

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт
институт
Проектирования зданий и экспертизы недвижимости
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель магистерской
программы
_____ Р. А. Назиров
подпись инициалы, фамилия
«_____» _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Энергосберегающие ограждающие конструкции с использованием материа-
лов с изменяющимся фазовым состоянием»
тема

08.04.01 «Строительство»
код и направление специальности

08.04.01.04 «Проектирование зданий. Энерго - и ресурсосбережение»
код и направление специальности

Научный руководитель _____ профессор, д.т.н Р. А. Назиров
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник _____ Д. В. Тараненко
подпись, дата инициалы, фамилия

Рецензент _____
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Красноярск 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Состояние вопроса, цели и задачи исследования	6
1.1 Правовое регулирование в сфере энергосбережения и энергоэффективности в РФ.....	6
1.2 Аккумулирование тепловой энергии в зданиях.....	8
1.3 Материалы с изменяющимся фазовым состоянием. Классификация и способы их упаковки	9
1.4 Материалы с изменяющимся фазовым состоянием. Свойства МИФС..	20
1.4.1 Свойства МИФС органического происхождения.....	20
1.4.2 Свойства МИФС неорганического происхождения.....	21
1.4.3 Свойства эвтектиков	22
1.5 Опыт исследования материалов с фазовым переходом	22
1.6 Исследования МИФС в климатических условиях г. Красноярска	36
1.12 Выводы.....	38
Глава 2. Программные комплексы. Приборы и оборудование	39
2.1 Исходные данные	40
2.1.1 Климатические параметры	40
2.1.2 Характеристики материалов	41
2.2 Математическое описание тепло- массопереноса	42
2.3 Математическое описание фазовых превращений	43
2.3.1 Задача Стефана	43
2.3.2 Численное решение задачи Стефана.....	46

Глава 3. Определение оптимальной конфигурации конструкции на основе МИФС	47
3.1 Экспериментальное исследование фазового перехода воды	47
3.2 Разработка методики численного расчета с учетом гистерезиса и верификация эксперимента с численным расчетом	50
3.3 Расчет количества теплоты, проходящее через стены за сутки, при температуре наружного воздуха, изменяющегося в интервале между T_{bot} и T_{top}	56
3.4 Расчет потерь тепловой энергии за один отопительный период (на кв.м. наружной ограждающей конструкции).....	62
3.5 Влияние теплопроводности МИФС на экономию энергии.....	63
3.6 Влияние расположения МИФС на экономию энергии	66
3.7 Включение фазовых переходов с неотрицательными температурами ..	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	80
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	82

ВВЕДЕНИЕ

Отрасль ЖКХ обладает огромным потенциалом по повышению энергоэффективности – на нее приходится около 20% потенциала по снижения энергопотребления в Российской Федерации. Удельный вес потребления ресурсов в многоквартирных домах в общем объеме произведённых в стране ресурсов составляет 52% по теплоэнергии, 30% – по электроэнергии [1].

Одним из способов снижения энергопотребления зданий является размещение в ограждающих конструкциях зданий материалов с изменяющимся фазовым состоянием (МИФС). Эти материалы поглощают избыток тепловой энергии при плавлении и восполняют ее дефицит в течение процесса кристаллизации, что приводит к задержке прохождения теплового потока сквозь конструкцию, к сглаживанию температуры воздуха в помещениях в течение дня и к понижению спроса на энергию, потребляемую для отопления и кондиционирования воздуха.

Актуальность работы обусловлена необходимостью снижения потребления энергии, вызванная ограниченными запасами энергоресурсов и обеспечением экологической безопасности населения.

Целью диссертации является исследование возможности применения материалов с изменяющимся фазовым состоянием в ограждающих конструкциях зданий с получением эффекта энергосбережения в условиях резко континентального климата.

Задачи диссертации:

- а) изучение номенклатуры и выбор наиболее рациональных МИФС из имеющихся торговых марок для применения в ограждающих конструкция, работающих при отрицательных температурах;
- б) разработка алгоритма расчета фазового перехода МИФС в современных программных комплексах;

- в) выявление факторов, влияющих на величину теплового потока, проходящего сквозь конструкцию с МИФС;
- г) определение оптимальной конфигурации ограждающей конструкции с МИФС;
- д) оценка экономии энергии, которая может быть получена при замене ограждающей конструкции с традиционным утеплением на конструкцию с МИФС.

Объект исследования: материалы с изменяющимся фазовым состоянием.

Предмет исследования: процесс тепломассопереноса в ограждающих конструкциях.

Глава 1. Состояние вопроса, цели и задачи исследования

1.1 Правовое регулирование в сфере энергосбережения и энергоэффективности в РФ

В целях достижения энергетической эффективности экономики, в энергетической стратегии России на период до 2030 года [2] предусмотрено использование определенных мер государственной энергетической политики. В их числе – разработка государственной, региональных и муниципальных программ энергосбережения и организация мониторинга их выполнения; внедрение новых обязательных строительных норм и правил эффективного использования энергии не только для объектов жилищно-коммунального хозяйства, но и для общественных, коммерческих и производственных зданий; стимулирование развития и использования новых энергетических технологий, создающих продукцию с качественно новыми потребительскими свойствами.

В настоящее время основным законом, регулирующим вопросы энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий, является Федеральный Закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» [3]. Закон устанавливает порядок обеспечения энергетической эффективности зданий, строений, сооружений.

Ряд обязательных условий к отапливаемым зданиям изложены в приказе Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 17 ноября 2017 г. N 1550/пр «Об утверждении Требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений» [4]. В составе требований:

- соблюдение удельного годового расхода энергетических ресурсов на отопление и вентиляцию путем достижения расчётной удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию значений нормируемой;

- соблюдение удельного годового расхода электрической энергии на общедомовые нужды и тепловой энергии на горячее водоснабжение (для многоквартирных домов);
- другие обязательные требования, выполнение которых влечет осуществление различных энергосберегающих решений, связанных с инженерными системами;
- дополнительные технические требования, касающиеся использования возобновляемых и альтернативных источников энергии и вторичных энергоресурсов.

Порядок определения расчетной удельной характеристики дан в своде правил «Тепловая защита зданий» [5]. Для вычисления данного комплексного показателя используется ряд других, удельных характеристик, в т.ч. удельная теплозащитная характеристика здания – физическая величина, численно равная потерям тепловой энергии единицы отапливаемого объема в единицу времени при перепаде температуры в 1°C через теплозащитную оболочку здания. Значение этой величины зависит, в том числе, от приведенного сопротивления теплопередаче фрагментов теплозащитной оболочки здания.

Согласно тому же СП, теплозащитная оболочка здания должна отвечать следующим требованиям:

- приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должно быть не меньше нормируемых значений (поэлементные требования);
- удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемого значения (комплексное требование);
- температура на внутренних поверхностях ограждающих конструкций должна быть не ниже минимально допустимых значений (санитарно-гигиеническое требование).

В действующей редакции свода правил имеется указание о необходимости расчета приведенного сопротивление теплопередаче в стационарных условиях теплопередачи. Однако в реальных условиях ограждающие конструкции зданий работают в условиях периодических изменений температур и влажности окружающего воздуха.

1.2 Аккумулирование тепловой энергии в зданиях

Тепловая энергия может аккумулироваться: веществами, которые при нагревании и охлаждении обратимо меняют свое агрегатное состояние, структуру или химический состав (т.е. аккумулирование энергии происходит за счет изменения фазового состояния); за счет химических реакций; за счет изменения температуры вещества.

В настоящее время наиболее широко применяются аккумуляторы теплоты на фазовых переходах [6]. Такой способ аккумулирования используется в системах вентиляции и кондиционирования воздуха [7,8], отопления и горячего водоснабжения [9], в том числе для хранения солнечной энергии (например, в гелиосистемах [10]).

В случае размещения материала с изменяющимся фазовым состоянием (МИФС) в ограждающих конструкциях зданий, следует ожидать повышение тепловой инерционности этих конструкций, сглаживание колебаний, уменьшение и/или сдвиг пиковых значений температуры внутреннего воздуха. В различных научных публикациях такое применение МИФС в целях энергосбережения оценивается как перспективное.

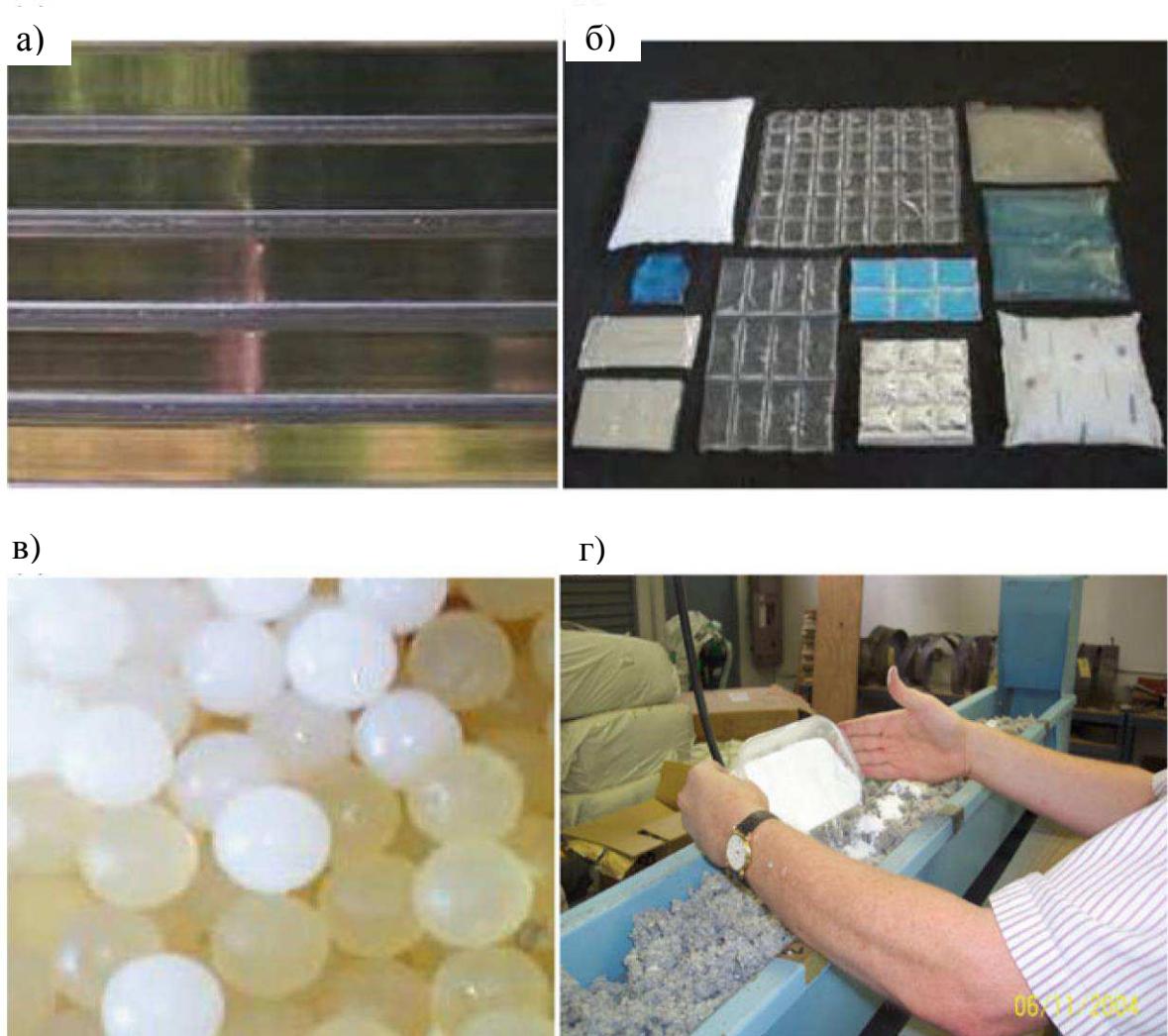
1.3 Материалы с изменяющимся фазовым состоянием.

Классификация и способы их упаковки

«Обычно МИФС 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 неэвтектических 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 [11, 12]» [13].

«Так как в жидкое состояние материалы с фазовым переходом текучи, удержание МИФС в строительных материалах или конструкциях достигают посредством упаковки (инкапсуляцией, микро- и макроинкапсуляцией, см. рисунок 1) или получением стабилизированной формы (shape-stabilized PCM, SS PCM). Микрокапсуляция позволяет получить материал с фазовым переходом, заключенный в капсулах с размерами от менее 1 мкм и до, примерно, 300 мкм (рисунок 2). 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 (сuspension). В виде гранул МИФС помещаются в пластиковые, стеклянные, металлические массивные контейнеры, пакеты из фольги или непосред-

ственno в строительные смеси в процессе их изготовления. Недостатком является тенденция к затвердеванию/таянию по краям, приводящая к более медленному поглощению и высвобождению энергии. Видом МИФС определяется выбор материала для упаковки: гидраты солей могут вызывать коррозию, а парафины размягчение пластика [11]» [13].



а) прозрачные оконные модульные контейнеры с расплавленным неорганическим PCM – Dörken GmbH & Co, Германия б) пакеты из алюминиевой и пластиковой фольги, содержащие PCM – Products Ltd, Великобритания в) макрокапсулирование PCM в виде сфер – Products Ltd, Великобритания г) добавление микрокапсулированного PCM в целлюлозу –экспериментальная продукция

Рисунок 1 – Виды упаковок для МИФС [12]

«A. Jamekhorshid, S. Sadrameli и M. Farid [14] сравнили 12 способов микроАинкапсулации, 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 ядра обычно служат парафины, из-за хорошо проработанного и относительно простого процесса их микроАинкапсулации» [13].

«J. Kosny, A.M. Farid и др. рассмотрели включение микрокапсул и в различные виды волоконной изоляции [12]. МикроАинкапсулация обеспечивает повышенную теплопередачу со строительным материалом за счет увеличенной по сравнению с большеразмерными упаковками поверхности теплообмена, и несколько снижает прочность этого материала. Зачастую микроАинкапсулация МИФС требует сложных процедур подготовки, что затрудняет ее массовое производство [15]» [13].

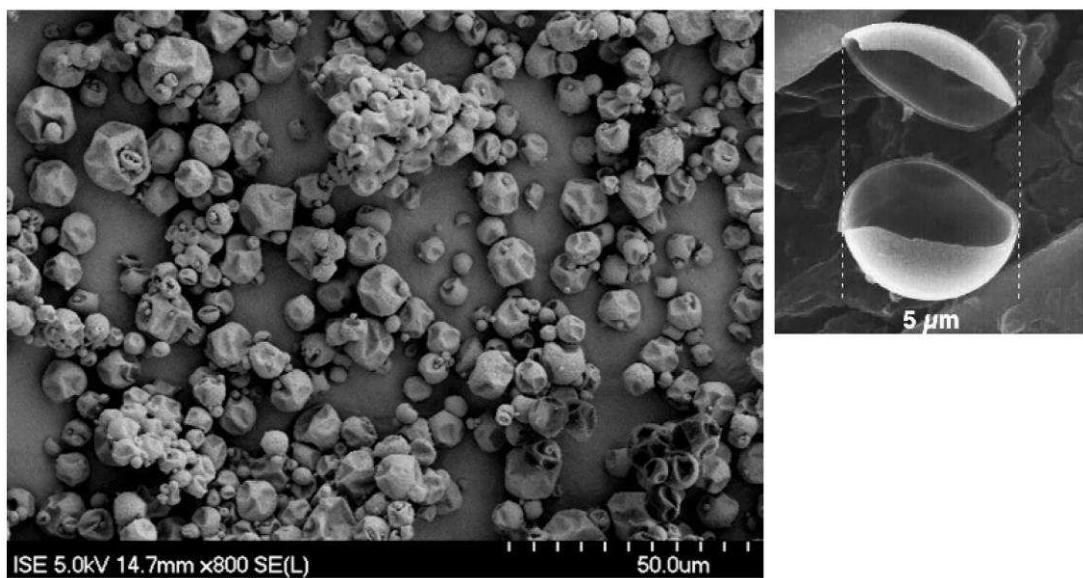


Рисунок 2 – Изображение с электронного микроскопа многих капсул (слева) и открытой микрокапсулы (справа) [16]

«Для получения материалов устойчивой формы используются следующие приемы: пропитка механически стабильных пористых материалов; полу-

чение композита из МИФС и материала, который будет служить поддерживающей структурой; комбинирование обоих способов – заполнение пор стабильного материала материалом с фазовым переходом и структурой, которая поддерживает его в порах [11]» [13].

«Авторы [17-19] указывают, что способ погружения, при котором МИФС в жидким состоянии поглощается с помощью капиллярного подъема в поры таких строительных материалов, как гипс, кирпич или бетон, имеет технологические сложности» [13].

В таблице 1 представлены характеристики производимых материалов с изменяющимся фазовым переходом.

