ethanol addition with waste pork lard methyl ester on performance, emission, and combustion characteristics of a diesel engine / D. John Panneer Selvam, K. Vadivel // *Thermal Science*. – 2014. – Vol. 18. – P. 217–228.
46. Örs İ. Experimental investigation of the cetane improver and bioethanol addition for the use of waste cooking oil biodiesel as an alternative fuel

in diesel engines / İ. Örs // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2020. – Vol. 42, No. 4. – P. 177.

47. Faried M. Biodiesel production from microalgae: Processes, technologies and recent advancements / M. Faried, M. Samer, E. Abdelsalam et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 79. – P. 893–913.

48. Properties and Phase Behavior of Water-in-Diesel Microemulsion Fuels Stabilized by Nonionic Surfactants in Combination with Aliphatic Alcohol / A. Ashikhmin, M. Piskunov, V. Yanovsky, W.M. Yan // Energy and Fuels. – 2020. – Vol. 34, No. 2. – P. 2135–2142.

49. Thermal stability control of the water-in-diesel microemulsion fuel produced by using a nonionic surfactant combined with aliphatic alcohols / A. Ashikhmin, M. Piskunov, I. Roisman, V. Yanovsky // Journal of Dispersion Science and Technology. – 2020. – Vol. 41, No. 5. – P. 771–778.

50. Synergistic Effect of the Fuel Microemulsion Characteristics on Drop Interaction with a Hot Wall / A. Ashikhmin, N. Khomutov, M. Piskunov et al. // Energy & Fuels. – 2021. – Vol. 35, No. 9. – P. 8042–8050.

51. Individual and synergistic effects of modifications of the carrier medium of carbon-containing slurries on the viscosity and sedimentation stability / M. Piskunov, D. Romanov, P. Strizhak, V. Yanovsky // Chemical Engineering Research and Design. – 2022. – Vol. 184. – P. 191–206.

52. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil / G.V. Kuznetsov, D.S. Romanov, K.Y. Vershinina, P.A. Strizhak // Fuel. – 2021. – Vol. 302. – P. 121203–121203.

53. The slurring properties of slurry fuels made of petroleum coke and petrochemical sludge / R. Wang, J. Liu, F. Gao et al. // Fuel Processing Technology. – 2012. – Vol. 104. – P. 57–66.

54. Effect of oily sludge on the rheological characteristics of coke-water slurry / M. Xu, H. Liu, H. Zhao, W. Li // Fuel. – 2014. – Vol. 116. – P. 261–266.

55. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels / L.M.E.F. Loureiro, P.B.F. Gil, F.V. Viera de Campos et al. // Journal of the Energy Institute. – 2018. – Vol. 91, No. 6. – P. 978–983.

56. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner / E.Y. Shadrin, I.S. Anufriev, E.B. Butakov et al. // Fuel. – 2021. – Vol. 303. – P. 121182.

57. Promoted slurryability of petroleum coke–water slurry by using black liquor as an additive / X. Zhan, Z. Zhou, W. Kang, F. Wang // Fuel Processing Technology. – 2010. – Vol. 91, No. 10. – P. 1256–1260.

58. Evaporation modes of LiBr, CaCl₂, LiCl, NaCl aqueous salt solution droplets on aluminum surface / G.V. Kuznetsov, D.V. Feoktistov, E.G. Orlova

et al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 126. – P. 161–168.

59. Dynamic characteristics of water spreading over laser-textured aluminum alloy surfaces / G.V. Kuznetsov, D.V. Feoktistov, E.G. Orlova et al. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2020. – Vol. 603. – P. 125253.

60. Local structures and electrical properties of organic molecular films investigated by non-contact atomic force microscopy / H. Yamada, T. Fukuma, K. Umeda et al. // *Applied Surface Science*. – 2002. – Vol. 188, No. 3. – P. 391–398.

61. Advanced porous polybenzimidazole membranes for vanadium redox batteries synthesized via a supercritical phase-inversion method / V.E. Sizov, M.S. Kondratenko, M.O. Gallyamov, K.J. Stevenson // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2018. – Vol. 137. – P. 111–117.

62. Zisman W.A. Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution / W.A. Zisman // *Contact Angle, Wettability, and Adhesion*. – 1964. – Vol. 43. – P. 1–51.

63. Fowkes F.M. Attractive Forces at Interfaces / F.M. Fowkes // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1964. – Vol. 56, No. 12. – P. 40–52.

64. Kaelble D.H. Dispersion-Polar Surface Tension Properties of Organic Solids / D.H. Kaelble // *The Journal of Adhesion*. – 1970. – Vol. 2, No. 2. – P. 66–81.

