УДК 691.1, 691.3 DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-90-105

# ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ФАЗОВЫМ СОСТОЯНИЕМ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

НАЗИРОВ Р.А., ТАРАНЕНКО Д.В., ВЕДЕ П.Ю.

Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия

***Аннотация.*** *Статья освещает различные аспекты использования материалов с изменяющимся фазовым состоянием в ограждающих конструкциях зданий в качестве меры энерго- и ресурсосбережения.*

*Такие материалы задействованы в регулировании микроклимата в зданиях (используются в системах охлаждения или нагрева) и в строительных конструкциях, т.к. способны, поглощая избыток энергии, в дальнейшем высвобождать его при дефиците. Ограждающие конструкции зданий с использованием материалов с фазовым переходом аккумулируют энергию солнечного излучения во время пиковых значений температур в дневное время, и расходуют ее при более низких температурах, что приводит к снижению энергопотребления и к повышению уровня теплового комфорта за счет сглаживания колебаний температуры в помещении, снижению и/или сдвигу пиковых нагрузок.*

*На основе подробного обзора научных публикаций зарубежом рассмотрена классификация и свойства материалов с фазовым переходом, способы и результаты включения их в строительные материалы и конструкции. Обнаружено, что климатические условия эксплуатации значительно влияют на эффективность материалов с фазовым переходом в ограждающих конструкциях, при этом их работа в условиях преимущественно отрицательных температур для стеновых ограждений практически не изучена и представляет интерес для дальнейших исследований. В статье представлены температуры и энергии фазовых переходов более 300 марок коммерческих материалов с изменяющимся фазовым состоянием.*

***Ключевые слова:*** *обзор, материалы с фазовым переходом, скрытая теплота, здание, энергосбережение, хранение энергии, строительство*

# THE USE OF MATERIALS WITH A CHANGING PHASE STATE IN BUILDING ENVELOPE STRUCTURES

NAZIROV R.A., TARANENKO D.V., VEDE P.Yu.

Siberian Federal University, City of Krasnoyarsk, Russia

***Abstract.*** *The article covers various aspects of the use of materials with a changing phase state in the envelope building structures for energy and resource saving.*

*Such materials are used to control the microclimate in buildings (in cooling or heating systems) and in the building structures since they are able to absorb excess energy and subsequently release it in the event of energy shortage. The building envelope structures using materials with a phase transition accumulate the solar radiation energy during peak temperatures in the daytime and consume it at lower temperatures, which reduces energy consumption and improves a thermal comfort by smoothing temperature fluctuations in the room, reducing and/or shifting peak loads.*

*The article treats the classification and properties of materials with a phase transition, methods and results of their integration into the building materials and structures based on a detailed review of scientific publications abroad. It was found that the climatic operating conditions significantly affect the efficiency of materials with a phase transition in the envelope structures, while their operation at predominantly negative temperatures for walls has virtually not been studied and is of interest for further research. The article shows the temperature and energy values of phase transitions for more than 300 brands of commercial materials with a changing phase state.*

***Keywords:*** *overview, materials with a phase transition, latent heat, building, energy saving, energy storage, phase change materials*

**Введение**

В настоящее время реализуется большое количество различных программ, демонстрирующих широкое признание необходимости энерго- и ресурсосбережения. Примером служит действующая в России федеральная целевая программа "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года". За счет выполнения этой программы планируется повысить конкурентоспособность, финансовую устойчивость, энергетическую и экологическую безопасность российской экономики.

В климатических условиях большинства регионов России на строительную отрасль приходится наибольшее количество энергетических затрат, что говорит об актуальности повышения эффективности потребления энергетических ресурсов в этом секторе.

В соответствии с СП “Тепловая защита зданий” теплотехнический расчет строительных конструкций производится в стационарном состоянии. Однако в реальных условиях ограждающие конструкции зданий работают в условиях периодических изменений температур и влажности окружающего воздуха. В этой связи резко возросло количество публикаций, посвященных исследованию и применению материалов с изменяющимся фазовым состоянием (phase change materials, PCMs) в строительных материалах и конструкциях. В процессе фазового перехода выделяется скрытая теплота фазового перехода, которую целесообразно использовать для повышения энергоэффективности.

**1. Классификация и свойства материалов с изменяющимся фазовым состоянием. Способы их упаковки**

Обычно PCMs по происхождению подразделяют на органические (для строительных конструкций чаще всего используют парафины, жирные кислоты), неорганические (гидраты солей), отдельно выделяют смеси и эвтектики (эвтектические смеси жирных кислот и гидратов солей), которые могут как полностью состоять из органических или неорганических соединений, так и содержать органику и неорганику одновременно. В отличие от неэвтектикческих материалов, эвтектики представляют собой однородную композицию из двух и более компонентов, которые осуществляют фазовый переход конгруэнтно: состав жидкости совпадает с составом твердой фазы. Помимо перечисленных классов, в температурном диапазоне фазовых переходов от 0°C до, приблизительно, 30°C находятся клатраты, от 90°C до 200°C сахарные спирты. При требуемых температурах фазового перехода ниже 0°C часто применяют эвтектические водно-солевые растворы, а выше 150°C возможно применение различных солей и их смесей [1, 2].

Так как в жидком состояние материалы с фазовым переходом текучи, удержание PCM в строительных материалах или конструкциях достигают посредством упаковки (инкапсуляцией, микро- и макроинкапсуляцией) или получением стабилизированной формы (shape-stabilized PCM, SS PCM). Микроинкапсуляция позволяет получить материал с фазовым переходом, заключенный в капсулах с размерами от менее 1 мкм и до, примерно, 300 мкм. Возможны как приближенные к правильным формы капсул, так и неправильные. Из-за небольших размеров, материал с фазовым переходом может быть получен в виде порошка или диспергирован в жидкость, обычно воду (суспензия). В виде гранул PCM помещаются в пластиковые, стеклянные, металлические массивные контейнеры, пакеты из фольги или непосредственно в строительные смеси в процессе их изготовления. Видом PCM определяется выбор материала для упаковки: гидраты солей могут вызывать коррозию, а парафины размягчение пластика [1].

A. Jamekhorshid, S. Sadrameli и M. Farid [3] сравнили 12 способов микроинкапсуляции, основанных на физических, физико-химических и химических методов создания стенки микрокапсулы. Выбор этих способов зависит от требуемых термических и механических свойств, размера и строения капсулы, толщины оболочки, материала ядра и оболочки. Материалом яд-

ра обычно служат парафины, из-за хорошо проработанного и относительно простого процесса их микроинкапсуляции.

J. Kosny, A.M. Farid и др. рассмотрели включение микрокапсул и в различные виды волоконной изоляции [2]. Микроинкапсуляция обеспечивает повышенную теплопередачу со строительным материалом за счет увеличенной по сравнению с большеразмерными упаковками поверхности теплообмена, и несколько снижает прочность этого материала. Зачастую микроинкапсуляция PCM требует сложных процедур подготовки, что затрудняет ее массовое производство [4].

Для получения материалов устойчивой формы используются следующие приемы: пропитка механически стабильных пористых материалов; получение композита из PCM и материала, который будет служить поддерживающей структурой; комбинирование обоих способов – заполнение пор стабильного материала PCM и структурой, которая поддерживает его в порах [1].

Авторы [5, 6, 7] указывают, что способ погружения, при котором PCM в жидком состоянии поглощается с помощью капиллярного подъема в поры таких строительных материалов, как гипс, кирпич или бетон, имеет технологические сложности.

Ниже, в таблице 1 представлены характеристики производимых материалов с изменяющимся фазовым переходом.