Таблица 1 – Производимые материалы с изменяющимся фазовым состоянием

№ п/п	Наименование материала, его марка	Температура плавления / кристаллизации, °C	Теплопроводность жидкости/твердой фазы, Вт/(м·К)	Скрытая теплота, кДж/кг	№ п/п	Наименование материала, его марка	Температура плавления / кристаллизации, °C	Теплопроводность жидкости/твердой фазы, Вт/(м·К)	Скрытая теплота, кДж/кг
1. Climator [20]									
1	ClimSel C-21	-21/-24	0.33/1.45	285	7	ClimSel C28	31/27	0.72/0.98	170
2	ClimSel C-18	-18/-23	0.56/2.17	288	8	ClimSel C32	32/29	1.08/0.76	160
3	ClimSel C7	8/4	0.59/0.78	123	9	ClimSel C48	53/48	0.53/0.76	180
4	ClimSel C10	6/11	0.70/0.83	116	11	ClimSel C58	58/55	0.47/0.57	260
5	ClimSel C21	26/21	0.75/0.93	134	12	ClimSel C70	77/70	0.81	144
6	ClimSel C24	27/24	0.93/0.74	140					
2. Croda International Plc [21]									
13	CrodaTherm™ -22	-23/-24	0.19/0.16	120	21	CrodaTherm™ 24W	23.8/22.2	0.16/0.22	184/-182
14	CrodaTherm™ 5	5.1/2.7	0.15/.0.23	191/-190	22	CrodaTherm™M E29D	28.8/23.5	н.д.	183/-179
15	CrodaTherm™ 6.5	6.8/2.5	0.15/.0.24	184/-182	23	CrodaTherm™M E29P	28.8/23.5	н.д.	183/-179
16	CrodaTherm™ 9.5	9	0.15/.0.24	135	24	CrodaTherm™ 29	29/26	0.15/0.22	207/-205
17	CrodaTherm™ 15	15/9.5	0.10/0.29	177/-176	25	CrodaTherm™ 32	32/29.5	0.16/0.22	190
18	CrodaTherm™ 19	19.3/17.9	0.16/0.23	175/-176	26	CrodaTherm™ 37	36/8/35	0.17/0.24	204/-202
19	CrodaTherm™ 21	21/19	0.15/0.18	190	27	CrodaTherm™ 53	53/51	0.16/0.28	226/-225

Продолжение таблицы 1

20	CrodaTherm™ 24	24.1/20.1	0.16/0.29	183	28	CrodaTherm™ 60	59/8/58/4	0.17/0.29	217/-212
3. Insolcorp [22]									
29	18 C° Infinite R	18	0.54/1.09	200	32	25 C° Infinite R	25	0.54/1.09	200
30	21 C° Infinite R	21	0.54/1.09	200	33	29 C° Infinite R	29	0.54/1.09	200
31	23 C° Infinite R	23	0.54/1.09	200					
4. Microtek laboratories, inc [23]									
34	fibratek 28S	28	н.д.	160	50	nextek 18D	50	н.д.	190
35	fibratek 24S	24		97	51	nextek 24D	51		170
36	fibratek 28D	28		160	52	nextek 28D	52		180-190
37	fibratek 24D	24		160	53	nextek 32D	53		170
38	Micronal 28S	28		160	54	nextek 37D	54		190
39	Micronal 24S	24		105	55	PCM-30	55		150-160
40	Micronal 28D	28		160	56	PCM-10	56		175-185
41	Micronal 24D	24		97	57	PCM6	57		180-190
42	nextek 6	6		170	58	PCM18	58		205-215
43	nextek 18	18		190	59	PCM24	59		165-175
44	nextek 24	24		170	60	PCM28	60		195-205
45	nextek 28	28		180-190	61	PCM32	61		180-190
46	nextek 29	31		170	62	PCM37	62		210-220
47	nextek 32	32		170	63	PCM43	63		235-245
48	nextek 37	37		190	64	PCM58	64		160-180
49	nextek 6D	6		170	65	vivtek 29	65		170
5. PCM Products, Ltd [24]									
66	A2	2	0.21	230	117	E-21	-21	0.51	285
67	A3	3	0.21	230	118	E-22	-22	0.57	305
68	A4	4	0.21	235	119	E-26	-26	0.58	265
69	A5	5	0.22	170	120	E-29	-29	0.64	250
70	A6	6	0.21	185	121	E-32	-32	0.56	225

Продолжение таблицы 1

71	A6.5	6,5	0.22	190	122	E-34	-34	0.54	200
72	A7	7	0.22	190	123	E-37	-37	0.54	225
73	A8	8	0.21	180	124	E-50	-50	0.56	175
74	A9	9	0.21	190	125	E-65	-65	0.56	240
75	A10	10	0.22	210	126	H105	104	0.500	125
76	A12	12	0.22	215	127	H115	114	0.503	100
77	A13	13	0.22	225	128	H120	120	0.506	120
78	A14	14	0.22	200	129	H160	162	0.509	105
79	A15	15	0.18	205	130	H190	191	0.512	170
80	A16	16	0.18	225	131	S8	8	0.44	130
81	A17	17	0.18	235	132	S10	10	0.43	170
82	A18	18	0.22	155	133	S13	13	0.43	150
83	A19	19	0.22	150	134	S15	15	0.43	180
84	A20	20	0.22	160	135	S17	17	0.43	155
85	A21	21	0.22	160	136	S18	18	0.43	145
86	A22	22	0.18	160	137	S19	19	0.43	175
87	A23	23	0.18	155	138	S20	20	0.54	195
88	A24	24	0.18	155	139	S21	21	0.54	220
89	A25	25	0.18	150	140	S22	22	0.54	215
90	A26	26	0.21	230	141	S23	23	0.54	200
91	A27	27	0.22	250	142	S24	24	0.54	180
92	A28	28	0.21	265	143	S25	25	0.54	175
93	A29	29	0.18	225	144	S27	27	0.54	185
94	A32	32	0.21	120	145	S32	32	0.51	220
95	A32H	32	0.22	240	146	S34	34	0.52	140
96	A36	36	0.18	130	147	S44	44	0.43	100
97	A36H	36	0.22	300	148	S50	50	0.43	125
98	A39	39	0.22	135	149	S58	58	0.69	145
99	A42	42	0.21	140	150	S70	70	0.57	100
100	A43	43	0.18	280	151	S72	72	0.58	155
101	A46	46	0.22	155	152	S83	83	0.62	100
102	A48	48	0.18	230	153	S89	89	0.67	145

Продолжение таблицы 1

103	A50	50	0.18	190	154	S117	117	0.70	125
104	A52	52	0.18	220	155	X25	25	0.36	110
105	A53	53	0.22	155	156	X30	30	0.36	115
106	A58	58	0.22	215	157	X40	40	0.36	150
107	A58H	58	0.18	240	158	X55	55	0.36	115
108	A62	62	0.22	205	159	X70	70	0.36	160
109	A70	70	0.23	225	160	X80	80	0.36	160
110	E0	0	0.58	395	161	X90	90	0.36	170
111	E-2	-2	0.58	325	162	X95	95	0.36	140
112	E-3	-4	0.6	330	163	X120	120	0.36	185
113	E-6	-6	0.56	300	164	X130	130	0.36	315
114	E-11	-12	0.57	310	165	X165	165	0.36	225
115	E-15	-15	0.53	320	166	X180	180	0.36	275
116	E-19	-19	0.58	300					
6. Phase Change [25]									
167	BioPCM Q4	4	0.15-2.5	210-250	173	BioPCM Q18	18	0.15-2.5	210-250
168	BioPCM Q5	5	0.15-2.5	210-250	174	BioPCM Q20	20	0.15-2.5	210-250
169	BioPCM Q6	6	0.15-2.5	210-250	175	BioPCM Q23	23	0.15-2.5	210-250
170	BioPCM Q8	8	0.15-2.5	210-250	176	BioPCM Q25	25	0.15-2.5	210-250
171	BioPCM Q12	12	0.15-2.5	210-250	177	BioPCM Q27	27	0.15-2.5	210-250
172	BioPCM Q15	15	0.15-2.5	210-250	178	BioPCM Q29	29	0.15-2.5	210-250
7. Pluss® [26]									
179	HS 33N	-30/-31	н.д.	224	194	HS 24	26/25	0.55/1.05	199
180	HS 26N	-24/-26	н.д.	272	195	HS 29	29	0.382/0.4 78	190
181	HS 23N	-21/-23	0.702/4.9 76	262	196	OM 29	29/26	0.172/0.2 93	194
182	HS 18N	-18	0.44/н.д.	242	197	FS 29	29/28	н.д/0.45	158
183	HS 15N	-15/-16	0.53/5.26	308	198	OM 30	32/30	0.146/0.2 24	230
184	HS 10N	-10	0.602/4.2 5	290	199	FS 30	31/30	0.340/0.4 96	172

Продолжение таблицы 1

185	HS 7N	-6	0.55/1.76	296	200	OM 32	33/30	0.145/0.2 19	187
186	HS 3N	-2/-3	0.35/2.2	346	201	HS 34	35/34	0.47/0.5	150
187	HS 01	1	0.55/2.2	270	202	OM 35	35/34	0.16/0.20	202
188	OM 03	4/3	0.146/0.2 24	140	203	OM 37	37/36	0.13/0.16	231
189	OM 05P	6.1/5	0.37/3.83	242	204	OM 42	44/43	0.1/0.19	221
190	FS 03	4/1	0.16/0.22	161	205	FS 42	42/41	2.91/3.01	181
191	OM 18	19	0.175/0.1 82	212	206	OM 46	48/45	0.10/0.20	196
192	OM 21	22/19	0.14/0.21	174	207	OM 48	51/48	0.10/0.20	172
193	HS 22	23/22	0.56/2.27	167.6					
8. PureTemp LLC [27]									
208	PureTemp -37	-37	0.15/0.25	145	220	PureTemp 28	28	0.15/0.25	190
209	PureTemp -21	-21	0.55/2.39	239	221	PureTemp 29	29	0.15/0.25	202
210	PureTemp -15	-15	0.55/2.34	301	222	PureTemp 37	37	0.15/0.25	210
211	PureTemp -2	-2	0.60/2.21	277	223	PureTemp 44	44	0.15/0.25	180
212	PureTemp 4	5	0.15/0.25	187	224	PureTemp 48	48	0.15/0.25	230
213	PureTemp 8	8	0.14/0.22	178	225	PureTemp 53	53	0.15/0.25	225
214	PureTemp 15	15	0.15/0.25	182	226	PureTemp 58	58	0.15/0.25	225
215	PureTemp 18	18	0.15/0.25	192	227	PureTemp 60	61	0.15/0.25	220
216	PureTemp 20	20	0.14/0.23	171	228	PureTemp 63	63	0.15/0.25	206
217	PureTemp 23	23	0.15/0.25	227	229	PureTemp 68	68	0.15/0.25	213
218	PureTemp 25	25	0.15/0.25	187	230	PureTemp 108	108	0.15/0.25	180
219	PureTemp 27	27	0.15/0.25	202	231	PureTemp 151	151	0.15/0.25	217
9. RGEES, LLC [28]									
232	PCM-HS26N	-24/-26	н.д.	210	236	PCM-OM18P	19.3/18. 8	н.д.	233
233	PCM-HS10N	-10	0.605/4.2 5	230	237	PCM-HS22P	23/22	0.56/1.13	185
234	PCM-OM05P	6.6/5.4	н.д.	216	238	PCM-OM37P	37/38	0.13/0.16	218

Продолжение таблицы 1

235	PCM-OM06P	6.4/3.9	н.д.	252	239	PCM-OM65P	66-68/65	0.33/0.19	183
10. Rubitherm® Technologies GmbH [29]									
240	GR 42	42	0.2	55	275	RT 47	47		165
241	GR 82	82	0.2	55	276	RT 50	50		160
242	PX 15	15	0.2	85	277	RT 54 HC	54		200
243	PX 25	25	0.1	95	278	RT 55	55		170
244	PX 52	52	0.2	100	279	RT 60	60		160
245	PX 82	82	0.1	105	280	RT 62 HC	62		230
246	RT - 9 HC	-9		250	281	RT 64 HC	64		250
247	RT - 4	-4		180	282	RT 65	65		150
248	RT 0	0		175	283	RT 69 HC	69		230
249	RT 2 HC	2		200	284	RT 70 HC	70		260
250	RT 3 HC	3		190	285	RT 82	82		170
251	RT 4	4		175	286	RT 80 HC	78	0.14	220
252	RT 5	5		180	287	RT 90 HC	90	н.д.	170
253	RT 5 HC	5		250	288	RT100	~100		120
254	RT 8	8		175	289	RT100HC	100		180
255	RT 8 HC	8		190	290	SP -30	-29 -- 28		250
256	RT 9	9		175	291	SP-28	-28 -- 29		260
257	RT 10	10		160	292	SP-24	-22 -- 23		250
258	RT 10 HC	10		200	293	SP-21	-21 -- 19		285
259	RT 11 HC	11		200	294	SP-17	-17 -- 18		300
260	RT 12	12		155	295	SP -11 UK	-12 -- 10		330
261	RT 15	15		155	296	SP -11	-11 -- 12		240

Окончание таблицы 1

262	RT 18 HC	18		260	297	SP-7_2	-7 – -5		290
263	RT 21	21		155	298	SP 5	4 – 6		170
264	RT 21 HC	21		190	299	SP 15	15 – 17		180
265	RT 22 HC	22		190	300	SP 21 EK	21 – 23		170
266	RT 24	24		160	301	SP 24 E	24 – 25		180
267	RT 25 HC	25		210	302	SP 25 E2	24 – 26		180
268	RT 26	26		180	303	SP 26 E	25 – 27		180
269	RT 28 HC	28		250	304	SP 29 Eu	29 – 31		200
270	RT 31	31		165	305	SP 31	31 – 33	н.д.	210
271	RT 35	35		160	306	SP 50 *	50 – 51		220
272	RT 42	42		165	307	SP 58 *	56 – 59		250
273	RT 35 HC	35		240	308	SP 70	67 – 73		150
274	RT 44 HC	44		250	309	SP 90 *	88 – 90		150
11. Teappcm [30]									
310	Latest TM 18T	18/17	1	175	315	Latest TM 32S	32		220
311	Latest TM 20T	20/19		175	316	Latest TM 34S	34		230
312	Latest TM 22T	22/21		175	317	Latest TM 36S	36		200
313	Latest TM 25T	25/24		175	318	Latest TM 48S	48		230
314	Latest TM 29T	29/28		175					

1.4 Материалы с изменяющимся фазовым состоянием.

Свойства МИФС

В [31, 32] перечислены некоторые желаемые свойства материалов с изменяющимся фазовым состоянием, среди которых:

- способность поглощать и выделять большое количество энергии при фазовых переходов (т.н. скрытую энергию, или скрытую теплоту);
- подходящая температура фазовых переходов;
- низкое давление пара (<1 бар) во избежание разрыва герметизирующего материала или дополнительных затрат на упаковку;
- химическая инертность по отношению к материалу упаковки и воспроизводимая без деградации кристаллизация для более длительного срока службы;
- высокая экологическая и пожарная безопасность;
- высокая скорость роста кристаллов;
- небольшое изменение объема во время фазовых превращений;
- доступность в большом количестве и дешевизна.

1.4.1 Свойства МИФС органического происхождения

У парафиновых МИФС обычно относительно острый профиль энталпии с хорошо заметными температурами плавления и кристаллизации. Они обладают низким давлением паров, но имеют относительно высокую стоимость и несовместимы с пластиковыми контейнерами. Средняя теплопроводность парафинов составляет около $0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, а теплота фазового перехода в большинстве случаев варьируется от 150 до 270 кДж/кг [12, 32].

Среди не парафинов, в целях сокращения потерь энергии в зданиях, наибольшее популярность получили жирные кислоты. Скрытая теплота многих жирных кислот располагается между 150 и 220 кДж/кг, а экологическая и пожарная безопасность значительно выше, чем у парафиновых углеводородов. Средняя теплопроводность кислот меняется в диапазоне от 0,15 до 0,17 Вт/(м·°C) [12, 32].

В основном, органические материалы с изменяющимся фазовым состоянием не испытывают разделения фаз после многократного прохождения через фазовые переходы.

1.4.2 Свойства МИФС неорганического происхождения

В группе неорганических материалов в настоящее время широко применяют только гидраты солей. Гидратированные соли состоят из неорганических солей и одной или нескольких молекул воды. В процессе фазового превращения, происходит гидратация или дегидратация солей. При дегидратации гидрат соли может превратиться в безводную форму с полным разделением соли и воды, либо в гидрат соли с меньшим количеством воды. Средняя скрытая теплота гидратов солей достаточно высока, приблизительно 250 кДж /кг, а их средняя теплопроводность примерно 0,5 Вт/(м·°C), что выше, чем у органических МИФС [12, 32]. Гидраты солей доступны в большом количестве, располагают низкой стоимостью, не горючи, имеют относительно высокую скрытую теплоту на единицу объема. В то же время, им присуще умеренная коррозионность, заметное изменение объема при плавлении и осуществление фазовых переходов неконгруэнтно.

При неконгруэнтном плавлении при дегидратации плотность безводной соли может заставить ее опустится на дно контейнера. Когда наступит темпе-

ратура кристаллизации, соль будет уложена на дне, и часть ее не сможет реабсорбировать воду. Общий объем соли, участвующий в изменении фазы, снизится, вместе с чем уменьшится и эффективность МИФС. Предотвратить неконгруэнтное плавление возможно включением дополнительной воды (избыток более 10%) или специальных загустителей.

Гидраты солей совместимы с пластмассами, что делает процесс их упаковки проще и дешевле.

По сравнению с органическими МИФС, неорганические материалы обычно имеют сходные энталпии по массе, но более высокую по объему из-за их высокой плотности.

1.4.3 Свойства эвтектиков

Из органических эвтектиков, наиболее часто исследуемы смеси жирные кислот. Многие комбинации неорганических эвтектических смесей еще предстоит проверить и подтвердить.

Для эвтектиков характерна возможность получения точной температуры фазового перехода и высокая стоимость.

1.5 Опыт исследования материалов с фазовым переходом

«F. Kuznik и J. Virgone [33] изучили тепловую работу стеновых панелей Energain толщиной 5 мм, состоящих на 60% по массе из микрокапсулированного 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 лет-

него, 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°C; минимальная увеличилась на 0,8°C. Коэффициент уменьшения амплитуды температуры воздуха составил 0,79. Соответствующие значения для межсезонья: 2,3°C; 0,4°C; 0,78; для зимы: 4,2°C; 0°C; 0,73. При этом внешняя контролируемая температура зимой колебалась между 5°C и 15°C, в межсезонье 10°C и 18°C, летом 15°C и 30°C. В числе прочих положительных эффектов отмечалось усиление конвекционного перемешивания внутреннего воздуха и уменьшение амплитуды колебаний температуры внутренней поверхности» [13].

«G. Evola и L. Marletta [34] представили методологию выбора подходящего МИФС 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 стенных панелей с МИФС в помещении, скорость ночной вентиляции и температуру плавления на результативность работы МИФС. Использовались два вида панелей. Первая включала в себя смесь полимера и микрокапсулированного 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 [35]. Обе панели показаны на рисунке 3. 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

комфорtnости. 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 м² и потолка 27 м². 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 МИФС (η PCM), равная отношению сохраненной тепловой энергии к максимальной емкости хранения, была выше в те дни, когда средняя температура панелей приближалась к температуре плавления. Помимо η PCM, авторы в своей работе задействовали частоту активации (FA), то есть процент времени, в течение которого PCM подвергался фазовому переходу. Отмечено, что выбор МИФС необходимо осуществлять, принимая во внимание условия местного климата» [13].

«A. Castell и M. Farid [36] предположили, что FA не всегда связана с улучшением теплового комфорта» [13].