65. Owens D.K. Estimation of the surface free energy of polymers / D.K. Owens, R.C. Wendt // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1969. – Vol. 13, No. 8. – P. 1741–1747.

66. Schrader M.E. Modern approaches to wettability: theory and applications / M.E. Schrader, G.I. Loeb. – Boston, MA : Springer US, 1992. – 451 p.

67. 91325 DIN SPEC. Characterization of sprays and spraying processes by measuring the size and the velocity of non-transparent droplets. – German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 2015. – 28 p.

68. Musoff H. Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach, Third Edition / H. Musoff, P. Zarchan // *Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach*. – Third Edition. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005. – 765 p.

69. Heinz M. Influence of nanofiber coating thickness and drop volume on spreading, imbibition, and evaporation / M. Heinz, P. Stephan, T. Gambaryan-Roisman // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2021. – Vol. 631. – P. 127450.

70. Impact Dynamics of Aqueous Polymer Droplets on Superhydrophobic Surfaces / L. Chen, Y. Wang, X. Peng et al. // *Macromolecules*. – 2018. – Vol. 51, No. 19. – P. 7817–7827.

71. Contact line-based model for the Cassie-Wenzel transition of a sessile droplet on the hydrophobic micropillar-structured surfaces / B. Hou, C. Wu, X. Li et al. // *Applied Surface Science*. – 2021. – Vol. 542. – P. 148611.
72. Lee J.B. Dynamic Wetting and Spreading Characteristics of a Liquid Droplet Impinging on Hydrophobic Textured Surfaces / J.B. Lee, S.H. Lee // *Langmuir*. – 2011. – Vol. 27, No. 11. – P. 6565–6573.
73. Marmur A. Solid-Surface Characterization by Wetting // *Annual Review of Materials Research*. – 2009. – Vol. 39. – P. 473–489.
74. Dynamic spreading characteristics of droplet on the hydrophobic surface with microstructures / J. Lyu, L. Gao, Y. Zhang et al. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2021. – Vol. 610. – P. 125693.
75. Malla L.K. Droplet Bouncing and Breakup during Impact on a Microgrooved Surface / L.K. Malla, N.D. Patil, R. Bhardwaj, A. Neild // *Langmuir*. – 2017. – Vol. 33, No. 38. – P. 9620–9631.
76. Experimental investigation of water droplet impact and freezing on micropatterned stainless steel surfaces with varying wettabilities / Y. Pan, K. Shi, X. Duan, G.F. Naterer // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – Vol. 129. – P. 953–964.
77. Wang X.W. An experimental investigation of single droplet impact cooling on hot enhanced surfaces fabricated by selective laser melting / X.W. Wang, J.Y. Ho, K.C. Leong // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 120. – P. 652–670.
78. The dynamics of droplet impact on a heated porous surface / P. Zhao, G.K. Hargrave, H.K. Versteeg et al. // *Chemical Engineering Science*. – 2018. – Vol. 190. – P. 232–247.
79. Bouncing or sticky droplets: Impalement transitions on superhydrophobic micropatterned surfaces / D. Bartolo, F. Bouamrine, E. Verneuil et al. // *Europhysics Letters*. – 2006. – Vol. 74, No. 2. – P. 299–305.
80. Reyssat M. Impalement of fakir drops / M. Reyssat, J.M. Yeomans, D. Quéré // *Europhysics Letters*. – 2007. – Vol. 81, No. 2. – P. 26006.
81. Oliveira S.M. Towards the design of 3D multiscale instructive tissue engineering constructs: Current approaches and trends / S.M. Oliveira, R.L. Reis, J.F. Mano // *Biotechnology Advances*. – 2015. – Vol. 33, No. 6, Part 1. – P. 842–855.
82. Spreading and imbibition of vesicle dispersion droplets on porous substrates / A. Kumar, J. Kleinen, J. Venzmer et al. // *Colloids and Interfaces*. – 2019. – Vol. 3. – No. 3. – P. 53.
83. Leijten J. From Nano to Macro: Multiscale Materials for Improved Stem Cell Culturing and Analysis / J. Leijten, A. Khademhosseini // *Cell Stem Cell*. – 2016. – Vol. 18, No. 1. – P. 20–24.