Таблица 1 - Характеристики производимых материалов с изменяющимся фазовым переходом

| № п/п | Наименование материала, его марка | Температура плавления / кристаллизации, °C | Скрытая теплота, кДж/кг | № п/п | Наименование материала, его марка | Температура плавления / кристаллизации, °C | Скрытая теплота, кДж/кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. Climator [8] | | | | | | | |
| 1 | ClimSel C-21 | -21/-24 | 285 | 6 | ClimSel C28 | 31/27 | 170 |
| 2 | ClimSel C-18 | -18/-23 | 288 | 7 | ClimSel C32 | 32/29 | 160 |
| 3 | ClimSel C7 | 8/4 | 123 | 8 | ClimSel C48 | 53/48 | 180 |
| 4 | ClimSel C21 | 26/21 | 134 | 9 | ClimSel C58 | 58/55 | 260 |
| 5 | ClimSel C24 | 27/24 | 140 | 10 | ClimSel C70 | 77/70 | 144 |
| 2. Croda International Plc [9] | | | | | | | |
| 11 | CrodaTherm™ -22 | -22/-27 | 157/-158 | 16 | CrodaTherm™ 21 | 21/19 | 190 |
| 12 | CrodaTherm™ 5 | 5.1/2.7 | 191/-190 | 17 | CrodaTherm™ 24 | 24.1/20.1 | 183 |
| 13 | CrodaTherm™ 6.5 | 6.8/2.5 | 184/-182 | 18 | CrodaTherm™ 24W | 23.8/22.2 | 184/-182 |
| 14 | CrodaTherm™ 15 | 15/9.5 | 177/-176 | 19 | CrodaTherm™ 29 | 29/26 | 207/-205 |
| 15 | CrodaTherm™ 19 | 19.3/17.9 | 175/-176 | | | | |
| 3. Insolcorp [10] | | | | | | | |
| 20 | 18 $C^0$ Infinite R | 18 | 200 | 23 | 25 $C^0$ Infinite R | 25 | 200 |
| 21 | 21 $C^0$ Infinite R | 21 | 200 | 24 | 29 $C^0$ Infinite R | 29 | 200 |
| 22 | 23 $C^0$ Infinite R | 23 | 200 | | | | |
| 4. Microtek laboratories, inc [11] | | | | | | | |
| 25 | fibratek 28S | 28 | 160 | 41 | nextek 18D | 18 | 190 |
| 26 | fibratek 24S | 24 | 97 | 42 | nextek 24D | 24 | 170 |
| 27 | fibratek 28D | 28 | 160 | 43 | nextek 28D | 28 | 180-190 |
| 28 | fibratek 24D | 24 | 160 | 44 | nextek 32D | 32 | 170 |
| 29 | Micronal 28S | 28 | 160 | 45 | nextek 37D | 37 | 190 |
| 30 | Micronal 24S | 24 | 105 | 46 | PCM-30 | -30 | 150-160 |
| 31 | Micronal 28D | 28 | 160 | 47 | PCM-10 | -10 | 175-185 |
| 32 | Micronal 24D | 24 | 97 | 48 | PCM6 | 6 | 180-190 |
| 33 | nextek 6 | 6 | 170 | 49 | PCM18 | 18 | 205-215 |
| 34 | nextek 18 | 18 | 190 | 50 | PCM24 | 24 | 165-175 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 35 | nextek 24 | 24 | 170 | 51 | PCM28 | 28 | 195-205 |
| 36 | nextek 28 | 28 | 180-190 | 52 | PCM32 | 32 | 180-190 |
| 37 | nextek 29 | 31 | 170 | 53 | PCM37 | 37 | 210-220 |
| 38 | nextek 32 | 32 | 170 | 54 | PCM43 | 43 | 235-245 |
| 39 | nextek 37 | 37 | 190 | 55 | PCM58 | 58 | 160-180 |
| 40 | nextek 6D | 6 | 170 | 56 | vivtek 29 | 31 | 170 |
| 5. PCM Products, Ltd [12] | | | | | | | |
| 57 | A2 | 2 | 200 | 114 | E-34 | −33.6 °C | 240 |
| 58 | A3 | 3 | 200 | 115 | E-32 | −32 | 243 |
| 59 | A4 | 4 | 200 | 116 | E-29 | −29 | 222 |
| 60 | A6 | 6 | 150 | 117 | E-26 | −26 | 260 |
| 61 | A8 | 8 | 150 | 118 | E-22 | −22 | 234 |
| 62 | A9 | 9 | 140 | 119 | E-21 | −20.6 ° | 263 |
| 63 | A15 | 15 | 130 | 120 | E-19 | −18.7 ° | 282 |
| 64 | A16 | 16 | 213 | 121 | E-15 | −15 | 303 |
| 65 | A17 | 17 | 150 | 122 | E-14 | −14.8 | 243 |
| 66 | A22H | 22 | 216 | 123 | E-12 | −12.3 | 250 |
| 67 | A22 | 22 | 145 | 124 | E-11 | −11.6 ° | 301 |
| 68 | A23 | 23 | 145 | 125 | E-10 | −10 | 286 |
| 69 | A24 | 24 | 145 | 126 | E-6 | −6 | 275 |
| 70 | A25H | 25 | 226 | 127 | E-3 | −3.7 | 312 |
| 71 | A25 | 25 | 150 | 128 | E-2 | −2 | 306 |
| 72 | A26 | 26 | 150 | 129 | E0 | 0 | 332 |
| 73 | A28 | 28 | 155 | 130 | H105 | 105 | 125 |
| 74 | A29 | 29 | 225 | 131 | H115 | 115 | 100 |
| 75 | A32 | 32 | 130 | 132 | H120 | 120 | 120 |
| 76 | A36 | 36 | 217 | 133 | H160 | 160 | 105 |
| 77 | A37 | 37 | 235 | 134 | H190 | 190 | 170 |
| 78 | A39 | 39 | 105 | 135 | S7 | 7 | 160 |
| 79 | A40 | 40 | 230 | 136 | S8 | 8 | 150 |
| 80 | A42 | 42 | 105 | 137 | S10 | 10 | 155 |
| 81 | A43 | 43 | 165 | 138 | S13 | 13 | 160 |
| 82 | A44 | 44 | 242 | 139 | S15 | 15 | 160 |
| 83 | A46 | 46 | 155 | 140 | S17 | 17 | 160 |
| 84 | A48 | 48 | 234 | 141 | S19 | 19 | 160 |
| 85 | A50 | 50 | 218 | 142 | S21 | 22 | 170 |
| 86 | A52 | 52 | 222 | 143 | S23 | 23 | 175 |
| 87 | A53H | 53 | 166 | 144 | S25 | 25 | 180 |
| 88 | A53H | 53 | 130 | 145 | S27 | 27 | 183 |
| 89 | A55 | 55 | 135 | 146 | S30 | 30 | 190 |
| 90 | A58H | 58 | 243 | 147 | S32 | 32 | 200 |
| 91 | A58 | 58 | 132 | 148 | S34 | 34 | 115 |
| 92 | A60H | 60 | 212 | 149 | S44 | 44 | 100 |
| 93 | A60H | 60 | 145 | 150 | S46 | 46 | 210 |
| 94 | A62 | 62 | 145 | 151 | S50 | 50 | 100 |
| 95 | A70 | 70 | 173 | 152 | S58 | 58 | 145 |
| 96 | A82 | 82 | 155 | 153 | S70 | 70 | 110 |
| 97 | A95 | 95 | 205 | 154 | S72 | 72 | 127 |
| 98 | A118 | 118 | 340 | 155 | S83 | 83 | 141 |
| 99 | A133 | 133 | 126 | 156 | S89 | 89 | 151 |
| 100 | A144 | 144 | 115 | 157 | S117 | 117 | 160 |
| 101 | A155 | 155 | 100 | 158 | X25 | 25 | 110 |
| 102 | A164 | 164 | 290 | 159 | X30 | 30 | 105 |
| 103 | A2 | 2 | 200 | 160 | X40 | 40 | 125 |
| 104 | A3 | 3 | 200 | 161 | X55 | 55 | 115 |
| 105 | A4 | 4 | 200 | 162 | X70 | 70 | 125 |
| 106 | A6 | 6 | 150 | 163 | X80 | 80 | 140 |
| 107 | A8 | 8 | 150 | 164 | X90 | 90 | 135 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 108 | A9 | 9 | 140 | 165 | X95 | 95 | 140 |
| 109 | A15 | 15 | 130 | 166 | X120 | 120 | 180 |
| 110 | A16 | 16 | 213 | 167 | X130 | 130 | 260 |
| 111 | A17 | 17 | 150 | 168 | X165 | 165 | 230 |