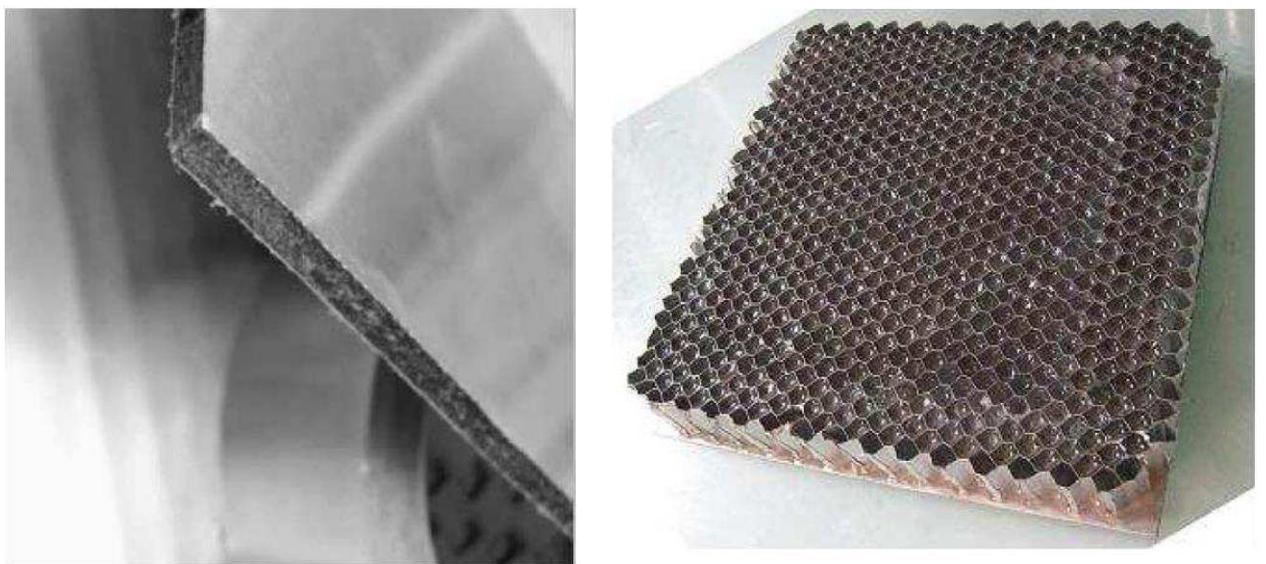


Рисунок 3 – Панель Energain (слева) [34] и сотовая матрица (справа) [35]

В [37] провели сравнение обычного штукатурного раствора и раствора, содержащего по своей массе около 20% микрокапсулированных парафиновых МИФС, одновременно трех марок, с температурами плавления 10°C, 26°C и 28°C. Авторы нанесли штукатурные растворы на внутренние поверхности двух прототипов здания, которые разместили в климатической камере. Уменьшенные прототипы комнаты были изготовлены из экстрадированного полистирола толщиной 3 см и имели форму куба; толщина штукатурного слоя на их поверхностях равнялась 2 см. В камере поочередно были созданы температуры, характерные для лета и зимы в Португалии.

Для лета, амплитуда колебаний температуры воздуха в прототипе со штукатуркой с МИФС оказалась равной 8,9°C, а в прототипе с обычной штукатуркой 13°C. Между максимальными температурами климатической камере и в прототипе с МИФС наблюдалась задержка в 4,5 часа, для прототипа без МИФС – 3 часа. Для зимы, амплитуда колебаний температуры воздуха была также меньше в прототипе с МИФС (4°C против 5,6°C), однако, температура воздуха в обоих прототипах была ниже комфортной для человека.

В численном моделирование авторы дополнительно изучили четыре типа модернизированной штукатурки с МИФС (с температурой плавления 10°C, 24°C, 26°C и 28°C). Для оценки эффективности МИФС авторы ввели специальный индекс, ТТ (единицы измерения: °C·ч), который рассчитывался с помощью интегрирования температуры воздуха в прототипе по времени, в пределах, когда она была выше 26°C. Таким образом, чем больше был индекс, тем выше была потребность в охлаждении воздуха. Индекс ТТ оказался ниже у прототипа, на поверхности которых был нанесен штукатурный раствор, включающий сразу три марки материала с фазовым переходом; у прототипов с МИФС, рассчитанных на температуру плавления в 10°C и в 24°C, индекс оказался больше, чем у прототипа с обычной штукатуркой. Авторы считают, что концепция интегрирования в штукатурный раствор нескольких различных марок материалов с фазовым переходом является многообещающей.

«L. Shilei, Z. Neng и F. Guohui [38] провели эксперименты с МИФС на северо-востоке Китая в зимних условиях, смешав каприновую и лауриновую кислоты (82:18). Температура плавления и кристаллизации этой смеси жирных кислот оказалась $20,394^{\circ}\text{C}$ и $19,138^{\circ}\text{C}$, скрытая теплота плавления и кристаллизации 150,305 Дж/г и 144, 183 Дж/г. МИФС был включен в гипс путем пропитки. Изготовленная стеновая панель имела толщину 9,5 мм с 26% поглощённого МИФС от общего веса, с температурой плавления и кристаллизации $18,491^{\circ}\text{C}$ и $18,587^{\circ}\text{C}$, со скрытой теплотой плавления и кристаллизации 39,126 Дж/г и 36,965 Дж/г. Испытания проводились 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 $19^{\circ}\text{C}...24^{\circ}\text{C}$ и $18,5^{\circ}\text{C}...22^{\circ}\text{C}$ соответственно (рисунок 4). В эксперименте с обычной комнатой величина теплового потока через южную стену варьировалась от $34 \text{ Вт}/\text{м}^2$ до $60 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (рисунок 5), через южную стену в комнате с МИФС от $33 \text{ Вт}/\text{м}^2$ до $52 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Применение панелей уменьшило и разность между температурой воздуха в комнате и температурой внутренней поверхности (рисунок 6). 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» [13].

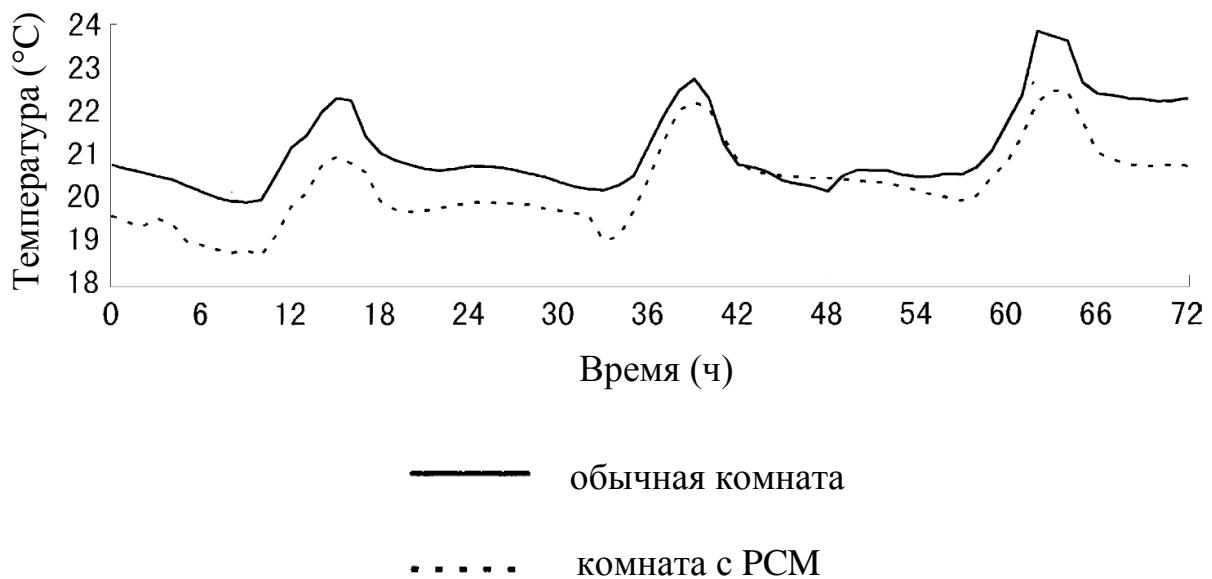


Рисунок 4 – Кривые температуры в помещении [38]

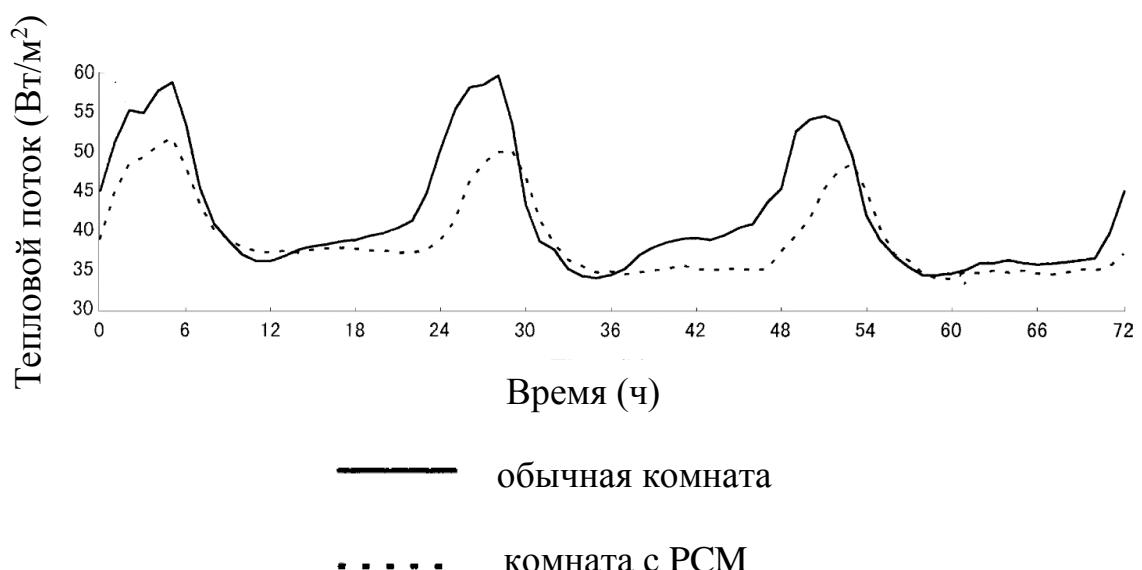


Рисунок 5 – Кривые теплового потока через стену [38]

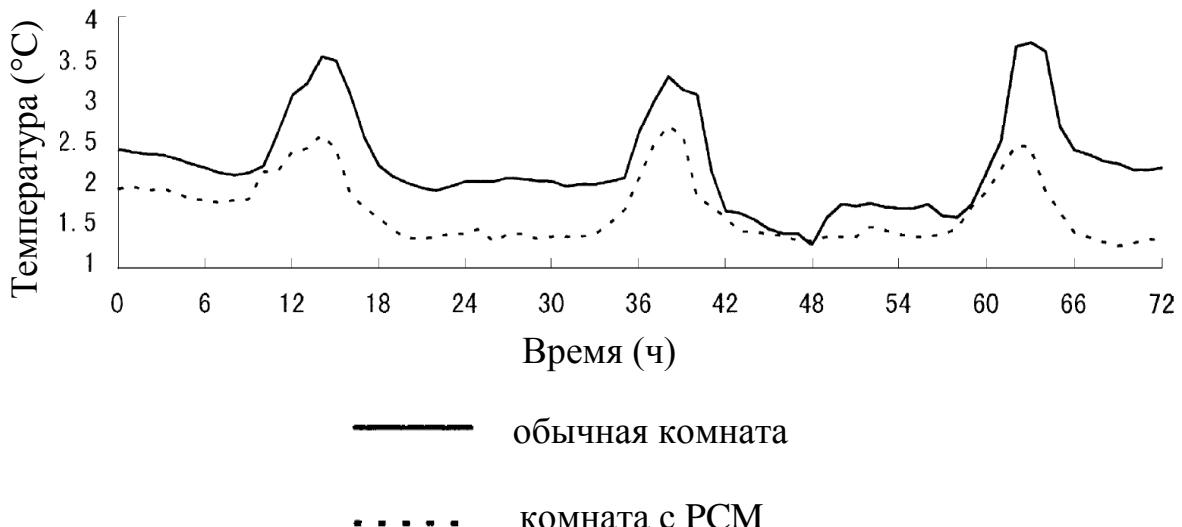


Рисунок 6 – Кривые разности температур между внутренним воздухом и внутренней поверхностью наружной стены [38]

Другие авторы выполняли пропитку гипса МИФС, применяя для этого бутилстеарат [39], эвтектические смеси каприновой и лауриновой кислот [40-42], смесь бутилстеарат-пальмитата [43-45], некоторые жирные кислоты [46]. В [47] добавляли микрокапсулированный парафин.

«E. Alawadhi [48] исследовал действие МИФС (парафины октадекан, эйкозан, и Р116) в жарком климате, которыми заполнялись цилиндрические пустоты в кирпиче. Тепловая эффективность системы кирпич-МИФС была оценена путем сравнения теплового потока на внутренней поверхности со стеной без МИФС в течение типичного рабочего времени. Анализировалось влияние количества и типа МИФС в кирпиче. Увеличение количества МИФС оказалось наиболее эффективным» [13].

В [49] использовались кабины с различными видами кирпичей и марками МИФС. Всего было построено пять типов кабин. Три типа кабин были построены с применением обычного пустотелого кирпича с цилиндрическими пустотами: кабина без изоляции, кабина с полиуретаном толщиной 5 см и та же кабина с полиуретаном, но дополненная слоем МИФС RT27 на потолке и

внутренних поверхностях стен . В конструкциях других типов применялся пустотелый кирпич с увеличенным объемом пустот; одна кабина была без какой-либо изоляции, на потолке и на внутренней стороне стен другой был нанесен МИФС SP25. Все кабины имели одинаковый размер и были расположены в Испании.

Внутри кабины оборудовались системой кондиционирования, которая поддерживала постоянную температуру воздуха 24°C; регистрировались температуры внутреннего воздуха и энергопотребление систем.

Авторы установили, что в летнее время потребление электроэнергии в кабинах с материалом с фазовым переходом и с полиуретаном было снижено примерно на 15-17% (по сравнению с кабинами с полиуретаном, но без МИФС). Большая экономия электроэнергии наблюдалась в кабине из кирпича с увеличенной долей пустот; авторы объясняют различием в теплопроводности кирпича.

Для обычных кирпичных кабин без изоляции в течении всего исследования были характерны высокие колебания температур. Наибольшее снижение амплитуды колебаний температур внутреннего воздуха было достигнуто в кабинах с МИФС (примерно на 1°C, по сравнению с кабинами без изоляции).

«Результаты исследований включения МИФС на основе парафина RT18 в кирпичную кладку приведены в [50, 51], в [52] - октадекана. Z. Chang, Y. Chen, L. Wu и M. Shi провели исследования со смесью гидратов соли [53]. M. Huang, P. Eames и N. Hewitt использовали коммерческие композиты GR41 и GR27 [54]» [13]. Авторы отмечали снижение энергопотребления, связанного с использованием систем кондиционирования воздуха.

J. Lei, J. Yang, E-H. Yang [55] выполнили параметрическое исследование на основе упрощенной расчетной модели размерами 3,0x3,0x2,8 метров в программе EnergyPlus в тропическом климате Сингапура. Все ограждающие конструкции модели имели толщину 150 мм и теплофизические характеристики

бетона, а на поверхности всех стен был добавлен слой МИФС. В качестве варьируемых параметров, рассматривалась температура фазового перехода (от 22°C до 32°C), толщина слоя МИФС (от 3 до 20 мм), местоположение слоя (на наружных поверхностях стен или на внутренних). Продолжительность расчетного периода в одном варианте составила сутки, в другом один год.

Эффективность МИФС оценивалась количеством теплопоступлений за весь расчетный период, и коэффициентом снижения теплопоступлений, вычисляемый как разность единицы и отношения количества теплопоступлений при использовании стен с МИФС к количеству теплопоступлений при использовании обычных стен, умноженная на сто процентов.

Результаты показали, что выбор подходящей температуры фазового перехода имеет решающее значение. Оптимальной температурой фазового перехода МИФС, наносимых на наружные поверхности ограждающих конструкций, являлась самая низкая температура, обеспечивающая полный цикл плавления-кристаллизации всего слоя МИФС; для материалов, наносимых на внутренние поверхности, оптимальной температурой оказалась средняя температура этих поверхностей.

Авторами замечено, что более широкий температурный диапазон фазового перехода может улучшить адаптацию МИФС к изменению температуры наружного воздуха, но ухудшить его эффективность.

Материалы с фазовым переходом на наружных поверхностях стен продемонстрировали более лучшую эффективность, чем материалы на внутренних поверхностях. Авторами показано, что материал с изменяющимся фазовым состоянием способствовал снижению поступающего количества тепла на 21%–32% на протяжении всего года.

«L.F. Cabeza, C. Castellón и другие [56, 57] добавляли Micronal фирмы BASF в бетон. В их эксперименте участвовало две кабины из бетона: с МИФС и без него. В более ранних работах [7, 58] показано, что МИФС имеют эффект,

когда они расплавляются и затвердеваются каждый день. Но в конце осени и зимой наружные температуры окружающей среды не достигали температуры плавления, поэтому для активации материалов с фазовым переходом в [58] была применена стена Trombe. Так как летом высокий пик наружной температуры (около 40 °C) и жаркие ночи препятствуют затвердеванию МИФС, в [57] кабины эксплуатировались с навесами летом. Влияние навесов позволило эксплуатировать МИФС в течение более длительного времени. Наблюдениями зафиксировано максимальное снижение температуры стен и покрытия кабины с МИФС на 6 °C и 11 °C соответственно» [13].

«H. Alqallaf и E. Alawadhi [59] для включения макрокапсулированного МИФС 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 МИФС. Для рассмотренных в работе случаев тепловой поток на внутренней поверхности крыши снижался на 9% – 17% в зависимости от выбранного МИФС (парафины A28, A32 и A39 от PlusICE), времени и месяца» [13].

«L. Royon, L. Karim и A. Bontemps [60] заполняли созданный композиционный МИФС в уже существующие пустоты в бетонной плите перекрытия, с постановкой эксперимента в реальных условиях и с компьютерным моделированием в COMSOL Multiphysics. Авторы при высокой температуре ($>100^{\circ}\text{C}$) смешали парафиновый МИФС 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» [13].