84. He B. Multiple Equilibrium Droplet Shapes and Design Criterion for Rough Hydrophobic Surfaces / B. He, N.A. Patankar, J. Lee // *Langmuir*. – 2003. – Vol. 19, No. 12. – P. 4999–5003.
85. Lee E. Simple fabrication of asphalt-based superhydrophobic surface with controllable wetting transition from Cassie-Baxter to Wenzel wetting state / E. Lee, D.H. Kim // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2021. – Vol. 625. – P. 126927.
86. Cassie-to-Wenzel transition of droplet on the superhydrophobic surface caused by light induced evaporation / R. Chen, L. Jiao, X. Zhu et al. // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 144. – P. 945–959.
87. Lafuma A. Superhydrophobic states / A. Lafuma, D. Quéré // *Nature Mater*. – 2003. – Vol. 2, No. 7. – P. 457–460.
88. Effects of Cassie-Wenzel wetting transition on two-phase flow in porous media / Z. Wang, H. Wei, Z. He et al. // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 146. – P. 106931.
89. Nonwetting of impinging droplets on textured surfaces / T. Deng, K.K. Varanasi, M. Hsu et al. // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 94. – No. 13. – P. 133109.
90. Bouncing or sticky droplets: Impalement transitions on superhydrophobic micropatterned surfaces / D. Bartolo, F. Bouamrine, E. Verneuil et al. // *Europhysics Letters*. – 2006. – Vol. 74, No. 2. – P. 299–305.
91. Bouncing transitions on microtextured materials / M. Reyssat, A. Pépin, F. Marty // *Europhysics Letters*. – 2006. – Vol. 74, No. 2. – P. 306.
92. Bowden F.P. The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds / F.P. Bowden, J.H. Brunton // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. – 1997. – Vol. 263, No. 1315. – P. 433–450.
93. Dear J.P. High-speed photography of surface geometry effects in liquid/solid impact / J.P. Dear, J.E. Field // *Journal of Applied Physics*. – 1988. – Vol. 63, No. 4. – P. 1015–1021.
94. Water - Speed of Sound vs. Temperature. – Электрон. дан. – Режим доступа: https://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-water-d_598.html, свободный.
95. Roisman I. Inertia dominated drop collisions. II. An analytical solution of the Navier–Stokes equations for a spreading viscous film / I. Roisman // *Physics of Fluids*. – 2009. – Vol. 21. – P. 52104–52104.
96. Maximal deformation of an impacting drop / C. Clanet, C. Béguin, D. Richard, D. Quéré // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2004. – Vol. 517. – P. 199–208.

97. Kumar A. Impact of emulsion drops on a solid surface: The effect of viscosity / A. Kumar, D.K. Mandal // *Physics of Fluids*. – 2019. – Vol. 31. – P. 102106.
98. Ukiwe C. On the Maximum Spreading Diameter of Impacting Droplets on Well-Prepared Solid Surfaces / C. Ukiwe, D.Y. Kwok // *Langmuir*. – 2005. – Vol. 21, No. 2. – P. 666–673.
99. Dynamic contact angle of spreading droplets: Experiments and simulations / Š. Šikalo, H.D. Wilhelm, I.V. Roisman et al. // *Physics of Fluids*. – 2005. – Vol. 17, No. 6. – P. 62103–62103.
100. Scheller B.L. Newtonian drop impact with a solid surface / B.L. Scheller, D.W. Bousfield // *American Institute of Chemical Engineers Journal*. – 1995. – Vol. 41, No. 6. – P. 1357–1367.
101. Capillary effects during droplet impact on a solid surface / M. Pasandideh-Fard, Y. M. Qiao, S. Chandra, J. Mostaghimi // *Physics of Fluids*. – 1996. – Vol. 8, No. 3. – P. 650–659.
102. Huh C. Hydrodynamic model of steady movement of a solid/liquid/fluid contact line / C. Huh, L.E. Scriven // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1971. – Vol. 35, No. 1. – P. 85–101.
103. Voinov O.V. Hydrodynamics of wetting // *Fluid dynamics*. – 1976. – Vol. 11, No. 5. – P. 714–721.
104. Berg J.C. Role of acid-base interactions in wetting and related phenomena / J.C. Berg // *Wettability*. – Third Edition. – CRC Press, 1993. – P. 75–148.
105. De Ruijter M.J. Dynamic Wetting Studied by Molecular Modeling Simulations of Droplet Spreading / M.J. de Ruijter, T.D. Blake, J. De Coninck // *Langmuir*. – 1999. – Vol. 15, No. 22. – P. 7836–7847.
106. Blake T.D. The physics of moving wetting lines // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 299. – P. 1–13.

Учебное издание

ИСЛАМОВА Анастасия Гомильевна
ПISKУНОВА Александра Евгеньевна
ПISKУНОВ Максим Владимирович
СТРИЖАК Павел Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА
И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ
С ЖИДКОСТЯМИ**

Корректурa *Д.В. Заремба*
Компьютерная верстка *Д.В. Сотникова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Подписано к печати 18.03.2025. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать CANON. Усл. печ. л. 6,75. Уч.-изд. л. 6,10.
Заказ 115-25. Тираж 100 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