

ІІТМО

**А. В. Федоров, Е. В. Тамбулатова, П. Е. Баланов
А. А. Федоров, В. А. Крылов**

ПРИКЛАДНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ В БИОТЕХНОЛОГИИ



**Санкт-Петербург
2024**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А. В. Федоров, Е. В. Тамбулатова, П. Е. Баланов
А. А. Федоров, В. А. Крылов

ПРИКЛАДНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ В БИОТЕХНОЛОГИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлениям подготовки 05.03.06, 19.03.01, 15.04.02, 18.04.02,
19.04.01, 19.04.02, 19.04.03, 20.04.01 в качестве учебного пособия для
реализации основных профессиональных образовательных программ высшего
образования бакалавриата и магистратуры

ИТМО

Санкт-Петербург
2024

Федоров А. В., Тамбулатова Е. В., Баланов П. Е., Федоров А. А., Крылов В. А.
ПРИКЛАДНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ В БИОТЕХНОЛОГИИ
Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО. 2024 – 88 с.

Рецензент:

Сивуха Сергей Михайлович, кандидат технических наук, чл.-кор.
Международной академии холода, зам. генерального директора ООО «Нева-
Теплотехника»

Учебное пособие предназначено студентам для освоения и использования теплофизических расчетов в производственной и исследовательской работе в области биотехнологии. Представлены основные механизмы переноса и передачи тепловой энергии, в том числе с учетом жизнедеятельности микроорганизмов. Подробно рассмотрены современные способы определения теплофизических свойств биотехнологических сред и материалов. На примерах показаны разнообразные теплофизические задачи, решаемые при создании биотехнологий и эксплуатации оборудования.

The logo of ITMO University, consisting of the letters 'ITMO' in a bold, black, sans-serif font. The letter 'I' is slightly taller than the other letters.

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2024

© А. В. Федоров, Е. В. Тамбулатова, П. Е. Баланов, А. А. Федоров,
В. А. Крылов,
2024

Содержание

Введение.....	4
1. Передача и трансформация тепловой энергии	6
в биотехнологических процессах	6
1.1. Перенос теплоты теплопроводностью в сплошных средах	10
1.2 Конвекция – основной механизм теплопередачи в биотехнологических процессах	12
1.3 Тепловое излучение как вид интенсивной теплопередачи.....	16
1.4 Сложный теплообмен в реальных условиях	20
1.5 Особенности тепловых процессов при работе с микроорганизмами	25
1.6 Баланс массы и энергии в биотехнологических задачах	28
Вопросы для самоконтроля по разделу 1	29
2. Теплофизические свойства веществ.....	31
2.1 Особенности исследования теплофизических свойств влагосодержащих материалов	33
2.2 Измерение теплоемкости методом дифференциальной сканирующей калориметрии.....	35
2.3 Методы определения плотности веществ	45
2.4 Вязкость веществ. Методы определения.....	49
Вопросы для самоконтроля по разделу 2	54
3.1 Расчет тепловыделения дрожжей при производстве пива	57
3.2 Рекомендации по расчету теплообменных аппаратов	60
3.3 Электронагревательные элементы биотехнологических процессов для экспериментальных исследований	69
3.4 Расчет тепловой энергии для отопления лаборатории и здания	73
3.5 Стужение сахарного сиропа путем выпаривания посредством	76
теплого воздействия	76
Вопросы для самоконтроля по разделу 3	83
Заключение	84
Литература	85

Введение

Биотехнологические процессы всегда связаны с энергетическим обменом. Тепловая энергия, как один из видов энергии, может передаваться, трансформироваться и превращаться в другие виды энергии. В природе это происходит повсеместно, причем тепловая энергия играет большую роль в процессах на макро- и микроуровне. Примеров множество – космические, климатические, океанические, геологические, биологические, техносферные и многие другие сложные многофакторные явления, изучению которых посвящено много усилий. И простое трение, и сложный химический процесс неизбежно связаны с превращением теплоты. Человечество давно и успешно использует тепловую энергию, получая и передавая ее различными способами. Вся нынешняя мировая индустрия построена на использовании тепловой энергии. Тепловая энергия в технике используется в энергетике, транспорте, машиностроении, сельском хозяйстве, космической отрасли, химических топологиях и, конечно, в пищевой и биотехнологической промышленности.

В биотехнологии для производственных и лабораторных целей часто приходится рассчитывать источники тепловой энергии или температурные режимы. В одних случаях нужно оценить время процесса нагрева или охлаждения, в других – потребляемую мощность и предельную температуру. Даже простое термостатирование – это тоже теплообмен. При проектировании и модернизации производств или лабораторий надо знать необходимое количество тепловой энергии для отопления и горячего водоснабжения помещения или целого сооружения. Разнообразных теплотехнических задач решается много. Это требует привлечения профессиональных специалистов и даже профильных организаций. Чаще всего необходимы первичные предварительные расчеты, которые позволяют правильно оценить проект. И их вполне квалифицированно может выполнить любой специалист, владеющий основами базовых теплотехнических знаний.

Теплофизика включает большой набор дисциплин – это тепломассообмен, термодинамика, теплофизические свойства веществ, теплотметрия, низкотемпературные системы. Теплофизика тесно связана со множеством других областей знаний. В первую очередь, это теплоэнергетика, холодильная и криогенная техника, техника высоких температур, ракетная техника, ядерная техника, геология. Тепловые расчеты являются одними из основных в приборостроении, компьютерной технике, оптике, энергомашиностроении и пищевой промышленности. Нами не ставилась цель охватить все возможные области теплофизических знаний. В предлагаемом учебном пособии рассматриваются отдельные прикладные аспекты теплофизики, которые включают следующие разделы: теплообмен, теплофизические свойства веществ, тепловой и материальный балансы, примеры решения прикладных задач.

Учебное пособие предназначено студентам для освоения навыков расчетов биотехнологических процессов, технологического и лабораторного оборудования. Оно может быть использовано в учебном процессе образовательных программах подготовки бакалавров: 19.03.01 «Биотехнология» по дисциплинам: «Оборудование биотехнологических производств»; «Проектные задачи биотехнологических производств»; «Прикладная реология пищевых систем»; «Энергоснабжение биотехнологических производств» и 05.03.06 «Экология и природопользование» по дисциплинам: «Энергосберегающие технологии и альтернативные источники энергии»; «Мировая энергетика и декарбонизация», «Термодинамика экологических систем», а также в магистратуре в образовательной программе 19.04.01, 19.04.02, 19.04.03 «ФудТех» по дисциплинам: «Процессы и аппараты пищевых производств»; «Технологии в пищевом производстве», «Управление пищевым производством»; «Пищевая инженерия и технологии» и образовательной программе 18.04.02, 20.04.01 «Индустриальная экология» по дисциплинам: «Новые энерго- и ресурсосберегающие процессы в экономике замкнутого цикла»; «Исследование альтернативных источников энергии» и 15.04.02. 20.04.01 «Экологическая инженерия и экодизайн» по дисциплине: «Ресурсо- и энергосбережение». Учебное пособие может быть использовано студентами при прохождении практик, НИР, СРС и выполнении выпускных квалификационных работ.

1. Передача и трансформация тепловой энергии в биотехнологических процессах

При теплообмене происходит перенос тепловой энергии в форме теплоты между телами, имеющими различную температуру. Скорость теплообмена или интенсивность переноса теплоты обуславливается законами теплопередачи.

Для описания теплообмена применяется ряд специальных терминов и определений, каждые из которых имеют приоритетное буквенное обозначение. Расчеты рекомендуется вести строго в системе единиц СИ. На практике основные и производные единицы измерения величин, используемых в тепловых расчетах, могут иметь как системные, так и несистемные размерности. Чаще всего это связано с удобством этих размерностей или традициями, сложившимися в конкретных производственных технологических процессах или в лабораторных методиках. Например, на производстве используются единицы массы – тонны, граммы; объема – литры, декалитры; времени – сутки, часы; расхода жидкости или газа – литры в минуту, кубометры в час; мощности – киловатты; количества теплоты и энергии – киловатт-часы, гигакалории; давления – бары. А в лабораторной практике удобнее использовать многократно меньшие величины массы – миллиграммы, микрограммы; объема – миллилитры, кубические сантиметры; расхода жидкости или газа – миллилитры в минуту; мощности – милливатты. Для перевода применяемых величин можно воспользоваться данными из таблицы 1.

Таблица 1. Единицы измерения величин

Величина	Приор. букв. обозн.	Наименование единицы	Размерн.	Переводной множитель в систему СИ
1	2	3	4	5
Длина	l	метр	м	-
		сантиметр	см	10^{-2}
		миллиметр	мм	10^{-3}
		дюйм	дюйм	$2,54 \cdot 10^{-3}$
Масса	m	килограмм	кг	-
		грамм	г	10^{-3}
		миллиграмм	мг	10^{-6}
		тонна	т	10^3
Площадь	S	квадратный метр	$м^2$	-
		квадратный сантиметр	$см^2$	10^{-4}
Объем	V	кубометр	$м^3$	-
		декалитр	дал	10^{-2}
		литр	л	10^{-3}
		миллилитр	мл	10^{-6}

1	2	3	4	5
		кубический сантиметр	см ³	10 ⁻⁶
Время	τ	секунда	с	-
		минута	мин	60
		час	час	3,6·10 ³
Давление	P	сутки	сут	86400
		паскаль	Па, н/м ²	
		бар	бар	10 ⁻⁵
Вязкость динамическая	μ	техническая атмосфера	ат,, кгс/см ²	9,81·10 ⁴
		Паскаль-секунда	Па с	
		пуаз	П	10 ⁻¹
Вязкость кинематическая	ν	сантипуаз	сП	10 ⁻³
		квадратный метр на секунду	м ² /с	-
		стокс	Ст	10 ⁻⁴
Теплоемкость	Cp	сантистокс	сСт	10 ⁻⁶
		джоуль на килограмм градус	Дж/(кг К)	-
		ватт на метр-градус	Вт/(м К)	-
Количество теплоты, энергии	Q	джоуль	Дж	-
		килокалория	ккал	4,19·10 ³
		гигакалория	Гкал	4,19·10 ⁹
		киловатт-час	кВт ч	3,6·10 ⁶
Мощность	W	ватт	Вт	-
		киловатт	кВт	10 ³
		гигакалория в час	Гкал/час	1163000
Плотность теплового потока		Ватт на метр квадратный	Вт/м ²	
Температура	t	градус Цельсия	°С	
		кельвин	К	
Расход массовый	G _m	килограмм в секунду	кг/с	-
		тонна в час	т/ч	0,277778
		килограмм в час	кг/ч	0,277778·10 ⁻³
		грамм в секунду	г/с	10 ⁻³
Объемный расход	G _v	кубометр в секунду	м ³ /с	
		кубометр в час	м ³ /час	0,277778·10 ⁻³
		литр в минуту	л/мин	16,6667·10 ⁻⁶
		миллилитр в секунду	мл/с	10 ⁻⁶

При подводе теплоты к материалам часть ее тратиться на процессы фазовых переходов (при наличии), а часть на процесс повышения их температуры – нагрев.

Для этого в реальных условиях используется много способов: электрическим током, горячим жидким теплоносителем, водяным паром, горячим воздухом, топочными газами, СВЧ, ИК-излучением и другими. Можно отметить много преимуществ того или иного способа нагрева, но на сегодняшний день наиболее распространенными являются жидкостной, паровой обогрев и электронагрев, как наиболее простые в реализации и управлении, а также экономически выгодные.

При жидкостном обогреве чаще всего применяется циркуляционный способ, когда теплоноситель движется по контуру, включающему нагреватель и теплообменник. В теплообменнике теплоноситель отдает теплоту обрабатываемому материалу. Естественная циркуляция поддерживается разностью плотностей теплоносителя, вызванной нагревом, а принудительная перекачивающими устройствами. И в лабораторной, и в производственной практике большое распространение получили водяные бани и термостаты как жидкостной способ нагрева.

Нагревание с помощью водяного пара – это очень эффективный способ нагрева. Водяной пар используется двух видов: *острый* и *глухой*.

Глухой пар взаимодействует с обрабатываемым материалом через стенку. При регламентном режиме водяной пар должен полностью конденсироваться на поверхности стенки и превращается в воду, и за счет наличия фазового перехода достигается высокий уровень теплоотдачи. Для этого способа нагрева используется насыщенный водяной пар, то есть находящийся при температуре насыщения при заданном давлении. Таким образом, при помощи изменения давления можно очень точно поддерживать температуру греющей поверхности.

Для острого пара используется как насыщенный, так и перегретый водяной пар, то есть имеющий температуру выше температуры насыщения для данного давления. В процессе нагрева пар взаимодействует или контактирует непосредственно с обрабатываемым материалом, жидким или сыпучим. По условиям технологии водяной пар при прохождении через материал, кроме нагрева, может решать транспортирующую функцию, извлекая какие-то вещества. А также может происходить запланированная частичная или полная конденсация водяного пара с переходом влаги в материал. Взаимодействие острого водяного пара с обрабатываемой жидкостью называется барботажем. Барботажем, кроме теплообменных функций, может осуществлять эффективное перемешивание жидкости без применения механических устройств.

Нагрев горячим воздухом осуществляется путем пропускания его вначале около греющих поверхностей, а затем через жидкий или сыпучий обрабатываемый материал или по его поверхности. Следует учитывать, что при таком способе нагрева кислород, содержащийся в воздухе, активно взаимодействует с материалом, активизируя окислительные процессы в нем. Негативно горячий воздух влияет на материал, из которого изготовлены стенки оборудования и газопроводов. Применяется нагрев вторичными энергетическими ресурсами, такими

как отогнанные пары жидкости на предыдущих стадиях технологического процесса и топочные газы из котельного оборудования. Это очень рационально с позиции энергосбережения. Надо иметь в виду сравнительно невысокую теплоотдачу при нагреве газообразным теплоносителем.

Инфракрасный нагрев также применяется в пищевом производстве, например, при сушке, выпечке и стерилизации. Надо учитывать, что количество энергии имеет спектральную зависимость. На это влияют как характеристики самого излучателя, так и обрабатываемого материала

Нагревание с помощью электричества имеет несколько видов: электронагреватели или печи с нагревательными элементами (ТЭН); прямой нагрев, когда среда или тело нагревается при прохождении электрического тока через него; СВЧ-нагревание за счет колебательного движения молекул в переменном электрическом поле. Два последних отличаются тем, что выделение тепловой энергии происходит сразу по всему объему обрабатываемого материала.

При выборе способа нагрева нужно учитывать все обстоятельства, но в первую очередь это оценка интенсивности теплопередачи. С позиций технической теплофизики жидкостной и паровой обогрев обеспечивают постоянство температуры греющей поверхности, а электронагрев обеспечивает постоянство подводимой тепловой мощности.

Существует три основных способа переноса тепловой энергии в природе и технике: *теплопроводность*; *конвекция*; *тепловое излучение*. Для примера на рисунке 1 схематично изображена горячая спираль электронагревателя, которая отдает теплоту в окружающую среду конвекцией и излучением и по металлическому корпусу теплопроводностью.

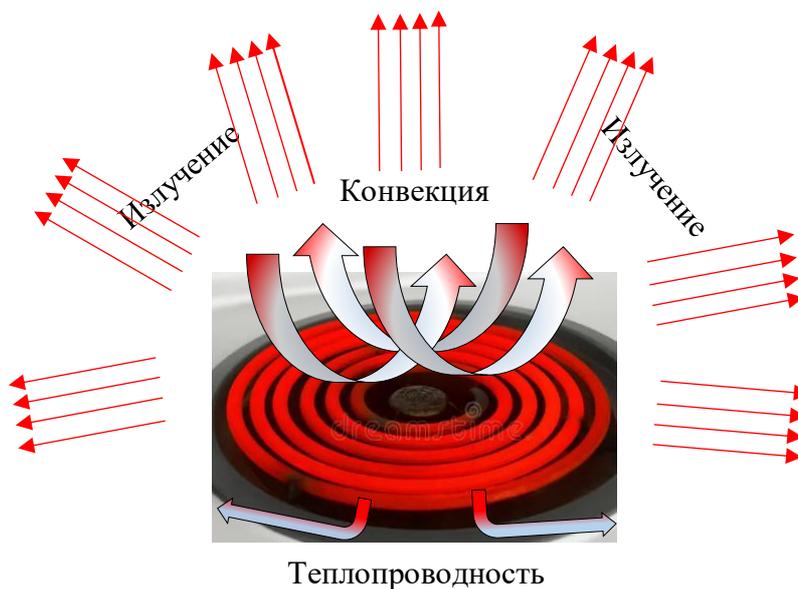


Рисунок 1 – Три способа переноса теплоты

Общим для всех способов передачи теплоты является то, что они возникают или «запускаются» при наличии разницы температур или градиента температур в разных точках рассматриваемой системы. И наоборот, при отсутствии градиента температур передача тепловой энергии прекращается. Распределение температуры в пространстве принято называть *полем температур*.

Большой вклад в развитие теплофизики, тепловой и низкотемпературной техники в разные годы внесли советские и российские ученые, и сформировались авторитетные научные школы по нескольким направлениям в этой области знаний. По теплопередаче и теплообмену за несколько десятилетий написано множество книг, среди них трудно какие-то выделить, но можно рекомендовать [1, 2, 3, 4, 5]. В них подробно даны описания сложных процессов передачи и трансформации тепловой энергии в сочетании с массопередачей и массообменом, включая химические и фазовые превращения. Приведены расчетные соотношения и методики расчета, но в большей степени они предназначены для использования специалистами в области тепловых и низкотемпературных систем, поэтому для простых инженерных расчетов нужно остановиться на некоторых ключевых понятиях и методиках.

1.1. Перенос теплоты теплопроводностью в сплошных средах

Способ или механизм передачи теплоты теплопроводностью подразумевает молекулярный перенос энергии и может иметь место только в сплошных средах. Он неизбежно присутствует во всех фазовых состояниях вещества. Заметную или определяющую роль теплопроводность играет в твердых телах или телах, сохраняющих форму, а также тонких пленках или слоях жидкостей и газов. Для переноса теплоты теплопроводностью достаточно небольшого градиента температур, даже просто его наличие. Но и конечно, тело или среда должны обладать достаточной способностью переноса тепловой энергии – *теплопроводностью*. На поле температур линии с одинаковой температурой называются *изотермами*, как это показано на рисунке 2.

При решении стационарных теплотехнических задач, то есть когда величина теплового потока не изменяется во времени, основным теплофизическим свойством тела является его коэффициент теплопроводности, обозначаемый буквой λ , которая имеет размерность Вт/(м·К). Вполне понятно, что тепловой поток может распространяться в теле в любом пространственном направлении, где имеется градиент температур. Закон Фурье утверждает, что количество теплоты, проходящее через единицу площади в направлении температурного градиента за единицу времени, пропорционально разнице температур на заданном отрезке по нормали к изотерме.

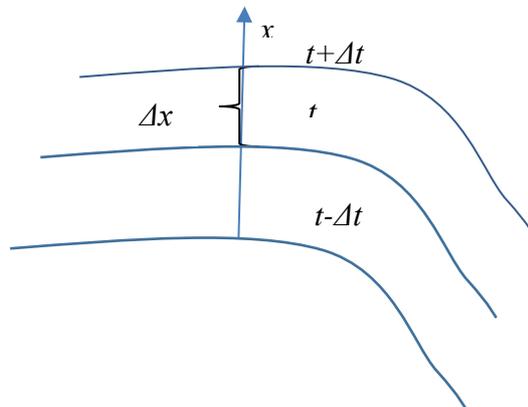


Рисунок 2 – Изотермы поля температур

Уравнение теплопроводности в простейшем виде выглядит следующим образом:

$$q = \lambda \frac{dt}{dx}, \quad (1)$$

где q – удельный тепловой поток или плотность теплового потока, Вт/м²;
 x – координата, вдоль которой распространяется тепловой поток.

Величина теплопроводности различных веществ λ широко представлена в справочных источниках. При появлении новых материалов приходится проводить дополнительное определение этой важной теплофизической величины.

Следует отметить, что у многих материалов имеется анизотропия теплопроводности, что должно учитываться в расчетах.

Для большинства твердых тел характерна существенная линейная зависимость теплопроводности от температуры. У большинства газов теплопроводность невелика, исключением является гелий и водород. Теплопроводность водяного пара зависит от давления и степени его перегрева. У большинства жидкостей теплопроводность уменьшается с ростом температуры, исключением являются вода и глицерин. Для смесей жидкостей и газов принцип аддитивности не всегда выполняется, поэтому приходится пользоваться опытными данными.

При решении нестационарных задач теплопроводности требуется дополнительно знание температуропроводности, которая зависит от удельной теплоемкости, плотности материала. Решение таких задач обычно связано с началом и окончанием какого-то технологического процесса. Постановка задачи в теплотехнике — это составление уравнения теплопроводности в пространственных координатах с *граничными и начальными условиями*, которые

связывают исследуемую систему с окружающим пространством и временем. Например, нестационарное уравнение теплопроводности в декартовых координатах выглядит так:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (2)$$

где a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – время, с.

Более подробно теплофизические свойства веществ и методы их определения будут описаны в следующем разделе настоящего пособия.

Начальные условия задают распределение поля температур в момент времени $\tau = 0$. Чаще всего имеет место равномерное распределение температуры:

$$\tau = 0, \quad t = t_0 = \text{const}. \quad (3)$$

Что касается граничных условий, то их установление требует более тщательного рассмотрения. От того, насколько верно будет установлено, по какому закону происходит теплообмен на границе тела, зависит ход решения задачи и конечный результат. Существует несколько типов граничных условий, или, как принято в теплотехнике, родов.

Граничные условия первого рода – задается температура по поверхности тела.

Граничные условия второго рода – задается удельный тепловой поток на поверхности.

Граничные условия третьего рода – задается температура окружающей среды и коэффициент теплоотдачи на границе.

Граничные условия четвертого рода – задаются условия взаимодействия на границе по законам теплопроводности.

Такие задачи сложны при аналитическом решении, так как математически имеют нелинейный характер. Численные методы расчета переноса теплоты отработаны достаточно хорошо, есть множество методик и прикладных расчетных программ. Самое важное – правильно принять возможные допущения, поставить задачу, и проанализировать полученный результат.

1.2 Конвекция – основной механизм теплопередачи в биотехнологических процессах

Конвективный перенос теплоты обусловлен перемещением макро- и микрообъемов жидкой или газовой среды при взаимодействии с греющей или охлаждающей поверхностью, как это показано на рисунке 3. При конвекции в

малой степени присутствует и первый механизм передачи теплоты теплопроводностью.

В условиях передачи теплоты конвекцией применяются понятия поверхности теплообмена, среды, с которой она обменивается тепловой энергией. Есть также понятие пограничного слоя, то есть части пространства, находящейся непосредственно у твердой стенки. Главной и наиболее трудно определяемой величиной является коэффициент теплоотдачи α , который зависит от множества взаимосвязанных параметров, включая теплофизические свойства среды и поверхности теплообмена, уровень и разницу температур, геометрию поверхности теплообмена, наличие или отсутствие фазовых превращений.

Основным уравнением, описывающим конвективный теплообмен, является формула Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha S(t_w - t_{cp}), \quad (4)$$

где Q – тепловой поток от поверхности к среде, Вт; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); S – площадь поверхности теплообмена, м²; t_w, t_{cp} – соответственно температуры поверхности теплообмена и среды, °С.

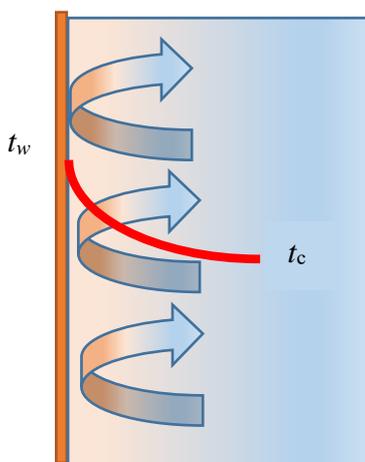


Рисунок 3 – Теплообмен конвекцией. Распределение температур

Различают естественную и вынужденную конвекцию. При естественной конвекции, к примеру, нагретая у поверхности какая-то часть среды поднимается вверх за счет подъемной силы, возникающей в результате изменения удельного объема. Затем она смешивается с остальной средой и отдает ей полученную тепловую энергию. При этом внизу у стенки место убывшей части среды занимает другая часть, еще не нагретая. В механизм естественной конвекции включаются как большие, так маленькие объемы среды, образуются вихри и конвективные токи сложной, часто неопределенной формы и направленности. При охлаждении среды

у стенки все происходит в обратном порядке: среда вначале опускается вниз, и дальше по аналогичному сценарию. Теоретическое описание гидродинамики и массообмена при естественной конвекции очень затруднительно. Поэтому в тепловых расчетах в основном используются эмпирические соотношения. Для наличия естественной конвекции недостаточно только разницы температур, важно еще пространственное расположение среды и поверхности теплообмена.