«A. Pasupathy и R. Velraj [61] изучали влияние МИФС в конструкции крыши посредством математической модели и эксперимента. Материалом с фазовым переходом – эвтектиком с температурой фазового перехода 26–28°C и с теплотой плавления 188 кДж/кг – заполнили панель из нержавеющей стали,

которая была размещена между верхней кровельной плитой и нижней бетонной плитой. Авторами был 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» [13].

«Другой способ размещения МИФС в крыше был предложен Н.-М. Chou. C.-R. Chen, и V.-L Nguyen. В их эксперименте участвовали кровельные гофрированные листы, между которыми был макрокапсулирован МИФС [62]» [13].

В [63] авторы определяли оптимальную толщину слоя МИФС в свето-прозрачной ограждающей конструкции, исследовав окно, стеклопакет которого был заполнен коммерческим материалом с изменяющимся фазовым состоянием маркой RT27 (окно с МИФС), и окно, стеклопакетом которого был заполнен воздухом (обычное окно), используя численное моделирование и две экспериментальные установки.

Первая установка представляла собой две изолированные камеры, которые помещались в естественную окружающую среду. На внешней границе камер внутри установки располагались модели окон: в одной камере – модель окна с МИФС, во второй – модель обычного окна. Камеры были ориентированы окнами на юг.

Регистрировалась температура воздуха в камерах и на внутренней поверхности остеклений. На внешней поверхности установки измерялось количество поступающей солнечной радиации и температура наружного воздуха. Пиковое значение радиации на вертикальную плоскость за время исследования составило 500 Вт/м², а средняя температура наружного воздуха равнялась 25°C.

Вторая установка также состояла из двух камер, между которыми помещалась модель окна, но температура в блоках регулировалась искусственно. В одном из блоков температура изменялась синусоидально, от 17°C до 35°C в

течении 24 часов, путем подачи нагретого потока воздуха. В другом изолированном блоке поддерживалась постоянная температура воздуха (24°C). Регистрировалась температура воздуха на внутренней поверхности остекления, которая соприкасалась с воздухом изолированного блока.

Таким образом, теплопередача в первой установке осуществлялась посредством излучения, конвекции и теплопроводности, тогда как теплопередача во второй установке была реализована только через конвекцию и теплопроводность, что может быть характерно для некоторых окон, выходящих на север. Толщина стекол и камеры во всех натурных моделях окон равнялась 4 и 12 мм соответственно.

В численном эксперименте расчетная модель теряла или получала тепло от внутренней и внешней среды за счет излучения, конвекции и теплопроводности. При этом был введен ряд допущений, в том числе отсутствие эффекта гистерезиса у материала с изменяющимся фазовым состоянием. Толщина стекол в расчетной модели равнялась 4 мм, а расстояние между стеклами варьировалось от 6 до 30 мм. Температура внешней среды менялось по синусоиде, от 17°C до 35°C в течении 24 часов, а температура внутренней среды оставалась постоянной (24°C).

В обоих случаях (с излучением и без него), авторы наблюдали более низкую амплитуду температуры на внутренней поверхности остекления при заполнении пространства между стеклами материалом с изменяющимся фазовым состоянием, а не воздухом. В целом, при использовании МИФС, пиковая температура уменьшилась примерно на 3°C , а задержка повышения температуры во время плавления составила 3 часа. После завершения процесса плавления авторами отмечен резкий рост температуры, в основном за счет излучения.

Варьируя толщину стеклопакета, авторы сделали вывод о том, что в случае наличия излучения оптимальная толщина слоя МИФС составляет 24 мм,

а в случае отсутствия излучения – 19 мм, т.к. большая толщина приведет к тому, что не вся жидккая фаза перейдет в твердую до начала нового процесса плавления на следующий день. По мнению авторов исследования, плохая прозрачность твердой фазы может ограничить применение материалов с изменяющимся фазовым состоянием в светопрозрачных ограждающих конструкциях.

Коллектив авторов [64] исследовал солнцезащитные устройства на основе материалов с изменяющимся фазовым состоянием и некоторые аспекты использования МИФС в светопрозрачных конструкциях, интегрировав их в поликарбонатные панели. Панели размещались на внешней поверхности двойного остекления в стене испытательной камеры, температура в которой поддерживалась на уровне 26°C, камеры находились на крыше здания, расположенного в умеренно субконтинентальном климате на северо-западе Италии.

Проводились две серии измерений температуры внутренней поверхности остеклений. В первой серии участвовали панели синего, зеленого и опалового цветов, заполненные одним и тем же парафиновым МИФС марки Р35. Все материалы с изменяющимся фазовым состоянием имели температуру фазового перехода в диапазоне 31-36°C, для того, чтобы обеспечить осуществление фазовых переходов в течении всех дней исследования. Контрольной в этой серии являлась пустая прозрачная панель.

Во второй серии измерений, три зеленые панели заполнялись парафиновым материалом Р35, солевым гидратом SH31 и органическим МИФС В35, а контрольной являлась пустая зеленая поликарбонатная панель.

Двойное остекление состояло из прозрачного стекла толщиной 6 мм, низкоэмиссионного стекла толщиной 6 мм и пространством между ними толщиной в 15 мм, заполненного аргоном.

В первой серии измерений, поликарбонатные панели всех трех цветов (синего, зеленого и опалового) оказали положительное влияние на температуру внутреннюю поверхности остеклений, максимально снизив ее примерно на 5°C (зеленая и опаловая панели) по сравнению с контрольной панелью. Задержка температуры составила около 3 часов. Величина теплового потока была снижена на 30% при использовании зеленой и серебристо-голубой панели, и на 50% при использовании синей панели.

Во второй серии измерений, все три типа МИФС способствовали сокращению тепловой энергии, проходящей сквозь панели, но немного лучшую производительность продемонстрировала панель с солевым гидратом.

Анализируя фотографии панелей, сделанные во время первой серии измерений, авторы сделали вывод, что материалы с изменяющимся фазовым состоянием в жидкой фазе казались совершенно прозрачными, без дефектов и пузырьков воздуха. Процесс плавления МИФС происходил постепенно, начиная с концов панелей. Паракфин в синей панели расплавился быстрее, а синяя и зеленая панель обеспечили более лучшую освещенность камер в то время, когда МИФС плавился или находился в жидкой фазе.

Во второй серии измерений, лучшую однородность в обоих фазах продемонстрировал органический материал с фазовым переходом. Во время изменения фазы этот МИФС равномерно образовывал небольшие агломераты, которые были распределены по всей панели поликарбоната. Худшая однородность оказалось у солевого гидрата: в жидким состоянии он казался мутным и включал большое количество пузырьков воздуха; его кристаллизация происходила неконгруэнтно с образованием кристаллов разного размера. Паракфиновый же материал с фазовым переходом показал наилучшую прозрачность в жидкой фазе среди всех других МИФС.

Авторы считают, что основным недостатком реализации светопрозрачных конструкций при помощи панелей с МИФС является ухудшение вида панелей из-за сильной неоднородности материала с фазовым переходом, которая проявляется, когда материал находится как в твердой, так и в жидкой фазе, и предполагают, что использование более усложненной конструкции с несколькими панелями с МИФС, рассчитанными на разные температуры фазового перехода, не только увеличит диапазон рабочих температур затенения, но и устранит этот недостаток.

1.6 Исследования МИФС в климатических условиях г. Красноярска

В [65] исследовалась зависимость между тепловым потоком и характеристиками материала с изменяющимся фазовым состоянием, имевшим температуру фазового перехода 0°C , и который был расположен на внешней поверхности наружной стены. Температура наружного воздуха была взята по данным метеостанции вблизи г. Красноярска. Анализировалось оказываемое на среднюю годовую величину теплового потока влияние четырех количественных факторов (толщина МИФС, количество скрытой теплоты, C^* и λ^*), значения которых варьировались на трех уровнях (таблица 2).

Таблица 2 – Значения варьируемых факторов в натуральных и кодированных единицах

Уровень	Толщина МИФС		Скрытая теп- лота		C^*		λ^*	
	см	код. ед.	Дж/кг	код. ед.	—	код. ед.	—	код. ед.
1	1	-1	166500	-1	1	-1	1,5	-1
2	2	0	249750	0	1,5	0	1,75	0
3	3	+1	333000	+1	2	+1	2	+1

В таблице 1 безразмерные входные параметры C^* и λ^* – это отношение теплофизических характеристик материала с фазовым переходом в различных фазах:

$$C^* = \frac{C_L}{C_S}, \quad (1)$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda_S}{\lambda_L}, \quad (2)$$

где C_S , λ_S – теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала соответственно в жидкому состоянии;

C_L , λ_L – теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала соответственно в кристаллическом состоянии.

Т.к. полученное уравнение регрессии оказалось сложным для интерпретации, была задействована встроенная в программный пакет STATISTICA функция желательности, т.е. был осуществлен перевод значений теплового потока (зависимая переменная, или выходной параметр) и соответствующих ему значений характеристик МИФС (входные параметры) в единую безразмерную числовую шкалу с фиксированными границами. При этом граничные значения функции, 0 и 1, соответствовали градации «плохо – хорошо». За нулевое значение функции принято максимальное (по модулю) значение теплового потока, а за единичное значение – минимальное (по модулю), как наиболее желательное. Полученные графики функции желательности представлены на рисунке 7.

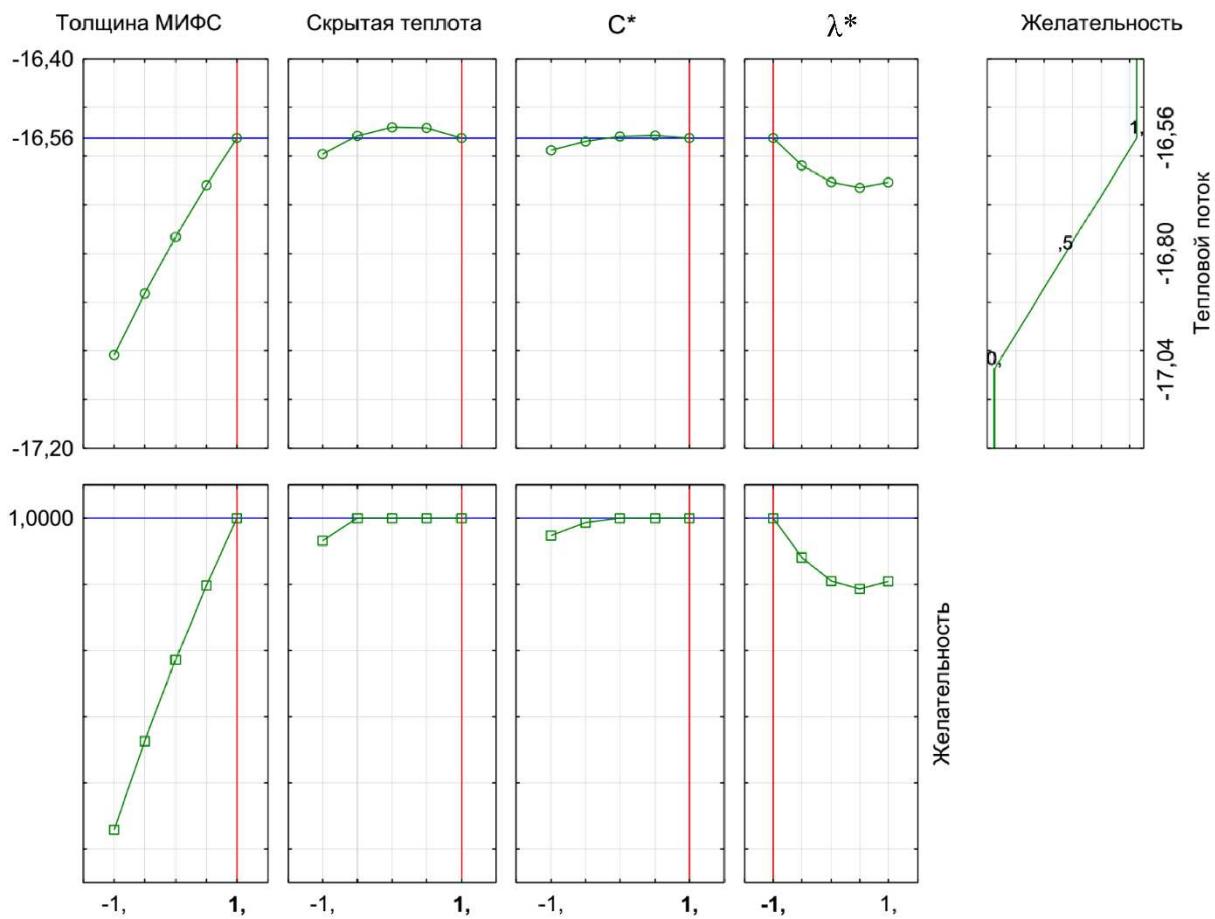


Рисунок 7 – Наиболее желаемые уровни факторов [65]

Согласно графикам, для такого фактора, как толщина МИФС, наиболее оптимальным оказался третий уровень (что соответствует натуральному значению 3 см); для фактора скрытая теплота третий уровень (333000 Дж/кг), для отношения теплоемкостей C^* третий уровень (2) и для отношения коэффициентов теплопроводности λ^* первый уровень (1,5).

1.12 Выводы

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

Большинство исследований проведено в регионах с теплым климатом, направлено на повышение эффективности кондиционирования и не учитывает температурный гистерезис – несовпадение температур плавления и кристаллизации. Вопрос о поведении ограждающих конструкций с МИФС в условиях преобладания отрицательных температур с учетом эффекта гистерезиса остается открытым. Таким образом, актуальным представляется решение задачи создания композиций МИФС для применения при пониженных температурах, а также расчета фазовых переходов с учетом температурного гистерезиса.

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

Глава 2. Программные комплексы. Приборы и оборудование

Для определения величин тепловых потоков, проходящих через внутреннюю поверхность ограждающих конструкций, использовался программный продукт Comsol Multiphysics. Он представляет собой интерактивную среду для расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на

дифференциальных уравнениях в частных производных, методом конечных элементов [66]. Благодаря модулю Теплопередача, входящий в состав этого продукта, задание теплообмена возможно теплопроводностью, конвекцией и излучением [67].

2.1 Исходные данные

2.1.1 Климатические параметры

В таблице 3 представлены значения краевых условий, которые были использованы при моделировании нестационарной работы ограждающих конструкций.

Таблица 3 – Границные условия

Наименование	Показатель	Обоснование
Плотность теплового потока на наружной поверхности $q_h = \alpha_h \cdot \Delta t$	$\alpha_h=23$ Вт/(м ² ·К)	Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности, α_h : табл. 6 СП 50.13330.2012 [5]
Температура внутренней поверхности, t_b	17 °C	– нормируемый температурный перепад $\Delta t_h=4^{\circ}\text{C}$ (табл. 5 СП 50.13330.2012) – температура внутреннего воздуха $t_b=21^{\circ}\text{C}$ (п. 5.2 СП 50.13330.2012 и табл. 1 ГОСТ 30494-2011 [68])
Наружная температура, t_h	$f(\tau) ^{\circ}\text{C}$	данные метеостанции [69] в черте г. Красноярска

График распределения температуры наружного воздуха по времени расчета показан на рисунке 8.

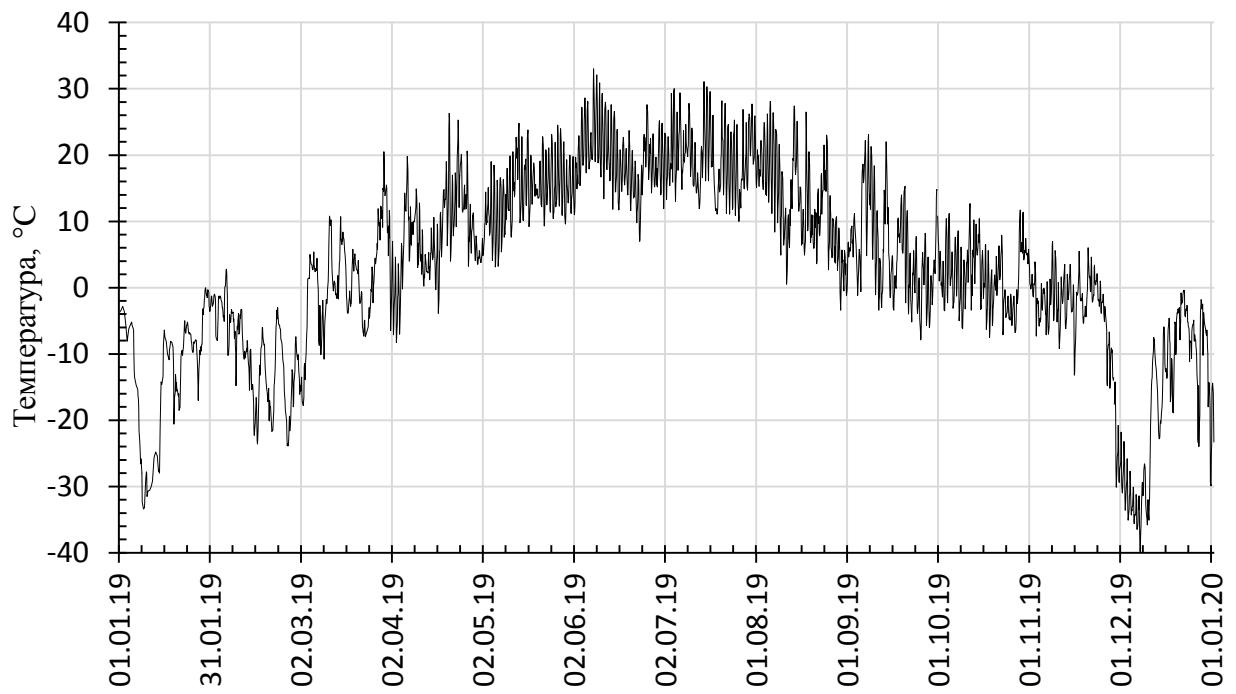


Рисунок 8 – Распределение температуры наружного воздуха по времени расчета

2.1.2 Характеристики материалов

Значения теплофизических характеристик строительных материалов были приняты согласно СП «Тепловая защита зданий» (таблица 3). Такие значения характеристик материалов с изменяющими фазовым состоянием, как плотность, теплоемкость, теплопроводность, температуры плавления и кристаллизации и количество скрытой теплоты, были взяты из каталогов [20-30] производителей МИФС. Часть из них представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Учитываемые свойства строительных материалов

Полное наименование	Плотность ρ_0 , кг/м ³	Удельная теплоемкость c_0 , кДж/(кг·°C)	Теплопроводность λ_A , Вт/(м ² ·°C)
Кирпичная кладка из сплошного глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе	1800	0,88	0,7
Плиты минераловатные из каменного волокна	180	0,84	0,045

2.2 Математическое описание тепло- массопереноса

Тепловое поле на данный момент времени t в декартовых координатах (x, y, z) будет определяться функцией распределения температуры T

$$T = T(x, y, z, t) \quad (1)$$

Распределение температуры в точках среды в различные моменты времени определяется из уравнения теплопроводности. В частных производных, уравнение теплопроводности в твердых телах будет иметь вид [70]

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + f, \quad (2)$$

где c – удельная теплоемкость среды;

ρ – плотность среды;

λ – коэффициент теплопроводности;

$\operatorname{grad} T$ – градиент температуры;

f – мощность внутренних источников теплоты.