| 112 | A22H | 22 | 216 | 169 | X180 | 180 | 280 |
| 113 | E-37 | −36.5 °C | 213 | | | | |
| 6. Phase Change [13] | | | | | | | |
| 170 | BioPCM Q4 | 4 | 210-250 | 176 | BioPCM Q18 | 18 | 210-250 |
| 171 | BioPCM Q5 | 5 | 210-250 | 177 | BioPCM Q20 | 20 | 210-250 |
| 172 | BioPCM Q6 | 6 | 210-250 | 178 | BioPCM Q23 | 23 | 210-250 |
| 173 | BioPCM Q8 | 8 | 210-250 | 179 | BioPCM Q25 | 25 | 210-250 |
| 174 | BioPCM Q12 | 12 | 210-250 | 180 | BioPCM Q27 | 27 | 210-250 |
| 175 | BioPCM Q15 | 15 | 210-250 | 181 | BioPCM Q29 | 29 | 210-250 |
| 7. Pluss® [14] | | | | | | | |
| 182 | HS 33N | -30/-31 | 224 | 201 | HS 24 | 26/25 | 199 |
| 183 | HS 26N | -24/-26 | 272 | 202 | HS 29 | 29 | 190 |
| 184 | HS 23N | -21/-23 | 262 | 203 | OM 29 | 29/26 | 194 |
| 185 | HS 18N | -18 | 242 | 204 | FS 29 | 29/28 | 158 |
| 186 | HS 15N | -15/-16 | 308 | 205 | OM 30 | 32/30 | 230 |
| 187 | HS 10N | -10 | 290 | 206 | FS 30 | 31/30 | 172 |
| 188 | HS 7N | -6 | 296 | 207 | OM 32 | 33/30 | 187 |
| 189 | HS 3N | -2/-3 | 346 | 208 | HS 34 | 35/34 | 150 |
| 190 | HS 01 | 1 | 350 | 209 | OM 35 | 35/34 | 202 |
| 191 | OM 03 | 4/3 | 229 | 210 | OM 37 | 37/36 | 231 |
| 192 | FS 03 | 4/1 | 161 | 211 | OM 42 | 44/43 | 221 |
| 193 | OM 08 | 8 | 180 | 212 | OM 46 | 48/45 | 196 |
| 194 | OM 11 | 9.5/10.5 | 240 | 213 | OM 48 | 51/48 | 172 |
| 195 | OM 18 | 19 | 212 | 214 | OM 50 | 51/50 | 223 |
| 196 | FS 18 | 20/18 | 123 | 215 | OM 55 | 55/54 | 208 |
| 197 | OM 21 | 22/19 | 174 | 216 | OM 65 | 66-68/65 | 183 |
| 198 | FS 21R | 20.7/19 | 154 | 217 | FS 65 | 66 | 218 |
| 199 | HS 22 | 23/22 | 167.6 | 218 | HS 89 | 88/87 | 125 |
| 200 | HSE 22 | 23/22 | 131 | | | | |
| 8. PureTemp LLC [15] | | | | | | | |
| 219 | PureTemp -37 | -37 | 145 | 231 | PureTemp 28 | 28 | 190 |
| 220 | PureTemp -21 | -21 | 239 | 232 | PureTemp 29 | 29 | 202 |
| 221 | PureTemp -15 | -15 | 301 | 233 | PureTemp 37 | 37 | 210 |
| 222 | PureTemp -2 | -2 | 277 | 234 | PureTemp 42 | 42 | 218 |
| 223 | PureTemp 4 | 4 | 187 | 235 | PureTemp 48 | 48 | 230 |
| 224 | PureTemp 8 | 8 | 178 | 236 | PureTemp 53 | 53 | 225 |
| 225 | PureTemp 15 | 15 | 182 | 237 | PureTemp 58 | 58 | 225 |
| 226 | PureTemp 18 | 18 | 192 | 238 | PureTemp 60 | 61 | 220 |
| 227 | PureTemp 20 | 20 | 171 | 239 | PureTemp 63 | 63 | 206 |
| 228 | PureTemp 23 | 23 | 227 | 240 | PureTemp 68 | 68 | 213 |
| 229 | PureTemp 25 | 25 | 187 | 241 | PureTemp 108 | 108 | 180 |
| 230 | PureTemp 27 | 27 | 202 | 242 | PureTemp 151 | 151 | 217 |
| 9. RGEES, LLC [16] | | | | | | | |
| 243 | PCM-HS26N | -24/-26 | 210 | 247 | PCM-OM18P | 19.3/18.8 | 233 |
| 244 | PCM-HS10N | -10 | 230 | 248 | PCM-HS22P | 23/22 | 185 |
| 245 | PCM-OM05P | 6.6/5.4 | 216 | 249 | PCM-OM37P | 37/38 | 218 |
| 246 | PCM-OM06P | 6.4/3.9 | 252 | 250 | PCM-OM65P | 66-68/65 | 183 |
| 10. Rubitherm® Technologies GmbH [17] | | | | | | | |
| 251 | GR 42 | 42 | 55 | 286 | RT 47 | 47 | 165 |
| 252 | GR 82 | 82 | 55 | 287 | RT 50 | 50 | 160 |
| 253 | PX 15 | 15 | 85 | 288 | RT 54 HC | 54 | 200 |
| 254 | PX 25 | 25 | 95 | 289 | RT 55 | 55 | 170 |
| 255 | PX 52 | 52 | 100 | 290 | RT 60 | 60 | 160 |
| 256 | PX 82 | 82 | 105 | 291 | RT 62 HC | 62 | 230 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 257 | RT - 9 HC | -9 | 250 | 292 | RT 64 HC | 64 | 250 |
| 258 | RT - 4 | -4 | 180 | 293 | RT 65 | 65 | 150 |
| 259 | RT 0 | 0 | 175 | 294 | RT 69 HC | 69 | 230 |
| 260 | RT 2 HC | 2 | 200 | 295 | RT 70 HC | 70 | 260 |
| 261 | RT 3 HC_1 | 3 | 190 | 296 | RT 82 | 82 | 170 |
| 262 | RT 4 | 4 | 175 | 297 | RT 80 HC | 78 | 220 |
| 263 | RT 5 | 5 | 180 | 298 | RT 90 HC | 90 | 170 |
| 264 | RT 5 HC | 5 | 250 | 299 | RT100 | ~100 | 120 |
| 265 | RT 8 | 8 | 175 | 300 | RT100HC | 100 | 180 |
| 266 | RT 8 HC | 8 | 190 | 301 | SP -30 | -29 – -28 | 250 |
| 267 | RT 9 | 9 | 175 | 302 | SP-28 | -28 – -29 | 260 |
| 268 | RT 10 | 10 | 160 | 303 | SP-24 | -22 – -23 | 250 |
| 269 | RT 10 HC | 10 | 200 | 304 | SP-21 | -21 – -19 | 285 |
| 270 | RT 11 HC | 11 | 200 | 305 | SP-17 | -17 – -18 | 300 |
| 271 | RT 12 | 12 | 155 | 306 | SP -11 UK | -12 – -10 | 330 |
| 272 | RT 15 | 15 | 155 | 307 | SP -11 | -11 – -12 | 240 |
| 273 | RT 18 HC | 18 | 260 | 308 | SP-7_2 | -7 – -5 | 290 |
| 274 | RT 21 | 21 | 155 | 309 | SP 5 | 4 – 6 | 170 |
| 275 | RT 21 HC | 21 | 190 | 310 | SP 15 | 15 – 17 | 180 |
| 276 | RT 22 HC | 22 | 190 | 311 | SP 21 EK | 21 – 23 | 170 |
| 277 | RT 24 | 24 | 160 | 312 | SP 24 E | 24 – 25 | 180 |
| 278 | RT 25 HC | 25 | 230 | 313 | SP 25 E2 | 24 – 26 | 180 |
| 279 | RT 26 | 26 | 180 | 314 | SP 26 E | 25 – 27 | 180 |
| 280 | RT 28 HC | 28 | 250 | 315 | SP 29 Eu | 29 – 31 | 200 |
| 281 | RT 31 | 31 | 165 | 316 | SP 31 | 31 – 33 | 210 |
| 282 | RT 35 | 35 | 160 | 317 | SP 50 * | 50 – 51 | 220 |
| 283 | RT 42 | 42 | 165 | 318 | SP 58 * | 56 – 59 | 250 |
| 284 | RT 35 HC | 35 | 240 | 319 | SP 70 | 67 – 73 | 150 |
| 285 | RT 44 HC | 44 | 250 | 320 | SP 90 * | 88 – 90 | 150 |
| 11. Теаррсm [18] | | | | | | | |
| 321 | Latest™18T | 18/17 | 175 | 326 | Latest™32S | 32 | 220 |
| 322 | Latest™20T | 20/19 | 175 | 327 | Latest™34S | 34 | 230 |
| 323 | Latest™22T | 22/21 | 175 | 328 | Latest™36S | 36 | 200 |
| 324 | Latest™25T | 25/24 | 175 | 329 | Latest™48S | 48 | 230 |
| 325 | Latest™29T | 29/28 | 175 | | | | |