При вынужденной конвекции организуется принудительное движение жидкой или газовой среды около греющей или охлаждающей поверхности. Причем, как правило, движение среды происходит в ограниченном пространстве: трубе, канале и т. п. в разнообразном пространственном положении.

Как уже отмечалось выше, коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции зависит от множества параметров:

$$\alpha = f(\lambda, C, \rho, t_w, t_c, \beta, \Delta t_w, \nu) , \quad (5)$$

где β – коэффициент объемного расширения, K^{-1} ; $\Delta t_w = t_w - t_c$ – разница температур поверхности и среды, $^{\circ}C$; ν – коэффициент кинематической вязкости среды, m^2/s .

Для вынужденной конвекции коэффициент теплоотдачи зависит от еще большего количества параметров, добавляются скорость движения жидкости (газа) у поверхности w , m/s , геометрические параметры поверхности (высота, длина, ширина, диаметр), m .

Коэффициент теплоотдачи как функция многих переменных неодинаков по всей греющей поверхности. Есть понятие локального и среднего коэффициента теплоотдачи. Чаще всего в оценочных расчетах оборудования используется средний коэффициент теплоотдачи.

Любое движение жидкости (газа) около поверхности, включая свободное, характеризуется степенью взаимодействия гидродинамических потоков и стенки и геометрическим параметрами. Принято различать ламинарное и турбулентное течение или движение жидкости (газа). Четкой границы между ними нет, это может быть целая область, которая носит название переходной.

Для описания тепловых и гидродинамических процессов давно и успешно применяются различные безразмерные критерии подобия и критериальные выражения. При равенстве однотипных критериев для разных условий процессов можно говорить об их подобии. И можно в таком случае использовать данные, полученные для одних тепловых процессов, в расчетах других. Причем каждый критерий несет в себе вполне определенный физический смысл, приведем основные из них, которые чаще всего используются в тепловых, массообменных и гидродинамических расчетах.

Критерий Нуссельта характеризует теплообмен на границе поверхности и жидкости, но со стороны жидкости:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (6)$$

где l – определяющий размер поверхности теплообмена, м.

Критерий Рейнольдса характеризует движение жидкости (газа) в виде соотношения инерционных и вязкостных сил:

$$\text{Re} = \frac{wl}{\nu}. \quad (7)$$

Критерий Пекле связывает теплоту, переносимую конвекцией, с молекулярным переносом теплоты:

$$\text{Pe} = \frac{wl}{a}. \quad (8)$$

Критерий Грасгофа связывает подъемные силы с вязкостными:

$$\text{Gr} = \frac{g\beta\Delta t_w wl^3}{\nu^2}. \quad (9)$$

Критерий Прандтля связывает вязкость и температуропроводность:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}. \quad (10)$$

Можно представить критерий Пекле в более простом виде:

$$\text{Pe} = \text{Re Pr}. \quad (11)$$

Критерий Нуссельта для естественной конвекции – это функция:

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}^n \text{Pr}^m). \quad (12)$$

А для вынужденной конвекции критерий Нуссельта – это функция:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}^k, \text{Pr}^l). \quad (13)$$

Как правило – это обобщенные эмпирические соотношения, где n , m , k , l – коэффициенты, которые зависят от условий теплообмена. Для большинства распространенных жидкостей в справочных источниках приведено множество надежных формул и готовых компьютерных программ для определения коэффициентов теплоотдачи при конвекции, но это требует определенной квалификации и серьезных временных затрат на постановку задачи и ее решение.

Аппаратурное решение биотехнологических задач требует всесторонней подготовки, в том числе и предварительный расчет энергетических и массовых балансов и температурных режимов. Для того чтобы на этом этапе получить необходимую информацию, не обязательно выполнять сложные вычисления. Для оценочных расчетов можно воспользоваться рекомендациями, имеющимися в литературных источниках, так, в [6] приведены ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи для разных видов теплообмена, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи

Вид теплообмена	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)
Естественная конвекция и излучение	2-10
Вынужденная конвекция в воздухе и газах	10-100
Естественная конвекция в масле и аналогичных жидкостях	200-300
Естественная конвекция в воде	200-600
Вынужденная конвекция в масле и аналогичных жидкостях	300-1000
Конденсация органических паров	500-2000
Вынужденная конвекция в воде	1000-3000
Кипение воды	500-45000
Капельная конденсация водяных паров	40000-120000

Можно отметить, что в биотехнологических процессах перенос теплоты осуществляется в основном естественной и вынужденной конвекцией. Тепловые расчеты осложняются из-за непредсказуемости внутренних перемещений среды. Также необходимо иметь надежные данные по теплофизическим свойствам взаимодействующих веществ. Поэтому при возможности следует проводить теплотехнические измерения прямо на действующем объекте или на экспериментальных установках.

1.3 Тепловое излучение как вид интенсивной теплопередачи

Излучение, в отличие от теплопроводности и конвекции, – это принципиально иной механизм передачи тепловой энергии, имеющий электромагнитную природу. Все нагретые тела излучают тепловую энергию в окружающее их пространство. И наоборот, все тела поглощают в той или иной

степени тепловую энергию. Под телами понимаются: твердые, жидкие, газообразные и смешанной структуры. Если на пути излучения встречается тело, то тепловая энергия частично поглощается, частично отражается и частично проходит сквозь него. Таким образом, кроме излучения и поглощения, существует явление отражения энергии. Все эти три вида энергии связаны между собой и, согласно закону сохранения энергии, могут быть представлены в виде простого балансового соотношения:

$$Q = Q_{\text{пог}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{пр}}, \quad (14)$$

где $Q_{\text{пог}}$ – поглощенная энергия, Дж, $Q_{\text{отр}}$ – отраженная энергия, Дж, $Q_{\text{пр}}$ – проходящая сквозь энергия, Дж.

Если в уравнении (14) разделить обе части на Q , то получится следующее:

$$1 = \frac{Q_{\text{пог}}}{Q} + \frac{Q_{\text{отр}}}{Q} + \frac{Q_{\text{пр}}}{Q}. \quad (15)$$

Или в безразмерном виде:

$$1 = a + r + d, \quad (16)$$

где a – поглощательная способность, r – отражательная способность, d – пропускная способность тела.

Каждая из величин в уравнении (16) изменяется от 0 до 1. К примеру:

- $a = 1, r = 0, d = 0$ – падающая лучистая энергия полностью поглощается телом. Такие тела называются абсолютно черными (АЧТ).
- $a = 0, r = 1, d = 0$ – падающая лучистая энергия полностью отражается при так называемом диффузионном отражении. Такие тела называются абсолютно белыми. Если при этом тело отражает по законам геометрической оптики, то поверхность называют зеркальной.
- $a = 0, r = 0, d = 1$ – падающая лучистая энергия полностью проходит через тело. В этом случае тела принято называть абсолютно прозрачными.

В природе таких идеальных тел нет, а величины, приведенных в (16) коэффициентов, могут принимать значения, близкие к 0 или 1.

Для характеристики излучения применяют понятие полного или интегрального, охватывающего весь диапазон длин волн, и монохроматического. В реальной практике длина волны приводится в виде:

$$\lambda = \lambda + d\lambda, \quad (17)$$

где λ – длина волны, м; $d\lambda$ – интервал длины волны, м.

Для обозначения длины волны чаще всего применяется буква λ , такая же, как и для обозначения теплопроводности тел, которая описана в предыдущем разделе настоящего учебного пособия. Это совершенно разные физические величины, и не следует их путать, а принять как общепризнанное обозначение, которое встречается в научно-технической литературе.

Таким образом, в отличие от других механизмов теплообмена, энергия излучения имеет не только количественную, но качественную характеристику – спектральную.

Теплота может передаваться через «прозрачную» для этого среду. Наибольшей интенсивности такой механизм передачи тепловой энергии достигается в разреженных средах и в вакууме. Факторами, влияющими на этот процесс, являются также физические, а точнее оптические, свойства поверхностей и сред.

Описывается тепловое излучение законами Планка, Рэлея-Джинса, Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа.

Закон Планка. Энергия, излучаемая абсолютно черным телом в единицу времени с единицы поверхности Q_{ov} – тепловой поток в диапазоне частот $d\nu$. Если АЧТ окружено средой, имеющей показатель преломления, то формула Планка выглядит следующим образом:

$$Q_{ov} = \frac{2\pi h \nu^2 n^2}{C_o^2 \left[\exp\left(\frac{h\nu}{KT}\right) - 1 \right]}, \quad (18)$$

где h – постоянная Планка, равная $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; K – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, ν – частота, Гц, n – показатель преломления среды вокруг тела; C_o – скорость света в вакууме, равная $2,998 \cdot 10^8$ м/с.

Можно записать уравнение (18) через длину волны λ , с учетом того, что она связана с частотой через скорость света, значение которой:

$$Q_{ov} = \frac{2\pi h C_o^2 \nu^3 n^2}{n^2 \lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hC_o}{n\lambda KT}\right) - 1 \right]}. \quad (19)$$

В классических формулах используется еще одна величина – постоянная Стефана-Больцмана σ , ее значение $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴). С помощью ее и уравнений (18), (19), в частном случае получаем уравнение:

$$Q_{ov}(T) = n^2 \sigma T^4. \quad (20)$$

Интенсивность теплового излучения характеризуется также геометрическими параметрами, то есть не по всем направлениям тепловой поток может быть одинаков. Описывается эта неравномерность с помощью закона Ламберта, и основное уравнение для плотности теплового излучения АЧТ представляется в виде:

$$d\Phi = \frac{n^2 \sigma 10^8}{\pi} \left(\frac{T}{100} \right)^4 \cos \theta dw, \quad (21)$$

где θ и ω – угол направления и телесный угол.

Чтобы описывать реальные тела, введено понятие степени черноты ε , то есть отношение реального излучения к излучению АЧТ при тех же условиях, и она всегда меньше 1. Степень черноты зависит от длины волны и температуры, различают интегральную или суммарную и спектральную. Эти величины определяются опытным путем, и есть справочные данные по большинству поверхностей.

Обязательно степень черноты должна быть привязана к конкретному уровню температуры. Чисто зрительно невозможно определить степень черноты. Например, у алюминия в зависимости от качества обработки поверхности и температуры степень черноты может меняться от 0,04 до 0,31, у стали от 0,075 до 0,820. Степень окисления металлических поверхностей существенно влияет на степень черноты, примерно на 10 – 15 %. Наличие каких-либо пленок значительно изменяет условия взаимодействия объектов при передаче тепловой энергии излучением. Это следует учитывать в расчетах и практической деятельности, так как после многократных циклов нагрев-охлаждение в присутствии кислорода, содержащегося в воздухе, структура металлических поверхностей оборудования меняется. Загрязнение поверхности также сильно влияет на степень черноты поверхности.

Для решения задач лучистого теплообмена составляется система уравнений. Решение системы таких уравнений – задача сложная, если учитывать поверхностные свойства взаимодействующих объектов, которые определяют интенсивность как излучения, так и восприятия теплового излучения. Для частных случаев можно прибегнуть к некоторым шаблонным решениям. К примеру, результирующий поток тепловой энергии между двумя телами может быть выражен соотношением:

$$Q = H_{1,2} C_{\text{пр}} 10^8 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (22)$$

где T_1, T_2 – температуры взаимодействующих тел, К; $H_{1,2}$ – приведенная поверхность теплообмена, м²; $C_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения, равный произведению σ на приведенную степень черноты $\varepsilon_{пр1,2}$.

Приведенная степень черноты определяется формулой:

$$\varepsilon_{пр1,2} = \frac{1}{1 + \varphi_{1,2} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \varphi_{2,1} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (23)$$

где φ_{12} и φ_{21} – угловые коэффициенты излучения; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степени черноты тел, участвующих в теплообмене.

Вся сложность заключается в определении именно величины угловых коэффициентов. Это вопросы геометрической оптики, и есть проверенные методики и литературные данные, которые позволяют ее определять с достаточной точностью.

Тепловое излучение – важнейший механизм переноса тепловой энергии в биотехнологических процессах. Важно, что тепловая энергия может восприниматься всем объемом обрабатываемого материала. Но следует обращать внимание на влияние теплового излучения на жизнедеятельность микроорганизмов.

1.4 Сложный теплообмен в реальных условиях

В предыдущих разделах рассмотрены механизмы переноса тепловой энергии: теплопроводностью, конвекцией и излучением. В реальности, чаще всего присутствует не только какой-то один из механизмов переноса тепловой энергии, и такой теплообмен принято называть *сложный теплообмен*.

Перенос теплоты теплопроводностью естественно присутствует во всех материалах и средах. Но если сравнивать их по агрегатному состоянию, то у твердых тел теплопроводность несравнимо выше, чем у жидкостей, и тем более у газов. Это объяснимо молекулярной природой передачи тепловой энергии. В разреженных газах, в вакууме такой механизм практически отсутствует.

Для изготовления биотехнологического оборудования применяется большая номенклатура конструкционных материалов. Среди них наибольшей теплопроводностью обладают металлы, а наименьшей – теплоизоляционные материалы, стекло, полимерные материалы и пластмассы. Но и металлы имеют очень разную теплопроводность. Высокая теплопроводность у меди, латуни, бронзы, алюминиевых сплавов. А у нержавеющей стали, которая является наиболее используемым материалом, теплопроводность невысока – и примерно в 15-20 раз ниже, чем у меди и 7-8 раз ниже, чем у алюминиевых сплавов. Это следует

учитывать при выборе того или иного материала для изготовления биотехнологического оборудования.

В твердых телах нет конвективного переноса тепловой энергии по самой его сути, так как внутри нет перемещения и перемешивания вещества. А теплообмен излучением в твердых телах, прозрачных для данного типа излучения, присутствует, в той или иной степени.

Стоит остановиться на некоторых аспектах, связанных с передачей теплоты именно теплопроводностью. Любое биотехнологическое оборудование имеет так называемые сборочные единицы. Эти единицы соединены между собой тем или иным способом. Если происходит нагревание какого-то элемента оборудования, то при нагреве теплота распространяется не только в нем, но и передается другим элементам. Так, в местах соединений возникает некое препятствие распространению теплоты за счет неплотного прижатия поверхностей, вызванного микро- и макронеровностями и неоднородностями материалов. Возникают так называемые *контактные тепловые сопротивления (КТС)*, которые препятствуют распространению теплоты. Возможны существенные потери и перегревы именно в местах стыков. Поэтому для уменьшения КТС надо применять специальные прокладки, смазки и заполнители, а также необходимо стремиться к снижению шероховатости поверхностей в местах соединения элементов конструкции. Это очень важно как при эксплуатации оборудования, так и при ремонте и профилактике.

Любая конструкция как лабораторного, так и промышленного оборудования состоит из элементов, изготовленных из широкого набора материалов: металлы, стекло, резина, силикон, полимеры, пластмассы, композиты, которые обладают разными теплофизическими свойствами, такими как теплоемкость, теплопроводность, плотность. Поэтому и теплота в них распространяется по-разному, что вызывает их неравномерный нагрев. Коэффициенты теплового расширения тоже отличаются по величине. В результате происходят термоупругие деформации, которые вызывают нарушение в работе узлов оборудования и даже разрушение конструкции. Особенно это касается такого сочетания материалов, как металл-стекло. Кроме того, всегда следует учитывать, что по металлическим соединениям, без которых не обходится ни одна конструкция, всегда безвозвратно «стекает» теплота в окружающую среду. Такие места в конструкциях называют «тепловые мостики», а в строительных конструкциях – «мостики холода». Это отчетливо видно на термограмме, представленной на рисунке 4.

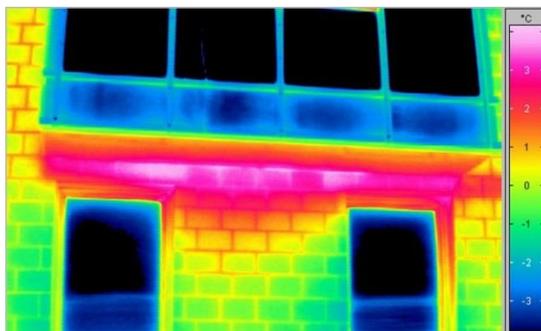


Рисунок 4 – Термограмма здания с изображением «утечек» теплоты

Еще одной важной темой, на которой следует становиться, является *теплоизоляция* технологического оборудования и трубопроводов. В биотехнологическом оборудовании применяются только нетоксичные материалы, сохраняющие заданные свойства при многократных изменениях температуры. Теплоизоляция – это, как правило, пористый материал, и низкая теплопроводность его достигается наличием огромного количества замкнутых газовых микрообъемов. Но сам материал, из которого изготовлена основа теплоизоляции, обладает в принципе ощутимой теплопроводностью. Капиллярно-пористая структура теплоизоляции провоцирует проникновение влаги вовнутрь массива теплоизоляции. Поэтому деформация, разрушение и накопление воды в теплоизоляционном материале приводит к резкому снижению теплоизолирующих свойств. То есть в нем начинается незапланированный перенос теплоты большей частью за счет материала теплоизолятора. В тепловой баланс включается теплота фазового перехода воды.

Последнее время появилось довольно много «чудо-материалов», обладающих удивительно низкой теплопроводностью, иногда близкой к теплопроводности воздуха, и поэтому предлагаемый теплоизолятор якобы может иметь очень малую толщину. Такие предложения требуют обязательной проверки и следует иметь в виду, что теплопроводность любого, даже самого «инновационного», материала не может быть ниже теплопроводности воздуха $0,0257-0,0314 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ в диапазоне температур $20-100 \text{ }^\circ\text{C}$.

При использовании для теплоизоляции экранов и защитных пластин нужно следить за качеством зеркальной поверхности, для обеспечения максимального отражения теплового излучения, что существенно (в 1,15-1,20 раза) снизит потери теплоты и одновременно обеспечит более равномерный нагрев объекта.

Как уже отмечалось, в жидкостях и газах теплопроводность значительно меньше, чем у твердых тел, но перенос теплоты этим механизмом есть, но несоизмеримо меньший, чем конвективным перенос. Перенос теплоты теплопроводностью в жидкостях и газах превалирует только при отсутствии конвекции, в некоторых геометрических условиях в замкнутых пространствах.

Одной из самых сложных задач в области теплообмена является описание процессов в мультикомпонентных многофазных смесях, которых большинство в

биотехнологии. Это эмульсии, суспензии, гели, пасты, а также смеси газов, жидкостей и твердых тел. Причем большинство из них меняет свою структуру в зависимости от физических параметров, таких как температура, давление, влажность. Построение физических и математических моделей является задачей трудноразрешимой. Поэтому чаще всего прибегают к экспериментальным способам определения интенсивности переноса тепловой энергии, и этому посвящено целое направление в технической теплофизике – *теплометрия*. То есть производится определение количества тепловой энергии, тепловых потоков непосредственно в оборудовании или специализированных экспериментальных установках с условиями, максимально приближенными к реальным. Это специальная область знаний, и для специалиста в области биотехнологии достаточно уметь правильно сформулировать техническое задание, дав исходную информацию и характеристики.

В теории теплопередачи приняты понятия *теплового сопротивления* R_T с размерностью $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ и *тепловая проводимость* σ , с размерностью $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$\sigma = \frac{1}{R_T} . \quad (24)$$

Этими величинами удобно пользоваться при составлении схем теплообмена, и всегда можно оценить степень вклада каждого из механизмов в общий теплообмен.

Для примера рассмотрим случай сложного теплообмена греющей твердой (металлической) поверхности температурой t_n с окружающей средой (воздухом) с температурой t_{cp} . Принимаем, что температура поверхности стенки во всех точках одинакова, и температура воздуха одинакова во всем объеме на удалении от стенки. Процесс теплообмена можно представить в виде схемы, которая показана на рисунке 5. Она будет выглядеть так.

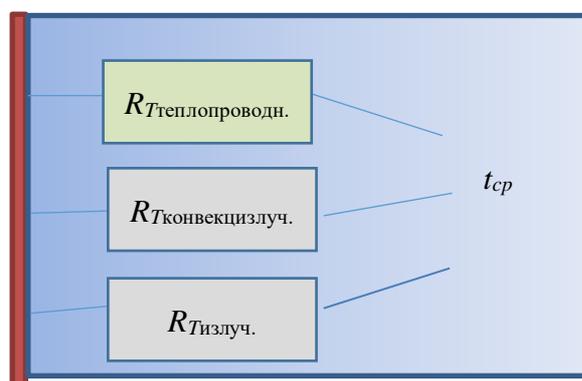


Рисунок 5 – Схема сложного теплообмена

Таким образом, видно, что перенос теплоты происходит параллельно, и тогда суммарное сопротивление получается в результате сложения обратных величин тепловых сопротивлений. В данном случае это соответствующие коэффициенты теплоотдачи:

$$\alpha_c = \alpha_{\text{тепл.}} + \alpha_{\text{конв.}} + \alpha_{\text{излуч.}} \quad (25)$$

При теплообмене конвекцией в жидкостях и газах значением передачи теплопроводностью можно пренебречь ввиду ее малости 2-3 % по сравнению с конвекцией и излучением. Следует отметить, что в ряде случаев, при невысоком уровне температур, недоучитывают еще излучение. Это неправильно, так как, например, при естественной свободной конвекции в воздухе, при температуре твердой поверхности около 100 °С и температуре среды около 20 °С, суммарный коэффициент теплоотдачи 11-12 Вт/(м²·К). А вклад конвекции в теплообмен составляет при этом соответственно 30–40 %. А если тот же воздух находится в виде узкой прослойки или пленки между твердыми поверхностями с разной температурой, то конвекция практически минимальна или отсутствует, и основные механизмы передачи теплоты - излучение и теплопроводность. А суммарный коэффициент теплопередачи мал, и это с успехом используется в теплоизоляционных системах, например, в стеклопакетах.

Чаще всего в биотехнологических процессах теплопередача осуществляется через плоскую стенку от одной более нагретой среды с температурой t_1 к другой среде с меньшей температурой t_2 . Принимается, что теплообмен происходит со стороны первой среды с коэффициентом теплоотдачи α_1 , а со стороны второй среды с коэффициентом теплоотдачи α_2 . Стенка имеет толщину δ , температуры поверхностей t_{w1} , t_{w2} . Материал стенки однородный и имеет теплопроводность λ . Исходя из представленной на рисунке 6 схемы тепловых сопротивлений, процесс переноса теплоты происходит последовательно среда 1 - стенка - среда 2. Поэтому тепловые сопротивления складываются. А тепловые сопротивления — это обратные величины коэффициентов теплоотдачи со стороны сред 1 и 2, и тепловая проводимость стенки. В результате получается величина, которая называется *коэффициент теплопередачи*:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (26)$$

Это уравнение, называемое уравнением теплопередачи, в практических расчетах используется очень часто. Его решение дает возможность быстро и достаточно точно оценить интенсивность передачи тепловой энергии. Следует

помнить, что итоговый коэффициент теплопередачи K всегда меньше любой из его составляющих.

При более сложных конфигурациях теплообмена может происходить перенос тепловой энергии, как параллельно, так и последовательно, одновременно в разных направлениях. С помощью составления тепловых схем возможно решать достаточно сложные задачи, при этом нужно обосновать приемлемые упрощения. В предварительных расчетах это полностью удовлетворяет целям общей оценки тепловой обстановки.

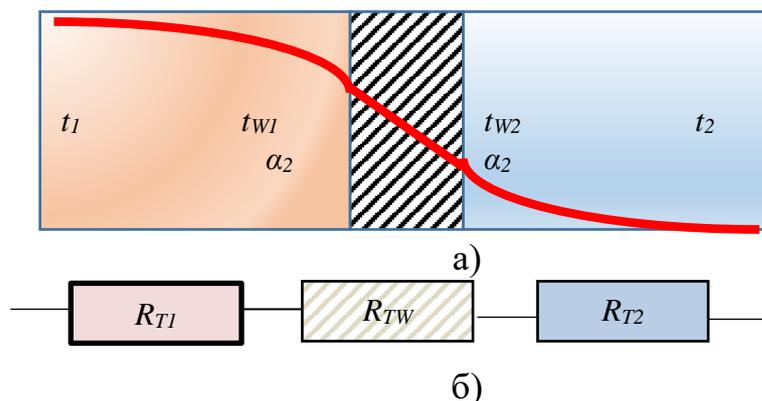


Рисунок 6 – Теплопередача через плоскую стенку
 а) изменение температуры от среды 1 к среде 2 чрез стенку; б) схема тепловых сопротивлений

Таким образом, сложный теплообмен имеет место практически всегда, и правильно оценить вклад каждого из механизмов теплопередачи — это значит правильно выбрать направление расчетов и гарантировать возможность получения более точного результата.