Теплофизические свойства могут зависеть от температуры: $c = c(T)$, $\rho = \rho(T)$, $\lambda = \lambda(T)$ и $f = f(T)$, в случае неоднородной среды – от точки пространства: $c = c(T)$, $\rho = \rho(T)$, $\lambda = \lambda(T)$ и $f = f(T)$.

В случае однородной среды, уравнение (2) упрощается и принимает вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \Delta T + \frac{f}{c\rho}, \quad (3)$$

где $\alpha = \lambda/(c\rho)$ – коэффициент температуропроводности;

$\Delta = \operatorname{div} \operatorname{grad}$ – оператор Лапласа.

Процесс массопереноса может быть описан с помощью уравнения диффузии. Уравнение диффузии в случае независимости коэффициента диффузии D от координаты ($D \neq D(x,y,z)$) и, соответственно, от концентрации C ($D \neq D(C)$)

$$\frac{\partial C(x,y,z,t)}{\partial t} = D \Delta c(x, y, z, t). \quad (4)$$

2.3 Математическое описание фазовых превращений

В работе решалась задача замораживания и оттаивания материалов с изменяющимися фазовым состоянием. Решение такой задачи с отслеживанием границы раздела фаз по времени было представлено Стефаном.

2.3.1 Задача Стефана

В классической форме задача Стефана формулируется следующим образом [70, 9]. Рассматривается пространственная область Ω , содержащая две

подобласти: Ω_S (чистое вещество в твердой фазе) и Ω_L (чистое вещество в жидкой фазе). Фазовый переход осуществляется при постоянной заданной температуре T^* на границе раздела фаз $S = S(t)$ – поверхности фазового перехода, где

$$T(x, y, z, t) = T^*. \quad (5)$$

Уравнение теплопроводности для твердой фазы идентично (2)

$$c_S \rho_S \frac{\partial T_S}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_S \operatorname{grad} T) + f_S, \quad (6)$$

где нижний индекс « S » указывает на принадлежность соответствующих теплофизических характеристик к твердой фазе.

Уравнение теплопроводности для жидкой фазы, при учете наличия конвективного переноса в ней

$$c_L \rho_L \left(\frac{\partial T_L}{\partial t} + v \operatorname{grad} T \right) = \operatorname{div}(\lambda_L \operatorname{grad} T) + f_L, \quad (7)$$

где нижний индекс « L » указывает на принадлежность теплофизических характеристик к твердой фазе;

v – локальная скорость среды.

Т.к. фазовый переход сопровождается выделением/поглощением некоторого количества тепла, тепловой поток на границе фазового перехода разрывен и равен

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right] = -LV_n, (x,y,z) \in S, \quad (8)$$

где L – теплота фазового перехода;

V_n – скорость движения границы фазового перехода по нормали к поверхности S n .

Другим условием Стефана является условие непрерывности температуры на границы контакта двух сред, т.е. скачок температуры равен нулю

$$[T] = 0, (x,y,z) \in S. \quad (9)$$

В обобщенной формулировке условия (5), (8) и (9) включены в уравнение теплопроводности, а учет теплоты фазового перехода эквивалентен заданию эффективной теплоемкости [70]

$$(C\rho + L\delta(T - T^*)) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \nu \operatorname{grad} T \right) = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + f, \quad (10)$$

где δ – функция, определяющая границу S .

В многокомпонентных средах, где фазовый переход одного вещества (одних веществ) может происходить при температуре, отличной от температуры фазового перехода другого вещества (других веществ), в определенном интервале температур будет образовываться двухфазная зона Ω_{SL} , где одна часть веществ будет находиться в жидкому состоянии, а другая часть – в твердом. При малой ширине двухфакторной зоны, можно ограничиться предположением о заданной зависимости температуры фазового перехода всех компонентов от промежуточной концентрации какого-либо одного компонента C^1 [70]

$$T(x, y, z, t) = T^*(C^l), (x, y, z) \in S(t). \quad (11)$$

2.3.2 Численное решение задачи Стефана

Обычно для численного решения задачу сводят к однофазной без непосредственного моделирования границы раздела фаз. Для этого используют энталпийный подход или метод эффективной теплоемкости [9].

Учитывая, что теплоемкость C – частная производная энталпии H по температуре при постоянном давлении $C = (\frac{\partial H}{\partial T})_P$, а конвективным переносом тепла в МИФС можно пренебречь [71], уравнение теплопроводности для обоих фаз записывают в виде

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + f. \quad (12)$$

Энталпийный подход основан на изменении энталпии в области фазового перехода на величину скрытой теплоты. Можно рассматривать связь энталпии и температуры как линейную [72]

$$T = a + b \cdot H, \quad (13)$$

где a – коэффициент, принимающие значения a_1, a_2, a_3 в зависимости от фазы вещества;

b – коэффициент, принимающие значения b_1, b_2, b_3 в зависимости от фазы вещества.

Отслеживание фазы вещества (жидкая, твердая, смешанная) может вестись по заданным значениям энталпии, характеризующим начало и завершение фазового перехода

$$\begin{cases} a = a_1, b = b_1 & H < H_{sol} \text{ (твердая фаза),} \\ a = a_2, b = b_2 & H_{sol} \leq H \leq H_{liq} \text{ (смешанная фаза),} \\ a = a_3, b = b_3 & H > H_{liq} \text{ (жидкая фаза).} \end{cases} \quad (14)$$

где H_{liq} – энталпия, соответствующая температуре ликвидуса;

H_{sol} – энталпия, соответствующая температуре солидуса.

Во втором методе, используется эффективная теплоемкость C_{eff} , которая заменяет удельную теплоемкость в уравнении теплопроводности (2)

$$C_{eff}(T) = \begin{cases} C_s, & T < T_{sol}, \\ \frac{L}{T_{liq}-T_{sol}} + \frac{C_{liq}+C_{sol}}{2}, & T_{sol} \leq T \leq T_{liq}, \\ C_L, & T > T_{liq}. \end{cases} \quad (15)$$

Глава 3. Определение оптимальной конфигурации конструкции на основе МИФС

3.1 Экспериментальное исследование фазового перехода воды

Для решения задачи был использован метод кажущейся теплоемкости [73]. Критерием верификация алгоритма являлась сходимость экспериментальной термограммы, полученной в ходе цикла плавления-кристаллизации МИФС, с термограммой, полученной путем численного моделирования этого цикла. В качестве МИФС была выбрана дистиллированная вода.

Для эксперимента была собрана установка, состоящая из шара для настольного тенниса, наполненного водой, и температурных датчиков (рисунок 9).

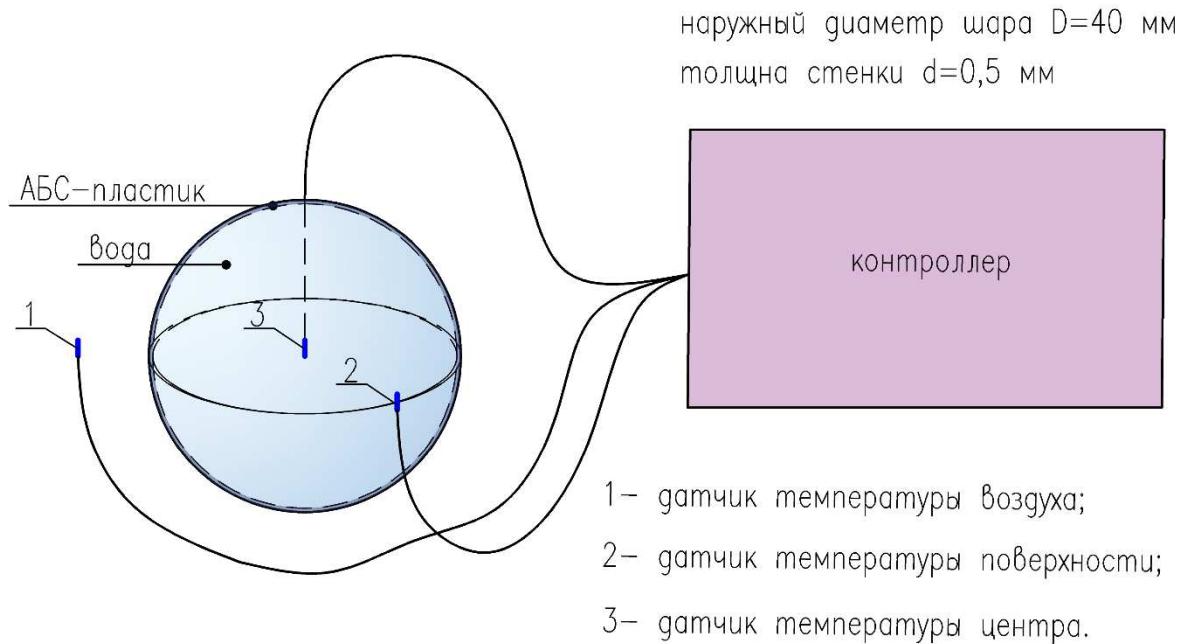


Рисунок 9 – Схема экспериментальной установки

Шар был помещен в среду с температурой ниже температуры кристаллизации, а после завершения кристаллизации – в среду с температурой выше температуры плавления. Термопары фиксировали температуру воздуха, температуры на наружной поверхности и в центре шарика. Результаты эксперимента показаны на рисунке 10.

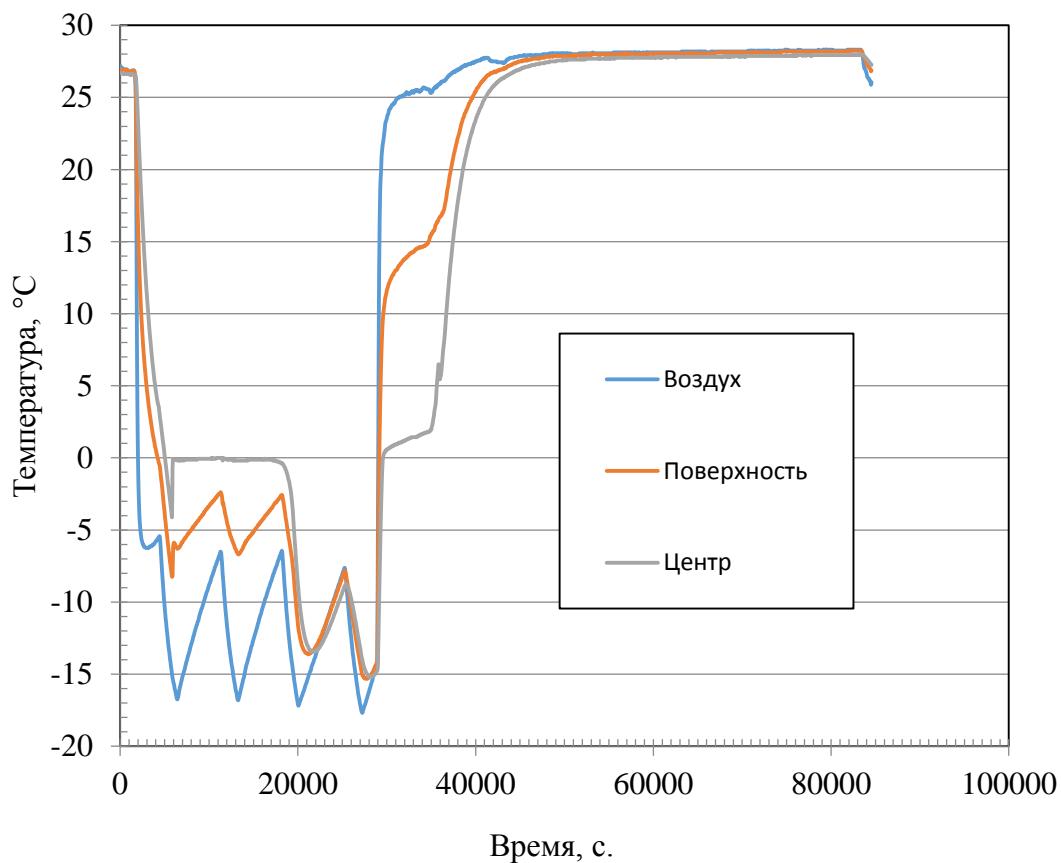


Рисунок 10 – Графики температур

Как видно из рисунка 10, температура кристаллизации не совпадает с температурой плавления – имеет место температурный гистерезис. Гистерезис был учтен при численном моделировании в целях более точного вычисления температуры в центре шарика.

Также на рисунке показано, что до начала процесса кристаллизации, температура в центре шара опустилась ниже температуры замерзания воды. Этот эффект переохлаждения, который свойственен для воды, не характерен для большинства искусственных материалов, поэтому он не рассмотрен в дальнейшей работе.

3.2 Разработка методики численного расчета с учетом гистерезиса и верификация эксперимента с численным расчетом

Численное моделирование гистерезиса осуществлялось в программе Comsol Multiphysics с построением расчетной модели в одномерной рабочей области. Геометрия модели была представлена тремя отрезками (рисунок 11). Температура в точках А и D представляла функцию от времени $T(t)$, точно повторяющую график температуры на поверхности шара (рисунок 10).

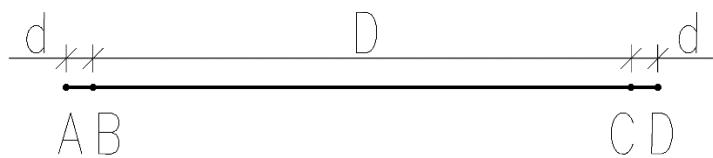


Рисунок 11 – Геометрия расчетной модели

Чтобы смоделировать фазовый переход, была введена переменная $SorL$, которая показывала, в жидкой ($SorL=0$) или в твердой фазе ($SorL=1$) находится МИФС. Эта переменная находилась для каждого элемента и для каждого временного шага

$$SorL(T_i) = \begin{cases} 0 & \text{при } T_i > T_{\text{top}}, \\ 1 & \text{при } T_i < T_{\text{bot}}, \\ SorL(T_{i-1}) & \text{при } T_{\text{bot}} \leq T_i \leq T_{\text{top}}, \end{cases} \quad (16)$$

где T_i – текущая температура в элементе;

T_{i-1} – температура на предыдущем временном шаге;

T_{top} – температура, при которой полностью завершается поглощение теплоты в процессе плавления;

T_{bot} – температура, при которой полностью завершается выделение теплоты в процессе кристаллизации.

Температура Т вычислялась по уравнению теплопроводности в твердых телах (2). Темпера́тура фазового перехода задавалась изменением теплоемкости МИФС С

$$C = S_{oL} \cdot d \frac{H_{StoL}(T)}{T} + (1 - S_{oL}) \cdot d \frac{H_{LtoS}(T)}{T}, \quad (17)$$

где $H_{StoL}(T)$ и $H_{LtoS}(T)$ – функции энталпии плавления и кристаллизации соответственно.

Т.к. петля гистерезиса, образованная наложением кривых энталпий, приблизительно имеет вид, показанный на рисунке 12, выделение/поглощение скрытой теплоты происходит в некотором интервале температур dT_{LtoS} (в случае кристаллизации) и dT_{StoL} (в случае плавления). По этой причине функции энталпий распределяли скрытую теплоту в небольшом температурном промежутке, с привязкой к температуре кристаллизации T_{freeze} и плавления T_{melt}

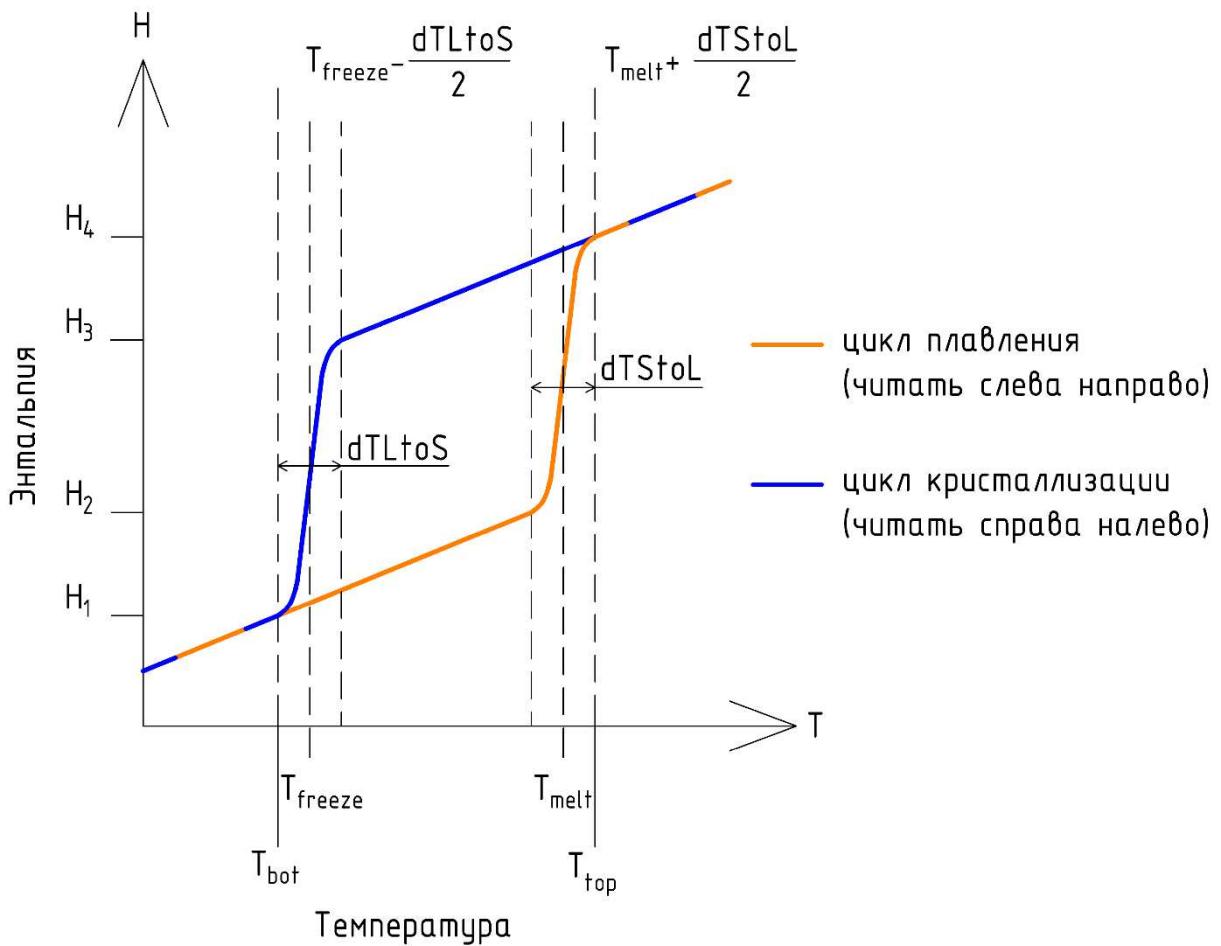


Рисунок 12 – Петля гистерезиса

Из схематического изображения петли гистерезиса следуют формулы определения температуры, ниже которой выделение энергии невозможно (T_{bot}), и температуры, выше которой поглощение энергии невозможно (T_{top})

$$dT_{LtoS} = 2 \cdot (T_{freeze} - T_{bot}), \quad (18)$$

$$dT_{StoL} = 2 \cdot (T_{top} - T_{melt}). \quad (19)$$

Для выбранного МИФС по рисунку 10 и по формулам (18) и (19) были найдены необходимые для расчета характеристики (таблица 5).