## 2. Материалы с фазовым переходом в конструкции стен и перекрытия

F. Kuznik и J. Virgone [19] изучили тепловую работу стеновых панелей Energain толщиной 5 мм, состоящих на 60% по массе из микроинкапсулированого парафина и на 40% из сополимеров, с оболочкой из алюминия толщиной 0,1 мм, в полномасштабной испытательной комнате. Полностью контролируя температуру и поток солнечной радиации, испытываемую ограждающей конструкцией, исследователями смоделирована температурная история суток летнего, зимнего и переходного периодов в двух сериях экспериментов, с панелями Energain, установленных с внутренней стороны помещения, и без них. Применение панелей позволило снизить наблюдаемые экстремальные температуры – максимальная температура летом снизилась на 3,9°С; минимальная увеличилась на 0,8°С. Коэффициент уменьшения амплитуды температуры воздуха составил 0,79. Соответствующие значения для межсезонья: 2,3°С; 0,4°С; 0,78; для зимы: 4,2°С; 0°С; 0,73. При этом внешняя контролируемая температура зимой колебалась между 5°С и 15°С, в межсезонье 10°С и 18°С, летом 15°С и 30°С. В числе прочих положительных эффектов отмечалось усиление конвекционного перемешивание внутреннего воздуха и уменьшение амплитуды колебаний температуры внутренней поверхности.

G. Evola и L. Marletta [20] представили методологию выбора подходящего PCM исходя из климатических условий эксплуатации и требований к комфорту. Они провели динамические симуляции всего летнего периода в программном обеспечении EnergyPlus на примере офисного помещения прямоугольной формы для четырех мест в Южной и Северной Европе и

оценили влияние наличия и способа расположение стеновых панелей с PCM в помещении, скорость ночной вентиляции и температуру плавления на результативность работы PCM. Использовались два вида панелей. Первая включала в себя смесь полимера и микроинкапсулированого парафина (60%), с алюминиевыми листами толщиной 100 мкм с обеих сторон и общей толщиной панели 5 мм. Вторая представляла собой алюминиевую сотовую матрицу, также на 60% по весу заполненная парафином в полимерных микросферах с диаметром приблизительно 5 мкм, запечатанная двумя тонкими алюминиевыми листами, общей толщиной 20 мм, и описанную более подробно в [21]. Эффективность использования панелей оценивалась с помощью индикатора интенсивности термического дискомфорта (ITD), определяемый как интеграл от времени по периоду занятости, положительной разницы между текущей рабочей температурой и температурой верхнего порога комфортности. Более эффективным оказался монтаж панелей на поверхности трех перегородок, чем на потолке (сокращение ITD 51% против 9,5% для панели первого вида в Милане), при площади стен 17,5 м$^2$ и потолка 27 м$^2$. При покрытии панелями и стен, и потолка, эффективность была близка к случаю, когда только стены были покрыты панелями. Так же индекс ITD продемонстрировал чувствительность к скорости ночной вентиляции, так как повышалась разрядка тепла, поглощаемое панелями в дневное время. Однако авторы не рекомендуют увеличивать скорость больше определенной величины. Эффективность хранения PCM (ηPCM), равная отношению сохраненной тепловой энергии к максимальной емкости хранения, была выше в те дни, когда средняя температура панелей приближалась к температуре плавления. Помимо ηPCM, авторы в своей работе задействовали частоту активации (FA), то есть процент времени, в течение которого PCM подвергался фазовому переходу. Отмечено, что выбор PCM необходимо осуществлять, принимая во внимание условия местного климата.

A. Castell и M. Farid [22] предположили, что FA не всегда связана с улучшением теплового комфорта.

F. Ascione, N. Bianco и другие [23] изучили изменение потребности в охлаждении помещений вследствие модернизации европейских зданий постройки 1950-х годов в пяти городах Средиземноморья, применяя в них штукатурку с PCM с температурой изменения фазы от 26°C до 29°C, помещенную на внутренние поверхности наружных ограждающих конструкций. Для 29°C наблюдался самый большой потенциал сохранения энергии. Наибольшая экономия энергии достигалась при толщине слоя штукатурки 3 см, тогда как более толстые слои не приводили к значительным улучшениям. Получена экономия энергии в городах Севилья и Неаполь не более 3%, в Марселе 4,1%, в Афинах 3,5%, в Анкаре 7,2%. Количество часов комфорта во время летнего периода повышено на величину от 15,5% в Севилье до 20,6% в Анкаре. По мнению авторов, более высокий дневной температурный перепад, характерный для засушливых климатов, был более благоприятен, так как он способствовал реализации цикла плавления -затвердевания PCM. Какое вещество использовалось как материал с фазовым переходом, авторы не уточняют.

U. Berardi и M. Manca [24] исследовали эффект от реконструкции многоэтажного жилого дома с PCM в климатах Торонто и Ванкувера. Наружные стены здания состояли из панелей с экструдированным пенополистиролом. В моделирование, реализуемое в EnergyPlus, этаж дома состоял из четырех смежных друг с другом комнат 5x5x3 м. В качества материала с фазовым переходом был выбран BioPcm с температурой плавления 25°C. Выполнены комбинации: без PCM, с PCM на полу и с PCM на полу и стенах. В расчетах среди прочих факторов учитывалась работа вентиляции. Установлено, что в случае третьей комбинации, в зависимости от ориентации комнаты, для Торонто возможна экономия энергии на охлаждении 15,8%-29,2%, а для Ванкувера 19,3%-59,4%. Авторы связывают большую экономию в последнем случае с более низкими температурами летом, вследствие которых небольшой избыток тепла мог быть поглощен PCM без переполнения его теплоемкости (при неполном плавлении). Как и в Торонто, материал с фазовым состоянием зимой в Ванкувере смог предоставить лишь небольшое снижение спроса на отопление в юго-восточной комнате (не более 6%).

S. Soudian и U. Berardi [25] исследовали совместную работу BioPCM и панели Energain, имеющие отличные друг от друга температуры плавления, пригодные для города Торонто, в специальных ячейках, представляющие собой уменьшенные версии квартир. Материалы с фазовым переходом интегрировались в стены и потолок. По итогам эксперимента, температура воздуха тестовой ячейки по сравнению с контрольной ячейкой была в среднем на 47% ниже в течение дня и на 29% выше ночью.

B. Diaconua и M. Cruceru [26] была оптимизирована стена с использованием PCM. В результатах этого исследования авторы отмечают перспективность использования материалов в одной конструкции материалов с разными теплофизическими свойствами.

F. Kuznik, J. Virgone и K. Johannes [27] в течении года проводили мониторинг проекта реконструкции здания к югу от Лиона с панелями Energain. Здание сочетало в себе два офиса с идентичной геометрией, при этом каждый офис представлял собой единственное помещение с размерами 5,2x3,55 м. Один из офисов оборудовался панелями, установленными в боковые перегородки и подвесной потолок. Вся площадь задействованных панелей составила приблизительно 46 м$^2$. Офис с PCM показал увеличение теплового комфорта за счет температуры воздуха в помещении и внутренней поверхности ограждающих конструкций. Тем не менее, PCM использовались неэффективно в течение некоторого времени из-за чрезмерных температур и отсутствия полной разрядки ночью.

R. Becker [28] изучил влияние двух типов PCM–панелей с разной толщиной (4, 8, 20 мм) в летний период в средиземноморском климате на зданиях различного функционального назначения и в разных исполнения в EnergyPlus. Модель жилого здания анализировались в двух вариантах: с внутренними стенами и перегородками из пустотелых бетонных блоков и наружных стен из автоклавного газобетона (далее – первый вариант), и с перегородками из гипсокартона и наружными сэндвич панелями (далее – второй вариант). Модель офиса была осуществлена только во втором варианте. Модель школы имела первый вариант (с изоляцией на наружной стороне) и третий (наружные бетонные стены с изоляцией на внутренней стороне, перегородки из гипсокартона и акустический потолок). В первом варианте, PCM смогли улучшить только тепловой комфорт, незначительно повлияв на потребление энергии. Для второго и третьего вариантов PCM улучшили тепловой комфорт и экономию энергии. Наиболее высоким показателем сокращения энергии обладал офис во втором исполнении (по сравнении с офисом в таком же исполнении, но без PCM – до 57%). Однако в жилом здании во втором варианте даже материалы с фазовым переходом не давали такой тепловой комфорт, который наблюдался в жилом здании в первом варианте с PCM и без него. Аналогичная ситуация для модели школы в первом и третьем исполнении.

