

УДК 517.28+536.491+699.86

ББК 22.161+22.317+38.637

Ж86

СЕРИЯ ОСНОВАНА В 2008 ГОДУ

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *В.Ф. Коровяков*,  
заместитель директора НИИМосстрой;  
кандидат технических наук *И.В. Бессонов*,  
ведущий научный сотрудник НИИСФ РААСН

*Монография рекомендована к публикации научно-техническим советом НИУ МГСУ*

**Жуков, Алексей Дмитриевич.**

Ж86 Высокопористые материалы: структура и тепломассоперенос [Электронный ресурс]: монография / А. Д. Жуков ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. — 2-е изд. (эл.). — Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 209 с.). — Москва : Издательство МИСИ–МГСУ, 2017. — (Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ). — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10".

ISBN 978-5-7264-1536-9

Тепло- и массоперенос в высокопористых материалах проявляется как на стадии формирования высокопористой структуры материалов, так и на стадии их эксплуатации.

Рассмотрены основные законы тепло- и массопереноса. Раскрыты закономерности проявления этих законов в капиллярно-пористых коллоидных телах. Проанализированы условия и особенности формирования свойств высокопористых тепло-изоляционных материалов и предложены критерии оценки этих свойств, а также конструктивных или технологических приемов, направленных на их оптимизацию.

Для инженерно-технических и научных работников строительной отрасли, отрасли производства строительных материалов, изделий и конструкций, а также аспирантов и обучающихся магистратуры.

УДК 517.28+536.491+699.86

ББК 22.161+22.317+38.637

**Деривативное электронное издание на основе печатного издания:** Высокопористые материалы: структура и тепломассоперенос : монография / А. Д. Жуков ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. — Москва : Издательство МИСИ–МГСУ, 2014. — 208 с. — ISBN 978-5-7264-0923-8.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-7264-1536-9

© ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2014

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение  | 3  |
| 1. Высокопористые теплоизоляционные материалы                             | 5  |
| 1.1. Производство теплоизоляционных материалов                            | 5  |
| 1.1.1. Теплоизоляционные материалы  | 5  |
| 1.1.2. Производство волокнистых теплоизоляционных материалов              | 9  |
| 1.1.3. Производство ячеистых теплоизоляционных материалов                 | 11 |
| 1.1.4. Автоклавные ячеистые бетоны  | 15 |
| 1.2. Свойства высокопористых материалов                                   | 17 |
| 1.2.1. Функциональные свойства  | 17 |
| 1.2.2. Строительно-эксплуатационные свойства                              | 19 |
| 1.2.3. Акустические свойства  | 23 |
| 1.2.4. Воздухопроницаемость волокнистых материалов                        | 26 |
| 1.2.5. Пористость теплоизоляционных материалов                            | 28 |
| 1.3. Закономерности формирования пористой структуры                       | 32 |
| 1.3.1. Способы создания пористой структуры                                | 32 |
| 1.3.2. Оптимизация структуры высокопористых материалов                    | 48 |
| 2. Распространение тепла в материалах                                     | 57 |
| 2.1. Теплопроводность материалов при различных условиях                   | 57 |
| 2.1.1. Общие положения учения о теплообмене                               | 57 |
| 2.1.2. Теплопроводность при стационарном режиме                           | 58 |
| 2.1.3. Теплопроводность плоской стенки                                    | 60 |
| 2.1.4. Теплопроводность цилиндрической стенки                             | 62 |
| 2.2. Конвективный теплообмен  | 64 |
| 2.2.1. Закономерности переноса тепла в условиях конвективного теплообмена | 64 |
| 2.2.2. Коэффициент теплоотдачи  | 66 |
| 2.2.3. Дифференциальные уравнения теплообмена                             | 67 |
| 2.3. Теплоотдача при свободном движении жидкости                          | 70 |
| 2.3.1. Теплоотдача в неограниченном пространстве                          | 70 |
| 2.3.2. Теплоотдача в ограниченном пространстве                            | 73 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.4. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости _____   | 75  |
| 2.4.1. Теплоотдача при движении жидкости в трубах и каналах _____                                | 75  |
| 2.4.2. Теплоотдача при поперечном омывании труб _____  | 82  |
| 2.4.3. Теплоотдача при движении жидкости<br>вдоль плоской стенки (плиты) _____                   | 88  |
| 2.5. Теплоотдача при изменении агрегатного состояния жидкости _____                              | 90  |
| 2.5.1. Теплоотдача при кипении жидкости _____  | 90  |
| 2.5.2. Пузырчатый и пленочный режимы кипения _____   | 94  |
| 2.5.3. Критическая тепловая нагрузка _____   | 96  |
| 2.5.4. Обобщенные зависимости теплоотдачи<br>в условиях парообразования _____                    | 97  |
| 2.5.5. Теплоотдача при конденсации паров _____   | 98  |
| 2.6. Теплопередача излучением _____  | 101 |
| 2.6.1. Законы теплового излучения _____  | 101 |
| 2.6.2. Лучистый обмен между телами _____   | 104 |
| 2.6.3. Лучеиспускание газов _____  | 105 |
| 3. Теплофизические свойства материалов и систем _____  | 108 |
| 3.1. Применение теплоизоляционных материалов _____   | 108 |
| 3.1.1. Энергоэффективность строительных конструкций _____  | 108 |
| 3.1.2. Мониторинг применения теплоизоляционных<br>материалов в конструкциях _____                | 109 |
| 3.2. Моделирование структуры и свойств<br>высокопористых материалов _____                        | 113 |
| 3.2.1. Построение универсальных структурных моделей _____  | 113 |
| 3.2.2. Прогнозирование свойств высокопористых<br>материалов с помощью универсальной модели _____ | 116 |
| 3.3. Передача тепла в высокопористых материалах _____  | 119 |
| 3.3.1. Теплопроводность высокопористых материалов _____  | 119 |
| 3.3.2. Объединенный закон теплопроводности _____   | 126 |
| 3.3.3. Влияние температуры на распространение тепла<br>в высокопористых материалах _____         | 130 |
| 3.3.4. Объединенный закон теплопроводности<br>и методы математической статистики _____           | 133 |
| 3.3.5. Структура материала и тепловые потоки _____   | 136 |
| 4. Тепломассоперенос при тепловой обработке<br>теплоизоляционных изделий _____                   | 140 |
| 4.1. Основы теории сушки теплоизоляционных изделий _____   | 140 |
| 4.1.1. Сушка как технологический процесс _____   | 140 |
| 4.1.2. Законы переноса тепла и влаги _____   | 143 |
| 4.1.3. Режим и критерии сушки _____  | 146 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.2. Тепловая обработка штучных теплоизоляционных изделий                       | 147 |
| 4.2.1. Теория конвективной сушки штучных изделий                                | 147 |
| 4.2.2. Тепло- и влагообмен между влажным материалом и окружающей газовой средой | 149 |
| 4.2.3. Внутренний влагообмен  | 154 |
| 4.2.4. Расчет продолжительности сушки   | 155 |
| 4.2.5. Усадка и деформации при сушке штучных изделий                            | 157 |
| 4.2.6. Методика исследования конвективной сушки штучных изделий                 | 159 |
| 4.3. Сушка безобжиговых теплоизоляционных изделий                               | 165 |
| 4.3.1. Перлитцементные изделия  | 165 |
| 4.3.2. Минераловатные плиты на битумном связующем                               | 168 |
| 4.3.3. Вулканитовые изделия   | 174 |
| 4.3.4. Перлитобитумные плиты  | 177 |
| 4.3.5. Торфяные теплоизоляционные плиты   | 178 |
| 4.4. Сушка обжиговых теплоизоляционных изделий                                  | 183 |
| 4.4.1. Диатомовые изделия с выгорающими добавками                               | 183 |
| 4.4.2. Пенодиатомитовые изделия   | 187 |
| 4.4.3. Перлитокерамические изделия  | 190 |
| 4.4.4. Вермикулитокерамические изделия  | 194 |
| 4.4.5. Легковесные огнеупорные перлитошамотные изделия                          | 196 |
| Заключение  | 201 |
| Библиографический список  | 203 |