Таблица 5 – Некоторые свойства воды и льда, используемые в расчете

Наименование	Значение, °C
Tfreeze	-0,28
Tmelt	1.44
dTLtoS	0.56
dTStoL	0.2
Ttop	1.45
Tbot	-0.56

Функция энталпии кристаллизации

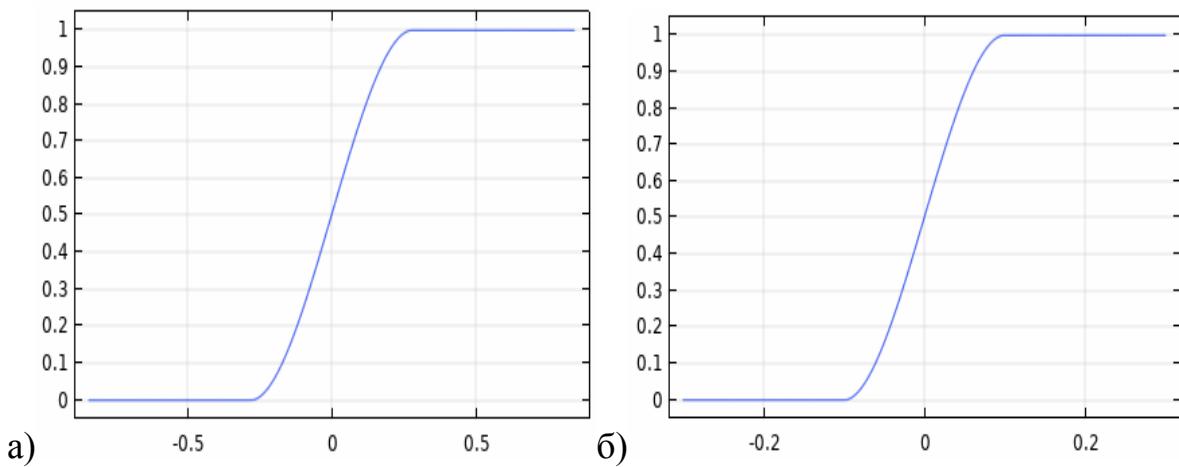
$$HLtoS(T) = C_L \cdot T + LH \cdot \text{step1} \cdot (T - T_{\text{freeze}}), \quad (20)$$

где $C_L = 4,2 \text{ кДж/(кг} \cdot {^\circ}\text{C)}$ – удельная теплоемкость воды [74];
 $LH = 335 \text{ кДж/кг}$ – теплота кристаллизации [74];
 step1 – сглаживающая функция (рисунок 13, а).

Функция энталпии плавления

$$HStoL(T) = C_S \cdot T + LH \cdot \text{step2} \cdot (T - T_{\text{melt}}), \quad (21)$$

где $C_S = 2,1 \text{ кДж/(кг} \cdot {^\circ}\text{C)}$ – удельная теплоемкость льда [74];
 $LH = 335 \text{ кДж/кг}$ – теплота плавления [74];
 step2 – сглаживающая функция (рисунок 13, б).



а) зависимость скрытой энергии (в долях единицы) от разницы между текущей температурой и температурой фазового перехода при кристаллизации б) тоже, при плавлении

Рисунок 13 – Функции сглаживания step1 и step2 для данного МИФС

Изменение коэффициента теплопроводности МИФС λ при переходе из одной фазы в другой происходило согласно системе уравнений

$$\lambda = \begin{cases} f_1(T) & \text{при } \text{SorL} = 0, \\ f_2(T) & \text{при } \text{SorL} = 1, \\ \lambda_s \cdot \text{SorL} + \lambda_L \cdot (1 - \text{SorL}) & \text{во всех остальных случаях,} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{при } T \leq T_{\text{bot}} + dT_{\text{LtoS}} \text{ и } T > T_{\text{bot}}, \\ \text{при } T \geq T_{\text{top}} - dT_{\text{StoL}} \text{ и } T < T_{\text{top}}, \\ \end{array} \quad (22)$$

где $\lambda_L = 0,56 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ – теплопроводность жидкой фазы [74];

$\lambda_s = 2,22 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ – теплопроводность твердой фазы [74];

$f_1(T) = (-1.66 * T + 180.59)/dT_{\text{LtoS}}$ – линейная зависимость теплопроводности от температуры при кристаллизации для данного МИФС;

$f_2(T) = (-1.66 * T + 182.95)/dT_{\text{StoL}}$ – линейная зависимость теплопроводности от температуры при плавлении для данного МИФС.

Формула плотности МИФС

$$\rho_S \cdot \text{SorL} + \rho_L \cdot (1 - \text{SorL}), \quad (23)$$

где $\rho_S = 917 \text{ кг/м}^3$ – плотность льда [74];

$\rho_L = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды [74].

Плотность, теплопроводность и теплоемкость материала стенки теннисного шара показана в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики АБС-пластика

Наименование	Значение по данным [75]
Плотность	1030 кг/м ³
Коэффиц. теплопроводности	0,13 Вт/(м ² ·°C)
Теплоемкость	1300 Дж/(кг·°C)

Сравнением графиков температур по времени (рисунок 14) установлено, что предложенный алгоритм учета фазового перехода хорошо описывает экспериментальную кривую.

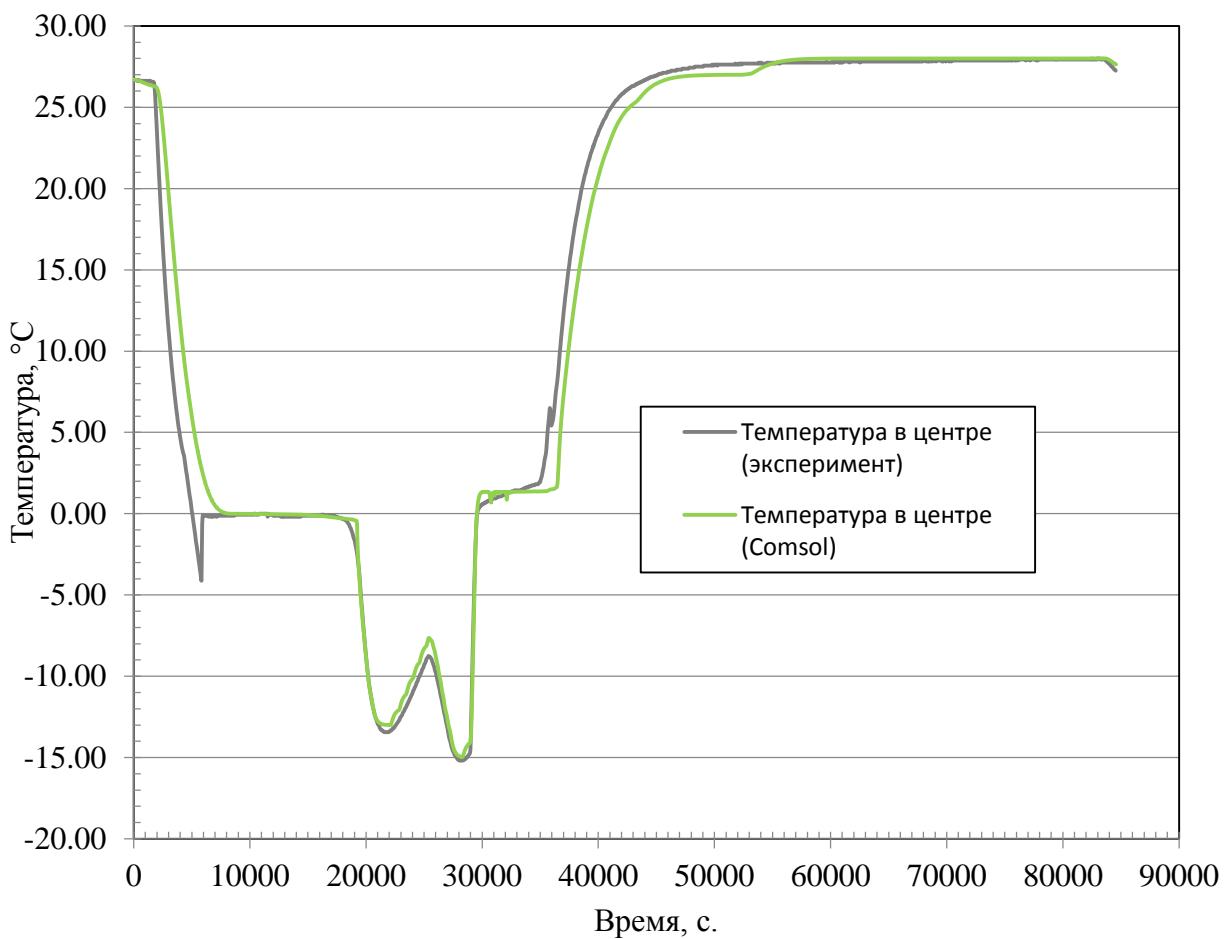


Рисунок 14 – Сравнение температур в центре шара

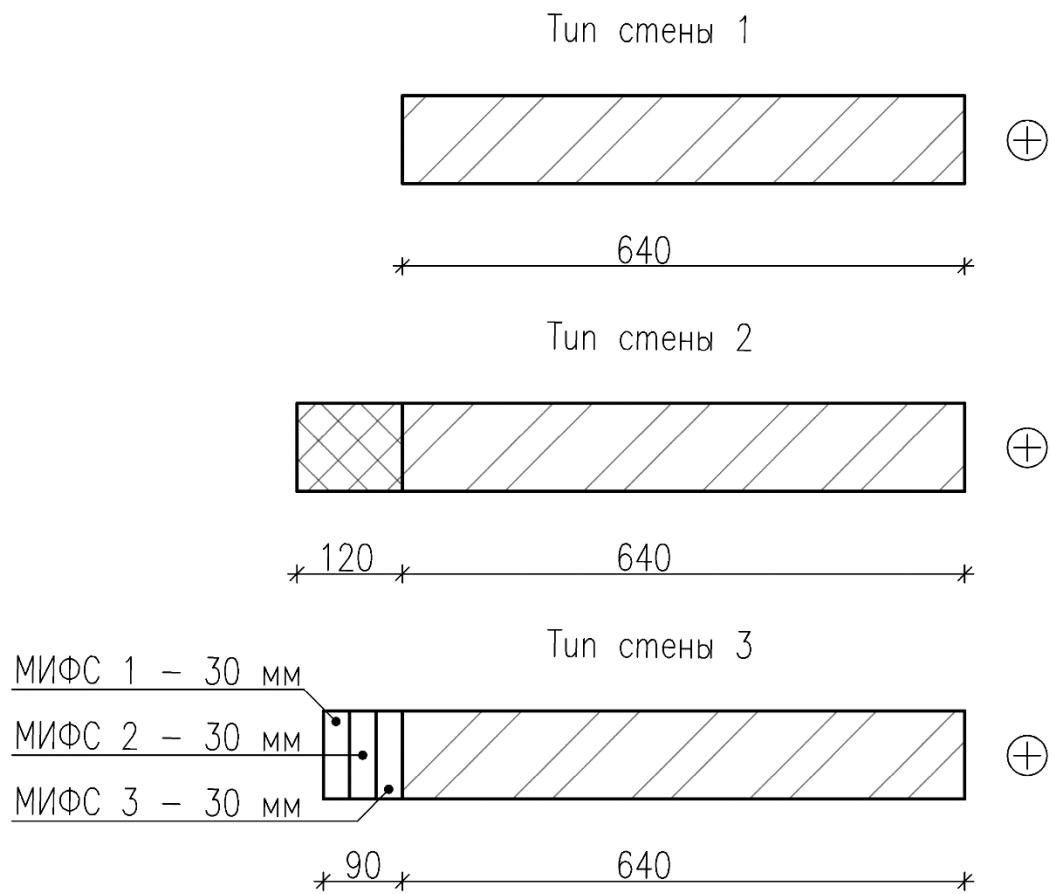
3.3 Расчет количества теплоты, проходящее через стены за сутки, при температуре наружного воздуха, изменяющемся в интервале T_{bot} и T_{top}

Для исследуемых типов стен (рисунок 15) были заданы синусоидальные температуры наружного воздуха с амплитудой A равной $10,5^{\circ}\text{C}$, $16,5^{\circ}\text{C}$, $23,5^{\circ}\text{C}$, $30,5^{\circ}\text{C}$ (рисунок 16). Было решено вначале сосредоточиться прежде всего на фазовых переходах с отрицательными температурами. Анализируя годовой ход температур в г. Красноярске (рисунок 8), по каталогом [20-30] были выбраны МИФС с наиболее подходящими температурами плавления и кристаллизации. Характеристики материалов с изменяющимся фазовым состоянием сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Характеристики МИФС

Наименование	МИФС 1 [26]	МИФС 2 [26]	МИФС 3 [26]
Марка	HS23N	HS15N	HS10N
T_{melt} , °C	-21,0	-15,0	-10,0
T_{freeze} , °C	-23,0	-16,0	-10,0
L , кДж/кг	262	308	290
C_S , кДж/(кг·°C)	1,58	1,87	1,90
C_L , кДж/(кг·°C)	3,40	3,40	3,40
λ_S , Вт/(м ² ·°C)	4,976	5,26	4,25
λ_L , Вт/(м ² ·°C)	0,702	0,53	0,602
ρ_S , кг/м ³	1078	1016	1057
ρ_L , кг/м ³	1140	1070	1125
dT, °C	1	1	1

Количество энергии, проходящее сквозь ограждения, показано на рисунках 17-20. Температура стен в начальный момент времени составила 10 °C.



- а) кирпичная кладка неутепленная
- б) кирпичная кладка утепленная мин. ватой
- в) кирпичная кладка с МИФС

Рисунок 15 – Основные варианты наружной стены

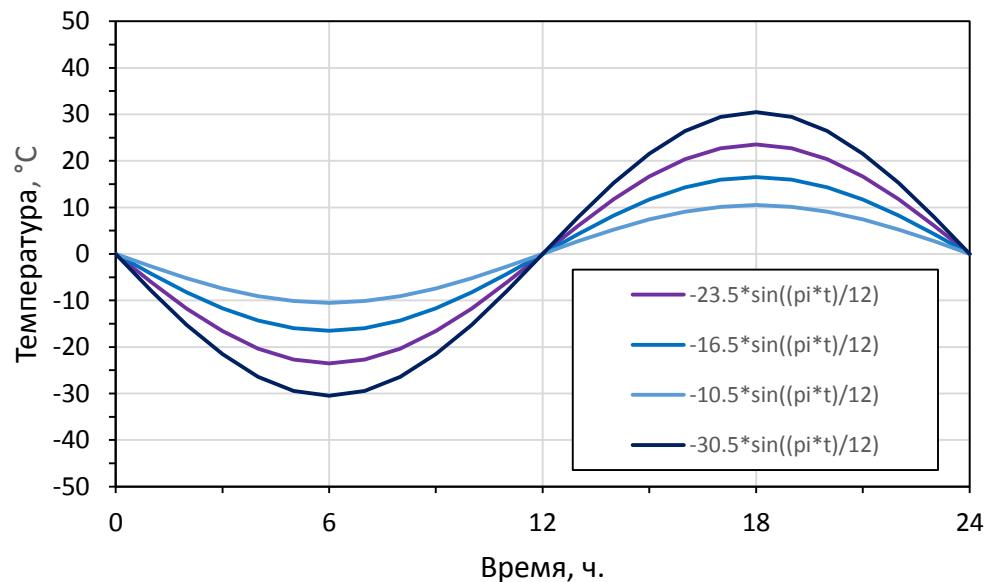


Рисунок 16 – Один период температуры на внешней границе стен

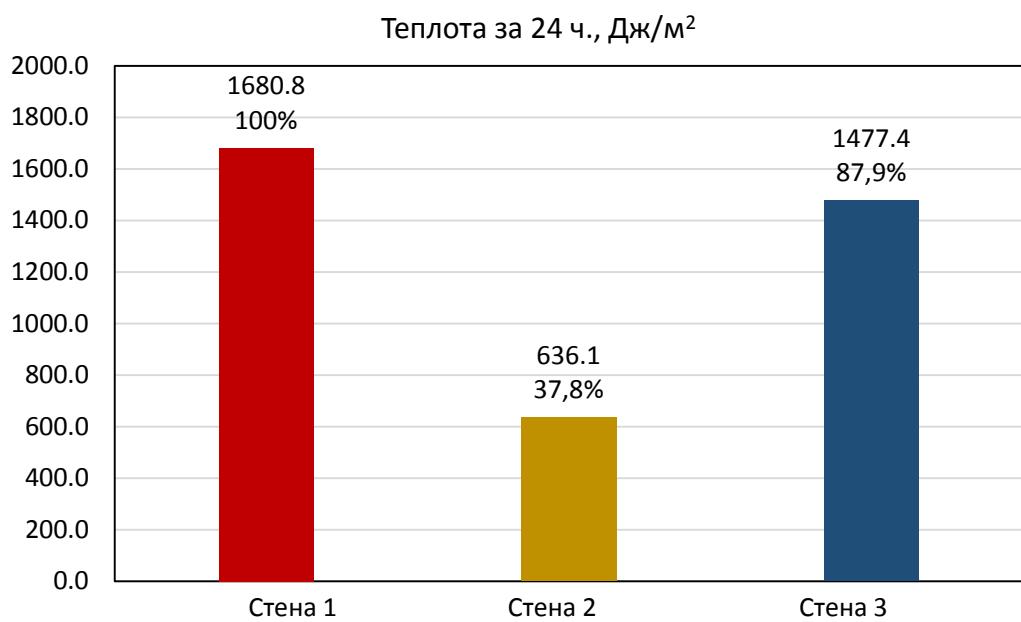


Рисунок 17 – Количество теплоты за 24 часа ($A=10,5^{\circ}\text{C}$)