Коллектив авторов [29] оценил факторы, оказывающие воздействие на производительность PCM в пассивной системе пола преимущественно с середины октября по середину декабря в Пекине. Было установлено, что: с целью снижения колебания температуры внутреннего воздуха, подходящей температурой плавления PCM является температура приблизительно соответствующая средней температуре воздуха в помещении в солнечные зимние дни; теплота плавления и теплопроводность PCM должна быть больше 120 кДж/кг и 0,5 Вт/(м·°С) соответственно; толщина пластины PCM под полом не должна быть более 20 мм; по сравнению с древесиной, кафель или металл лучше использовать в качестве покрытия пола; воздушный зазор между пластиной PCM и напольным покрытием должен быть минимальным.

### 3. Использование материалов с изменяющимся фазовым состоянием в композициях на основе гипса

L. Shilei, Z. Neng и F. Guohui [30] провели эксперименты с PCM на северо-востоке Китая в зимних условиях, смешав каприновую и лауриновую кислоты (82:18). Температура плавления и кристаллизации этой смеси жирных кислот оказалась 20,394°С и 19,138°С, скрытая теплота плавления и кристаллизации 150,305 Дж/г и 144, 183 Дж/г. PCM был включен в гипс путем пропитки. Изготовленная стеновая панель имела толщину 9,5 мм с 26% погло-

щённого PCM от общего веса, с температурой плавления и кристаллизации 18,491°C и 18,587°C, со скрытой теплотой плавления и кристаллизации 39,126 Дж/г и 36,965 Дж/г. Испытания проводилось в двух подобных комнатах, но только в одной из них были установлены панели по внутренней поверхности существующей кирпичной стены. Температура окружающей среды колебалась от минус 1°C до плюс 9°C, постепенно увеличиваясь в течении трех суток. Температура в комнате с панелями и без них колебались между 19°C…24°C и 18,5°C…22°C соответственно. В эксперименте с обычной комнатой величина теплового потока через южную стену варьировалась от 34 Вт/м$^2$ до 60 Вт/м$^2$, через южную стену в комнате с PCM от 33 Вт/м$^2$ до 52 Вт/м$^2$. Применение панелей уменьшило и разность между температурой воздуха в комнате и температурой внутренней поверхности. Тем самым панели способствовали сохранению тепла и выравниванию температуры. Авторы уверены, что применение подобных панелей сможет уменьшить стоимость отопительного оборудования и сопутствующие с ним затраты.

Пропитку гипса PCM выполняли и другие авторы, применяя для этого бутилстеарат [31], эвтектические смеси каприновой и лауриновой кислот [32, 33, 34], смесь бутилстеарат-пальмитата [35, 36, 37], некоторые жирные кислоты [38]. В [39] добавляли микроинкапсулированный парафин.

**4. Внедрение PCM в кирпич и кирпичную кладку**

E. Alawadhi [40] исследовал действие PCM (парафины октадекан, эйкозан, и P116) в жарком климате, которыми заполнялись цилиндрические пустоты в кирпиче. Тепловая эффективность системы кирпич-PCM была оценена путем сравнения теплового потока на внутренней поверхности со стеной без PCM в течение типичного рабочего времени. Анализировалось влияние количества и типа PCM в кирпиче. Увеличение количества PCM оказалось наиболее эффективным.

Результаты исследований включения PCM на основе парафина (RT18) в кирпичную кладку приведены в [41, 42], в [43] - октадекана. Z. Chang, Y. Chen, L. Wu и M. Shi провели исследования со смесью гидратов соли [44]. M. Huang, P. Eames и N. Hewitt использовали коммерческие композиты GR41 и GR27 [45].

**5. Добавление PCM в бетон**

L.F. Cabeza, C. Castellón и другие [46, 47] добавляли Micronal фирмы BASF в бетон. В их эксперименте участвовало две кабины из бетона с PCM и без него. В более ранних работах [7, 48] показано, что PCM имеют эффект, когда они расплавляются и затвердевают каждый день. Но в конце осени и зимой наружные температуры окружающей среды не достигали температуры плавления, поэтому для активации материалов с фазовым переходом в [48] была применена стена Trombe. Так как летом высокий пик наружной температуры (около 40 ºC) и жаркие ночи препятствуют затвердеванию PCM, в [47] кабины эксплуатировались с навесами летом. Влияние навесов позволило эксплуатировать PCM в течение более длительного времени. Наблюдениями зафиксировано максимальное снижение температуры стен и покрытия кабины с PCM на 6 ºC и 11 ºC соответственно.

H. Alqallaf и E. Alawadhi [49] для включения макроинкапсулированного PCM в бетонную кровлю использовали вертикальные цилиндрические отверстия. Составленная численная модель была подтверждена экспериментально. Сообщается, что тепловой поток может быть значительно уменьшен с увеличением диаметра отверстий для PCM. Для рассмотренных в работе случаев тепловой поток на внутренней поверхности крыши снижался на 9% –17% в зависимости от выбранного PCM (парафины A28, A32 и A39 от PlusICE), времени и месяца.

H. Alqallaf и E. Alawadhi в [50] вместо только цилиндрических отверстий в крыши использовали цилиндрические и конусообразные, в которых нижний диаметр d зависел от верхнего диаметра D и принимал значения 0, 0,25D, 0,5D, 3D/4. Использовалось компьютерное моделирование и три разных PCM – октадекан, эйкозан, и Suntech P116. Было выполнено па-

раметрическое исследование геометрии конуса и типа используемого PCM. Эйкозан показал лучшую производительность среди рассмотренных PCM, а коническая геометрия контейнера PCM (d=0) являлась наилучшим с точки зрения термической эффективности. В результате, тепловой поток на внутренней поверхности крыши может быть уменьшен до 39% для определенного оптимального типа PCM и геометрии отверстия конуса.

L. Royon, L. Karim и A. Bontemps [51] заполняли созданный композиционный PCM в уже существующие полости в бетонной плите перекрытия, с постановкой эксперимента в реальных условиях и с компьютерным моделированием в COMSOL Multiphysics. Авторы при высокой температуре (>100°C) смешали парафиновый PCM RT 27 от компании Rubitherm со стирол-бутадиен-стирольным блоком от Sigma Aldrich. Блок-сополимер действовал в качестве поддерживающего материала. Новый материал продемонстрировал пригодность для обеспечения значительной тепловой инерции здания.

Применены и другие способы интегрирования PCM в строительные материалы: T. Lee и другие выполнили пропитку бетона парафином и бутилстеаратом [52], K. Cellat с соавторами провели прямое включение бутилстеарата [53].

### 6. Материалы с фазовым переходом в конструкции крыши

A. Pasupathy и R. Velraj [54] изучали влияние PCM в конструкции крыши посредством математической модели и эксперимента. Материалом с фазовым переходом заполнили панель из нержавеющей стали, которая была размещена между верхней кровельной плитой и нижней бетонной плитой. Компоненты PCM: эвтектик 48% $CaCl_2$ + 4,3% NaCl + 0,4% KCl + 47,3% $H_2O$, температура фазового перехода 26–28°C и с теплотой плавления 188 кДж/кг. Сделан вывод о том, что система с еще одной верхней панелью с Climsel C32 (температура плавления 32°C) сможет работать в течение всех сезонов в Индии.

Еще один способ размещения PCM в крыше был предложен H.-M. Chou. C.-R. Chen, и V.-L Nguyen. В их эксперименте участвовали кровельные гофрированные листы, между которыми был макроинкапсулирован PCM [55].

### 7. Материалы с фазовым переходом в светопрозрачных конструкциях

H. Weinläder [56] изучили парафиновый RT25 и два солевых гидрата: S27 от Cristopia, основанный на $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ и L30, и на $LiNO_3 \cdot 3H_2O$. PCM были инкапсулированы в прозрачные пластиковые контейнеры и помещены за обычное двойное остекление с воздушным зазором около 10 мм. В результате, фасадные панели с PCM оказались хорошими дополнением к обычным окнам. В зимний сезон фасадные панели значительно улучшили тепловой комфорт. Летом они сместили тепловые поступления на более поздний вечер. Тем не менее, окна с PCM не могут эксплуатироваться там, где нужен визуальный контакт с окружающей средой: в жидком состоянии все материалы имели одинаковое значение пропускания в визуальном диапазоне (около 0,9), в твердом состоянии коэффициент пропускания уменьшается до 0,5.