1.5 Особенности тепловых процессов при работе с микроорганизмами

Практические калориметрические измерения не могут быть проведены для одиночных микроорганизмов. Для проведения регистрируемых измерений необходимо не менее ста шести индивидуальных клеток [7]. Следует учитывать, что теплота или тепловой поток является результирующим параллельных биохимических процессов.

Микроорганизмы различны по метаболизму и потребности питания. Поэтому информация по тепловым характеристикам поведения микроорганизмов является важной для характеристики той или иной культуры. Сама питательная среда сильно влияет на интенсивность переноса теплоты. Перемешивание, изменение давления, химические и физические воздействия, уровень температур, рН среды в процессе роста культуры являются также важными параметрами.

Обычно теплота, образуемая в результате жизненных процессов, переходит в окружающую среду. При хорошем питании в теплоизолированной системе температура может увеличиваться до критических величин и за счет самосогревания приводит к необратимым явлениям, в отдельных случаях даже самовозгоранию. К примеру, такое можно наблюдать в природе в сыром сене, где самовозгорание начинается при температуре 265 °С. То есть при отсутствии терморегуляции биологическая система погибает.

Есть такое понятие, как теплопродукция, которая характеризуется интенсивностью выделения тепловой энергии живыми организмами. Обычно она представляется в размерности тепловой мощности. Если привести эту величину к единице массы, то у микроорганизмов она значительно выше, чем у более высших биологических объектов. Так в [7] со ссылкой на первоисточники приведены данные по теплопродукции различных объектов, эти данные представлены в таблице 3. Так как физическая размерность времени (минута или час) не очень приемлема для микроорганизмов, то принимается так называемое время генерации.

Таблица 3. Сравнение теплопродукции различных объектов

	Температура, °С	Масса, г	Время генерации, мин	Теплопродукция одного организма, кал/(час. Организм)	Удельная теплопродукции кал/(час г)	Теплопродукция на одну генерацию, кал/(г. генерация)
Бактерии	25	$4 \cdot 10^{-19}$	40	$1,8 \cdot 10^{-9}$	450	300
Дрожжи	30	$2 \cdot 10^{-11}$	10^2	$3,5 \cdot 10^{-9}$	180	300
Дрозофилы	31	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^4$	$35 \cdot 10^{-3}$	30	
Мыши	25	5	10^5	40	8	$14 \cdot 10^3$
Люди	20	$70 \cdot 10^3$	10^7	100	1,4	$250 \cdot 10^3$
Сердце лягушки	27	$47 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^5$	$47 \cdot 10^{-3}$	1	$8,9 \cdot 10^3$
Эритроциты человека	37	$2 \cdot 10^{-11}$	$1,7 \cdot 10^5$	$30 \cdot 10^{-12}$	0,3	850
Зерна пшеницы	30	$6 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^5$	$15 \cdot 10^{-3}$	0,25	110
Солнце (поверхность)	5000	10^{33}	-	$1,6 \cdot 10^{29}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	-

При рассмотрении данных можно сделать вывод о том, что теплопродукция очень различна. У микроорганизмов большая часть теплопродукции связана с интенсивным клеточным делением, а у высших организмов большей частью с работой мышц и активностью различных желез.

Эти процессы подробно изучаются, и есть много публикаций, где подробно описаны микрокалориметрические методы исследования и оригинальные методики расчета [8, 9, 10, 11, 12].

Микроорганизмы далеки от термодинамического равновесия и должны иметь активный метаболизм в связи с высокой теплопродукцией. Влияние температуры на ход процесса неоднозначно и зависит от того, что именно рассматривается: рост микроорганизмов, их дыхание или образование метаболитов.

При проведении биотехнологических процессов в ферментерах следует учитывать особенности конструкции и составлять балансовые соотношения с учетом всех взаимодействующих газовых и жидких сред. Ферментер или биореактор создает максимально благоприятные условия взаимодействия между субстратом и растущими клетками. Должно достигаться эффективное перемешивание и поддержание заданной температуры процесса, путем отвода избыточной теплоты. При аэробной ферментации ферментер должен иметь аэрационный узел. Обеспечение стерильности накладывает ограничения на конструкции аппаратов. Перемешивание может осуществляться как механическим устройством, так и с помощью подаваемых газовых сред – барботажем, рециркуляцией или иным способом, каждый из которых имеет как преимущества, так и недостатки. Выбор способа зависит от теплофизических свойств среды, объема и геометрических параметров конструкции. Для охлаждения среды внутри ферментеров («сброса» избыточной теплоты) вполне достаточно использовать жидкостную систему с погружными змеевиками, имеющими большую поверхность теплообмена. Общий коэффициент теплопередачи будет определяться условиями теплообмена со стороны с меньшим значением коэффициента теплоотдачи – со стороны охлаждаемой среды.

Для понимания глубины и разнообразия теплопродуктивных процессов в живых системах важно систематизировать их по отличительным признакам.

Энергетические процессы, используемые биологическими организмами, в том числе микроскопическими, классифицируют в различных системах отсчёта. В нашем случае будет использоваться система питания – энергия.

Таким образом мы выделяем следующие энергетические процессы:

- Брожение. Энергия генерируется, во многом, благодаря процессу гликолиза, который представляет из себя генерацию пировиноградной кислоты из углеводов, из которой, в свою очередь, могут получаться продукты, ценные для человека. Например, этиловый спирт и молочная кислота.

- Бактериальный фотосинтез. Использование микроорганизмами энергии солнечного света для трансформации неорганических соединений в органические с целью накопления запаса энергетически выгодных соединений. Важнейшим соединением, которое позволяет осуществляться этому процессу, является хлорофилл.

- Фотоорганотрофия. В этом случае исходным источником энергии является свет, а “точкой приёма” – простые органические соединения, например, органические кислоты и спирты.

- Фотолитотрофия. Тип энергетического обмена, когда первичным источником энергии является свет, а базовым преобразуемым материалом является углекислый газ. Также в окислительных процессах задействуются вода и сероводород.

- Аэробное дыхание. Важное эволюционное и энергетическое достижение организмов. В этом случае начальная стадия процесса схожа с брожением, но образующаяся в результате гликолиза пировиноградная кислота превращается в углекислый газ и воду. Энергетический потенциал этого процесса очень высокий. Например, при брожении с накоплением молочной кислоты генерируется две, энергетически наиболее востребованные, молекулы АТФ (аденозинтрифосфат), а при дыхании образуется 38 молекул АТФ.

- Хемолитотрофия. В этом случае микроорганизмы получают энергию за счёт окисления различных неорганических соединений: железа, азот, сера и др. Солнечный свет в этом процессе не участвует.

- Бактериальное анаэробное дыхание. Этот вариант бактериального энергетического обмена предполагает использование нитратов, сульфатов и других соединений. При этом энергетическая эффективность этого процесса ниже, чем при аэробном дыхании, но выше, чем при брожении.

1.6 Баланс массы и энергии в биотехнологических задачах

Материальный баланс. Возможностью решения любых сложных тепловых задач в биотехнологии являются материальный и тепловой балансы. В основе материального баланса лежит закон сохранения массы вещества, то есть в любом технологическом процессе сумма массы веществ на входе должна быть равна сумме масс веществ на выходе. Учитываются массы всех веществ: газообразных, жидких и твердых. Материальный баланс объективно отражает расходные статьи технологического процесса по исходным материалам и сырью, отходам, стокам, выбросам в атмосферу и целевой продукт. Точность составления материального баланса по его статьям зависит от степени изученности самого технологического процесса. При химических изменениях веществ, участвующих в технологическом процессе, материальный баланс рассчитывается на основе стехиометрических уравнений реакции. Единицей измерения при расчете материальных балансов в периодических технологических и лабораторных процессах является единица массы – г, кг, т и т. д., а в непрерывных единица измерения массового расхода – г/с, кг/час, т/ч, т/сут и т. д. Уравнение материального баланса в общем виде выглядит следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n m_{\text{прих } i} = \sum_{i=1}^m m_{\text{расх } i}, \quad (27)$$

где $m_{\text{прих } i}$ – масса i -го вещества на входе, включая исходное сырье и компоненты; $m_{\text{расх } i}$ – масса i -го вещества на выходе, включая целевой и вспомогательный продукты.

Составление материального баланса технологической операции, на первый взгляд, задача тривиальная, но она требует внимательности, скрупулезности и знаний основных физических, химических и биологических процессов, происходящих внутри системы. Недоучет какого-то компонента может полностью нивелировать усилия по составлению материального баланса. Также четко нужно ограничить объект исследований и установить параметры его взаимодействия с окружающей средой и другими объектами.

Тепловой баланс. В основе теплового баланса лежит закон сохранения энергии. Почти всегда в технологических процессах тепловой баланс относят к единицам, которые использовались для составления материального баланса. Уравнение теплового баланса можно представить в виде:

$$\sum_{i=1}^n Q_{\text{прих } i} = \sum_{i=1}^m Q_{\text{расх } i}, \quad (28)$$

где $Q_{\text{пр } i}$ – i -я теплота, поступившая в систему, включая привносимую с исходными веществами, подогрев и энергию экзотермических реакций и биопроцессов; $Q_{\text{расх } i}$ – i -я теплота, уносимая целевым продуктом и отходами, включая потери и энергию, поглощаемую эндотермическими реакциями и биопроцессами, а также теплоту, отводимую целенаправленно охлаждающими элементами.

Составление уравнений материального и теплового баланса совместно с краевыми условиями позволяет замкнуть тепловую задачу. Задав исходные данные, в итоге можно решить эти уравнения, определив искомые величины и параметры.

Вопросы для самоконтроля по разделу 1

- Какие размерности величин применяются для измерения расхода вещества (жидкости, газа, сыпучего материала)?
- В каких единицах измеряется количество теплоты?
- Что такое глухой пар?
- Какие преимущества и недостатки электронагрева при подводе тепловой энергии к исследуемому образцу вещества?
- Что такое поле температур?
- Какой механизм переноса тепловой энергии преобладает в газах?
- Что такое граничные условия при постановке тепловой задачи?
- Что характеризует критерий Рейнольдса?

- Какое ориентировочное значение имеет коэффициент теплоотдачи при естественной вынужденной конвекции в воде?
- Что означает понятие сложный теплообмен?
- Теплопроводность материала теплоизоляции больше или меньше теплопроводности воздуха?
- Как определять тепловые параметры биотехнологических сред (смеси, суспензии, эмульсии и т.д.)?
- Что такое коэффициент теплопередачи?
- Какие особенности тепловых процессов наблюдаются при работе с микроорганизмами?
- Что такое теплопродукция в процессе жизнедеятельности микроорганизмов?
- Как соотносится баланс массы с балансом энергии в биопроцессах?

2. Теплофизические свойства веществ

Теплофизические свойства характеризуют способность веществ и материалов поглощать, отводить или передавать тепловую энергию. Без знания их величин невозможно решить ни одного уравнение теплового баланса. Теплофизические свойства однозначно связаны с составом и структурой веществ. Они также зависят от температуры и давления системы. В настоящее время насчитывается огромное число различных веществ, смесей и композиционных материалов. В пищевой биотехнологии присутствуют как чистые вещества, так и смеси, композиционные материалы. Вещества, участвующие в биотехнологических процессах, бывают твёрдые, жидкие, газообразные. Чаще всего в пищевой биотехнологии приходится сталкиваться с мультикомпонентными многофазными средами, имеющими сложные структуры, такие как гели, пасты, суспензии и эмульсии. Присутствие в рассматриваемом веществе живых биологических объектов существенно влияет на значения теплофизических свойств. Поэтому изучение теплофизических свойств экспериментальным способом является актуальной задачей и считается основным источником пополнения справочных данных по теплофизическим характеристикам веществ. Применяется множество методов измерения теплофизических характеристик, большинство из которых разработаны достаточно давно, но современный уровень техники и технологий, особенно в компьютерной области, в последнее время дал новые возможности. Можно производить большой объем измерений и обработки результатов, хранить и передавать полученную информацию в цифровом виде. Это дает возможность получения более точных данных в интересующем объеме режимных параметров.

К числу теплофизических характеристик материалов относят удельную теплоемкость $c(t)$, коэффициент теплопроводности $\lambda(t)$, коэффициент температуропроводности $a(t)$ и удельную энтальпию $h(t)$. Напомним кратко их физический смысл.

Удельной теплоемкостью $c(t)$ называется величина, численно равная количеству теплоты δQ , которое необходимо подвести (отвести) для нагревания (охлаждения) единицы массы тела на 1 К:

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}. \quad (29)$$

Для смесей удельная теплоемкость подчиняется закону аддитивности и подсчитывается для них следующим образом:

$$c = g_1 c_1 + g_2 c_2 + \dots + g_n c_n, \quad (30)$$

где c_1, c_2, \dots, c_n – удельные теплоемкости компонентов смеси; g_1, g_2, \dots, g_n – доли массы компонентов (весовые доли).

Теплопроводность $\lambda(t)$ характеризует теплопроводящие свойства материалов. Ее конкретное значение определяется коэффициентом теплопроводности, который соответственно определяется количеством теплоты, проходящей через единицу площади поверхности материала в единицу времени при градиенте температуры, равном единице:

$$\lambda = \frac{q}{|\text{grad } T|}. \quad (31)$$

Температуропроводность $a(t)$ характеризует теплоинерционные свойства материалов (т. е. их способность быстро устранять нестационарную составляющую температурного поля, возникающую при внешнем тепловом воздействии на тело). Коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (32)$$

где ρ – плотность материала.

Удельной энтальпией, по определению, называют энергетическую функцию состояния вещества $h(p, t)$, которая представляет собой сумму удельной внутренней энергии $U(p, t)$ и комплекса pV , отражающего энергию упругого сжатия тела,

$$h(p, t) = U(p, t) + pV, \quad (33)$$

где V – удельный объем вещества, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Энтальпию материала часто называют тепловой функцией или теплосодержанием. При элементарном изменении температуры dt приращение энтальпии dh совпадает с теплотой, поглощаемой телом в изобарном процессе:

$$dh = c_p dt. \quad (34)$$

Так как в выражение коэффициента температуропроводности (32) входит также плотность, то эту величину приходится учитывать, хотя она и является механическим свойством материала.

Плотность – это скалярная физическая величина, равная отношению массы тела к его объему:

$$\rho = \frac{M}{V}. \quad (35)$$

Плотность, также как и теплоемкость в смесях, подчиняется закону аддитивности и рассчитывается по формуле:

$$\rho = \frac{1}{\frac{g_1}{\rho_1} + \frac{g_2}{\rho_2} + \dots + \frac{g_n}{\rho_n}}, \quad (36)$$

где $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ – плотности компонентов смеси.

2.1 Особенности исследования теплофизических свойств влагосодержащих материалов

Разнообразие дисперсных материалов, включающих твердые, рыхлые, сухие и влажные вещества, обусловило наличие большого количества методов и средств измерения их теплофизических характеристик. Они описаны в монографиях Г. М. Кондратьева [13], А. В. Лыкова [14], А. Ф. Чудновского [15], Л. П. Филиппова [16], В. А. Осиповой [17], О. А. Геращенко [18], Е. С. Платунова [19].

Все существующие методы измерений можно разделить на две группы по теоретическим принципам, которые положены в их основу.

1. *Стационарные методы.* Они характеризуются тем, что в процессе определения теплофизических характеристик образцов температурное поле в них остается неизменным со временем. Позволяют определять только теплопроводность образцов.

Для исследования влажных дисперсных материалов эти методы мало пригодны, так как стационарный температурный режим не устраняет медленную миграцию воды и ее пара внутри образца.

2. *Нестационарные методы.* К ним относятся: зондовые методы, методы регулярного теплового режима, квазистационарные и динамические.

Принцип, положенный в основу *зондовых методов* [15], состоит в том, что в испытываемую среду погружается источник тепла – зонд, а затем в опыте рассматривается процесс распространения теплового потока от зонда внутрь среды и регистрируются возникающие температурные изменения либо в среде, либо в зондах. Зондовые методы при исследовании теплофизических свойств дисперсных материалов имеют следующие преимущества: а) образцы претерпевают минимальное нарушение в механическом и тепловом отношении; б) методы позволяют находить весь комплекс теплофизических характеристик.

Однако, несмотря на неоспоримые достоинства зондовых методов, они не нашли широкого применения в пищевой технологии. Зондовые методы оказались наиболее удобными только при изучении теплопроводности достаточно протяженных объектов (грунтов и почв).

Основоположником теории *регулярного теплового режима* является Г. М. Кондратьев [13]. Созданные Кондратьевым Г. М. и его учениками методы оказались простыми в реализации, поэтому получили широкое распространение в приборостроении. Особую известность среди приборов для измерения теплофизических характеристик приобрели *α -калориметры* (предназначаются для определения температуропроводности), бикалориметры (используются для определения теплопроводности) и микрокалориметры (служат для определения теплоемкости). Однако регулярные методы целесообразно использовать, в основном, при измерениях вблизи комнатной температуры, где естественным образом обеспечивается изотермичность среды и начального состояния образцов.

Для исследования тепловых свойств в широкой области температур наиболее перспективными оказались *квазистационарные методы*, линейная теория которых впервые была детально разработана А. В. Лыковым [14]. В основу этой группы методов положены закономерности линейного разогрева образца, когда его температурное поле сохраняется неизменным, повышаясь во всех точках образца с постоянной скоростью. Однако эти методы имели два существенных недостатка: 1) нуждались в обеспечении линейного разогрева; 2) не имели строгого теоретического обоснования, позволяющего корректно учитывать произвольную температурную зависимость теплофизических характеристик образца.

Динамические методы по своему физическому содержанию близки к квазистационарным, являясь их аналитическим обобщением в рамках нелинейной теории теплопроводности, однако в последующем выделились в самостоятельную группу нестационарных методов, обладающую качественно новыми эксплуатационными возможностями.

Главным признаком регулярного теплового режима является постоянство темпа нагрева (охлаждения) во всех точках внутри образца, а в случае квазистационарного режима – постоянство температурного перепада в образце и скорости его разогрева на протяжении рабочей стадии опыта. Такие жесткие требования диктовались линейной теорией теплопроводности, но реализовать их практически невозможно. Динамические методы позволили объединить положительные качества регулярных и квазистационарных методов, теоретически обосновав возможность их применения в условиях монотонного изменения температуры, когда одновременно учитывается нелинейность уравнения теплопроводности и непостоянство скорости изменения температуры.

Динамические методы были теоретически обоснованы Е. С. Платуновым, В. В. Курепиным, С. Е. Буравым и И. В. Барановым [20] и получили дальнейшее

практическое развитие. Авторам удалось аналитически обосновать условия регуляризации температурных полей с учетом нелинейности ТФХ веществ и создать новую группу методов определения теплофизических характеристик в условиях монотонного разогрева (охлаждения).

Они на сегодня выгодно отличаются от всех других групп методов тем, что позволяют аналитически корректно определять теплофизические характеристики в широких температурных диапазонах и даже в зонах фазовых и структурных превращений. Именно по этой причине режим монотонного разогрева–охлаждения образцов считается сейчас наиболее перспективным, когда ставятся задачи комплексного изучения теплофизических характеристик влагосодержащих материалов, к каковым относятся пищевые продукты.

Первые исследования теплофизических свойств пищевых материалов в режиме монотонного замораживания и размораживания были выполнены И. В. Барановым, С. С. Прошкиным, А. А. Никитиным и Е. В. Тамбулатовой [21, 22, 23, 24]. Результаты именно их исследований лежат в основе современного прибора ИТС-сλ-10 для измерения ТФХ влагосодержащих материалов (пищевых продуктов, грунтовых пород и др.), позволяющего в одном опыте и на одном образце исследовать весь комплекс тепловых и влажностных характеристик в широкой области температур и получать новые сведения о теплофизических характеристиках влагосодержащих веществ и материалов.

2.2 Измерение теплоемкости методом дифференциальной сканирующей калориметрии

Согласно стандарту ASTM E473, дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) — это метод, в котором разность тепловых потоков через вещество и эталон измеряется как функция температуры, в то время как образец подвергается контролируемой температурной программе.

Следует отметить, что одно и то же сокращение, ДСК, используется для обозначения метода (дифференциальная сканирующая калориметрия) и прибора, выполняющего измерения (дифференциальный сканирующий калориметр). Основой метода ДСК является измерение разницы температур между образцом и эталон для последующего расчета теплового потока.

Принцип действия ДСК теплового потока основан на создании однородного температурного поля в печи калориметра. В сенсоре, выполненном в форме диска, распространяются равные тепловые потоки, направленные к исследуемому образцу и к эталону. Если теплоемкости образца и эталона различаются или если в образце происходит поглощение или выделение тепла, т. е. изменение тепловых потоков вследствие фазовых переходов или реакций, то это приводит к возникновению температурного градиента внутри сенсора, являющегося хорошим проводником. Чувствительные температурные сенсоры, регистрируя эти

градиенты, позволяют быстро и точно измерить любое изменение тепловых потоков. Такие отклонения отображаются в виде экзотермических или эндотермических пиков или ступеней и образуют кривую дифференциального теплового потока.

Основные принципы измерения с помощью ДСК наглядно иллюстрирует рисунок 7. При повышении температуры печи и, как следствие, нагреве измерительной ячейки в большинстве случаев эталон, за счет своих свойств, нагревается быстрее образца. Таким образом, температурная кривая эталона, представленная зеленой кривой на рисунке 7, лежит выше температурной кривой для образца, красная кривая.

При неизменной скорости нагрева/охлаждения обе кривые будут изменяться параллельно до тех пор, пока не произойдут какие-либо изменения в образце, связанные с фазовыми переходами или химическими реакциями.

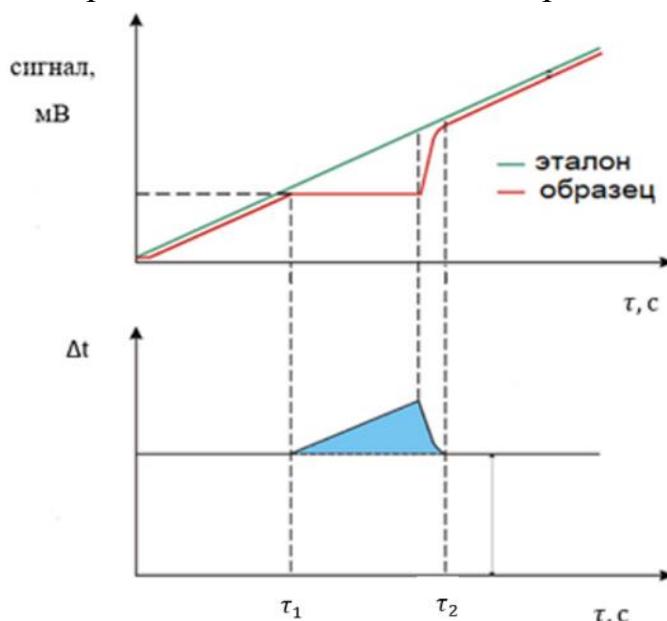


Рисунок 7 – Метод ДСК [25]

На рисунке 7 показан процесс плавления, начинающийся в точке τ_1 . В процессе плавления температура в образце остается постоянной, до момента завершения перехода в другое состояние. По окончании процесса плавления, которому соответствует точка τ_2 температура образца начинает возрастать. При это, поскольку в качестве эталона выбирается инертное вещество, характер изменения температуры эталона остается линейным, а сама температура увеличивается.

По оси ординат в нижней части рисунка откладывается дифференциальный сигнал двух температурных $\Delta t = t_0 - t_3$, по оси абсцисс по-прежнему время. В промежутке от τ_1 до τ_2 , вычисленная разница образует пик, который соответствует процессу плавления, сопровождающийся поглощением тепла. Такой процесс называется эндотермическим. Если же теплота будет выделяться,

то такой процесс будет являться экзотермическим. Процесс кристаллизации относится к экзотермическим процессам. Площадь пика соответствует теплоте фазового перехода [25].

Более подробно теория обоснование метода ДСК, с принятыми математическими допущениями и приближениями, изложена в работе [26].

В качестве примера рассмотрим прибора DSC 204 Phoenix F1, немецкой фирмы Netzsch. Данный прибор относится к группе ДСК, работающих по методу теплового потока. На рисунке 8 представлена схема измерительного узла прибора.

