



Календерьян, В. А. Тепломассоперенос в аппаратах с плотным слоем дисперсного материала [Текст] : монография / Календерьян Виргиния Александровна, Бошкова Ирина Леонидовна. - Киев : Слово, 2011. - 184 с. : табл., рис. - Библиогр.: с. 175-183. - ISBN 978-966-194-091-7.

Монография посвящена процессам переноса теплоты и массы в движущихся и неподвижных плотных слоях дисперсных материалов. Приведены одно- и двухкомпонентные модели тепломассопереноса в слое с внутренними источниками теплоты, обусловленными химическими и фазовыми превращениями, при наличии погруженных теплообменных поверхностей, аналитические зависимости для распределения температур компонентов. Описаны оригинальные методы и стенды для определения коэффициентов теплообмена компонентов слоя с поверхностью, коэффициентов переноса влаги и теплоты в дисперсных материалах при сушке, а также экспериментальные данные по структуре, аэродинамическому сопротивлению и теплообмену продуваемого слоя с пучками гладких и оребренных труб, коэффициентам теплообмена компонентов слоя при наличии и отсутствии внутренних источников, по коэффициентам тепло- и влагопереноса слоя ряда материалов в процессах сушки, формулы для расчета этих характеристик. Приведены методики и результаты расчетов тепловлажностных режимов в слое плодоовощной продукции при ее хранении и охлаждении. Представлены сведения о кинетике кондуктивной, кондуктивно-конвективной, микроволновой и микроволново-конвективной сушки различных дисперсных материалов, формулы для скорости сушки, обобщенные зависимости, описывающие изменение безразмерных среднеинтегральных влагосодержаний и температур в процессах сушки при различных способах подвода энергии. Приведены методики и результаты расчетов аппаратов с неподвижным и движущимся слоем (каталитического генератора теплоты, сернокислотного каталитического реактора, воздухоохладителя, сушилок).

ПРЕДИСЛОВИЕ

Аппараты с плотными слоевыми дисперсными системами применяются в энергетике, металлургии, химической, пищевой и других отраслях промышленности. Это, например, установки для энерготехнологической переработки

твердых топлив, каталитические генераторы теплоты, аппараты для конверсии метана, обогащения руд цветных металлов, переработки различных отходов, каталитические химические реакторы, сушилки для различных сыпучих материалов. В связи с этим исследованиям процессов тепломассопереноса в таких системах посвящена обширная литература, в том числе монографии (например, [1—7]). В [1, 2] проанализированы и обобщены данные по структурным, аэродинамическим характеристикам неподвижного продуваемого слоя, межкомпонентному тепло-и массообмену. В [3—6] приведены данные по аэродинамическому сопротивлению и теплообмену движущегося продуваемого и непродуваемого слоя с гладкими и оребренными трубчатыми поверхностями при продольном и поперечном омывании. В [7] рассматриваются процессы теплопереноса в неподвижном слое.

Значительное внимание уделяется математическому описанию процессов переноса теплоты и массы в слоях, фильтруемых газом или жидкостью. В общем случае такое описание не может быть выполнено на основании представлений механики сплошных сред вследствие макроскопической неоднородности дисперсных систем. Континуальное приближение правомерно лишь в случаях, когда структурный размер элементов дисперсной среды значительно меньше линейного масштаба изменения средних температур и концентраций [8, 9]. Такое условие выполняется во многих интересных для практики задачах о тепломассопереносе в дисперсных средах. В связи с этим возникает необходимость формулировки уравнений сохранения теплоты и массы для континуумов, моделирующих компоненты системы либо систему в целом. Применяются различные методы вывода уравнений переноса: а) феноменологический, б) метод пространственного или временного осреднения микроскопических локальных уравнений, в) статистический метод осреднения локальных уравнений по ансамблю возможных конфигураций коллектива частиц. При использовании феноменологического подхода уравнения сохранения постулируются, а коэффициенты переноса определяются экспериментально. При пространственном осреднении в уравнения вводят переменные средние по объемам и различно ориентированным площадкам. При таком подходе необходимо сделать предположения о характере связи между различными средними величинами, а также допущения, позволяющие свести интегралы по объему (поверхности) ансамбля частиц к интегралам для одной частицы. По-видимому, наиболее строгим является статистический метод, позволяющий получить уравнения сохранения и соотношения, замыкающие систему уравнений, на основании одних и тех же модельных представлений и не требующий формулировки гипотез о виде связи между объемным и поверхностным осреднением.