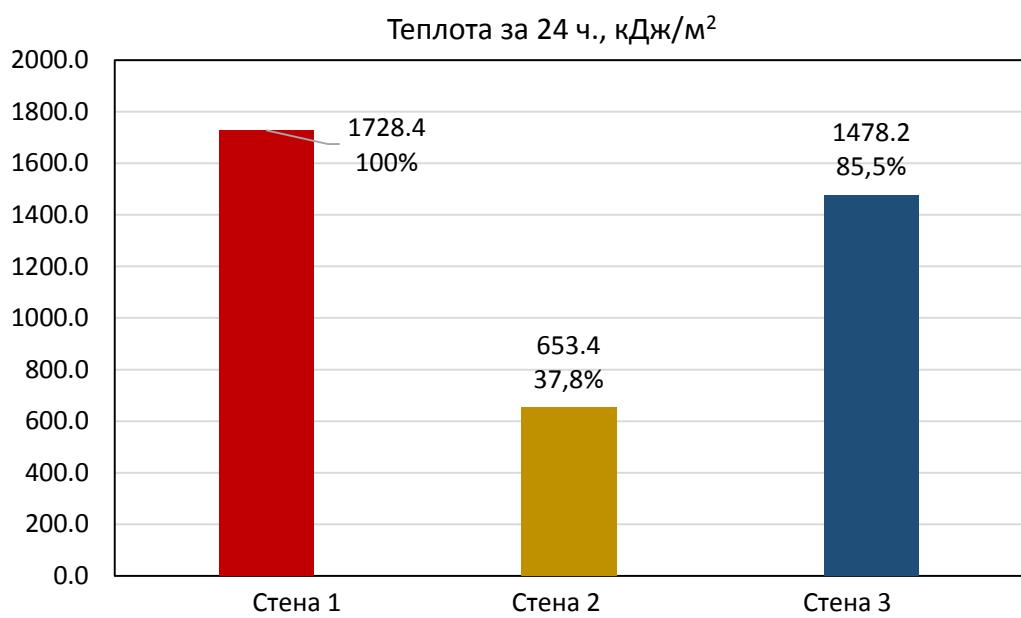


Рисунок 18 – Количество теплоты за 24 часа ($A=16,5^{\circ}\text{C}$)

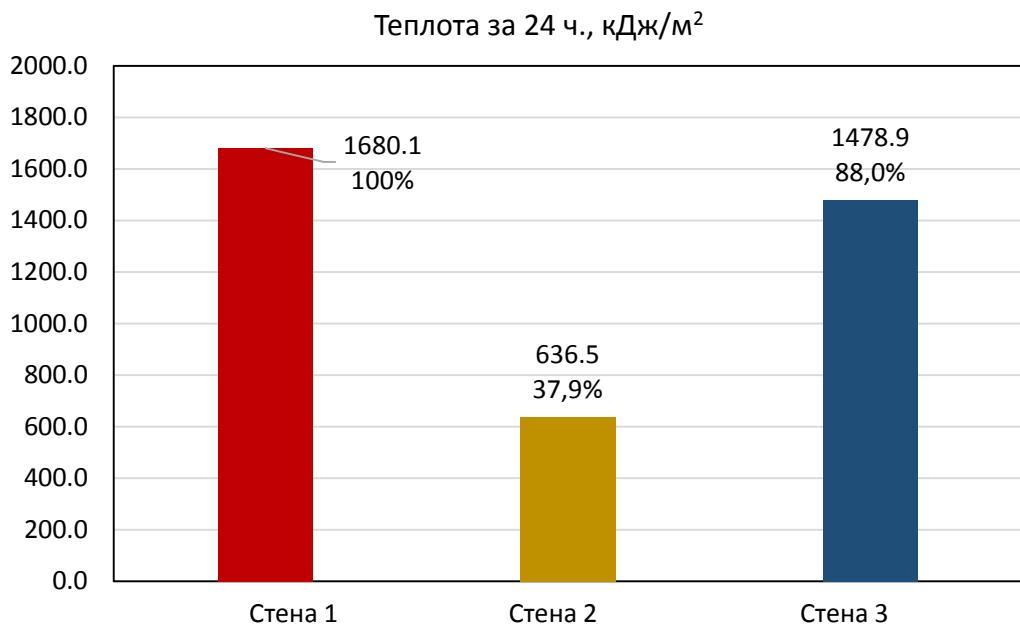


Рисунок 19 – Количество теплоты за 24 часа ($A=23,5^{\circ}\text{C}$)

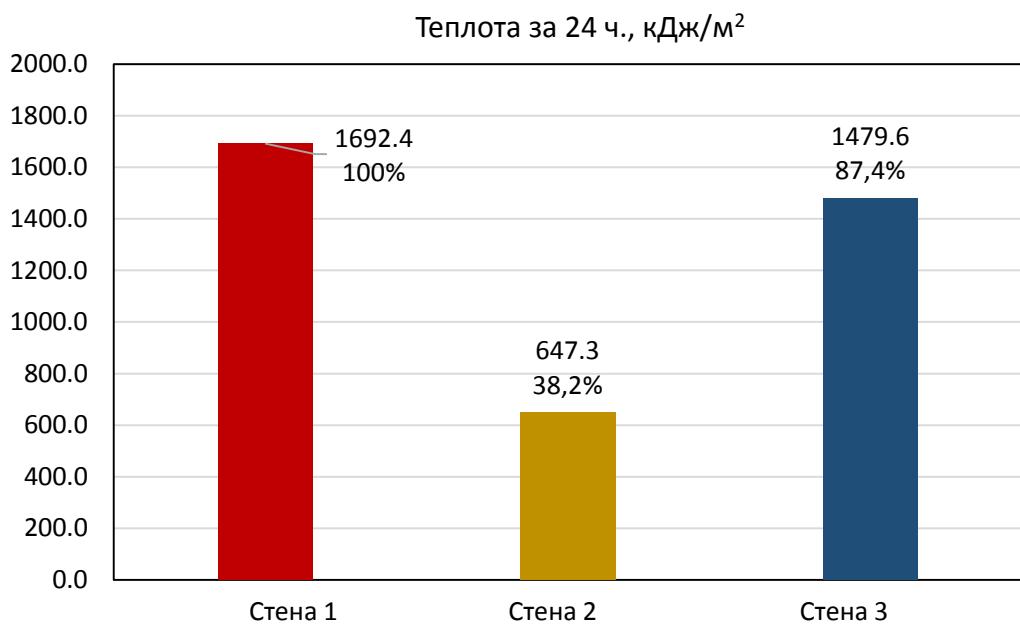


Рисунок 20 – Количество теплоты за 24 часа ($A=30,5^{\circ}\text{C}$)

Как видно из графиков, наибольшее количество энергии за сутки потеряла кирпичная стена (стена первого типа), наименьшее – стена с минеральной ватой (второго типа).

Была рассчитана экономия энергии по сравнению с кирпичной стеной ΔQ в зависимости от амплитуды A по формуле

$$\Delta Q_n = Q_{nA} - Q_{1A}, \quad (24)$$

где ΔQ_n – экономия энергии для n -ого типа стены ($n=2; 3$);

Q_{nA} – количество теплоты для n -ого типа стены ($n=2; 3$) при амплитуде $A, ^\circ\text{C}$ ($A=30,5; 23,5; 16,5; 10,5$);

Q_{1A} – количество теплоты для кирпичной стены при амплитуде $A, ^\circ\text{C}$ ($A=30,5; 23,5; 16,5; 10,5$);

Характер изменения ΔQ в зависимости от A показан на рисунке 21.

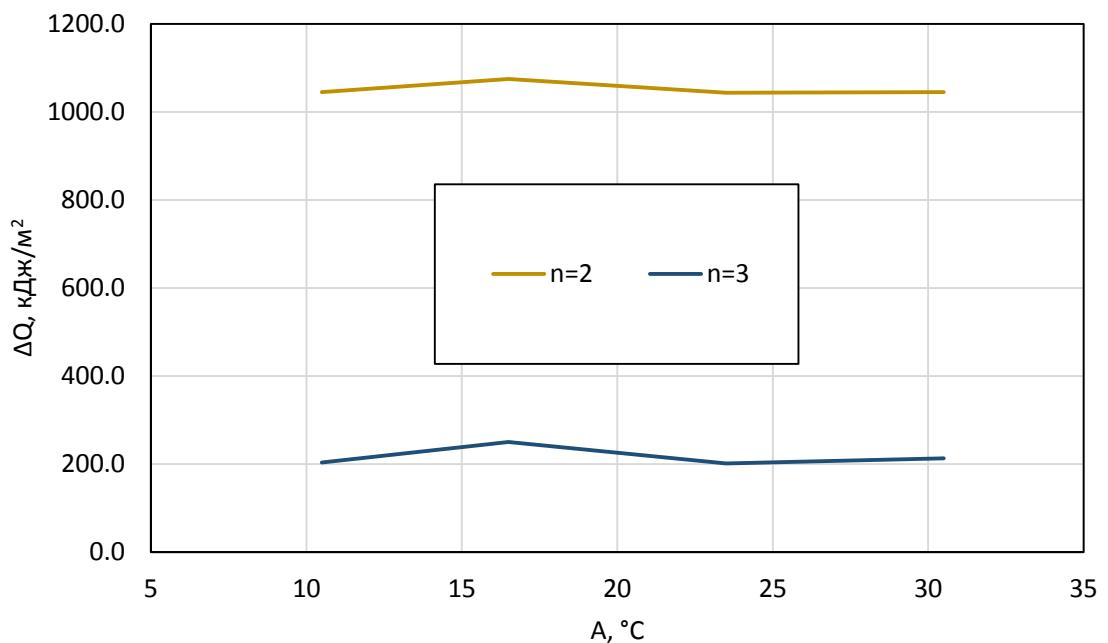


Рисунок 21 – Экономия энергии (от базового уровня)

По рисунку 21 видно, что изменение экономии энергии по амплитудам незначительно и находится в пределах погрешности характеристик МИФС.

3.4 Расчет потерь тепловой энергии за один отопительный период (на кв.м. наружной ограждающей конструкции)

Исследовался тепловой поток, проходящий через четыре типа наружных ограждающих конструкций – через основные варианты стен (рисунок 15) и через кирпичную стену с толщиной 73 см (стена четвертого типа), т.е. с толщиной, равной толщине стены с МИФС. Отопительный период, согласно [76], для 2019 года начался 13 сентября, а завершился 20 мая. Для задания стен в программе было использовано одномерное пространство.

По результатам расчета, составлена таблица 8.

Таблица 8 – Значения теплового потока и потерь тепловой энергии за отопительный период

Стена	q, Вт·ч/м ²	Q, кДж/м ²	От типа 1, %
Тип 1 (кирпич 64 см)	-75497-60150=-135647	-488329	100,0
Тип 2 (с мин. ватой)	-24390-17614=-42004	-151214	31,0 (-69,0%)
Тип 3 (с МИФС)	-69384-50161=-119545	-430362	88,1 (-11,9%)
Тип 4 (кирпич 73 см)	-69762-51194=-120956	-435442	89,7 (-10,8%)

Как видно из таблицы, материалы с изменяющимся фазовым состоянием при сопоставимой с утеплителем толщине значительно лучше, чем утеплитель, проводят тепло. Они обладают большей теплоемкостью, чем минеральная вата, но слишком большой теплопроводностью в обоих фазах (особенно в твердой – даже больше, чем у кирпича). Из-за этого, разница в потерях энергии между стенами третьего и четвертого типов крайне мала и составляет чуть

больше процента (1,2%). В то же время, значения экономии энергии по отношению к стене первого типа в этом расчете очень приближены к значениям экономии энергии, которые были получены при задании синусоидальной температуры в 3.3.

3.5 Влияние теплопроводности МИФС на экономию энергии

Снижение теплового потока в случае установки МИФС возможно не только путем аккумулирования энергии, но и за счет увеличения термического сопротивления ограждающей конструкции. Чтобы оценить влияние теплопроводности материалов с изменяющимся фазовым состоянием на экономию энергии, было рассчитано количество теплоты, проходящее через стену второго типа, в стационарном режиме.

В этом расчете температура наружного воздуха равнялась -25°C, а температура внутреннего воздуха 21°C. Стена рассчиталась в случае, когда все материалы с изменяющимся фазовым состоянием находились полностью в твердом состоянии (сопротивление теплопередаче всей конструкции $R = 1,27 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$) и, в случае, когда они были полностью расплавлены ($R = 1,40 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$).

На рисунке 22 показаны графики распределения температур по толщине стены.

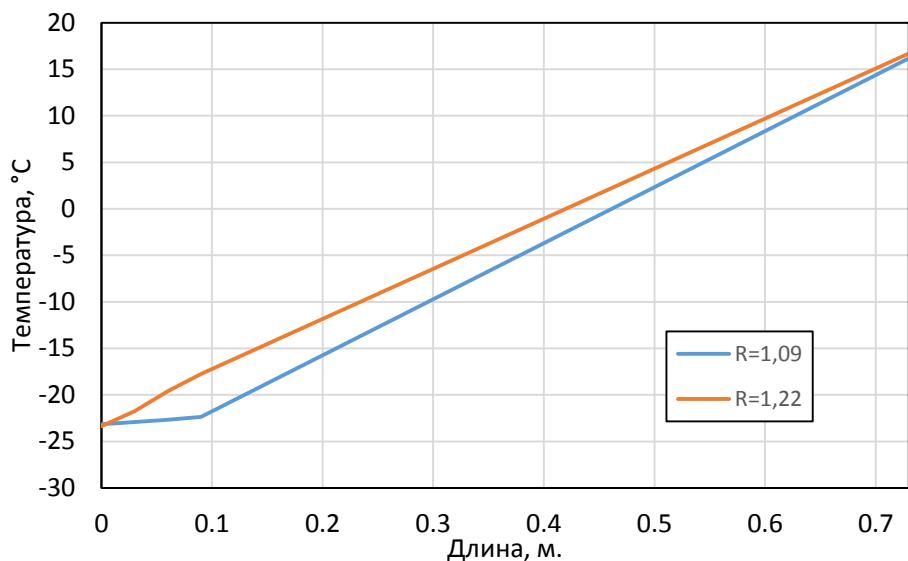


Рисунок 22 – Распределение температуры в конструкции с МИФС

Линия температуры при расплавленном МИФС выше, чем линия температуры при пребывании материалов с изменяющимся фазовым переходом в твердом состоянии, что согласуется с более высоким сопротивлением теплоизменению.

Количество тепловой энергии для обоих случаев показано на рисунке 23 в форме гистограммы.

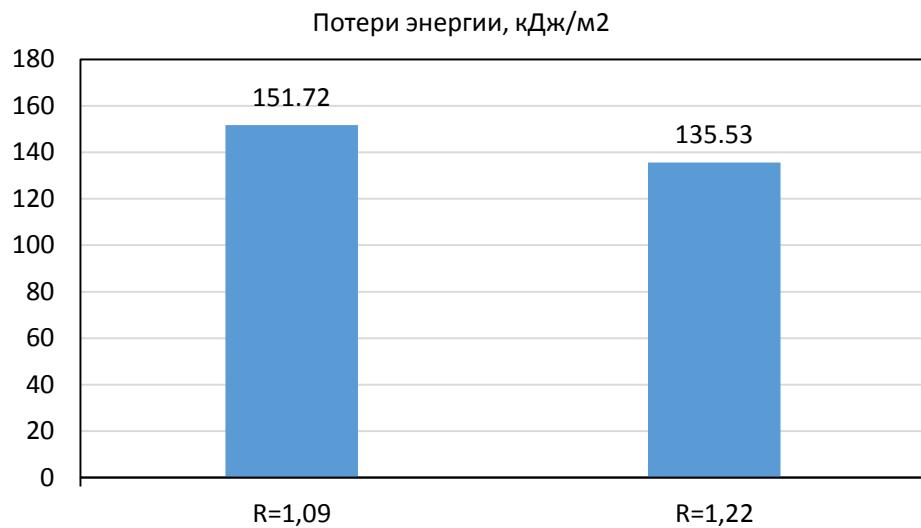


Рисунок 23 – Количество теряющей энергии

Разница в количестве тепловой энергии составила 16,19 кДж/м² или 10,7% .

Далее влияние теплопроводности материалов с изменяющимся фазовым состоянием на снижение теплового потока было оценено в нестационарном режиме. На рисунке 24 показано, как изменяются потери тепловой энергии за отопительный период при уменьшении имеющихся коэффициентов теплопроводности на 20 и 40 процентов.