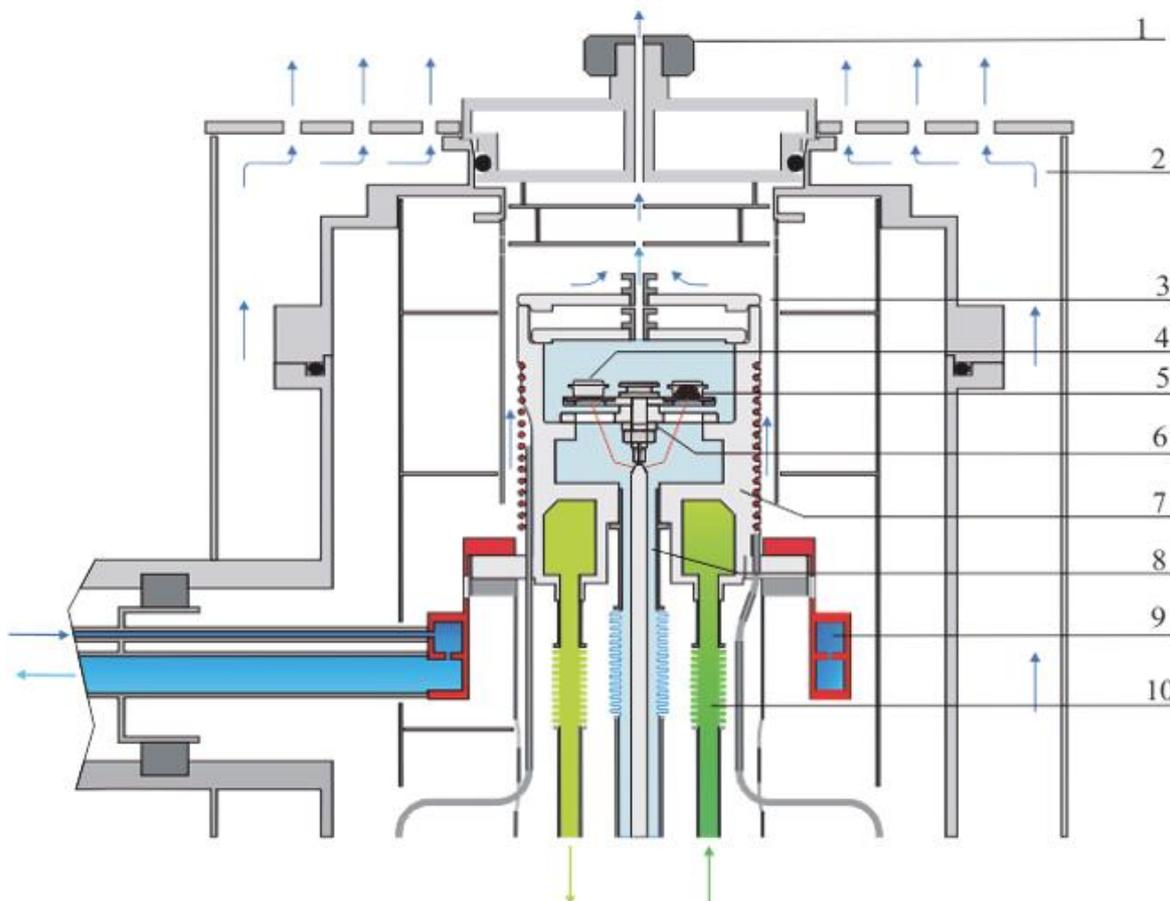


Рисунок 8 – Схема измерительного узла [25]

- 1 – выход защитного/продувочного газов; 2 – воздушное охлаждение;
- 3 – защитный газ; 4 – пустой тигель; 5 и 11 – тигель для образца/эталона;
- 6 – м сенсору; 7 – блок печи; 8 – продувочный газ; 9 – механическое охлаждение;
- 10 – охлаждение жидким азотом;

Из рисунка 8 видно, что в измерительные ячейки находится сенсор, на котором симметрично располагаются два тигля. Схематичное представление измерительной ячейки приведено на рисунке 9.

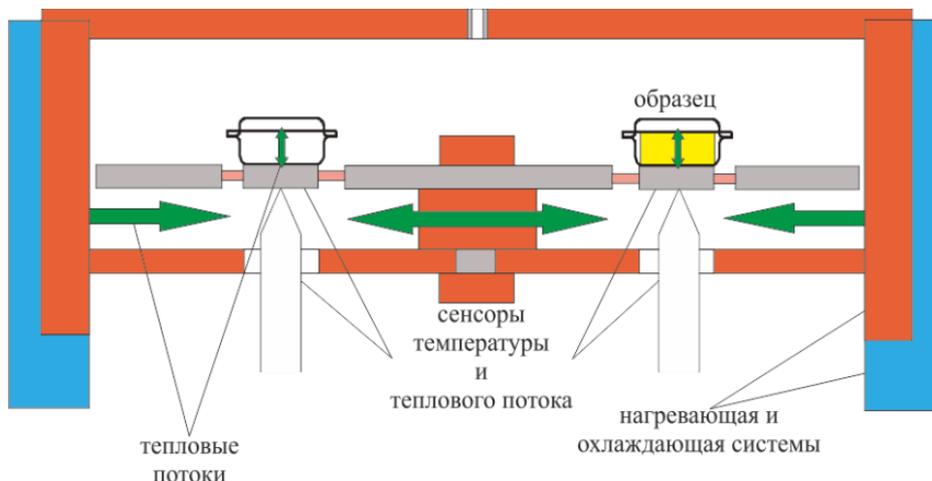


Рисунок 9 – Измерительная ячейка DSC 204PhoenixF1 [25]

Левый тигель на протяжении всей серии экспериментов остается пустым и выступает в качестве сравнительного. В правый тигель последовательно помещаются сначала эталонный образец, затем исследуемый. В ходе опыта измеряется тепловой поток через тигель и средняя температура тигля.

В данном приборе используется сенсор μ – типа, представленный на рисунке 10.



Рисунок 10 – Сенсор μ – типа [25]

Основой данной конструкции данного сенсора является пластина из легированного кремния, выполненная в виде диска [25]

Определения удельной изобарной теплоемкости с помощью дифференциально сканирующих калориметров позволяет производить исследования в довольно широкой области температур. На практике данный диапазон зависит от используемой системы охлаждения и материала тиглей. Для представленного в данном разделе прибора минимальная температура равна минус 180 °С, а максимальная 700 °С.

Для повышения точности измерения удельной теплоемкости необходимо обратить внимание на следующее:

1. Для исследований используются тигли объемом порядка 13 мм³. В связи с этим масса исследуемых образцов зачастую не превышает 100 мг для твердых материалов и 20 мг для жидкостей. Поэтому крайне важно определять массу с точностью до не ниже $\pm 0,01$ мг. Массу образца рекомендовано подбирать

таким образом, чтобы сигнал от образца был максимально приближен к сигналу от используемого эталона.

2. Скорости изменения температуры в процессе эксперимента необходимо подбирать таким образом, чтобы минимизировать градиент температуры внутри образца.

3. Исследования необходимо проводить при одних и тех же внешних условиях.

4. Во всей серии опытов необходимо использовать одни и те же тигли. Тигли для исследований подбираются таким образом, чтобы различие их масс не превышало 0,2 мг. Масса тигля в среднем составляет от 37 до 39 мг.

5. При перезагрузке тиглей в измерительную ячейку необходимо сохранять одинаковое позиционирования тигля в ячейке.

6. В качестве эталонного образца необходимо использовать вещество близкое по своим теплофизическим свойствам к исследуемому образцу.

7. Проводить серию из трех измерений с полной перезагрузкой исследуемого образца.

Методика измерения удельной изобарной теплоёмкости состоит из следующих этапов:

1. Составление температурной программы. Температурная программа составляется исходя из задач исследования. Чаще всего для при определении удельной изобарной теплоёмкости используется температурная программа, представленная на рисунке 11. Она содержит один стационарный сегмент, сегмент нагрева и сегмент охлаждения до комнатной температуры. Последний сегмент не используется при обработке и анализе полученных данных.

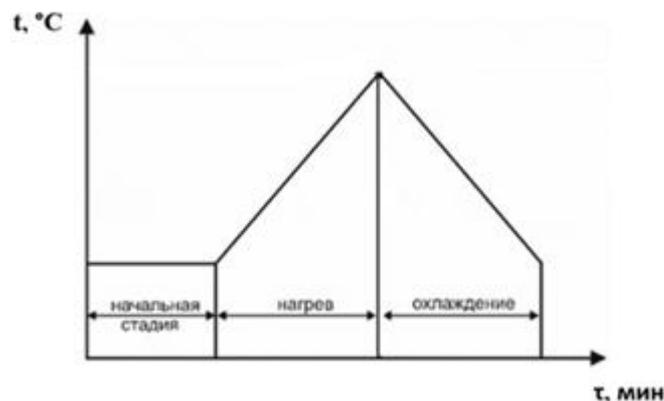


Рисунок 11 – Схема проведения эксперимента

На первом динамическом участке скорость нагрева обычно составляет 5 – 10 К/мин, на втором 10 – 20 К/мин. Это позволяет сократить время эксперимента, не изменяя температурного диапазона, а также повысить качество сигнала в процессе нагрева, что в конечном счете отразилось на полученных данных. Время стационарного сегмента обычно составляет от 15 до 30 минут. Следует учитывать, что сигнал, полученный вблизи перехода с одного сегмента на

другой сильно искажен, поэтому рекомендуется задавать температурный диапазон немного больший, чем исследуемый. Величина расширения температурного диапазона зависит от выбранной скорости нагрева/охлаждения и составляет порядка 15 °С при скорости 10 К/мин. Остальные параметры остались без изменений. В рамках температурной программы также выбираются продувочный и защитный инертный газ, и задаётся его расход. Величина расхода не должна приводить к потере тепла в результате вынужденной конвекции в измерительной ячейке. Рекомендованный расход 20 мл/мин для продувочного и 50 мл/мин для защитного газа.

2. Проведение серии опытов по заданной температурной программе:

2.1 Коррекция. На обе ячейки помещаются пустые тигли. Измеряется разность тепловых потоков через два пустых тигля ($DСК = DСК_{баз}$) и температура правого тигля. Зависимости этих сигналов от времени и температуры показаны на рисунках 12 и 13.

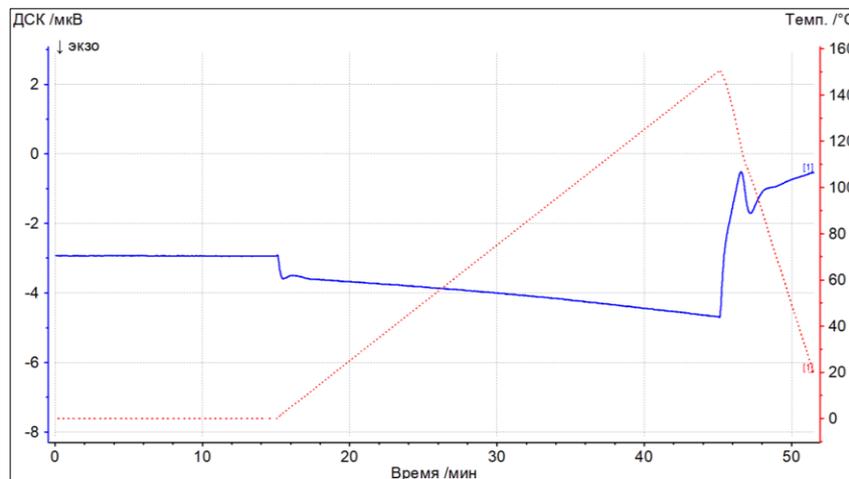


Рисунок 12 – Зависимость сигналов от времени при измерении базовой линии

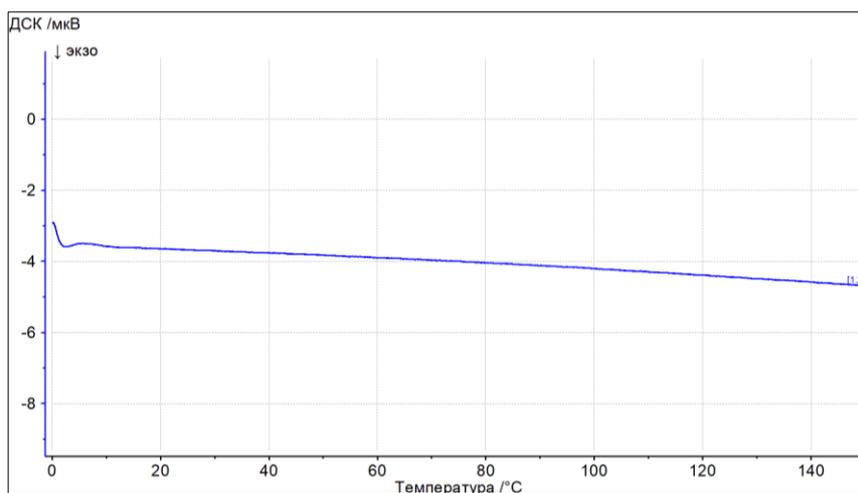


Рисунок 13 – Зависимость сигнала от температуры при измерении базовой линии

2.2. Калибровка. Тигель ячейки сравнения остается пустым. В тигель для образцов помещается вещество с известной теплоемкостью $c_{p\text{эт}}$ и массой $m_{\text{эт}}$. Измеряется разность тепловых потоков через пустой тигель и тигель с эталоном $DSC_{\text{эт}}$, и температура тигля с эталоном. Зависимости сигналов $DCK = DSC_{\text{эт}} - DSC_{\text{баз}}$ от времени и температуры показаны на рисунках 14 и 15.

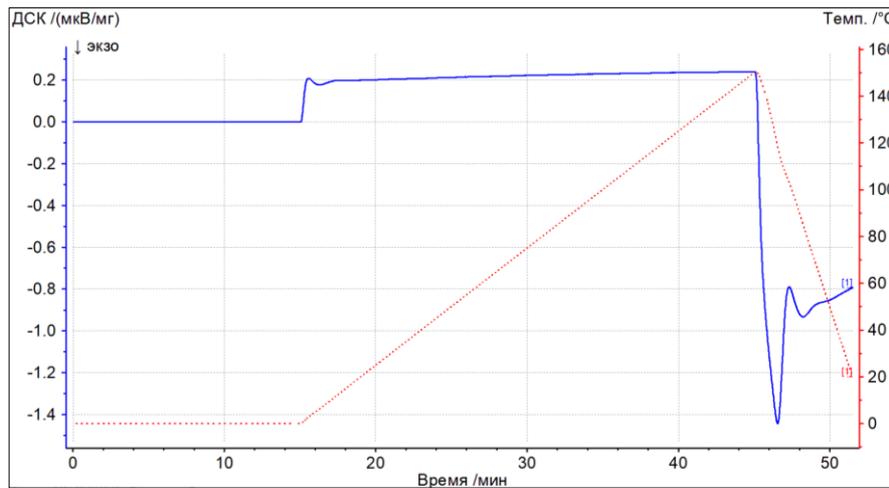


Рисунок 14 – Зависимость сигналов от времени при измерении эталонного образца

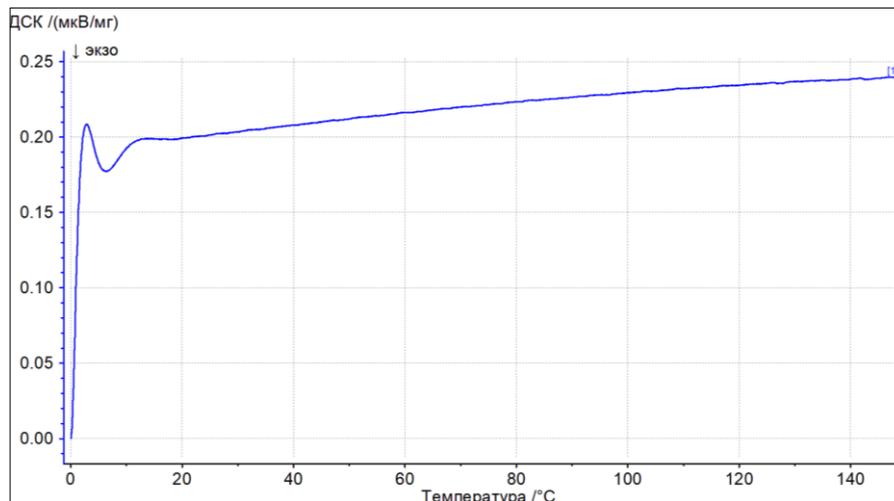


Рисунок 15 – Зависимость сигнала ДСК от температуры при измерении эталонного образца

2.3 Измерение. Тигель ячейки сравнения остается пустым. В тигель для образца помещается исследуемый образец массой $m_{\text{обр}}$. Измеряется разность тепловых потоков через пустой тигель и тигель с образцом $DSC_{\text{обр}}$, и температура тигля с образцом. Зависимости сигналов $DCK = DSC_{\text{обр}} - DSC_{\text{баз}}$ от времени и температуры показаны на рисунках 16 и 17. В качестве исследуемого образца использовалось нерафинированное подсолнечное масло

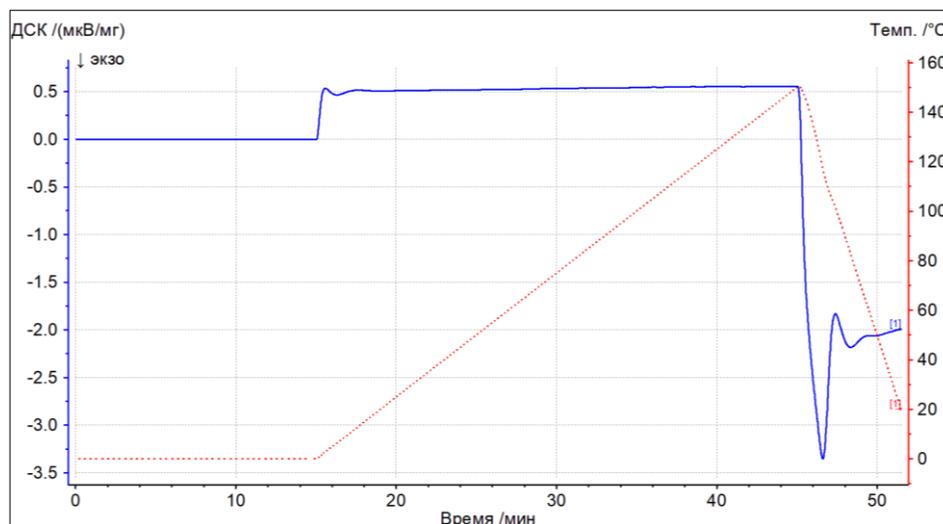


Рисунок 16 – Зависимость сигналов от времени при измерении исследуемого образца

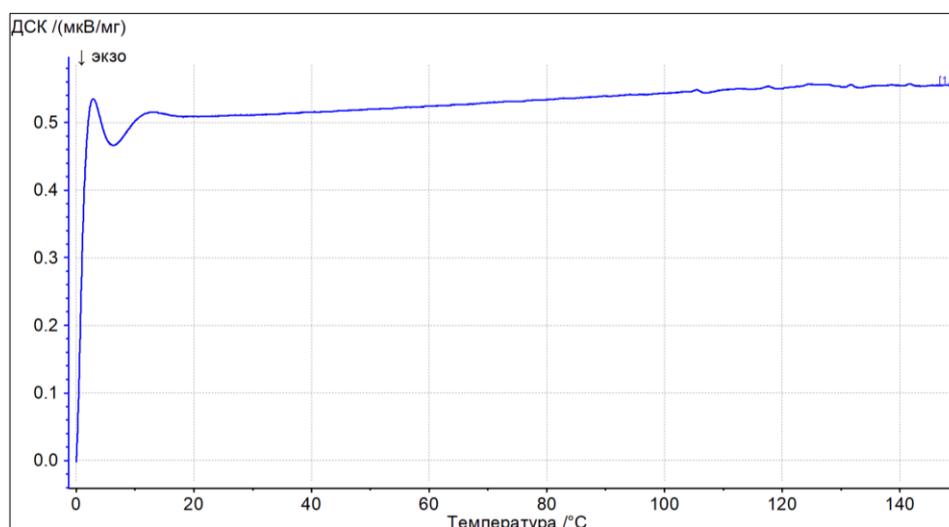


Рисунок 17 – Зависимость сигнала ДСК от температуры при измерении исследуемого образца

3. Расчет удельной изобарной теплоемкости. Формула, используемая в программном пакете Proteus 6.1, для расчета удельной теплоемкости исследуемого образца, имеет соответствующий вид:

$$c_0 = \frac{m_c DSC_0 - DSC_T}{m_0 DSC_c - DSC_T} c_c, \quad (37)$$

где c_0 – удельная теплоемкость образца, c_c – удельная теплоемкость сапфира, m_0 – масса исследуемого образца, m_c – масса эталона, DSC_0 – сигнал ДСК образца, DSC_c – сигнал ДСК эталона, DSC_T – сигнал ДСК пустого тигля.

На рисунке 18 представлена зависимость удельной изобарной теплоемкости от температуры для образца.

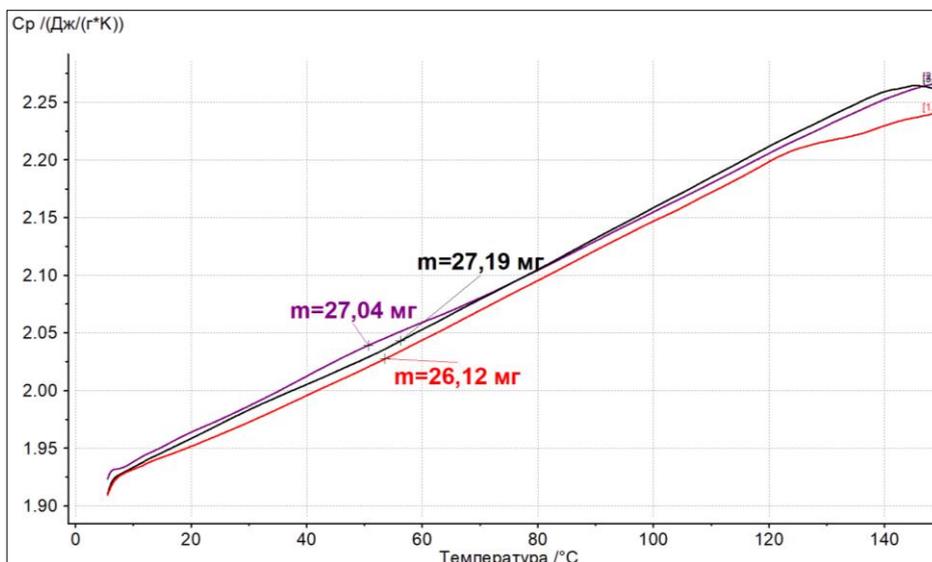


Рисунок 18 – Зависимость удельной изобарной теплоемкости от температуры для трех проб образца

Зависимости удельной изобарной теплоемкости от температуры для различных материалов представлены на рисунках 19,.20,21,22.