Широкое распространение получили феноменологические однокомпонентные гомогенные модели (например, [1, 2, 3, 5, 7—12] и др.), позволяющие получить аналитические решения различных задач теплопереноса. В таких моделях постулируется равенство температур компонентов. Между тем, при определенных условиях (при протекании в слое реакций с большим теп-

ловым эффектом, кратковременных нестационарных процессах, низкой интенсивности межкомпонентного теплообмена, высокой каркасной теплопроводности слоя) температуры компонентов могут существенно различаться. В таких случаях используют двухкомпонентные гомогенные модели, в которых слой рассматривается, как система, состоящая из двух квазисплошных компонентов, между которыми протекают межкомпонентные процессы тепло-и массообмена (например, [6, 13—19]. В [13, 19] система уравнений теплопереноса для двухкомпонентных моделей сводилась к некоторому эквивалентному уравнению. Сопоставление одно-и двухкомпонентных моделей показало, что использование однокомпонентных моделей в кратковременных процессах, при интенсивном тепловыделении, высоком термическом сопротивлении межкомпонентного теплообмена приводит к существенным ошибкам в предсказании температур [6, 20—24]. Известные в литературе модели теплопереноса при наличии внутренних источников теплоты справедливы для свободного слоя, модели для слоя с погруженными поверхностями отсутствуют.

Настоящая монография посвящена ряду процессов, сведения о которых (как показано в соответствующих главах) в литературе отсутствуют либо крайне ограничены. Двух-и однокомпонентные математические модели используются для описания тепломассопереноса в слое с внутренними источниками (стоками) теплоты, обусловленными химическими и фазовыми превращениями, при наличии и отсутствии погруженных теплообменных поверхностей. На основании этих моделей получены аналитические зависимости для распределения температур компонентов в неподвижном продуваемом слое с источниками теплоты и погруженными поверхностями, в движущемся слое при кондуктивно-конвективной и микроволново-конвективной сушке. Описаны оригинальные методы и стенды для определения коэффициентов теплообмена компонентов слоя, коэффициентов переноса влаги и теплоты в дисперсных материалах при сушке, а также экспериментальные данные по структуре, аэродинамическому сопротивлению и теплообмену продуваемого слоя с пучками гладких и оребренных труб, коэффициентам теплообмена компонентов слоя с поверхностью при наличии и отсутствии внутренних источников, по изменению коэффициентов тепло-и влагопереноса слоя ряда материалов в процессе сушки, а также формулы для расчета этих характеристик. Приведены методика и результаты расчетов тепло-влажностных режимов в слое плодоовощной продукции при ее хранении и охлаждении. Представлены сведения о кинетике кондуктивной, кондуктивно-конвективной, микроволновой и микроволново-конвективной сушки различных дисперсных материалов, формулы для скорости сушки, обобщенные зависимости, описывающие изменение безразмерных среднеинтегральных влагосодержаний и температур в процессах сушки. Приведены основанные на двухкомпонентных моделях методика и результаты расчетов аппаратов с неподвижным и движущимся слоем (каталитического генератора теплоты, сернокислотного каталитического реактора, воздухоохладителя, сушилок). Материалы монографии в определенной мере будут способствовать воспол-

нению имеющихся в литературе пробелов.

Главы 1—3, 5 монографии написаны В.А. Календерьян, главы 4, 6 написаны авторами совместно, общая редакция В.А. Календерьян.

Авторы выражают благодарность д.т.н. проф. Притуле В.В., рецензентам д.т.н. проф. Дорошенко А.В. и д.т.н. проф. Станкевичу Г.Н.

СОДЕРЖАНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	6
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	8
1. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В НЕПОДВИЖНОМ ПРОДУВАЕМОМ СЛОЕ С ПОГРУЖЕННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ.....	11
1.1. Модели тепло- и массопереноса в слое.....	11
1.2. Температурное поле в неподвижном продуваемом слое с погруженными поверхностями.....	14
1.2.1. Стационарный теплоперенос в слое без внутренних источников теплоты.....	14
1.2.2. Стационарный теплоперенос в слое с внутренними источниками теплоты.....	17
1.2.3. Нестационарный теплоперенос в слое без внутренних источников теплоты.....	19
1.2.4. Сопоставление моделей.....	21
2. ПОРОЗНОСТЬ, АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН НЕПОДВИЖНОГО ПРОДУВАЕМОГО СЛОЯ С ПОГРУЖЕННЫМИ ПУЧКАМИ ТРУБ.....	25
2.1. Краткая характеристика исследований.....	25
2.2. Порозность и аэродинамическое сопротивление слоя с погруженными пучками труб.....	25
2.3. Теплообмен неподвижного продуваемого слоя с пучками труб.....	31
2.4. Теплообмен компонентов неподвижного продуваемого слоя с пучками труб.....	45
2.4.1. Теплообмен компонентов при отсутствии в слое внутренних источников теплоты.....	45
2.4.2. Теплообмен компонентов при наличии в слое внутренних источников теплоты.....	49

3. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПЛОТНОМ ПРОДУВАЕМОМ СЛОЕ ПЛОДООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ И ХРАНЕНИИ.....	55
3.1. Основные закономерности процессов.....	55
3.2. Математическая модель процессов тепломассопереноса.....	57
3.3. Расчетное исследование тепловлажностных режимов в плотном продуваемом слое плодоовощной продукции при охлаждении и хранении.....	60
3.3.1. Общая характеристика расчетов.....	60
3.3.2. Анализ тепловлажностных режимов охлаждения плодоовощной продукции в продуваемом слое.....	61
3.3.3. Анализ тепловлажностных режимов хранения плодоовощной продукции в продуваемом слое.....	72
4. СУШКА ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛОТНОМ СЛОЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПОДВОДА ЭНЕРГИИ.....	77
4.1. Способы подвода энергии.....	77
4.2. Кондуктивная и кондуктивно-конвективная сушка дисперсных материалов в плотном слое.....	78
4.2.1. Математическая модель теплопереноса в движущемся плотном слое при кондуктивно-конвективной сушке.....	78
4.2.2. Температурное поле в движущемся плотном слое при кондуктивно-конвективной сушке.....	79
4.2.3. Анализ влияния различных факторов на поле температур в слое...	81
4.2.4. Кинетика кондуктивной и кондуктивно-конвективной сушки дисперсных материалов в плотном слое.....	84
4.2.5. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных.....	89
4.3. Микроволновая и микроволново-конвективная сушка дисперсных материалов в плотном слое.....	90
4.3.1. Математические модели теплопереноса в движущемся плотном слое при микроволново-конвективной и микроволновой сушке.....	90
4.3.2. Расчетное исследование полей температур в движущемся слое при микроволново-конвективной сушке.....	95
4.3.3. Кинетика микроволновой и микроволново-конвективной сушки зерновых культур в неподвижном слое.....	100
4.4. Обобщенные уравнения кривых влагосодержания и температуры в процессах сушки дисперсных материалов при различных способах подвода энергии.....	115
4.5. Сопоставление характеристик процессов сушки при различных	

способах подвода энергии.....	116
5. КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЛАГО-И ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПЛОТНОМ СЛОЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССАХ СУШКИ.....	118
5.1. Краткий анализ состояния вопроса.....	118
5.2. Методика исследований и экспериментальная установка.....	119
5.3. Результаты исследований и их анализ.....	123
5.3.1. Характеристики дисперсных материалов.....	123
5.3.2. Изменение коэффициентов переноса влаги и теплоты в процессах сушки.....	126
5.3.3. Оценка потоков влаги и теплоты.....	136
6. АППАРАТЫ С ПЛОТНЫМ СЛОЕМ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА.....	138
6.1. Каталитический генератор теплоты для обезвреживания сточных вод химических производств.....	138
6.2. Сернокислотный химический реактор с неподвижным слоем катализатора.....	144
6.3. Воздухоохладитель с движущимся плотным слоем промежуточного дисперсного теплоносителя.....	148
6.3.1. Схема и принцип работы воздухоохладителя.....	148
6.3.2. Методика и результаты расчета воздухоохладителя.....	151
6.4. Установки для микроволново-конвективной сушки дисперсных материалов в плотном движущемся слое.....	158
6.4.1. Схемы установок.....	158
6.4.2. Методики расчета установок для микроволново-конвективной сушки дисперсных материалов в движущемся и неподвижном слое.....	162
6.4.3. Расчетные характеристики установки для микроволново-конвективной сушки зерновых культур в движущемся плотном слое.....	166
6.5. Конвективная сушилка с движущимся плотным слоем дисперсного материала.....	167
6.6. Влияние неравномерности на теплоперенос в аппаратах с движущимся продуваемым слоем.....	171
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК.....	175