F. Goia, M. Perino и V. Serra [57] выполнили полномасштабное испытание прототипа остекления с PCM от Rubitherm. Испытание было выполнено на южной стене летом, зимой и в межсезонье в субконтинентальном климате. Результаты сравнивались с обычным двойным остеклением. Показано, что остекление PCM способно снизить потребление энергии летом более чем на 50%. Зимой подобная технология была менее эффективна.

Испытывались и другие светопрозрачные конструкции (и приоконные изделия) с различными PCM. A. Bontemps, M. Ahmad и другие [58] изучали перегородку из светопрозрачных блоков с парафином, жирной кислотой и гидратом соли. E. Alawadhi [59] рассмотрел возможность внедрения PCM (октадекана, эйкозана и P116) в оконные жалюзи.

### Заключение

Материалы с изменяющимся фазовым состоянием находят все более широкое применение в строительной практике. В ограждающих конструкциях зданий они используются сте-

новых ограждениях, плитах покрытия и в светопрозрачных ограждениях. Применение таких материалов в жарком климате позволяет снизить амплитуду колебаний температуры внутренней поверхности ограждений и внутреннего воздуха, снижает расход энергии на поддержание комфортного микроклимата в помещениях.

На эффективность применения РСМ напрямую влияет климатическая активность региона. Она будет тем выше, чем больше полных фазовых переходов будет испытывать такой материал в условиях эксплуатации конструкции. Становится очевидным важность выбора таких материалов в зависимости, в том числе, от ориентации стеновых ограждений. Для южных и северных стен одного и того же здания могут быть применены материалы с различными температурами фазового перехода и тепловыми эффектами.

Принимая во внимание принятую технологию изготовления строительных конструкций, наиболее перспективным, по – видимому, следует считать внедрение РСМ в строительные смеси в инкапсулированном виде, т.к. при этом отпадает необходимость организации новых переделов, таких как постов пропитки, в существующие технологические нитки производства изделий и конструкций.

Большинство исследований проведено в регионах с теплым климатом и направлено на повышение эффективности кондиционирования. Вопрос о поведении ограждающих конструкций с РСМ в условиях преобладания отрицательных температур остаётся открытым. Таким образом, актуальным представляется решение задачи создания композиций РСМ для применения при пониженных температурах, также слоистых элементов ограждающих конструкций с такими композициями.

Для большинства материалов указаны только температуры фазового перехода и его энергия. Отсутствие значений теплопроводности материала в разных фазовых состояниях существенно затрудняет моделирование работы конструкций с такими материалами в современных программных комплексах.

Внедрение в строительные конструкции РСМ должно сопровождаться исследованиями в области их химической активности, пожарной безопасности и экологических аспектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mehling H., Cabeza L.F. Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Berlin: Springer, 2008. 308 с.

2. Kosny J. PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Cham: Springer, 2015. 271 с.

3. Jamekhorshid A., Sadrameli S.M., Farid M. A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. №1 (31). С. 531-542. doi:10.1016/j.rser.2013.12.033

4. Xie N., Luo J., Li Z., Huang Z., Gao X., Fang Y., Zhang Z. Salt hydrate/expanded vermiculite composite as a form-stable phase change material for building energy storage // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2019. №1 (189). С. 33-42. doi:10.1016/j.solmat.2018.09.016

5. Zhou D., Zhao C.Y., Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications // Applied Energy. 2012. №1 (92). С. 593-605. doi:10.1016/j.apenergy.2011.08.025

6. Xiao M., Feng B., Gong K. Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductive // Energy Conversion and Management. 2002. №1 (43). С. 103-108. doi:10.1016/s0196-8904(01)00010-3

7. Cabeza L. F., Castellón C., Nogués M., Medrano M., Leppers R., Zubillaga O. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings // Energy and Buildings. 2007. №2 (39). С.113-119. doi:10.1016/j.enbuild.2006.03.030

8. Climator [Электронный ресурс]. URL: https://www.climator.com/ (дата обращения: 25.09.2018).

9. CRODA [Электронный ресурс]. URL: https://www.crodatherm.com/en-gb (дата обращения: 25.09.2018).

10. Insolcorp [Электронный ресурс]. URL: https://www.insolcorp.com (дата обращения: 25.09.2018).

11. Microtek laboratories, inc. [Электронный ресурс]. URL: https://www.microteklabs.com/ (дата обращения: 25.09.2018).

12. PCM [Электронный ресурс]. URL: http://www.pcmproducts.net (дата обращения: 25.09.2018).

13. Phase Change Energy Solutions [Электронный ресурс]. URL: https://phasechange.com/ (дата обращения: 25.09.2018).

14. Pluss [Электронный ресурс]. URL: http://www.pluss.co.in/ (дата обращения: 25.09.2018).

15. PureTemp [Электронный ресурс]. URL: http://www.puretemp.com/ (дата обращения: 25.09.2018).

16. SavEnrgтм Phase Change Materials [Электронный ресурс]. URL: https://rgees.com (дата обращения: 23.03.2019).

17. Rubitherm Phase Change Materials [Электронный ресурс]. URL: https://www.rubitherm.eu/ (дата обращения: 25.09.2018).

18. Phase Change Material PCM Manufacturers for Air Conditioning, Electronics Cooling. [Электронный ресурс]. URL: http://www.teappcm.com/ (дата обращения: 25.09.2018).

19. Kuznik F., Virgone J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use // Applied Energy. 2009. №10 (86). С. 2038-2046. doi:10.1016/j.apenergy.2009.01.004

20. Evola G., Marletta L., Sicurella F. A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings // Building and Environment. 2013. №1 (59). С. 517-527. doi:10.1016/j.buildenv.2012.09.021

21. Hasse C., Grenet M., Bontemps A., Dendievel R., Sallée H. Realization, test and modelling of honeycomb wallboards containing a Phase Change Material // Energy and Buildings. 2011. №1 (43). С. 232-238. doi:10.1016/j.enbuild.2010.09.017

22. Castell A., Farid M. M. Experimental validation of a methodology to assess PCM effectiveness in cooling building envelopes passively // Energy and Buildings. 2014. №1 (81). С. 59-71. doi:10.1016/j.enbuild.2014.06.011

23. Ascione F., Bianco N., De Masi R. F., de' Rossi F., Vanoli G.P. Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season // Applied Energy. 2014. №1 (113). С. 990-1007. doi:10.1016/j.apenergy.2013.08.045

24. Berardi U., Manca M. The Energy Saving and Indoor Comfort Improvements with Latent Thermal Energy Storage in Building Retrofits in Canada // Energy Procedia. 2017. №1 (111). С. 462-471. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.208

25. Soudian S., Berardi U. Experimental investigation of latent thermal energy storage in highrise residential buildings in Toronto // Energy Procedia. 2017. №1 (132). С. 249-254. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.706

26. Diaconu B.M., Cruceru M. Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings // Energy and Buildings. 2010. №10 (42). С. 1759-1772.

27. Kuznik F., Virgone J., Johannes K. In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard // Renewable Energy. 2011. №5 (36). С. 1458-1462. doi:10.1016/j.renene.2010.11.008

28. Becker R. Improving thermal and energy performance of buildings in summer with internal phase change materials // Journal of Building Physics. 2013. №3 (37). С. 296-324. doi:10.1177/1744259113480133

29. Xu X., Zhang Y., Lin K., Di H., Yang R. Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings // Energy and Buildings. 2005. №10 (37). С. 1084-1091. doi:10.1016/j.enbuild.2004.12.016

30. Shilei L. Neng Z., Guohui F. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter // Energy and Buildings. 2006. №1 (38). С. 18-24. doi:10.1016/j.enbuild.2005.02.007

31. Athienitis A. K., Liu C., Hawes D., Banu D., Feldman D. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage // Building and Environmen. 1997. №5 (32). С. 405-410. doi:10.1016/s0360-1323(97)00009-7

32. Shilei L., Neng Z., Guohui F. Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage // Energy and Buildings. 2006. №6 (38). С. 708-711. doi:10.1016/j.enbuild.2005.10.006

33. Shilei, L., Neng Z., Guohui F. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter // Energy and Buildings. 2006. №1 (38). С. 18-24. doi:10.1016/j.enbuild.2005.02.007

34. Shilei L., Guohui F., Neng Z., Li D. Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards // Energy and Buildings. 2007. №10 (39). С. 1088-1091. doi:10.1016/j.enbuild.2006.11.012