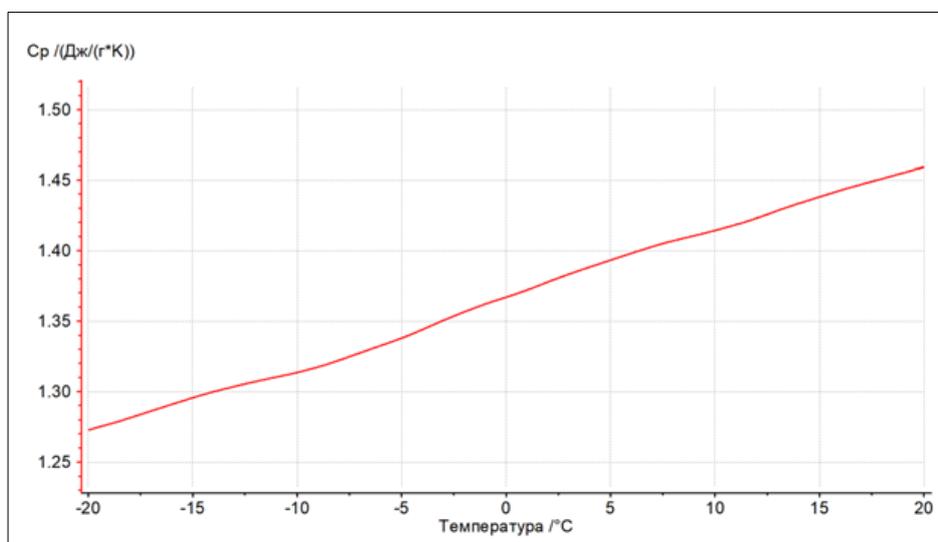


Рисунок 19 – Зависимость удельной изобарной теплоемкости от температуры для оргстекла

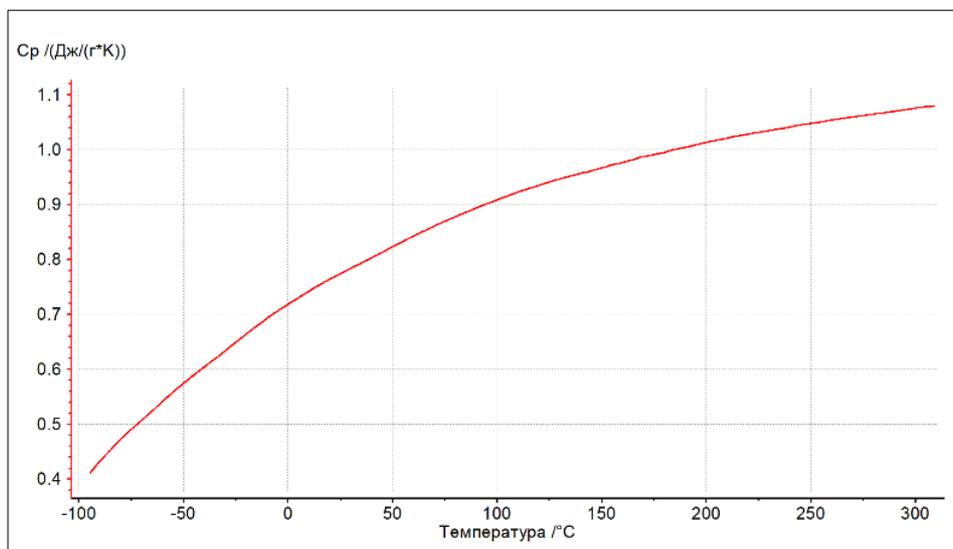


Рисунок 20 – Зависимость удельной изобарной теплоемкости от температуры для корунда

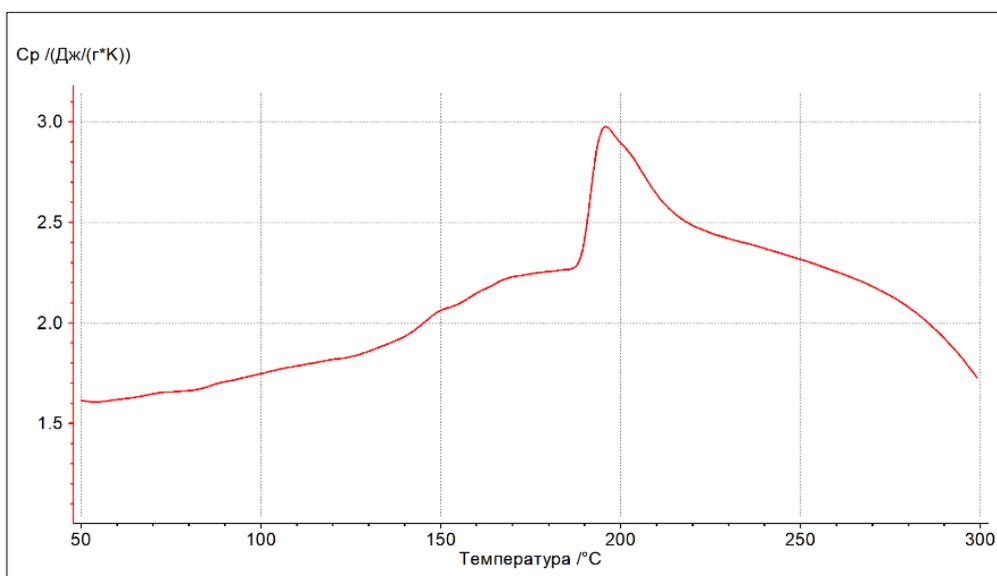


Рисунок 21 – Зависимость удельной изобарной теплоемкости от температуры для клея КДС-17М

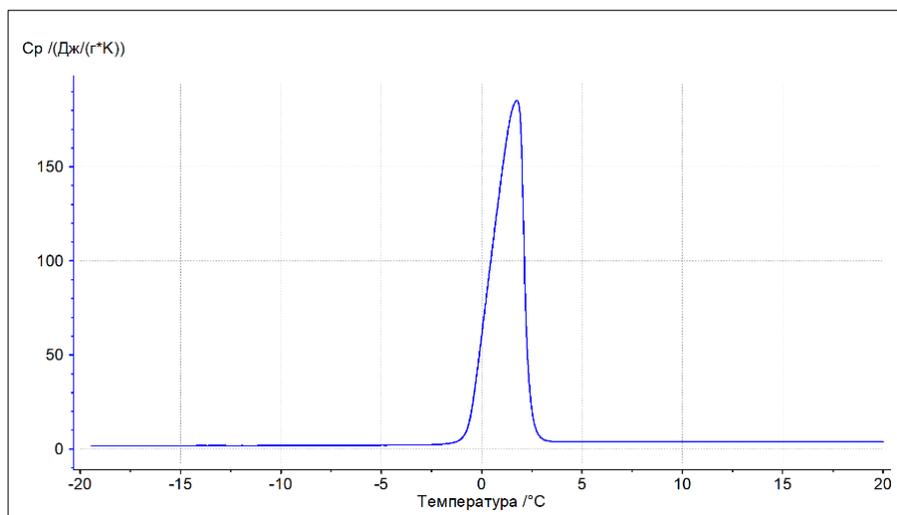


Рисунок 22 – Зависимость удельной изобарной теплоемкости от температуры для дистиллированной воды

2.3 Методы определения плотности веществ

Плотность — физическая величина, определяемая как отношение массы тела к занимаемому этим телом объёму или как производная массы по объёму. Это физическое свойство во многом определяет способность материалов передавать тепловую энергию. В основном это касается теплопередачи теплопроводностью и конвекцией. В жидкостях и газах изменение плотности в зависимости от состава, температуры и давления является одним из определяющих факторов при оценке интенсивности перемещения макробъёмов вещества. Плотность используется в формулах для расчета коэффициентов теплоотдачи. В литературных источниках есть множество данных по плотности всевозможных веществ. Использование на практике новых материалов вызывает необходимость определения или уточнения этой физической величины. Также не всегда имеющиеся данные охватывают интересующий температурный диапазон. В биотехнологических процессах эта задача особенно актуальна, так, например, небольшие изменения в составе питательных сред могут существенно влиять на изменение плотности.

В данном разделе будут рассмотрены методы определения плотности жидкостей. Можно назвать минимум три метода определения плотности жидкостей:

- метод плавучести;
- пикнометрический метод;
- электронный плотномер.

Метод плавучести основывается на применении закона Архимеда. Это достаточно быстрый и распространённый способ измерения. Для проведения оценки плотности используют сосуд, наполненный исследуемой жидкостью, в

которую погружается специальное устройство в виде поплавок со шкалой – это ареометр, показанный на рисунке 23.

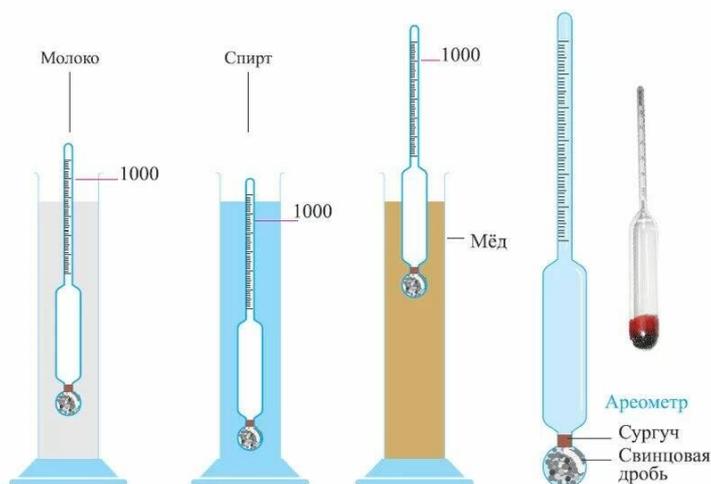


Рисунок 23 – применение ареометров и их устройство

Ареометр должен свободно плавать в сосуде, а по глубине его погружения как раз и судят о плотности жидкости. У ареометров есть шкала, которая находится в верхней части прибора. Снимать значения плотности необходимо по нижнему краю мениска, который указывает на определённую метку шкалы. Если мениск жидкости находится ниже шкалы, нужно использовать более тяжелый ареометр с другим диапазоном измерительной шкалы, а если мениск выше шкалы (ареометр утонул) – более легкий. Обычно ареометры поставляются в виде набора из нескольких штук, например, набор ареометров общего назначения АОН-1, который позволяет проводить измерения плотности жидкостей в диапазоне от 700 до 1840 кг/м³, а шкалы каждого отдельного ареометра из набора перекрывают друг друга. Важно отметить, что с помощью ареометра достоверно плотность можно определить при какой-то одной конкретной температуре, которая указана в его описательной части. Чаще всего это 20 °С. В качестве сосуда для проведения измерений рекомендуется использовать мерный цилиндр, учитывая, что его диаметр и глубина должны быть таковыми, чтобы ареометр свободно плавал в жидкости и не прилипал к стенкам.

Пикнометрический метод является весьма точным способом определения плотности жидкости. Пикнометр – это специальная стеклянная колба, как правило, известного объема, как показано на рисунке 24, с достаточно узким горлышком и притертой крышкой для точной фиксации объема жидкости.

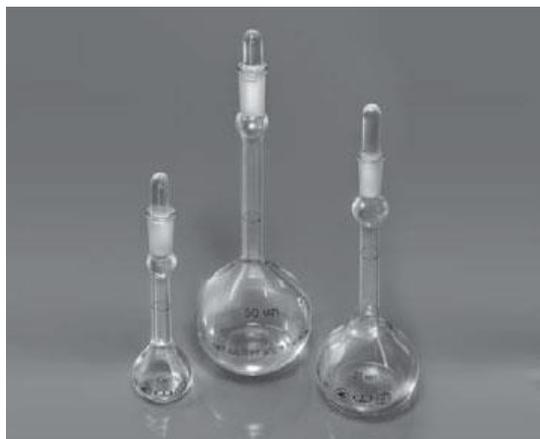


Рисунок 24 – Применение ареометров и их устройство

Для того, чтобы измерить плотность жидкости с помощью пикнометра его сначала нужно взвесить в пустом состоянии. Далее заполнить пикнометр жидкостью с известной плотностью (например, дистиллированной водой) до метки и термостатировать при температуре измерения. После, убедившись в том, что жидкость находится на необходимом уровне, пикнометр взвешивается на весах. Используя известное значение плотности эталонной жидкости, вычисляется емкость пикнометра при температуре измерения, и все описанные выше операции повторяются с жидкостью, плотность которой требуется определить. Формула для определения плотности:

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{M_2 - M_0}{M_1 - M_0} \rho_{\text{э}}, \quad (38)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, которую требуется определить, г/см³; $\rho_{\text{э}}$ – плотность эталонной жидкости, г/см³; M_0 – масса пикнометра, г; M_1 – масса пикнометра с эталонной жидкостью, г; M_2 – масса пикнометра с жидкостью, плотность которой нужно определить.

Трудности использования пикнометров заключаются в следующем. При работе с вязкими образцами или дисперсиями с крупными частицами весьма проблематично их помещать внутрь пикнометра и доводить уровень жидкости до метки объема. В процессе заполнения не должны образовываться пузырьки, которые будут вносить погрешности при измерении. К тому же пикнометры весьма сложно мыть, т. к. ерши не пролезают в тонкое горлышко. Перед началом исследования следует тщательно промыть пикнометр хромовой смесью, затем дистиллированной водой, а после тщательно высушить. Типичные объемы пикнометров: 5, 10, 25, 50, 100 и 150 см³.

Электронный плотномер, схематично показанный на рисунке 25 – это удобный и надежный прибор для измерения плотности и удельного веса. Принцип

работы прибора, под которым в данном случае понимается электронный плотномер, основывается на определении периода колебаний U-образной измерительной трубки определенного объема, вызываемых электромагнитным генератором. Под воздействием возбуждающего магнитного поля пустая измерительная трубка колеблется с собственной частотой, а при заполнении трубки измеряемой жидкостью частота колебаний меняется в зависимости от ее массы или же плотности. Период колебания трубки измеряется датчиком. Частота собственных колебаний трубки зависит от ее конструктивных особенностей, упругости, массы и определяется в процессе предварительной настройки при заполнении трубки жидкостью с известной плотностью.

Настройка плотномеров производится по результатам измерений периода колебаний измерительной трубки по двум стандартным образцам. Например, это может быть воздух и дистиллированная вода, или вода и глицерин. Конструкцией прибора предусмотрено, что измерение плотности можно проводить при различных температурах, т. е. находящаяся внутри корпуса прибора U-образная осциллирующая трубка может быть термостатирована. Для проведения измерений требуется очень небольшое количество образца (3-5 мл), который загружается в измерительную ячейку с помощью шприца. После установления температурного равновесия происходит измерение, и далее на экране выводится измеренное значение плотности. В случае плотномера D4 Mettler Toledo оно отображается с точностью до четвертого знака после запятой в г/см^3 . Потом ячейка промывается с помощью специальных моющих средств, легколетучего растворителя и просушивается воздушным компрессором (ячейка сквозная). Весь цикл обычно занимает около пяти минут.

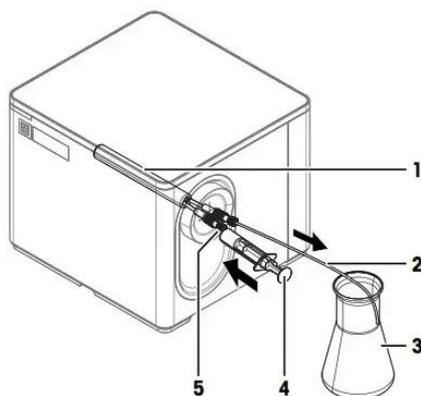


Рисунок 25 – Плотномер D4 Mettler Toledo.

Заполнение измерительной трубки образцом. 1 – измерительная ячейка;
2 – сливная трубка; 3 – емкость для сбора образца и растворов промывки;
3 – шприц с образцом; держатель шприца

Важно отметить, что чем ближе будет значение плотности жидкости, которую вы измеряете к значениям эталонных образцов, по которым настраивается прибор – тем точнее будет получаемый результат.

2.4 Вязкость веществ. Методы определения

Прежде чем начать разговор о методах определения вязкости различных материалов, правильным будет дать определение этому термину.

Вязкость — это физическая характеристика вещества, которая определяет его способность сопротивляться деформации и потоку [27]. Иными словами, это свойство описывает, насколько легко или трудно вещество может протекать или перемещаться. Также вязкость можно назвать «внутренним трением» материала. При количественном определении вязкости веществ различают **динамическую и кинематическую вязкость**.

Динамическая вязкость (μ , Па · с) представляется как отношение единицы силы, необходимой для смещения слоя жидкости на единицу расстояния, к единице площади слоя. **Кинематическая вязкость** (ν , м²/с) материала в определенных условиях — под действием силы тяжести [28].

На сегодняшний день известно множество различных способов и устройств, с помощью которых можно экспериментально определить вязкость различных веществ. Прибор для измерения вязкости называется вискозиметр. Наибольшее распространение среди известных на данный момент конструкций вискозиметров получили вискозиметры капиллярные, с падающим шариком и ротационные.

Измерение вязкости при помощи капиллярного вискозиметра основано на определении времени истечения через капилляр определенного объема жидкости из измерительного резервуара. Среди капиллярных вискозиметров достаточно востребованными являются стеклянные капиллярные вискозиметры. Общий вид таких вискозиметров представлен на рисунке 26. В основу его принципа работы положен закон Пуазейля о вязкой жидкости:

$$\mu = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8QL}, \quad (39)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; R – радиус капилляра, м; Δp – разность давлений, Па; Q – расход, м³/с; L – длина капилляра, м.

Согласно приведённому уравнению для расчета коэффициента динамической вязкости необходимо определить количество протекаемой жидкости за единицу времени через капилляр, разницу давлений, а также геометрические размеры капилляра такие, как длина и диаметр. Однако на практике достаточным является измерение времени прохождения (истечения)

жидкости между двумя специальными метками, после чего полученное значение времени подставляется в формулу из паспорта вискозиметра:

$$\nu = K \cdot \tau, \quad (40)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – время прохождения жидкости между метками, с ; K – постоянная вискозиметра, $\text{м}^2/\text{с}^2$.

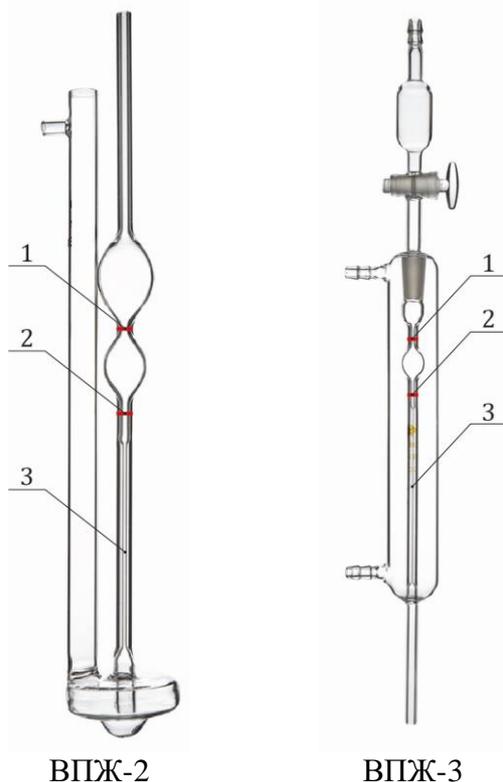


Рисунок 26 – Капиллярные вискозиметры.
1 и 2 – верхняя и нижняя метки; 3 – капилляр

Постоянная вискозиметра обычно определяется производителем оборудования и указывается в паспорте прибора, но она также может быть найдена путем решения обратной задачи, т. е. путем проведения измерений жидкости с известной вязкостью (например, дистиллированная вода или глицерин). Для того чтобы получить коэффициент динамической вязкости, как уже отмечалось, необходимо кинематическую вязкость умножить на плотность.

Поскольку вязкость веществ зависит от их природы и может значительно различаться, каждый отдельный стеклянный капиллярный вискозиметр рассчитан на определённый диапазон измерений по вязкости. Чем более вязкий образец, тем больший по диаметру капилляр используется, поскольку более вязкому образцу труднее протекать через капилляр меньшего диаметра. Диаметры капилляров и

соответствующие им диапазоны измеряемой вязкости могут быть определены в справочной литературе.

Важно отметить, что вязкость веществ сильно изменяется при уменьшении или увеличении температуры, а получение вязкостно-температурных зависимостей того или иного вещества является весьма популярным запросом среди исследователей. Учитывая данные факты, весьма важно при проведении измерений обеспечивать равномерность поддерживаемой температуры путем термостатирования. Для этого, например, вискозиметр типа ВПЖ-2 может быть помещен в специализированную водяную баню или же измерения могут быть проведены при комнатной температуре с обязательной фиксацией ее значения. У вискозиметра типа ВПЖ-3 предусмотрено наличие термостатирующей рубашки, которую можно подключить к циркуляционному жидкостному термостату с помощью трубок. Время термостатирования должно быть таким, чтобы температура во всем объеме образца установилась одинаковая.

Более подробная информация о порядке работы с капиллярными вискозиметрами представлена в их паспортах, поскольку он зависит от конструктивных особенностей самого вискозиметра.

Еще одной надежной и распространенной конструкцией вискозиметра, в основу которой положен принцип падающего (или скатывающегося) шарика, является вискозиметр Гепшлера, представленный на рисунке 27.

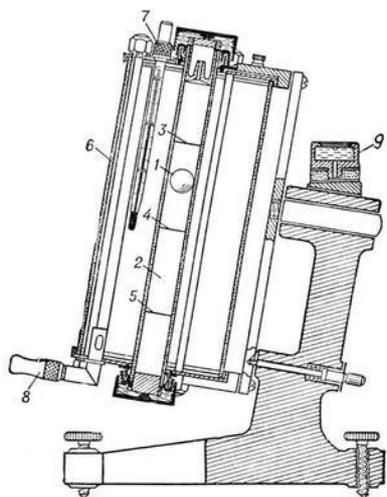


Рисунок 27 – Вискозиметр Гепшлера

1 – Шарик; 2 – измерительная трубка; 3 и 5 – основные метки; 4 – вспомогательная метка; 6 – рубашка; 7 – термометр; 8 – штуцеры для подключения к циркуляционному термостату; 9 – пузырьковый уровень

В ходе проведения эксперимента измеряется время прохождения шариком заданной дистанции между основными метками в измерительной трубке,

заполненной жидкостью, вязкость которой требуется определить. Измерительная трубка располагается в термостатируемом объеме (рубашке), куда через штуцеры поступает и, соответственно, отводится теплоноситель от циркуляционного жидкостного термостата. Также в конструкции предусмотрен термометр и пузырьковый уровень установки основания вискозиметра. В комплектации вискозиметра предусмотрено шесть отличающихся друг от друга по диаметру и материалу изготовления шариков, два из которых (№ 1 и 2) – стеклянные, а четыре оставшихся – металлические. Каждый из шариков рассчитан на определенный диапазон вязкости, при этом при увеличении вязкости анализируемого вещества используют шарик меньшего диаметра. Основные характеристики шариков представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики шариков вискозиметра Гепплера

Шарик	Диаметр, мм	Константа К, (сП·см ³)/(г·с)	Минимальное время падения, с	Диапазон измерения в сП при макс. времени падения 300 с	Предел Погрешностей, %
1	15,805	~0,009	60	~(0,6..5)	±2
2	15,630	~0,07	30	~(3...30)	±0,5
3	15,560	~0,13	30	~(25...250)	±0,5
4	15,000	~1,2	30	~(250...2500)	±1
5	13,500	~10,5	30	~(2500...25000)	±1
6	10,000	~40	30	~(8000...80000)	±1,5

При проведении измерений важно обратить внимание на минимальное и максимальное время падения шарика. При отклонении времени падения от указанного в таблице 4 диапазона значительно возрастает погрешность рассчитываемой вязкости, и полученные значения нельзя считать достоверными.

Расчеты вязкости выполняются по формуле:

$$\mu = K(\rho_2 - \rho_1)t, \quad (41)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, сП; K – константа шарика, (сП·см³)/(г·с); ρ_2 – объемный вес (или плотность) шарика, г/см³; ρ_1 – объемный вес (или плотность) испытуемой жидкости, г/см³; t – время движения шарика, с.

Еще одним видом вискозиметров, который отличается по механике проведения измерения от двух предыдущих, является ротационный вискозиметр. Если при измерении вязкости с использованием капиллярного вискозиметра или вискозиметра Гепплера необходимо было использовать секундомер, то в случае применения ротационного вискозиметра он не потребуется. Принцип работы ротационных вискозиметров основывается на определении величины крутящего момента при вращении специальной насадки (шпинделя) в исследуемой жидкости

с заданной угловой скоростью. Основная расчетная формула для коэффициента динамической вязкости выглядит следующим образом:

$$\mu = k \frac{M}{\omega}, \quad (42)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; k – постоянная прибора, м⁻³; M – вращающий момент, Н·м; ω – угловая скорость, с⁻¹.

Постоянная прибора для ротационных вискозиметров будет зависеть от конструктивных особенностей применяемой измерительной системы. В рамках данного пособия предлагается рассмотреть так называемый ротационный вискозиметр Брукфильда, который получил достаточно широкое распространение среди специалистов из различных отраслей. Общий вид такого вискозиметра, а также его принципиальная схема представлены на рисунке 28.

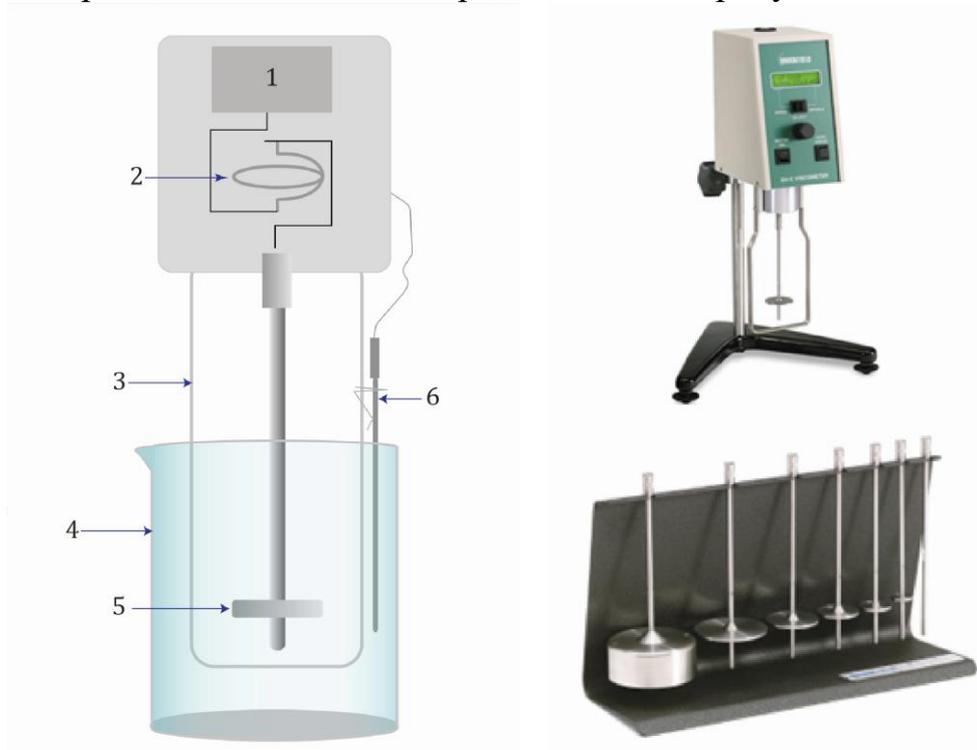


Рисунок 28 – Вискозиметр Брукфильда

1 – электродвигатель; 2 – измерительная пружина; 3 – рамка; 4 – стакан с измеряемой жидкостью; 5 – шпиндель; 6 – датчик температуры

Все вискозиметры Брукфильда используют стандартный принцип ротационной вискозиметрии: вязкость измеряется посредством пересчета крутящего момента, необходимого для вращения шпинделя прибора с постоянной скоростью. Исследуемая жидкость заливается в сосуд, в качестве которого, как правило, используется химический стакан Гриффина емкостью 600 мл. В стакан с

исследуемой жидкостью помещается шпиндель, закреплённый на вале вискозиметра. Далее задается скорость вращения шпинделя, и на экране выводится значение вязкости. Крутящий момент определяется по величине закручивания измерительной пружины, через который соединяется электродвигатель и вал, на котором закреплен шпиндель. Поскольку измерительная пружина работает в определенном диапазоне крутящего момента, то для работы с жидкостями различной вязкости в наборе обычно предусмотрено наличие шпинделей с разной площадью поверхности, при этом чем менее вязкая жидкость, тем больше должна быть площадь поверхности шпинделя, чтобы обеспечить создание необходимой величины крутящего момента при вращении шпинделя. Крутящий момент, как правило, задается и отображается в процентах, и при проведении измерений, если крутящий момент приближается к значению 100 %, необходимо взять шпиндель с меньшей площадью поверхности. Для обеспечения термостатирования образца стакан может быть размещен в водяной бане. Измеренное значение вязкости в результате проведения эксперимента отображается на экране прибора.

Важно отметить, что ротационные вискозиметры являются весьма универсальными приборами, позволяющим проводить измерения как ньютоновских жидкостей, так и жидкостей, проявляющих неньютоновские свойства. Ньютоновские жидкости – это жидкости, вязкость которых зависит от их природы, температуры и давления. Для неньютоновских жидкостей к названным выше зависимостям добавляется зависимость от скорости деформации (течения) и её продолжительности. Иными словами, например, чем быстрее будет двигаться жидкость в трубопроводе, тем меньше будет её вязкость. Изучением свойств неньютоновских жидкостей занимаются в рамках науки реологии, неотъемлемой частью которой является и вискозиметрия.

Таким образом, в данном разделе были рассмотрены наиболее популярные конструкции вискозиметров, однако на практике встречаются и другие.

Вопросы для самоконтроля по разделу 2

- Для чего нужно знать теплоемкость материала образца в биотехнологическом процессе?
- В каких единицах измеряется теплопроводность материалов?
- Что такое регулярный тепловой режим?
- Какие особенности измерения теплоемкости можно отметить при использовании метода сканирующей теплотрии?
- Для чего нужно знать плотность вещества в биотехнологическом процессе?
- Какие существуют способы определения плотности жидкостей и в чем их особенности?
- Что такое вязкость и от чего она зависит?

- Какие существуют способы определения вязкости жидкостей и в чем их особенности?
- Что такое ньютоновские и неньютоновские жидкости?

3. Примеры решения теплофизических задач в биотехнологии

При решении задач, связанных с передачей и преобразованием тепловой энергии, самое важное – это максимально точно определить объект исследования. Это может быть как отдельная технологическая операция, реализованная в конкретном оборудовании, так и целый комплекс, например, цех, участок или лаборатория. Нужно определить условия взаимодействия объекта с окружающей средой на его границах, а также особенности взаимодействия с другими объектами. Кроме этого, нужно определиться с начальными и конечными условиями состояния исследуемого объекта во времени. Основными параметрами в теплофизических задачах являются температура и тепловая мощность. Механизм теплопередачи определяет направление решения задачи. Главное условие передачи тепловой энергии это наличие градиента температур. Нужно помнить, что любая термодинамическая система стремится к равновесию, а при отсутствии источника тепловой энергии к нему придет достаточно быстро, то есть произойдет выравнивание поля температур. Поэтому для поддержания заданных температурных режимов требуется постоянное поступление (отвод) тепловой энергии к объекту (от объекта) или ее получение внутри этого объекта. Особенностью биотехнологических процессов является выделение энергии в результате жизнедеятельности микроорганизмов практически во всем объеме исследуемой среды. Следует помнить, что возможности передачи тепловой энергии имеют свои пределы, а интенсивность теплопередачи определяется, каким именно способом она передается. Уровень рабочих температур, величины температурных градиентов и теплофизические свойства материалов определяют приоритет того или иного механизма передачи тепловой энергии. Большое значения имеет площадь, через которую передается тепловая энергия, и ориентация в пространстве взаимодействующих сред или объектов.

По сути, при решении тех или иных теплофизических задач осуществляется моделирование объектов. На первом этапе строится физическая модель, а затем математическая. При построении физической модели описываются механизмы передачи теплоты, принимаются допущения, то есть принимаются обоснования пренебрегать чем-то в выстраиваемой модели. После формирования краевых условий задача становится замкнутой. Затем все это превращается в язык формул, и модель становится математической. Здесь уместно вспомнить знаменитую фразу, которая приводится в литературе в нескольких разных интерпретациях: «Построение математических моделей — это своего рода искусство, где тесно переплетаются и знание теории, и опыт, и интуиция...». В наше время исследователям в дополнение к совершенному математическому аппарату предоставлены мощные компьютерные технологии, но некоторая «интуиция» обязательно должно присутствовать.

При тепловых расчетах больших и сложных объектов хороший результат дает принцип разбиения на отдельные замкнутые задачи. Строится иерархическая многоуровневая система, то есть результаты отдельных задач становятся исходными данными для решения на следующем уровне и так далее. Важно выбрать именно нижний предел разбиения на фрагменты – микроуровень. Можно, например, углубиться до молекулярного уровня взаимодействия, но это не всегда оправдано. Рекомендацией будет, наверное, такое разбиение, которое позволяет сохранить физические и химические параметры объекта в целом. Например, в двухфазных системах не имеет смысла геометрическое разбиение объекта мельче, чем размер пузырей газа в жидкости или размер капель в газообразной среде. А при тепловой обработке жидкости или газа в канале разбивать меньше его поперечного линейного размера нерационально. При работе с микроорганизмами следует учитывать их представительное количество, которое определяет минимальный объем исследуемой среды.

При тепловых расчетах следует учитывать, что практически нет идеальных условий, так как при эксплуатации промышленного и лабораторного оборудования существуют те или иные загрязнения, отложения на поверхностях теплообмена. Также со временем могут меняться физические свойства материалов, из которых изготовлены сами аппараты и соединительные трубопроводы.

Однако в практической биотехнологии для решения теплофизических задач есть большие преимущества. Это в первую очередь параметры стерильности оборудования и помещений, а также высокие требования к поддержанию в помещениях определенных условий по качеству воздушной среды, которые в определенной степени упрощают решение тепловых задач. Теплофизические расчеты позволяют определить температурные режимы и потребные тепловые мощности, что дает возможности для рационального построения технологических процессов.

3.1 Расчет тепловыделения дрожжей при производстве пива

При спиртовом брожении в сусле протекают биологические, биохимические, физико-химические процессы. Питательные вещества, поступающие в дрожжевые клетки из сусла, под действием ферментов превращаются в различные промежуточные продукты, расходуемые на спиртовое брожение и рост дрожжей.

Основным биохимическим процессом брожения является превращение сбраживаемых сахаров в этиловый спирт и диоксид углерода. Большая часть экстракта сусла состоит из углеводов, из них около 75 % сбраживаются (сбраживаемые сахара). Часть экстракта составляют несбраживаемые вещества. К ним относятся декстрины, белки, минеральные вещества и др. Сахара сбраживаются в определенной последовательности, что обусловлено скоростью их проникновения в дрожжевую клетку. В первую очередь сбраживается фруктоза и

глюкоза. Сахароза предварительно гидролизуется ферментом β -фруктофуранозидазой дрожжей до глюкозы и фруктозы. После фруктозы и глюкозы дрожжи поглощают мальтозу, которая под действием фермента α -глюкозидазы превращается в сбраживаемую глюкозу. Мальтотриоза расходуется дрожжами медленно и не полностью. Таким образом, для процесса брожения стартовым компонентом всегда будет являться глюкоза. В общем виде процесс преобразования глюкозы в основные продукты брожения можно представить в следующем виде:



Эта реакция сопровождается выделением энергии, которая может расходоваться на нужды клетки, а также выделяться в виде тепла. Эта энергия, которую аккумулирует клетка, содержится в специальных молекулах АТФ (аденозинтрифосфат), и энергетический баланс брожения с их учетом можно представить в следующем виде:



где НАД – кофермент (Никотинамидадениндинуклеотид), НАД·Н – восстановленная форма кофермента, АДФ – аденозиндифосфат, ПВК – пировиноградная кислота, Ф_n – фосфатная группа ортофосфорной кислоты.

Превращения пировиноградной кислоты в различные метаболиты (у разных микроорганизмов различные) на накопление АТФ уже не влияют. Таким образом, при брожении получается 2 молекулы АТФ, энергоемкость которых составляет 61 кДж/моль ($30,5 \times 2$).

Проведем термодинамические расчеты. Общая разность энергии исходных продуктов и продуктов спиртового брожения – это разность между энергией глюкозы и энергией этанола:

$$2870 \text{ кДж/моль} - 2640 \text{ кДж/моль} = 230 \text{ кДж/моль}.$$

Замеры делались с помощью сжигания веществ в калориметрической бомбе. Иногда приведенные значения могут несколько отличаться, и результат составляет 210 кДж/моль. Это вопрос методологии измерений и интерпретации результата. В наших расчётах будем исходить из наиболее часто встречающегося варианта - 230 кДж/моль. Таким образом, разница этих энергий (энтальпий образования) составляет:

$$230 \text{ кДж/моль} - 61 \text{ кДж/моль} = 169 \text{ кДж/моль}.$$

Это и есть то количество теплоты, которое выделится в результате брожения дрожжевых клеток.

Применительно к пивоварению эта величина указывает, сколько тепловой энергии высвободится при брожении суслу в нормальных условиях, т. е. без учета теплопритоков из окружающей среды и теплоты собственно охлаждаемой жидкости (в данном случае – суслу).

Для энергетических расчетов в условиях пивоварения эти данные могут использоваться с учетом следующих технологических показателей:

- Масса суслу, идущего на брожение;
- Объем суслу, идущего на брожение;
- Экстрактивность суслу, идущего на брожение;
- Относительная плотность сбраживаемого суслу;
- Степень сбраживания суслу;
- Молекулярная масса глюкозы $M=180$ г/моль.

В одном килограмме глюкозы содержится $1000\text{г}/180(\text{г/моль}) = 5,5$ моль. При её ферментации (брожении) выделится $5,5\text{моль} \times 169\text{кДж/моль} = 929,5\text{кДж}$ тепловой энергии из 1 кг глюкозы (экстракта). Эта величина будет отправной точкой для создания формулы по расчету тепловыделения дрожжей.

Учитывая характеристики продукта, мы получаем:

$$Q = \frac{929,5mCC_{\text{дЭ}}}{10000}, \quad (45)$$

где Q - тепловыделение при брожении определенного сорта пива, кДж; m – масса сбраживаемого экстракта, кг; $CC_{\text{д}}$ – действительная степень сбраживания, %; Э – экстрактивность суслу, %; 10000 – коэффициент нивелирующий относительную (процентную) величину.

Такой величиной, как масса, пользоваться в условиях пивоваренного производства не практично, кроме того, она будет регулярно варьироваться в зависимости от экстрактивности суслу. Поэтому целесообразно перейти к объемным величинам:

$$V = m/\rho, \quad (46)$$

где V – объем сбраживаемого суслу, м³; m – масса сбраживаемого суслу, кг; ρ – абсолютная плотность начального суслу, кг/м³.

Абсолютная плотность в пивоварении применяется редко, вместо нее традиционно пользуются относительной плотностью суслу ($d^{20/20}$), которую получают отношением массы известного объема суслу к массе равного объема воды при 20 °С. Эта величина эмпирическая (табличная) и зависит от экстрактивности суслу. Обычно она находится в пределах 1,04–1,05.

Чтобы получить абсолютную плотность, относительную плотность раствора умножают на абсолютную плотность воды при интересующей температуре (20°С). В нашем случае эта величина будет выглядеть следующим образом:

$$\rho = 998,23d_{20}^{20}, \quad (47)$$

где ρ – абсолютная плотность начального сусла, кг/ м³; d_{20}^{20} – относительная плотность сусла. Объединяя формулы (45) (46) и (47), мы получаем следующее соотношение:

$$Q = \frac{929,5 \cdot 998,23d_{20}^{20}VCCдЭ}{10000}, \quad (48)$$

где Q - тепловыделение при брожении определенного сорта пива, кДж; 929,5 – тепловыделение от сбраживания 1 кг экстракта, кДж; d_{20}^{20} – относительная плотность сусла; 998,23 – абсолютная плотность воды при 20 °С, кг/ м³; V – объем сбраживаемого сусла, м³; ССд – действительная степень сбраживания, %; Э – экстрактивность сусла, %; 10000 – коэффициент нивелирующий относительную (процентную) величину.

Если множители, выраженные числами, привести к единому знаменателю, то мы получим следующую итоговую формулу:

$$Q = 92,78d_{20}^{20}VCCд \times Э, \quad (49)$$

где Q - тепловыделение при брожении определенного сорта пива, кДж; 92,78 – коэффициент пересчета; d_{20}^{20} – относительная плотность сусла; V – объем сбраживаемого сусла, м³; ССд – действительная степень сбраживания, %; Э – экстрактивность сусла, % [29].

3.2 Рекомендации по расчету теплообменных аппаратов

Теплообменный аппарат или теплообменник – это устройство для передачи теплоты от одной жидкой или газообразной среды к другой. Эти взаимодействующие среды принято называть теплоносителями. Один из них – греющий (или охлаждаемый) теплоноситель, который отдает тепловую энергию, а другой, соответственно, принимает тепловую энергию и нагревается (или охлаждается). Теплообменные устройства по принципу действия делятся на поверхностные и смесительные (контактные).

Поверхностные, или рекуперативные, теплообменники – это устройства, где теплоносители движутся одновременно относительно разделяющей их стенки,

через которую происходит передача тепловой энергии. В регенеративных теплообменниках, где поверхность нагрева омывается последовательно одним теплоносителем, затем другим, и передача тепловой энергии осуществляется через эту поверхность.

В рекуперативных теплообменниках теплота от одного теплоносителя к другому передается через разделяющую их стенку, таким образом, стенка служит поверхностью теплообмена с обеих сторон и сама должна обладать минимальным тепловым сопротивлением. В зависимости от конструктивного исполнения поверхности теплообмена рекуперативные теплообменные аппараты разделяют на следующие категории:

- кожухотрубные;
- двухтрубные типа «труба в трубе»;
- пластинчатые;
- змеевиковые;
- канальные;
- микроканальные;
- трубчатые выпарные и т. д.

В регенеративных теплообменниках тепловая энергия от одного теплоносителя к другому передается при содействии промежуточного вещества. Чаще всего в качестве последнего используются массивный материал.

В отличие от рекуперативных и регенеративных теплообменников, в смесительных теплообменниках обмен тепловой энергией происходит при непосредственном контакте взаимодействующих сред. В смесительных теплообменных аппаратах теплообмен происходит при смешении теплоносителей без разделяющей их твердой поверхности. Наиболее простыми и компактными являются смесительные теплообменники, в которых смешиваются теплоносители, не требующие дальнейшего разделения, например, при подогреве воды паром. Используются смесительные теплообменники и для легко разделяющихся теплоносителей: газ – жидкость, газ – дисперсный твердый материал, вода – твердые частицы. Для увеличения поверхности контакта теплоносителей их тщательно перемешивают, жидкости разбрызгивают или разбивают на мелкие струи и капли.

Достаточно распространенным теплообменным рекуперативным аппаратом являются аппараты типа «труба в трубе», представленные на рисунке 29.

Теплообменники этого типа чаще всего представляют собой батарею из нескольких теплообменных элементов, расположенных один под другим. Каждый элемент состоит из внутренней трубы и охватывающей ее наружной трубы. Внутренние трубы отдельных элементов, также как и наружные трубы соответственно, соединены между собой последовательно. Один теплоноситель движется в трубах, а другой – в межтрубном пространстве по кольцевым каналам между трубами.

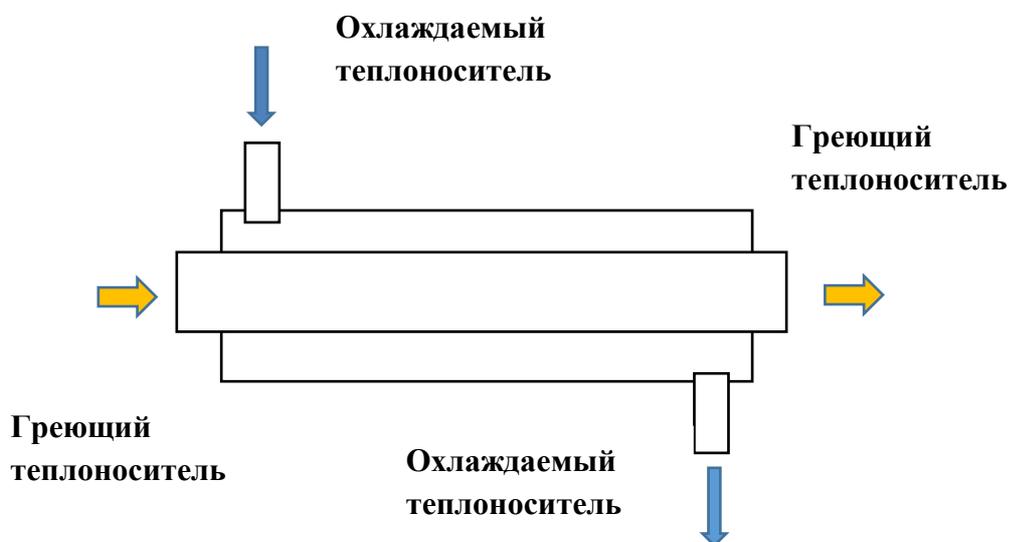


Рисунок 29. - Принципиальная схема движения теплоносителей противоточного теплообменного аппарата

Теплообмен между теплоносителями осуществляется через стенки внутренних труб. В двухтрубных теплообменниках обеспечивается высокая скорость теплоносителей и высокая интенсивность теплообмена. Однако эти теплообменники громоздки и металлоемки; поэтому их применяют преимущественно для проведения процессов нагрева и охлаждения при высоких давлениях. При необходимости создания больших поверхностей теплообмена устанавливают несколько параллельно соединенных батарей.

В теплообменных аппаратах приняты различные конфигурации взаимодействия теплоносителей, основные из них показаны на рисунке 30.

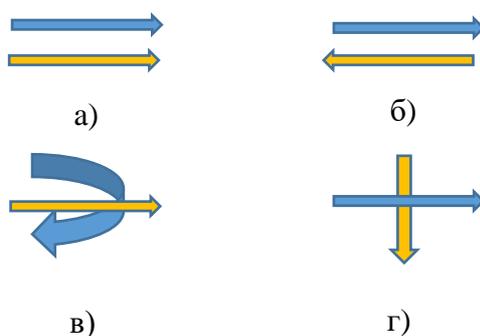


Рисунок 30. - Конфигурация движения теплоносителей: прямоток (а); противоток (б); смешанный (в) и перекрестный ток (г)

При разработке и эксплуатации теплообменных аппаратов принято различать конструктивный и поверочный тепловые расчеты. Как уже отмечалось выше, в подобных теплофизических расчетах используются термины:

теплоносители, поверхность теплообмена, количество теплоты, температуры теплоносителей.

В теплообмене участвует греющий или горячий теплоноситель и нагреваемый или холодный теплоноситель. Теплоносители в тепловом расчете удобно назвать взаимодействующими средами.

Конструктивный расчет выполняется, как правило, на этапе проектирования конструкции, и его цель — определить площадь поверхности теплообмена. При этом заданными параметрами являются количество теплоты и температуры взаимодействующих теплоносителей.

Выполняя поверочный расчет, определяют конечные температуры теплоносителей и так называемую тепловую производительность для конкретной конструкции аппарата, зная поверхность теплообмена. Поверочный расчет выполняется, чтобы установить температурный режим аппарата.

На первом этапе теплового расчета из справочной литературы принимается: тип аппарата, материалы, из которых он изготовлен, основные геометрические параметры, состав теплоносителей, их входные и выходные температуры.

Рекомендуется вести конструктивный расчет в следующей последовательности. Вначале составляется тепловой баланс теплообменного аппарата. Затем определяется средняя разность температур между теплоносителями в теплообменном аппарате Δt_m . После этого определяются средние по всей поверхности коэффициенты теплоотдачи теплой и холодной сред α_2 и α_x . Имея значения этих величин, определяется коэффициент теплопередачи K и так называемая *тепловая нагрузка* аппарата Q . Тепловая нагрузка — это одна из основных характеристик аппарата, определяющая его производительность. Затем находится поверхность теплообмена F . Рекомендуется принимать поверхность теплообмена с некоторым запасом, который нивелирует некоторые допущения, принятые в расчете.

После этого рассчитываются гидравлические характеристики, такие как проходные сечения, скорости движения сред, гидравлические сопротивления, по которым находят мощности перекачивающих устройств, обеспечивающих нужный гидродинамический режим.

Поверочный расчет теплообменного аппарата рекомендуется выполнять в следующей последовательности. Вначале определяются коэффициенты теплоотдачи сред и соответствующий им коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата. Затем находят изменения температур теплоносителей, их конечные значения на выходах и определяют тепловую производительность аппарата.

Есть некоторый нюанс, на который стоит обратить внимание. В начале этого расчета средние температуры взаимодействующих сред в аппарате неизвестны. Поэтому для определения теплофизических свойств, входящих в формулы для коэффициентов теплоотдачи, принимаются входные температуры. Затем после

определения температур на выходе вычисляют средние температуры, и по ним теплофизические свойства уточняются. И так в несколько итераций достигается искомый результат.

Как обычно, в основе теплового расчета теплообменного аппарата лежат два основных положения сохранения массы и энергии, которые выражаются через уравнение теплового баланса и уравнение теплопередачи. Достаточно подробно методы расчета теплообменников описаны в литературе, например [30, 31, 32]. Для примера рассмотрим самый простой случай взаимодействующих сред — жидкостей, без фазовых и химических превращений. Также в средах не происходит никаких биологических процессов, которые бы могли создать дополнительные источники тепловыделений. Взаимодействуют жидкости.

Уравнение теплового баланса выглядит следующим образом:

$$Q = G_{\Gamma} C_{p_{\Gamma}} (t_{f_{\Gamma 1}} - t_{f_{\Gamma 2}}) = G_{\chi} C_{p_{\chi}} (t_{f_{\chi 2}} - t_{f_{\chi 1}}) \quad , \quad (50)$$

где Q – тепловая нагрузка (производительность) аппарата или теплота, отдаваемая горячей и получаемая холодной средой в единицу времени, Вт; G_{Γ} и G_{χ} – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с; $C_{p_{\Gamma}}$ и $C_{p_{\chi}}$ – изобарные удельные теплоемкости горячего и холодного теплоносителей, Дж/(кг·К); $t_{f_{\Gamma 1}}$ и $t_{f_{\chi 1}}$ – температуры горячего и холодного теплоносителей на входе в аппарат, °С; $t_{f_{\Gamma 2}}$ и $t_{f_{\chi 2}}$ – температуры горячего и холодного теплоносителей на выходе из аппарата, °С;. Индекс Γ указывает, что величины относятся к горячей среде, а индекс χ – к холодной среде, индексы 1 и 2 обозначает величины на входе и выходе теплообменного аппарата. Важная расчетная величина – массовый расход жидкости, который определяется формулой:

$$G = \rho w S, \quad (51)$$

где w – скорость движения жидкости, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; S – площадь поперечного сечения канала, м².