35. Banu, D., Feldman, D., Hawes, D. Evaluation of thermal storage as latent heat in phase change material wallboard by differential scanning calorimetry and large scale thermal testing // Thermochimica Acta. 1998. №1 (317). С. 39-45. doi:10.1016/s0040-6031(98)00368-2

36. Feldman D., Banu D. DSC analysis for the evaluation of an energy storing wallboard // Thermochimica Acta. 1996. №1 (272). С. 243-251. doi:10.1016/0040-6031(95)02456-5

37. Scalat S., Banu D., Hawes D., Parish J., Haghighata F., Feldman D. Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard // Solar Energy Materials and Solar Cells. 1996. №1 (44). С. 49-61. doi:10.1016/0927-0248(96)00017-7

38. Peippo K., Kauranen P., Lund P. D. A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating // Energy and Buildings. 1991. №4 (17). С. 259-270. doi:10.1016/0378-7788(91)90009-r

39. Lai C., Chen R. H., Lin C.-Y. Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM // Energy and Buildings. 2010. №8 (42). С. 1259-1266. doi:10.1016/j.enbuild.2010.02.018

40. Alawadhi E.M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material // Energy and Buildings. 2008. №3 (40). С. 351-357. doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.001

41. Silva T., Vicente R., Soares N., Ferreira V. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution // Energy and Buildings. 2012. №1 (49). С. 235-245. doi:10.1016/j.enbuild.2012.02.010

42. Vicente R., Silva T. Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach // Applied Thermal Engineering. 2014. №1/2 (67). С. 24-34. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.02.069

43. Haghshenaskashani S., Pasdarshahri H. Simulation of Thermal Storage Phase Change Material in Building // Journal of Civil and Environmental Engineering. 2009. №10 (3). С.356-360.

44. Zhang C., Chen Y., Wu L., Shi M. Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures // Energy and Buildings. 2011. №12 (43). С. 3514-3520. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.028

45. Huang M.J., Eames P.C., Hewitt N.J. The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2006. №13 (90). С. 1951-1960. doi:10.1016/j.solmat.2006.02.002

46. USE OF MICROENCAPSULATED PCM IN BUILDINGS AND THE EFFECT OF ADDING AWNINGS [Электронный ресурс]. URL: https://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_8_1%20Sustainable_Comfort_Cooling/64.pdf (дата обращения: 19.10.2018).

47. Arce P., Castellón C., Castell A., Cabeza L. F. Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings // Energy and Buildings. 2012. №1 (44). С. 88-93. doi:10.1016/j.enbuild.2011.10.028

48. Cabeza L.F., Medrano M., Castellón C., Castell A., Solé C., Roca J. and Nogués M. Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes // Contributions to Science. 2007. №4 (3). С. 501-510. doi:10.2436/20.7010.01.26

49. Alqallaf H. J., Alawadhi E.M. Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain // Energy and Buildings. 2013. №1 (61). С. 73-80. doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.041

50. Alawadhi E. M., Alqallaf H. J. Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study // Energy Conversion and Management. 2011. №8/9 (52). С. 2958-2964. doi:10.1016/j.enconman.2011.04.004

51. Royon L., Karim L., Bontemps A. Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings // Energy and Buildings. 2013. №1 (63). С. 29-35. doi:10.1016/j.enbuild.2013.03.042

52. Lee T., Hawes D. W., Banu, D., Feldman, D. Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2000. №3 (62). С. 217-237. doi:10.1016/s0927-0248(99)00128-2

53. Cellat K., Beyhan B., Kazanci B., Konuklu Y., Paksoy H. Direct Incorporation of Butyl Stearate as Phase Change Material into Concrete for Energy Saving in Buildings // Journal of Clean Energy Technologies. 2017. №1 (5). С. 64-68. doi:10.18178/JOCET.2017.5.1.345

54. Pasupathy A., Velraj R. Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management // Energy and Buildings. 2008. №3 (40). С. 193-203. doi:10.1016/j.enbuild.2007.02.016

55. Chou H.-M., Chen C.-R., Nguyen V.-L. A new design of metal-sheet cool roof using PCM // Energy and Buildings. 2013. №1 (57). С. 42-50. doi:10.1016/j.enbuild.2012.10.030

56. Weinläder H., Beck. A., Fricke J. PCM-facade-panel for daylighting and room heating Helmut // Solar Energy. 2005. №2 (78). С. 177-186. doi:10.1016/j.solener.2004.04.013

57. Goia F., Perino M., Serra V. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype // Solar Energy. 2014. №1 (100). С.217-233. doi:10.1016/j.solener.2013.12.002

58. Bontemps A., Ahmad M., Johannès K., Sallée H. Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls // Energy and Buildings. 2011. №9 (43). С. 2456-2461. doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.030

59. Alawadhi E.M. Using phase change materials in window shutter to reduce the solar heat gain // Energy and Buildings. 2012. №1 (47). С. 421-429. doi:10.1016/j.enbuild.2011.12.009

## REFERENCES

1. Mehling H., Cabeza L.F. Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Berlin: Springer, 2008. 308 p.

2. Kosny J. PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Cham: Springer, 2015. 271 p.

3. Jamekhorshid A., Sadrameli S.M., Farid M. A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 31. Pp. 531-542. doi:10.1016/j.rser.2013.12.033

4. Xie N., Luo J., Li Z., Huang Z., Gao X., Fang Y., Zhang Z. Salt hydrate/expanded vermiculite composite as a form-stable phase change material for building energy storage. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2019. Vol. 189. Pp. 33-42. doi:10.1016/j.solmat.2018.09.016

5. Zhou D., Zhao C.Y., Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Applied Energy. 2012. Vol. 92. Pp. 593-605. doi:10.1016/j.apenergy.2011.08.025

6. Xiao M., Feng B., Gong K. Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductive. Energy Conversion and Management. 2002. Vol. 43. No 1. Pp. 103-108. doi:10.1016/s0196-8904(01)00010-3

7. Cabeza L. F., Castellón C., Nogués M., Medrano M., Leppers R., Zubillaga O. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. Energy and Buildings. 2007. Vol. 39. No 2. Pp.113-119. doi:10.1016/j.enbuild.2006.03.030

8. Climator [Electronic resource]. URL: https://www.climator.com/ (date of circulation: 25.09.2018).

9. CRODA [Electronic resource]. URL: https://www.crodatherm.com/en-gb (date of circulation: 25.09.2018).

10. Insolcorp [Electronic resource]. URL: https://www.insolcorp.com (date of circulation: 25.09.2018).

11. Microtek laboratories, inc. [Electronic resource]. URL: https://www.microteklabs.com/ (date of circulation: 25.09.2018).

12. PCM [Electronic resource]. URL: http://www.pcmproducts.net (date of circulation: 25.09.2018).

13. Phase Change Energy Solutions [Electronic resource]. URL: https://phasechange.com/ (date of circulation: 25.09.2018).

14. Pluss [Electronic resource]. URL: http://www.pluss.co.in/ (date of circulation: 25.09.2018).

15. PureTemp [Electronic resource]. URL: http://www.puretemp.com/ (date of circulation: 25.09.2018).

16. SavEnrgтм Phase Change Materials [Electronic resource]. URL: https://rgees.com (date of circulation: 23.03.2019).

17. Rubitherm Phase Change Materials [Electronic resource]. URL: https://www.rubitherm.eu/ (date of circulation: 25.09.2018).

18. Phase Change Material PCM Manufacturers for Air Conditioning, Electronics Cooling. [Electronic resource]. URL: http://www.teappcm.com/ (date of circulation: 25.09.2018).

19. Kuznik F., Virgone J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use. Applied Energy. 2009. Vol. 86. No 10. Pp. 2038-2046. doi:10.1016/j.apenergy.2009.01.004

20. Evola G., Marletta L., Sicurella F. A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. Building and Environment. 2013. Vol. 59. Pp. 517-527. doi:10.1016/j.buildenv.2012.09.021

21. Hasse C., Grenet M., Bontemps A., Dendievel R., Sallée H. Realization, test and modelling of honeycomb wallboards containing a Phase Change Material. Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. No 1. Pp. 232-238. doi:10.1016/j.enbuild.2010.09.017

22. Castell A., Farid M. M. Experimental validation of a methodology to assess PCM effectiveness in cooling building envelopes passively. Energy and Buildings. 2014. Vol. 81. Pp. 59-71. doi:10.1016/j.enbuild.2014.06.011

23. Ascione F., Bianco N., De Masi R. F., de' Rossi F., Vanoli G.P. Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season. Applied Energy. 2014. Vol. 113. Pp. 990-1007. doi:10.1016/j.apenergy.2013.08.045

24. Berardi U., Manca M. The Energy Saving and Indoor Comfort Improvements with Latent Thermal Energy Storage in Building Retrofits in Canada. Energy Procedia. 2017. Vol. 111. Pp. 462-471. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.208

25. Soudian S., Berardi U. Experimental investigation of latent thermal energy storage in highrise residential buildings in Toronto. Energy Procedia. 2017. Vol. 132. Pp. 249-254. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.706

26. Diaconu B.M., Cruceru M. Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings. Energy and Buildings. 2010. Vol. 42. No 10. Pp. 1759-1772.