Уравнение теплопередачи, из которого обычно определяют поверхность теплообмена F , имеет вид:

$$Q = K \Delta t_m F, \quad (52)$$

где K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); Δt_m – температурный напор или разность между температурами взаимодействующих сред, °С; F – площадь поверхности теплообмена, м².

Температурный напор изменяется по длине аппарата, и различают локальный и средний температурный напор. Характерное изменение температур

теплоносителей и соответствующих температурных напоров в зависимости от организации движения показано на рисунке 31.

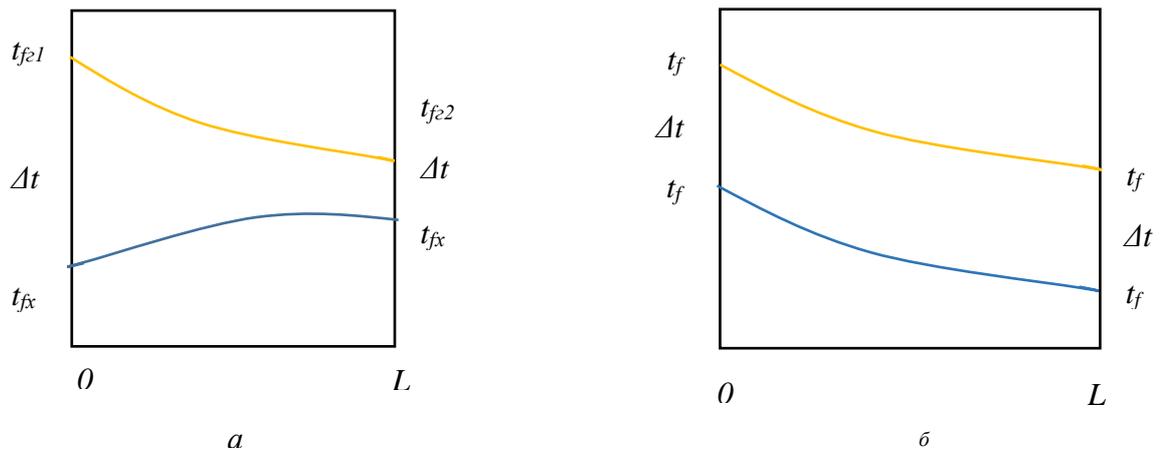


Рисунок 31 - Изменение температур теплоносителей при различных схемах движения жидкостей в аппарате: *a* – прямоток; *б* – противоток

Опыт показал, что целесообразно в тепловом расчете теплообменных аппаратов использовать среднелогарифмические разности температур, которые могут быть определены с помощью следующих формул:

$$\Delta t_m = \frac{(\Delta t_1 - \Delta t_2)}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)}. \quad (53)$$

Расчет Δt_m удобно производить по уравнению:

$$\Delta t_m = \frac{(\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_m)}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_m}\right)}, \quad (54)$$

где Δt_1 и Δt_2 – разность между температурами сред на входе и выходе из аппарата, °С; $\Delta t_{\bar{o}}$ – большая разность температур, °С, Δt_m – меньшая разность температур, °С.

Характерно, что при одинаковых температурах жидкостей среднелогарифмический температурный напор Δt_m при противотоке теплоносителей всегда больше, чем при прямотоке. При постоянной температуре одной из жидкостей средние температурные напоры при прямотоке и противотоке одинаковы. Это следует учитывать, выбирая тот или иной способ организации движения.

Есть одна интересная особенность: если $\Delta t_{\delta}/\Delta t_m < 2$, то можно вместо среднелогарифмического напора использовать среднеарифметическое значение температурного напора:

$$\Delta t_m = 0,5(\Delta t_{\delta} + \Delta t_m), \quad (55)$$

Для более сложных схем движения жидкостей, таких как смешанное или перекрестное, средний температурный напор меньше Δt_m противотока и рассчитывается с учетом поправки, определяемой по справочникам, как функция соответствующих температур жидкостей.

Коэффициент теплопередачи от горячей среды к холодной зависит от условий теплообмена со стороны каждой среды, а также от термического сопротивления стенки теплопередающей поверхности:

$$R_w = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (56)$$

На теплообменной поверхности в результате эксплуатации могут возникать отложения и загрязнения, которые имеют толщину и, как правило, обладают малой теплопроводностью. И они вносят ощутимый вклад в общее термическое сопротивление стенки:

$$R_z = \frac{\delta_z}{\lambda_z}. \quad (57)$$

Таким образом, полное термическое сопротивление стенки с учетом загрязнений:

$$R = R_w + R_z = \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_z}{\lambda_z}, \quad (58)$$

где λ , δ – теплопроводность материала стенки, Вт/(м·К), и ее толщина, м, соответственно; λ_z – теплопроводность слоя загрязнений, Вт/(м·К), и его толщина δ_z , м, соответственно.

При прочих равных условиях численное значение коэффициента теплопередачи зависит от того, к какой поверхности его относят, однако поверхностные теплообменные аппараты обычно изготавливают из труб, отношение толщины стенок которых к диаметру $\delta/d < 0,1$. И тогда вполне обоснованно можно коэффициент теплопередачи рассчитывать по более простой формуле, используемой для плоской стенки по формуле (26).

Коэффициенты теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителей определяются по соответствующим формулам, которые в большом количестве представлены в справочной литературе. Здесь следует обратить внимание на влияние гидродинамической обстановки внутри канала на теплообмен, что в конечном счете выражается в выборе для расчетов той или иной формулы.

В общем случае средний коэффициент теплоотдачи при движении жидкости в трубах или каналах рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{l}. \quad (59)$$

В этом выражении число Нуссельта (Nu) определяется по следующим правилам — при ламинарном режиме течения ($\text{Re}_f < 2300$) имеем:

$$\text{Nu}_f = 0,17 \text{Re}_f^{0,33} \text{Pr}_f^{0,43} \text{Gr}_f^{0,1} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25}; \quad (60)$$

при турбулентном режиме течения ($\text{Re}_f > 10000$) для расчета чаще всего используют соотношение (более применимое для пучков труб):

$$\text{Nu}_f = 0,021 \text{Re}_f^{0,8} \text{Pr}_f^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25}; \quad (61)$$

при переходном режиме течения ($2300 < \text{Re}_f < 10000$):

$$\text{Nu}_f = K_o \text{Pr}_f^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25}, \quad (62)$$

где K_o — функция числа Re, значения которой приведены в таблице 5.

Таблица 5. Значения функции K_o

$\text{Re} \cdot 10^{-3}$	2,3	2,5	3,0	3,5	4	5	6	7	8	9	10
K_o	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	26	27	30	33

Теплофизические величины, входящие в числа подобия, зависят от температуры, и значения этих величин рассчитываются при температуре, называемой *определяющей температурой*. Числа подобия обычно обозначаются

индексами, которые указывают, какой температуре они соответствуют, если индекс w , то температуре стенки, если f , то температуре жидкости, а если m , то среднему значению температуры.

В качестве определяющего размера l при движении жидкости в трубах или каналах принимают соответственно внутренний диаметр трубы d или эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}$:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4S}{\Pi}, \quad (63)$$

где S – площадь проходного сечения канала, м^2 ; Π – периметр этого сечения, м .

Для канала, имеющего кольцевое сечение, в качестве определяющего размера принимается:

$$d_{\text{экв}} = D_{\text{вн}} - d_{\text{внш}}, \quad (64)$$

где $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр внешней трубы, м ; $d_{\text{внш}}$ – внешний диаметр внутренней трубы,

В качестве определяющей температуры выбирается средняя температура жидкости t_f по длине, а за определяющую скорость – средняя скорость движения жидкости:

$$w = \frac{G}{\rho S}, \quad (65)$$

где G – массовый расход жидкости, кг/с ; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; S – площадь поперечного сечения, м^2 .

Рекомендуемый порядок выполнения расчетов:

- Выбрать теплофизические свойства взаимодействующих сред при определяющей температуре горячего теплоносителя, приведя их при необходимости к единой системе единиц (СИ).
- Определить скорость течения горячего теплоносителя w_2 .
- Рассчитать критерий Рейнольдса Re_2 для течения горячего теплоносителя.
- Вычислить критерий Нуссельта Nu_2 для горячего теплоносителя, исходя из режима течения теплоносителя.
- Определить коэффициент теплоотдачи со стороны горячего теплоносителя α_r .
- Определить тепловую нагрузку теплообменного аппарата.
- Определить расход холодного теплоносителя G_x из уравнения теплового баланса.

- Вычислить определяющую температуру холодного теплоносителя и определить его теплофизические свойства.
- Определить скорость движения холодного теплоносителя w_x и рассчитать критерий Рейнольдса Re_x , определив его режим течения.
- Вычислить критерий Нуссельта Nu_x , исходя из режима холодного теплоносителя.
- Определить коэффициент теплоотдачи со стороны холодного теплоносителя α_x .
- Определить среднюю логарифмическую разность температур в теплообменном аппарате.
- Вычислить термическое сопротивление R для чистой поверхности.
- Вычислить коэффициент теплопередачи K для чистой теплообменной поверхности.
- Определить поверхность теплообмена F и необходимую длину труб L .
- Вычислить термическое сопротивление R_z для загрязненной поверхности.
- Вычислить коэффициент теплопередачи.
- Определить для этого случая поверхность теплообмена F и необходимую длину труб L .

Таким образом можно выполнить тепловой расчет и определить гидродинамические и геометрические параметры.

3.3 Электронагревательные элементы биотехнологических процессов для экспериментальных исследований

Нагреватель – один из самых важных элементов тепловой части установки, именно он осуществляет нагрев, имеет наибольшую температуру и определяет работоспособность устройства в целом. Они очень широко применяются как в лабораторном, так и производственном оборудовании.

Самыми простыми и удобными в управлении среди нагревателей являются электрические, в которых при прохождении тока происходит превращение электрической энергии в тепловую. Разработано множество всевозможных электронагревателей с большим набором мощностей и конструктивных особенностей. Нагреватель может быть вмонтирован в аппарат, быть съемным, накладным или погружным. Нагревательные элементы могут также выполнять роль активной теплоизоляции для обеспечения стабильной работы основного узла биореактора. Нагревательные элементы являются основным элементом самостоятельных видов лабораторного оборудования: термостатов, водяных бань, колбонагревателей, электроплиток.

Греющий элемент электронагревателя при работе для выделения достаточной мощности имеет высокую температуру, и непосредственно в прямом контакте с биосредой его использовать нельзя. Поэтому применяются различные прокладки и изолирующие элементы или промежуточный жидкий теплоноситель.

В экспериментах очень удобными являются гибкие нагреватели как дополнительные тепловые элементы. В настоящее время разработаны и используются на практике разнообразные электронагреватели в защитных термостойких оболочках. Но многие из термостойких материалов не всегда приемлемы в биотехнологических процессах. Однако уровень температур в этих процессах не превышает 150–200 °С, поэтому широкое применение получили оболочки из силикона различных марок. Плоские гибкие и безопасные электронагреватели изготавливаются в виде лент, прямоугольников, круглой или овальной формы.

Основные требования, предъявляемые к материалам тепловыделяющих элементов электронагревателей:

- механическая прочность при высоких температурах;
- высокое удельное электрическое сопротивление;
- малый температурный коэффициент сопротивления;
- хорошие технологические свойства.

Материалы, применяемые для изготовления нагревателя, могут быть металлические и неметаллические. Среди металлических материалов можно выделить наиболее распространенные – это нихром и фехраль.

Нихром имеет следующие преимущества:

- максимальная температура нагревателя 1400 °С;
- хорошие механические свойства как при низких, так и при высоких температурах;
- имеет хорошие технологические свойства – пластичность и свариваемость;
- хорошо обрабатывается;
- не стареет, немагнитен.

Фехраль дешевле нихрома, применяется в том же температурном диапазоне, обладает лучшей жаростойкостью. Однако не инертен, более хрупкий и имеет низкую коррозионную стойкость.

Еще применяются высокотемпературные нагреватели из молибдена, вольфрама, тантала, ниобия, но это достаточно дорогие материалы. Их обоснованно используют в специальных тепловых системах.

Неметаллические материалы, такие как карборунд, дисилицид молибдена, уголь, графит, имеют неоспоримые преимущества, но они явно дороже.

Рассмотрим порядок выбора и расчета параметров самого распространенного типа электронагревателей из нихрома. Прежде всего уточняются исходные данные и среда, в которой работает электронагреватель:

- P — мощность нагревателя, Вт;
- U — подаваемое электрическое напряжение, В;
- t — рабочая температура нагревателя, °С;

Последовательность расчета:

1. Определяется сила тока (A), проходящего через нагреватель:

$$I = \frac{P}{U}. \quad (66)$$

2. Исходя из известной силы тока, определяется электрическое сопротивление R (Ом) электронагревателя:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (67)$$

3. Подбирается диаметр проволоки d (мм) электронагревателя, исходя из допустимой силы тока и рабочей температуры нагревателя. Допустимая сила тока должна быть не больше, чем расчетная, приведенная в таблице 6.

Таблица 6. Значения допустимой силы тока в проволоке из нихрома

Диаметр проволоки, мм	Температура, °C						
	200	400	600	700	800	900	1000
	Максимальная допустимая сила тока, А						
4,00	37,0	60,0	80,0	93,0	110,0	129,0	151,0
3,00	22,3	37,5	54,5	64,0	77,0	88,0	102,0
2,50	16,6	27,5	40,0	46,6	57,5	66,5	73,0
2,00	11,7	19,6	28,7	33,8	39,5	47,0	51,0
1,80	10,0	16,9	24,9	29,0	33,1	39,0	43,2
1,60	8,6	14,4	21,0	24,5	28,0	32,9	36,0
1,50	7,9	13,2	19,2	22,4	25,7	30,0	33,0
1,40	7,25	12,0	17,4	20,0	23,3	27,0	30,0
1,30	6,6	10,9	15,6	17,8	21,0	24,4	27,0
1,20	6,0	9,8	14,0	15,8	18,7	21,6	24,3
1,10	5,4	8,7	12,4	13,9	16,5	19,1	21,5
1,00	4,85	7,7	10,8	12,1	14,3	16,8	19,2
0,90	4,25	6,7	9,35	10,45	12,3	14,5	16,5
0,80	3,7	5,7	8,15	9,15	10,8	12,3	14,0
0,75	3,4	5,3	7,55	8,4	9,95	11,25	12,85
0,70	3,1	4,8	6,95	7,8	9,1	10,3	11,8
0,65	2,82	4,4	6,3	7,15	8,25	9,3	10,75
0,60	2,52	4	5,7	6,5	7,5	8,5	9,7
0,55	2,25	3,55	5,1	5,8	6,75	7,6	8,7
0,50	2	3,15	4,5	5,2	5,9	6,75	7,7
0,45	1,74	2,75	3,9	4,45	5,2	5,85	6,75
0,40	1,5	2,34	3,3	3,85	4,4	5,0	5,7
0,35	1,27	1,95	2,76	3,3	3,75	4,15	4,75
0,30	1,05	1,63	2,27	2,7	3,05	3,4	3,85
0,25	0,84	1,33	1,83	2,15	2,4	2,7	3,1
0,15	0,46	0,74	0,99	1,15	1,28	1,4	1,62
0,10	0,1	0,47	0,63	0,72	0,8	0,9	1,0

Если нагреватель находится в обычных условиях, то есть в воздушной среде, то принимается табличное значение силы тока. Если нагреватель находится в жидкой среде, то силу тока можно увеличить: в воде в 1,2 раза; в минеральном масле в 1,3 раза. А если нагреватель находится в закрытом положении, то силу тока нужно уменьшить в 1,5 раза.

4. С другой стороны, электрическое сопротивление проволоки определяется соотношением:

$$R = \frac{L\rho_{\text{э}}}{S}, \quad (68)$$

где $\rho_{\text{э}}$ – удельное электрическое сопротивление материала проволоки, Ом·м, L – длина проволоки, м; S - площадь поперечного сечения проволоки, м².

Для сведения величина удельного электрического сопротивления нихрома (X20H80-H) приведена в таблице 7.

Таблица 7. Величина удельного электрического сопротивления нихрома

Марка сплава нихрома	Диаметр, мм	Удельное электрическое сопротивление $\rho_{\text{ном}}$, мкОм·м
X20H80-H	от 0,1 до 0,5	1,08
	от 0,5 до 3,0	1,11
	Св. 3,0	1,13

5. Определяется площадь сечения проволоки диаметром d , из которой изготовлен нагреватель:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (69)$$

6. Длина проволоки электронагревателя получается из уравнения (68):

$$L = \frac{RS}{\rho}. \quad (70)$$

Приведен простой и надежный алгоритм расчета длины нихромовой проволоки для нагревателя, которая обеспечит его заданную мощность. Обратным путем по тем же формулам при заданных геометрических параметрах проволоки - диаметру и длине, можно определить рабочую температуру и мощность нагревателя. Аналогично может быть рассчитан электронагревательный элемент из любого другого материала разнообразной геометрической формы и пространственной конфигурации.

3.4 Расчет тепловой энергии для отопления лаборатории и здания

При модернизации производства, расширении помещений и строительстве новых зданий требуется рассчитывать количество тепловой энергии, необходимой для отопления и вентиляции, чтобы обеспечить комфортные условия для персонала и работы оборудования. Это тоже одна из типовых теплотехнических задач и относится к области *строительной теплофизики* и *теплоэнергетики*. Понятно, что такие расчеты должны делаться специалистами в соответствии с нормативными техническими документами, но для оценочных действий вполне возможно выполнить упрощенный расчет, который даст возможность рассмотреть ситуацию с технической и экономической позиции.

Расчеты ведутся со средними и укрупненными величинами. В основу расчетов заложены общие принципы теплообмена и обобщенные данные многолетних климатических наблюдений и опыт эксплуатации строительных объектов в разных природно-географических зонах. Упрощенный расчет теплового потребления может быть выполнен на основе действующих сводов правил СП 60.133330.2020 и других нормативных материалов. Это весьма объемные документы, и при первом ознакомлении они могут вызвать трудности, но в принципе алгоритмы расчета не очень сложные и логичные. Следует отметить, что расчеты вести удобнее в единицах, принятых в многолетней практике в теплоэнергетике и строительном проектировании, они внесистемные.

Расход теплоты (ккал) для отопления и вентиляции отдельного здания определяется по формуле:

$$Q_o = q_o V (t_b - t_n), \quad (71)$$

$$Q_b = q_b V (t_b - t_{нв}), \quad (72)$$

где q_o , и q_b – отопительные характеристики здания на отопление и вентиляцию, ккал/(ч м³ °С); V – наружный строительный объем здания, м³; t_b – температура внутри здания; t_n – наружная температура воздуха, °С; $t_{нв}$ – наружная температура воздуха, поступающего на вентиляцию, °С.

Строительный объем здания – это площадь основания задания, умноженная на его высоту. Расчет нельзя вести для отдельного помещения, так как с теплотехнической позиции теплообмен с окружающей средой происходит со всей наружной поверхности здания. А количество тепловой энергии для отдельного помещения определяется как часть от общей величины в соответствии с соотношением объемов или площадей, то есть по удельной характеристике.

Под отопительной характеристикой здания на отопление понимается величина, которая характеризует интенсивность отдачи теплоты от единицы строительного объема здания в единицу времени при разнице температур в один

градус (между температурой внутри помещений и температурой наружного воздуха). Отопительная характеристика на вентиляцию характеризует теплоотдачу от единицы строительного объема при обеспечении здания вентиляцией в единицу времени при разнице температур в один градус (между температурой внутри помещений и температурой воздуха, поступающего в вентиляционную систему). Отопительные характеристики здания аналогичны коэффициентам теплоотдачи, только относят их к единице объема объекта.

Отопительная характеристика зависит от объема здания, этажности, и чем больше объем, тем меньше потери. Для каждого вида функционального назначения проектируются и возводятся разные типы зданий. Они имеют множество отличий - по материалу стен, отделке, остеклению, площади и объему помещений, ориентации по сторонам света и т. п. Плотность застройки также влияет на тепловые характеристики. Есть специальные формулы для расчетов тепловых характеристик, и в справочных источниках есть много данных по тепловым характеристикам всевозможных конструкций зданий, и некоторые из них приведены в таблице 8.

Таблица 8. Тепловые характеристики зданий и сооружений.

Наименование зданий	Строительный объем здания, тыс. м ³	q _о , ккал/м ³ ч ⁰ С	q _в , ккал/м ³ ч ⁰ С	t _в , С
Административные, бизнес центры	до 5	0,43	0,09	18
	от 5 до 10	0,38	0,08	
	более 10	0,35	0,07	
Театры, концертные залы,	до 5	0,36	0,41	16
	от 5 до 10	0,29	0,36	
	более 10	0,22	0,31	
Торговые центры	до 5	0,38	0,08	16
	от 5 до 10	0,33	0,10	
	более 10	0,31	0,27	
Школы и учебные заведения	до 5	0,39	0,09	18
	от 5 до 10	0,36	0,08	
	более 10	0,33	0,07	
Медицинские учреждения	до 5	0,40	0,36	20
	от 5 до 10	0,36	0,32	
	более 10	0,32	0,30	
Предприятия общественного питания, рестораны, кафе	до 5	0,35	0,70	18
	от 5 до 10	0,33	0,65	
	более 10	0,30	0,60	
Производственные помещения общего назначения	до 5	0,48	0,40	18
	от 5 до 10	0,43	0,38	
	более 10	0,40	0,35	
Исследовательские центры, лаборатории	до 5	0,37	1,00	18
	от 5 до 10	0,35	0,95	
	более 10	0,33	0,90	

Климатогеографическое положение объекта существенно влияет на основные температурные и временные параметры, принимаемые в качестве исходных данных. Это температуры наружного воздуха, как средние, так и минимальные за отопительный период и продолжительность этого периода. Они существенно отличаются между собой в разных регионах.

Максимальный расход теплоты на отопление здания рассчитывается, исходя из температурных параметров максимально холодных дней:

$$Q_{\text{ом}} = q_o V(t_{\text{в}} - t_{\text{но}}). \quad (73)$$

Аналогично рассчитывается максимальное значение теплоты на вентиляцию, учитывая минимальную температуру наружного воздуха для вентиляции:

$$Q_{\text{вм}} = q_{\text{в}} V(t_{\text{в}} - t_{\text{нво}}). \quad (74)$$

Значения средних и минимальных температур в отопительный сезон в различных регионах можно взять в СП 131.13330.2018, и некоторые из них приведены в таблице 9.

Таблица 9. Характеристики отопительного сезона в различных городах РФ

Город	Продолжительн. отопительного. сезона, сут.	Средняя температура отопительного периода, $t_{\text{п}}$, °C	Расчетная минимальн. температура для отопления $t_{\text{но}}$, °C	Расчетная минимальн. температура для вентиляции $t_{\text{нво}}$, °C
Москва	205	-3,2	-25	-14
Санкт-Петербург	219	-2,2	-25	-11
Казань	218	-5,7	-30	-18
Волгоград	182	-3,4	-22	-13
Иркутск	241	-8,9	-38	-25
Владивосток	201	-4,8	-25	-16
Екатеринбург	228	-6,4	-31	-20
Новосибирск	227	-9,1	-39	-24

Суммарная часовая тепловая нагрузка рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{мч}} = Q_{\text{ом}} + Q_{\text{вм}}. \quad (75)$$

Годовой расход теплоты рассчитывается как произведение плановой длительности отопительного периода N (сут.) для рассматриваемого региона на сумму часовых расходов теплоты, расходуемой на вентиляцию и отопление:

$$Q_{\Gamma} = 24N(Q_0 + 0,75Q_B). \quad (76)$$

Эта величина обычно представляется в размерности – Гкал.

Далее, чтобы перейти к экономической составляющей расчета, вычисляются затраты на обеспечение здания тепловой энергией за год:

$$Z_{от} = Q_{\Gamma} T_{\Gamma}, \quad (77)$$

где T_{Γ} – тариф, применяемый для расчетов за тепловую энергию в рассматриваемом регионе, руб./Гкал.

При необходимости можно рассчитать потребности на отдельное помещение. Как уже описано выше, в реальной практике это можно сделать по удельному весу и доле рассматриваемого помещения в общей площади здания. Такие расчеты актуальны для малых производств, когда правообладатель отдельного помещения осуществляет расчеты за коммунальные услуги на основании теоретического расчета по данным, которые предоставляет владелец всего здания. Вполне объяснимо, что чаще всего они завышены в пользу последнего.

Таким образом рассчитываются как теплотехнические, так и финансово-экономические потребности для эксплуатируемого, вновь вводимого или реконструируемого объекта.

3.5 Сгущение сахарного сиропа путем выпаривания посредством теплового воздействия

Одним из примеров применения тепловых процессов в реальных лабораторных и производственных технологиях является сгущение сахарного сиропа путем выпаривания. Такая процедура довольно часто осуществляется как простой и надежный способ удаления воды из сиропа.

Имеется исходный продукт – сироп с небольшой концентрацией, который наливается в сосуд. Сосуд устанавливается на электронагревательный прибор, и производится нагрев с доведением сиропа до температуры кипения. Затем осуществляется выпаривание воды до нужной концентрации сиропа и охлаждение его до заданной температуры. Задач может быть несколько. Например, требуется определить время всей технологической операции для обработки заданной массы сиропа при установленной мощности электронагревателя. Или, наоборот, определить необходимую мощность электронагревателя при заданном времени процедуры сгущения того же количества сиропа.

Рассмотрим эту несложную технологическую операцию на конкретном примере в лабораторных условиях. Сахарный сироп объемом 2,5 л имеет исходную концентрацию 15 % масс и температуру 20 °С. При заданной мощности

нагревателя 1,6 кВт необходимо сгустить его до концентрации 80 % масс и затем остудить до температуры 20 °С. Требуется определить время всего процесса.

Так как расчет ведется для определения примерного времени, то вполне оправданным будет принять следующие допущения. Осуществляется перемешивание сиропа в сосуде, поэтому температура во всем объеме жидкости принимается одинаковой. Так как сосуд, в который налита жидкость, тонкостенный и металлический, то температура боковой поверхности стенки сосуда принимается равной температуре жидкости. Сосуд не закрыт крышкой, и водяной пар свободно покидает жидкость. С наружной поверхности стенок сосуда и с поверхности жидкости теплообмен с окружающей средой происходит в условиях свободной конвекции и излучения, и суммарный коэффициент теплоотдачи принимается примерно равным 11 Вт/(м²·К). Для таких условий это вполне оправдано. Температура кипения сахарного сиропа принимается равной 100 °С, то есть пренебрегается ее изменение при увеличении концентрации раствора. Изменением мощности электронагревателя можно пренебречь. Потери теплоты с электронагревателя за счет рассеивания в окружающую среду принимаются примерно 15 % от общей мощности. Теплофизические свойства берутся из справочных источников. Тепловым расширением выпариваемого сиропа можно также пренебречь. Исходные данные, необходимые для расчетов, приведены в таблице 10.

Все принятые допущения и предположения кардинально не изменяют общей реальной картины процесса, и поэтому полученный результат инженерной задачи будет вполне достоверным.

Таблица 10. Исходные данные

Наименование показателя	Ед. изм.	Величина
Мощность электронагревателя, W	Вт	1600
Начальная концентрация, C_1	% масс	80
Конечная концентрация, C_2	% масс	15
Диаметр сосуда, d	м	0,2
Начальная высота столба жидкости, h_1	м	0,25
Плотность 15 % сиропа, ρ_1 ,	кг/м ³	1060
Плотность 80 % сиропа, ρ_2	кг/м ³	1440
Удельная теплоемкость 15 % сиропа, C_{p1}	Дж/(кг К)	3992
Удельная теплоемкость 80 % сиропа, C_{p2}	Дж/(кг К)	2800
Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности сосуда с сиропом к окружающей среде, α	Вт/(м ² К)	11

Весь технологический процесс изготовления (выпаривания) сиропа разбивается на три стадии (фазы) — по единству тепловых условий: нагревание, кипение и остывание.

Нагревание. В процессе нагревания концентрация сиропа остается неизменной, соответственно, уменьшения массы и объема жидкости не происходит. Производится непрерывный подвод тепловой энергии заданной мощности, а с наружной боковой поверхности сосуда и с верхней поверхности жидкости происходит теплообмен с окружающей средой. Часть тепловой энергии рассеивается в самом электронагревателе.

Нагревание сиропа происходит от 20 до 100 °С. Задача решается путем разбиения всего диапазона температур по шагам Δt_i . И для каждого шага составляется уравнение теплового баланса. В результате получают промежутки времени $\Delta \tau_i$, за которые сироп нагревается на Δt_i .

Уравнение теплового баланса для каждого шага по температуре имеет вид:

$$\Delta \tau_i W = C p_1 m_1 (t_{i+1} - t_i) + \alpha S \left(\frac{t_{i+1} + t_i}{2} - t_{\text{среды}} \right) \Delta \tau_i . \quad (78)$$

Из этого уравнения выражается промежуток времени нагрева:

$$\Delta \tau_i = \frac{C p_1 m_1 (t_{i+1} - t_i)}{W - \alpha S \left(\frac{t_{i+1} + t_i}{2} - t_{\text{среды}} \right)_i} . \quad (79)$$

Площадь поверхности теплообмена – сумма боковой поверхности сосуда и поверхности жидкости:

$$S_1 = \frac{\pi d^2}{4} + \pi d h_1 . \quad (80)$$

где: h_1 – высота слоя жидкости, м.

Высота слоя жидкости h_1 рассчитывается по формуле:

$$h_1 = \frac{4V_1}{\pi d^2} . \quad (81)$$

Масса исходного раствора рассчитывается по формуле:

$$m_1 = \rho_1 V_1 , \quad (82)$$

В результате расчетов получаются следующие значения: $S_1=0,157 \text{ м}^2$, $V_1=0,0079 \text{ м}^3$, $m_1=8,325 \text{ кг}$. Промежуточные значения величин для всей стадии нагревания представлены в таблице 11.

Таблица 11. – Зависимость температуры от времени на стадии нагревания

t (°C)	$\Delta\tau$ (с)	τ (с)	τ (мин)
20	41,5	41,5	0,6
22	41,6	83,2	1,3
24	41,7	125,0	2,0
...
100	45,5	1783,3	29,7

На рисунке 32 представлен график изменения температуры на стадии нагревания:

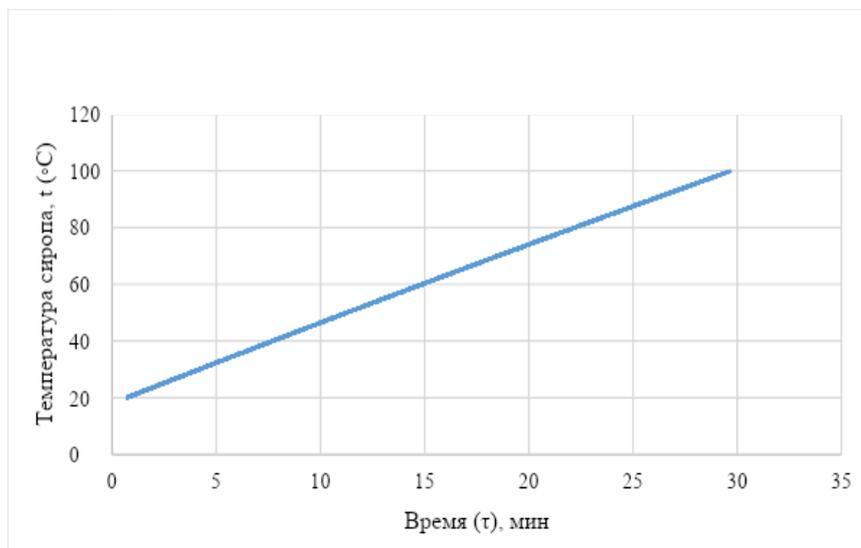


Рисунок 32 – Нагревание сиропа

Кипение. При достижении сиропом температуры кипения начинается удаление воды из раствора в виде водяного пара, который свободно покидает жидкость. Производится непрерывный подвод тепловой энергии, которая расходуется на парообразование и частично теряется с наружной поверхности сосуда и с поверхности жидкости сверху. В принятых допущениях считается, что на стадии кипения температура сиропа принимается неизменной 100 °C , а вот концентрация сиропа изменяется от 15 до 80 % масс. Происходит изменение объема и массы сиропа. Задача решается путем разбиения всего диапазона изменяемой массы сиропа по шагам - Δm_i . Для каждого шага составляются уравнения материального и теплового баланса. В результате получается промежуток времени $\Delta\tau_i$, за который масса сиропа уменьшается на Δm_i . И

соответственно, увеличивается концентрация сиропа. Расчет заканчивается, когда концентрация раствора достигает заданного значения 80 % масс.

Уравнение теплового баланса на стадии кипения имеет вид:

$$\Delta\tau_i W = r\Delta m_i + \alpha\Delta S(t_{\text{кип}} - t_{\text{среды}})\Delta\tau_i. \quad (83)$$

Из уравнения (83) выражается промежуток времени:

$$\Delta\tau_i = \frac{r\Delta m_i}{W - \alpha\Delta S(t_{\text{кип}} - t_{\text{среды}})} \quad (84)$$

Так как в процессе кипения происходит выпаривание воды и уменьшается масса и объем раствора, соответственно сокращается площадь теплообмена боковой поверхности.

Масса сахара в сиропе (масса сухих веществ) рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{сах}} = \frac{c_1 m_1}{100} \quad (85)$$

Для представленных исходных данных масса сахара $m_{\text{сах}}$ равна 1,249 кг, а масса конечного раствора с концентрацией 80 % масс рассчитывается по формуле:

$$m_2 = \frac{m_{\text{сах}}}{c_2} 100 \quad (86)$$

В результате получается $m_2=1,561$ кг. Таким образом, масса раствора изменяется с 8,325 кг до 1,561 кг. Результат расчета представлен в таблице 12. Плотность раствора изменяется с 1060 кг/м³ до 1440 кг/м³. Зная, что плотность находится в прямой зависимости от массы, определим шаг изменения плотности k для каждой m_i по формуле:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{n}. \quad (87)$$

Исходя из формулы для расчета плотности каждого значения m_i и ρ_i рассчитывается значение объемов V_i ; а затем рассчитывается значение высоты столба жидкости h_i , результаты расчета представлены в таблице 12.

Таблица 12. Изменение параметров раствора

ω (мсах/м _и)	m_i (кг)	ρ_i (кг/м ³)	V_i (м ³)	h_i (м)	$\Delta\tau$ (с)	τ (с)	τ (МИН)
0,150	8,325	1060	0,00785	0,250	178,5	178,5	2,9
0,151	8,225	1065	0,00772	0,245	178,2	356,7	5,9
0,153	8,125	1070	0,00758	0,241	177,9	534,6	8,9
...
0,819	1,525	1440	0,00107	0,033	164,7	11784,7	196,4

На рисунке 33 представлен график изменения концентрации на стадии выпаривания.

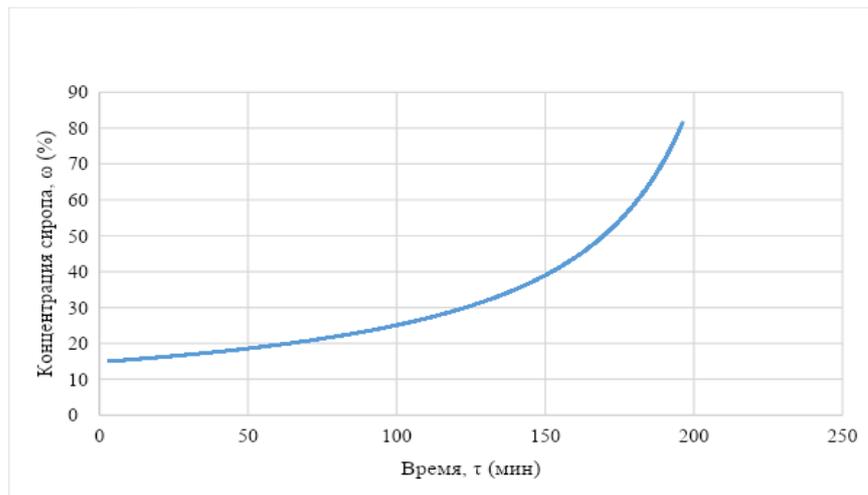


Рисунок 33 – Кипение сиропа.

Остывание. Процесс идет естественным образом – никакой стимуляции теплообмена не производится. На стадии остывания сиропа поступления теплоты нет, и его концентрация остается неизменной – 80 % масс. Значит, не требуется составления уравнения баланса масс. Происходит изменение температур сиропа от 100 до 20 °С. Задача решается путем разбиения всего диапазона температур по шагам Δt_i , и для каждого шага составляется уравнение теплового баланса. В результате можно получить промежуток времени $\Delta\tau_i$, за который сироп остывает на Δt_i .

Уравнение теплового баланса для каждого шага имеет вид:

$$Cp m_2 (t_i - t_{i+1}) = \alpha S_2 \left(\frac{t_i + t_{i+1}}{2} - t_{\text{среды}} \right) \Delta\tau. \quad (88)$$

Из уравнения (88) можно получить $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau = \frac{Cp m_2 (t_i - t_{i+1})}{\alpha S_2 \left(\frac{t_i + t_{i+1}}{2} - t_{\text{среды}} \right)}. \quad (89)$$

Остывание сиропа происходит от 100 до 20 °С (температура окружающей среды). Результаты промежуточных расчетов представлены в таблице 13.

Таблица 13. Зависимость температуры от времени в фазу остывания

t (°C)	$\Delta\tau_i$ (с)	τ (с)	τ (мин)
100	186,3	186,3	3,1
98	191,1	377,4	6,2
...
20	12041,8	53490,8	891,2

На рисунке 34 представлен график изменения температуры сиропа в фазе остывания:

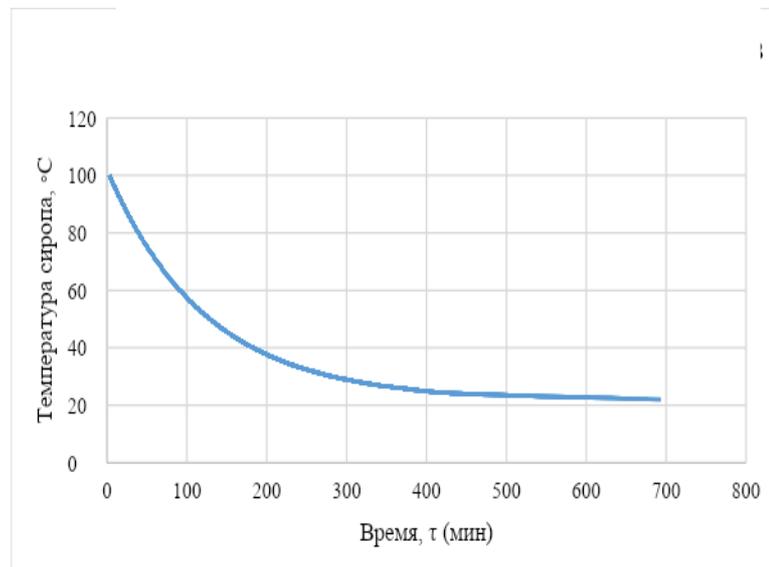


Рисунок 34 – Остывание сиропа

На рисунке 35 представлены графики зависимостей для всех трех стадий: нагревание, выпаривание, остывание.

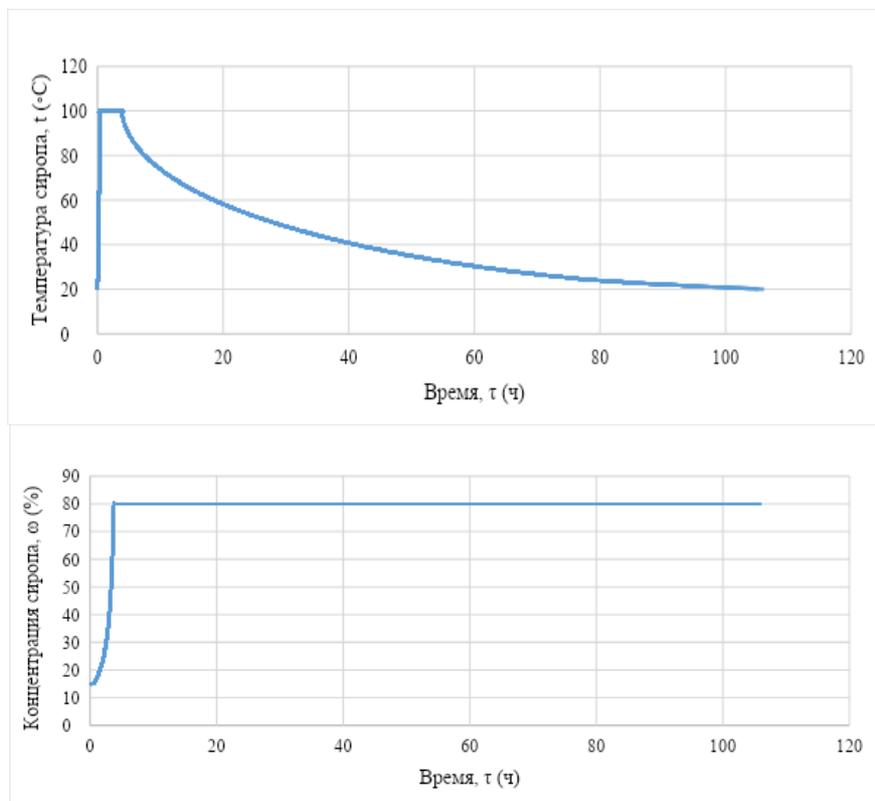


Рисунок 35 – Все стадии процесса

Далее, суммируя полученные промежутки времени Δt_i для всех стадий процесса сгущения сиропа, получается общее время, в течение которого сироп от начальных параметров достигнет заданных конечных величин.

Вопросы для самоконтроля по разделу 3

- Почему в тепловых расчетах биотехнологических сред чаще используются объемные величины, чем массовые?
- Какие бывают теплообменные аппараты, применяемые в биотехнологических процессах?
- Что такое противоток в теплообменных устройствах?
- Что такое удельное электрическое сопротивление в электронагревателях?
- Как влияет длина электронагревательного элемента на его мощность?
- Что такое отопительная характеристика здания и в каких единицах она определяется?
- Почему количество теплоты для отопления здания определяется в гигакалориях (Гкал)?
- Чем схожи по тепловым параметрам стадии нагрева и охлаждения при сгущении сахарного сиропа выпариванием?
- Как снизить потери тепловой энергии в биотехнологических процессах?

Заключение

Рассмотрены основные теплофизические аспекты в биотехнологии для лабораторной и производственной деятельности. Приведенные примеры решения разных задач показывают, насколько важны процессы переноса и трансформации тепловой энергии. Вполне понятно, что в рамках пособия не ставилась задача охватить все возможные комбинации процессов. Но изложенные в настоящем пособии теоретические основы и практические рекомендации позволят решать тепловые задачи. Во многом именно интенсивность теплопередачи и трансформация тепловой энергии определяют ход биотехнологических процессов и конечный результат - получение продуктов с высокими качественными показателями.

Освоение специалистами в области биотехнологии практических навыков тепловых и теплофизических расчетов открывает новые возможности междисциплинарных исследований. Даже просто правильная постановка задачи, с учетом всех физических факторов и условий, несомненно, может обеспечить более точный результат. Оценка тепловой обстановки в биотехнологических процессах открывает возможности их более рационального построения.

Важнейшими являются и вопросы энергосбережения, которые невозможно решать без квалифицированных тепловых расчетов. Таким образом, могут решаться задачи рециклинга и вторичного использования энергоресурсов и влияние последствий применяемых биотехнологий на окружающую среду с позиции трансформации энергии. Могут решаться и обратные задачи — разработки биотехнологических процессов для получения энергии.

Литература

1. Михеев М. А., Основы теплопередачи / М.А.Михеев И. М. Михеева. – М.: Изд. Дом "Бастет", 2010. - 344 с.
2. Исаченко В. П. Теплопередача: учебник для энергетических вузов / В. П. Исаченко., В. А. Осипова, А. С. Сукомел. –Москва, Энергия, 1975. - 488 с.
3. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Москва, Издательство Атомиздат, 1979.-416 с.
4. Данилова Г.Н. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г. Н. Данилова, С. Н. Богданов, О. П. Иванов и др. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение : Ленингр. отделение, 1986. - 303 с.
5. Жукаускас А.А. Интенсификация теплообмена – Вильнюс, МОКЛАС, 1988.- 189 с.
6. Дульнев Г. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры: учебное пособие / Г.Н. Дульнев, Н.Н. Тарновский. – Л.: Энергия., 1971. - 249 с.
7. Рехарский М.В. Термодинамика биотехнологических процессов/ М.В.Рехарский. - М.: Наука,1976. - 280 с.
8. Далькэ И. В., Головки Т. К., Малышев Р. В. Использование метода микрокалориметрии в биологии и экологии // Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. – 2004. – №. 9. – С.11-15.
9. Мухачев С. Г., Еникеев Ш. Г. Потеря устойчивости процессов биосинтеза при гипербарических и лимитирующих концентрациях кислорода в газовой фазе // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – №. 19. – С. 248-249
10. Муханов В. С. и др. Диссипация энергии, продуктивность и скорость оборота биомассы в сообществе бактериопланктона: сравнительное исследование двух водных экосистем // Экология моря. – 2000. – Т. 52. – С. 12-17.
11. Драпеза А. И. и др. Разработка сенсорной системы для оценки теплопродукции популяций микроорганизмов //БГМУ: 90 лет в авангарде медицинской науки и практики. – 2012. – С. 80-83.
12. Франк Ю. А., Ивасенко Д.А., Герасимчук А.Л. Перспективы биокомпостирования органических отходов в условиях низких температур. Управление техносферой. Т.5 вып. 2. – 2022. - С. 208-220.
13. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим/ Г.М. Кондратьев. – Л.: Гостехиздат, 1954. - 320 с.
14. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. - М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
15. Чудновский, А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов /А.Ф. Чудновский. – М.: Физматгиз, 1962. – 407 с.

16. Филиппов Л. П. Подобие свойств веществ / Л.П. Филиппов. - М.: Изд-во МГУ, 1978. - 255 с.
17. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В.А. Осипова. - М.: Энергия, 1979. - 319 с.
18. Герашенко О. А. Основы теплотметрии / О.А. Герашенко М.: Энергия, 1971. - 327 с.
19. Теплофизические измерения и приборы/ Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров; Под общ. Ред. Е.С Платунова. - Л.: Машиностроение, Ленинградское. отделение, 1986. - 256 с.
20. Платунов Е.С., Баранов И.В., Буравой С.Е., Курепин В.В. Теплофизические измерения. - СПб: СПбГУНиПТ, 2010. - 738 с.
21. Баранов И. В., Прошкин С. С., Самолетов В. А. Исследования теплофизических свойств влагосодержащих материалов в условиях замораживания и размораживания //Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством. – 2001. – С. 80-88.
22. Баранов И. В., Никитин А. А. Комплексные измерения теплофизических характеристик влагосодержащих материалов при замораживании и размораживании //Вестник Международной академии холода. – 2007. – №. 1. – С. 24-27
23. Платунов Е. С., Баранов И. В., Куслиева Е. В. Автоматизированный прибор для измерений теплофизических характеристик влагосодержащих материалов //Вестник Международной академии холода. – 2009. – №. 3. – С.36-40.
24. Тамбулатова Е.В., Плужникова Д.В. Теплофизические измерения влагосодержащих материалов. СПб.: Университет ИТМО, 2022. - 44 с.
25. <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/>
26. Емелина А.Л. Дифференциальная сканирующая калориметрия. — М.: МГУ, 2009. — 42 с.
27. Арет В.А. Реологические основы расчета оборудования производства жиросодержащих пищевых продуктов: учебное пособие/ В.А. Арет, Б.Л. Николаев, Л.К. Николаев.– Санкт-Петербург: Интермедия, 2013. – 344 с.
28. Малкин, А. Я. Реология: концепции, методы, приложения / А. Я. Малкин, А. И. Исаев / пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2007. – 560 с.
29. Баланов П. Е., Иванченко О. Б. Синтез теплоты дрожжевыми клетками при сбраживании пивного сусла // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2013. – №. 3.– С. 5-12.
30. Гуляев В. А. Теплотехника: учебник для ВУЗов / В. А. Гуляев, Б. А. Вороненко, Л. М. Корнюшко, В. В. Пеленко, А. П. Щеренко. – СПб.: Изд. РАПП, 2009. - 352 с.
31. Банных О.П. Основные конструкции и тепловой расчет теплообменников. Учебное пособие. СПбНИУ ИТМО, 2012. – 42 с.

32. Минкин Д.Ю. Теплофизические закономерности развития пожарной опасности на промышленных предприятиях и нефтегазовых объектах /Д.Ю. Минкин, А.В. Федоров, А.А. Кузьмин, Н.Н. Романов. - СПб: СПбУГПС МЧС России -2018. - 464 с.

Федоров Александр Валентинович
Тамбулатова Екатерина Викторовна
Баланов Петр Евгеньевич
Федоров Алексей Александрович
Крылов Василий Александрович

ПРИКЛАДНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ В БИОТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А