27. Kuznik F., Virgone J., Johannes K. In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard. Renewable Energy. 2011. Vol. 36. No 5. Pp. 1458-1462. doi:10.1016/j.renene.2010.11.008

28. Becker R. Improving thermal and energy performance of buildings in summer with internal phase change materials. Journal of Building Physics. 2013. Vol. 37. No 3. Pp. 296-324. doi:10.1177/1744259113480133

29. Xu X., Zhang Y., Lin K., Di H., Yang R. Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings. Energy and Buildings. 2005. Vol. 37. No 10. Pp. 1084-1091. doi:10.1016/j.enbuild.2004.12.016

30. Shilei L. Neng Z., Guohui F. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter. Energy and Buildings. 2006. Vol. 38. No 1. Pp. 18-24. doi:10.1016/j.enbuild.2005.02.007

31. Athienitis A. K., Liu C., Hawes D., Banu D., Feldman D. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. Building and Environmen. 1997. Vol. 32. No 5. C. 405-410. doi:10.1016/s0360-1323(97)00009-7

32. Shilei L., Neng Z., Guohui F. Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage. Energy and Buildings. 2006. Vol. 38. No 6. Pp. 708-711. doi:10.1016/j.enbuild.2005.10.006

33. Shilei, L., Neng Z., Guohui F. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter. Energy and Buildings. 2006. Vol. 38. No 1. Pp. 18-24. doi:10.1016/j.enbuild.2005.02.007

34. Shilei L., Guohui F., Neng Z., Li D. Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards. Energy and Buildings. 2007. Vol. 39. No 10. Pp. 1088-1091. doi:10.1016/j.enbuild.2006.11.012

35. Banu, D., Feldman, D., Hawes, D. Evaluation of thermal storage as latent heat in phase change material wallboard by differential scanning calorimetry and large scale thermal testing. Thermochimica Acta. 1998. Vol. 317. No 1. Pp. 39-45. doi:10.1016/s0040-6031(98)00368-2

36. Feldman D., Banu D. DSC analysis for the evaluation of an energy storing wallboard. Thermochimica Acta. 1996. Vol. 272. Pp. 243-251. doi:10.1016/0040-6031(95)02456-5

37. Scalat S., Banu D., Hawes D., Parish J., Haghighata F., Feldman D. Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard. Solar Energy Materials and Solar Cells. 1996. Vol. 44. No 1. Pp. 49-61. doi:10.1016/0927-0248(96)00017-7

38. Peippo K., Kauranen P., Lund P. D. A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. Energy and Buildings. 1991. Vol. 17. No 4. Pp. 259-270. doi:10.1016/0378-7788(91)90009-r

39. Lai C., Chen R. H., Lin C.-Y. Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM. Energy and Buildings. 2010. Vol. 42. No 8. Pp. 1259-1266. doi:10.1016/j.enbuild.2010.02.018

40. Alawadhi E.M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material. Energy and Buildings. 2008. Vol. 40. No 3. Pp. 351-357. doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.001

41. Silva T., Vicente R., Soares N., Ferreira V. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution. Energy and Buildings. 2012. Vol. 49. Pp. 235-245. doi:10.1016/j.enbuild.2012.02.010

42. Vicente R., Silva T. Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach. Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 67. No 1/2. Pp. 24-34. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.02.069

43. Haghshenaskashani S., Pasdarshahri H. Simulation of Thermal Storage Phase Change Material in Building. Journal of Civil and Environmental Engineering. 2009. Vol. 3. No 10. Pp.356-360.

44. Zhang C., Chen Y., Wu L., Shi M. Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures. Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. No 12. Pp. 3514-3520. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.028

45. Huang M.J., Eames P.C., Hewitt N.J. The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2006. Vol. 90. No 13. Pp. 1951-1960. doi:10.1016/j.solmat.2006.02.002

46. USE OF MICROENCAPSULATED PCM IN BUILDINGS AND THE EFFECT OF ADDING AWNINGS [Electronic resource]. URL: https://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_8_1%20Sustainable_Comfort_Cooling/64.pdf (date of circulation: 19.10.2018).

47. Arce P., Castellón C., Castell A., Cabeza L. F. Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings. Energy and Buildings. 2012. Vol. 44. Pp. 88-93. doi:10.1016/j.enbuild.2011.10.028

48. Cabeza L.F., Medrano M., Castellón C., Castell A., Solé C., Roca J. and Nogués M. Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes. *Contributions to Science*. 2007. Vol. 3. No 4. C. 501-510. doi:10.2436/20.7010.01.26

49. Alqallaf H. J., Alawadhi E.M. Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain. Energy and Buildings. 2013. Vol. 61. Pp. 73-80. doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.041

50. Alawadhi E. M., Alqallaf H. J. Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study. Energy Conversion and Management. 2011. Vol. 52. No 8/9. Pp. 2958-2964. doi:10.1016/j.enconman.2011.04.004

51. Royon L., Karim L., Bontemps A. Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings. Energy and Buildings. 2013. Vol. 63. Pp. 29-35. doi:10.1016/j.enbuild.2013.03.042

52. Lee T., Hawes D. W., Banu, D., Feldman, D. Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2000. Vol. 62. No 3. Pp. 217-237. doi:10.1016/s0927-0248(99)00128-2

53. Cellat K., Beyhan B., Kazanci B., Konuklu Y., Paksoy H. Direct Incorporation of Butyl Stearate as Phase Change Material into Concrete for Energy Saving in Buildings. Journal of Clean Energy Technologies. 2017. Vol. 5. No 1. Pp. 64-68. doi:10.18178/JOCET.2017.5.1.345

54. Pasupathy A., Velraj R. Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management. Energy and Buildings. 2008. Vol. 40. No 3. Pp. 193-203. doi:10.1016/j.enbuild.2007.02.016

55. Chou H.-M., Chen C.-R., Nguyen V.-L. A new design of metal-sheet cool roof using PCM. Energy and Buildings. 2013. Vol. 57. Pp. 42-50. doi:10.1016/j.enbuild.2012.10.030

56. Weinläder H., Beck. A., Fricke J. PCM-facade-panel for daylighting and room heating Helmut. Solar Energy. 2005. Vol. 78. No 2. Pp. 177-186. doi:10.1016/j.solener.2004.04.013

57. Goia F., Perino M., Serra V. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype. Solar Energy. 2014. Vol. 100. Pp. 217-233. doi:10.1016/j.solener.2013.12.002

58. Bontemps A., Ahmad M., Johannès K., Sallée H. Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls. Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. No 9. Pp. 2456-2461. doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.030

59. Alawadhi E.M. Using phase change materials in window shutter to reduce the solar heat gain. Energy and Buildings. 2012. Vol. 47. Pp. 421-429. doi:10.1016/j.enbuild.2011.12.009

**Информация об авторах:**

**Назиров Рашит Анварович**
ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», г. Красноярск, Россия,
доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой «Проектирование зданий и экспертиза недвижимости»,
E-mail: nazirovra@gmail.com

**Тараненко Дмитрий Васильевич**
ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», г. Красноярск, Россия,
магистрант кафедры «Проектирование зданий и экспертиза недвижимости»,
E-mail: dmitij_taranenko@mail.ru

**Веде Петр Юрьевич**
ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», г. Красноярск, Россия,
магистрант кафедры «Проектирование зданий и экспертиза недвижимости»,
E-mail: vede@live.ru

**Information about authors:**

**Nazirov R. A.**
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia,
Doctor of Engineering Science,
professor, head of the department "Building design and property survey"
E-mail: nazirovra@gmail.com

**Taranenko D. V.**
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia,
candidate for a master's degree at the department "Building design and property survey"
E-mail: dmitij_taranenko@mail.ru

**Vede P. Yu.**
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia,
candidate for a master's degree at the department "Building design and property survey"
E-mail: vede@live.ru