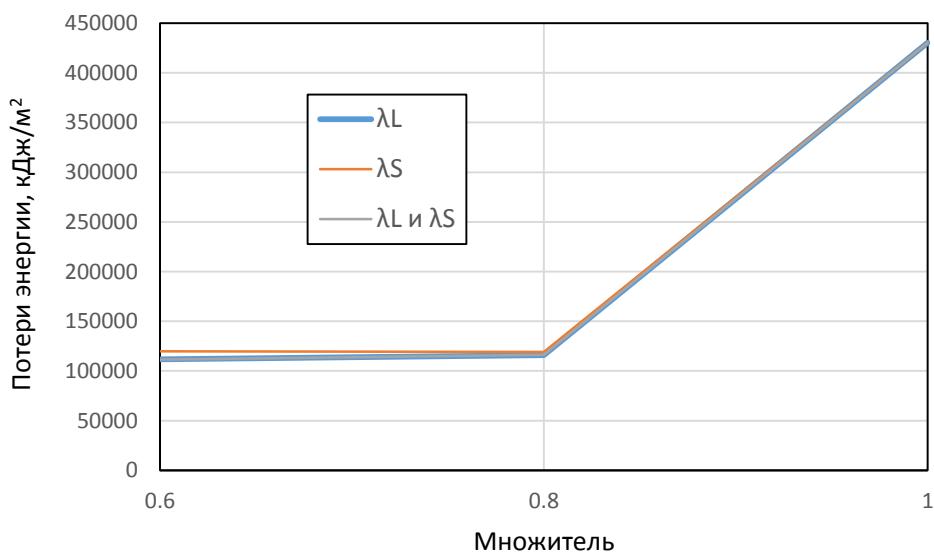


Рисунок 24 – Изменение тепловой потока в зависимости от изменения теплопроводности МИФС

В целом, разница по потерям энергии между коэффициентами теплопроводности МИФС в расплавленном состоянии (λ_L), в кристаллическом состоянии (λ_S) и коэффициентами теплопроводности обоих фаз (λ_L и λ_S) на одинаковых множителях не существенна. Наибольшее сокращение потерь энергии наблюдается при уменьшении коэффициентов теплопроводности λ_L со 100% (множитель 1) до 80% (множитель 0,8) – на 72,8%. Полученное при этом значение потерь меньше, чем потери через утеплитель, на 22,6%.

Следовательно, целесообразно было бы использовать МИФС с характеристиками, указанными в таблице 6, но с меньшей теплопроводностью жидкой или твердой фазы, или обоих фаз, на 20%.

3.6 Влияние расположения МИФС на экономию энергии

Последовательность расположения материалов с изменяющимся фазовым состоянием в стене может быть различна. Размещение слоев с МИФС в стене третьего типа было выполнено исходя из предположения, что температуры, равные температурам фазового перехода, будут чаще всего повторяться в соответствующих им МИФС. Однако, возможно, рациональнее было разместить слои материалов с изменяющимся фазовым состоянием в другом порядке (рисунок 25,б).

Далее был выполнен расчет по потерям энергии через такую стену. Также были рассмотрены варианты стены, содержащие только один слой МИФС (рисунок 25, в-д).

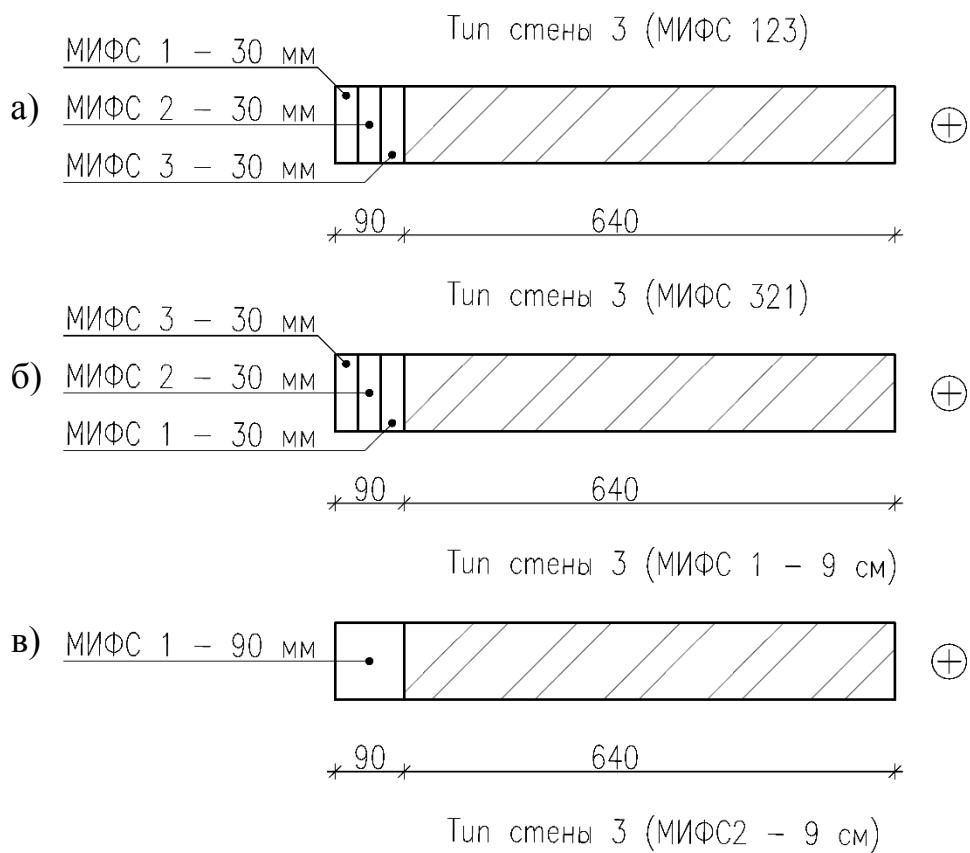


Рисунок 25 – Последовательности размещения МИФС, лист 1

Тип стены 3 (МИФС2 – 9 см)



* 90 * 640 *

Тип стены 3 (МИФС3 – 9 см)



* 90 * 640 *

Рисунок 25, лист 2

Количество теплоты, проходящее за отопительный период через стену МИФС123, было рассчитано в 3.4 (таблица 8). Аналогично было рассчитано количество теплоты, проходящее через стены, изображенные на рисунке 27, б-д (таблица 9).

Таблица 9 – Значения теплового потока и потеря тепловой энергии за отопительный период

Стена	q, Вт·ч/м ²	Q, кДж/м ²	От типа 1, %
Тип 3 (МИФС123)	-69384-50161=-119545	-430362	88,1 (-11,9%)
Тип 3 (МИФС321)	-70595-50393=-120988	-435557	89,2 (-10,8%)
Тип 3 (МИФС1–9см)	-70481-50527=-121008	-435629	89,2 (-10,8%)
Тип 3 (МИФС2–9см)	-69381-49230=- 118611	-427000	87,4 (-12.6%)
Тип 3 (МИФС3–9см)	- 71368-51283=-122651	-441544	90,4 (-9,6%)

Разница в потерях энергии между расположениями МИФС321 и МИФС123 составила 5195 кДж/м² или 1,2 %. Следовательно, чем выше температура фазового перехода у МИФС, тем ближе к помещению следует его размещать.

На рисунках 26 и 27 показаны расчетные величины тепловых потоков с различными МИФС.

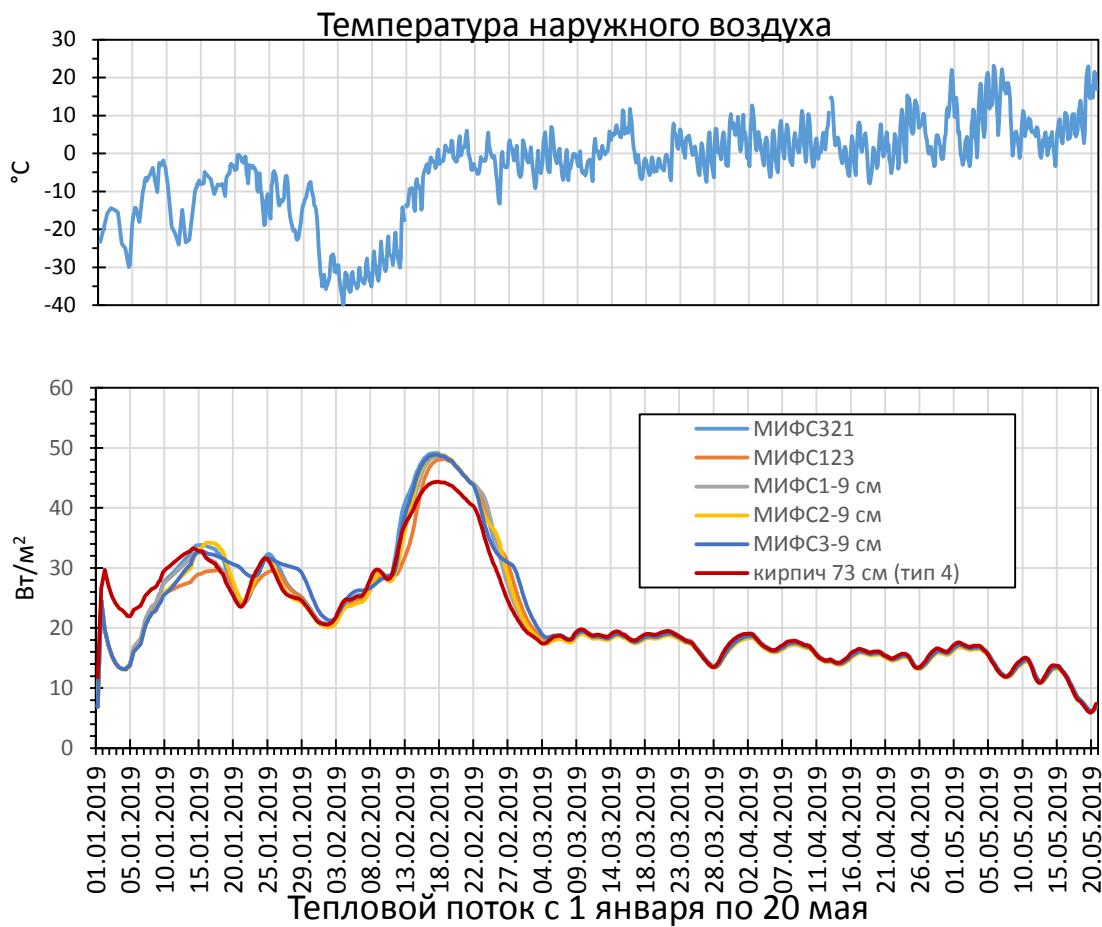


Рисунок 26 – Расчетные величины тепловых потоков до 20 мая

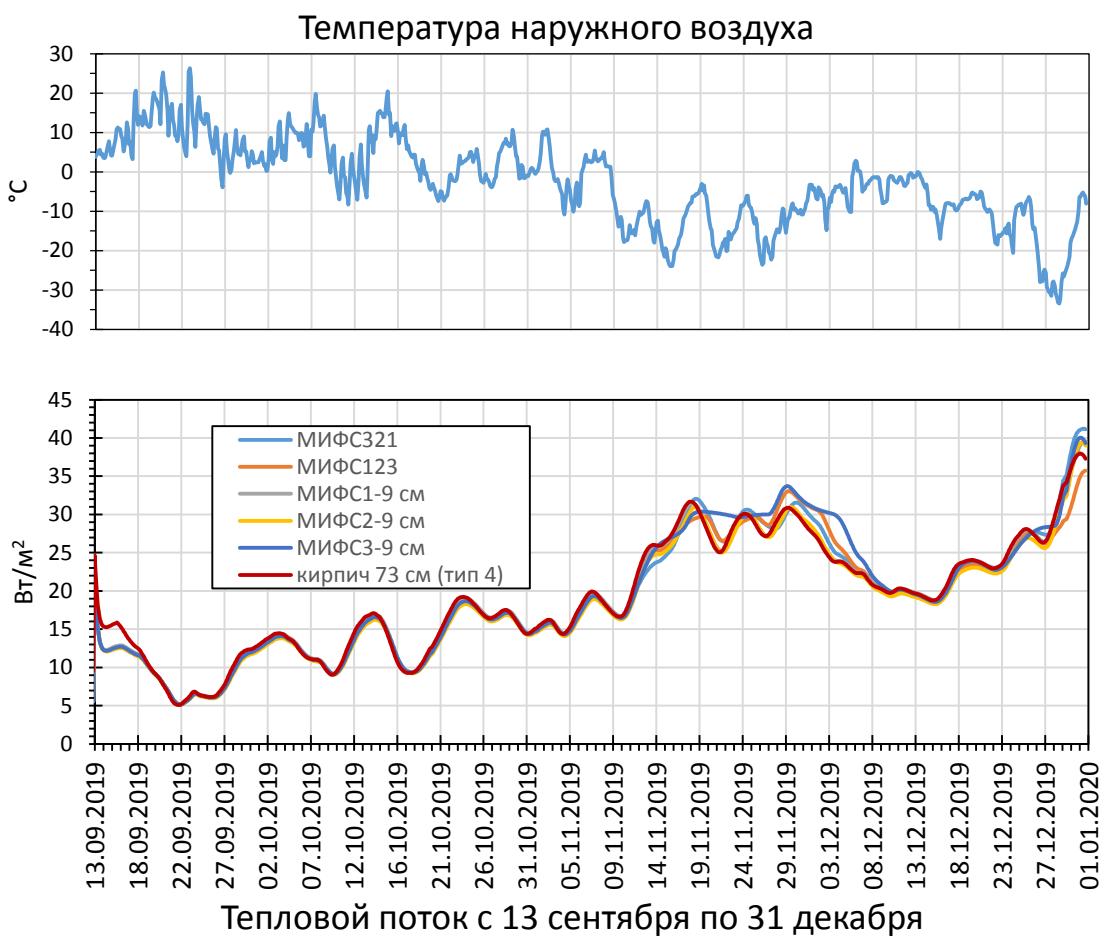


Рисунок 27 – Расчетные величины тепловых потоков с 13 сентября

На рисунках 28 и 29 показаны расчетные величины тепловых потоков относительно стены четвертого типа (кирпичная кладка толщиной 73 см). Отрицательные значения на этих рисунках свидетельствуют об экономии энергии.

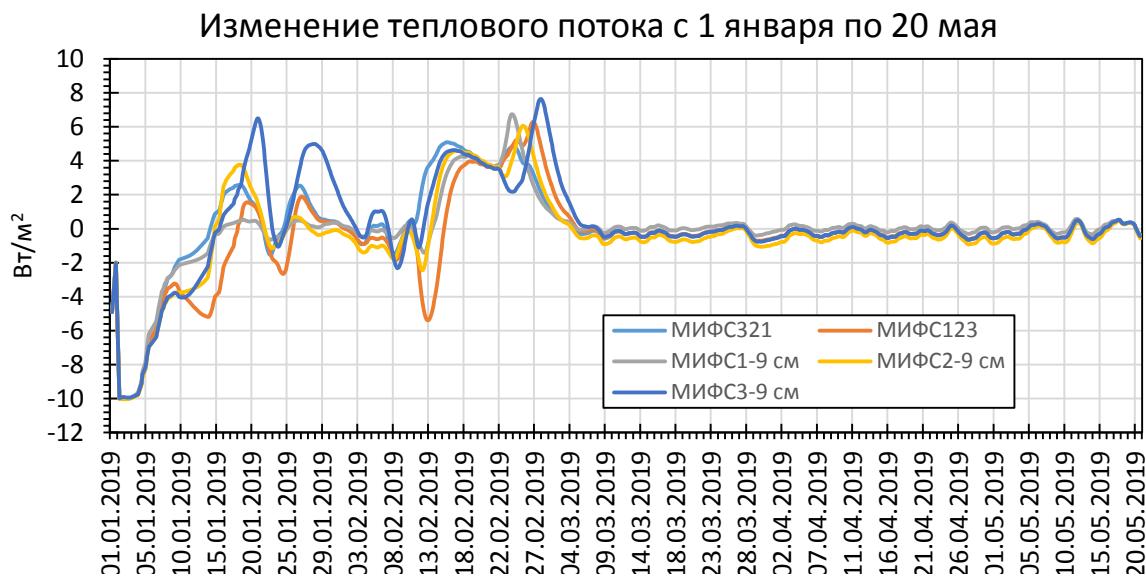


Рисунок 28 – Расчетные величины тепловых потоков до 20 мая

(относительно стены четвертого типа)

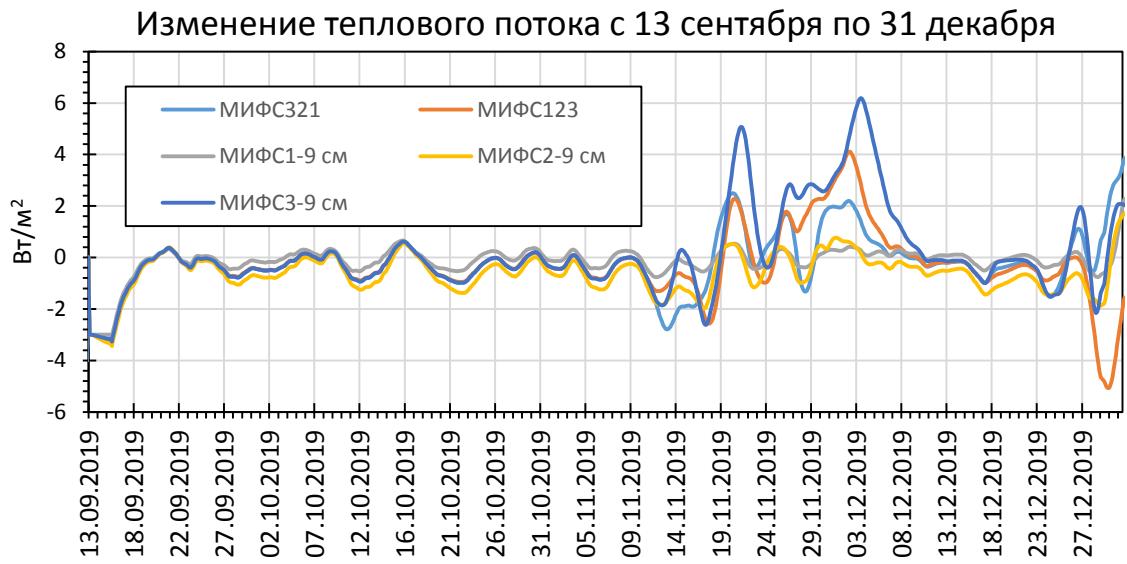


Рисунок 29 – Расчетные величины тепловых потоков с 13 сентября

(относительно стены четвертого типа)

Как видно из рисунков 28-29, снижение теплового потока от уровня стены четвертого типа при использовании МИФС имеет место лишь на отдельных отрезках времени.

Рисунок 30 содержит сравнение исследуемых типов стен по потерям энергии за отопительный период.

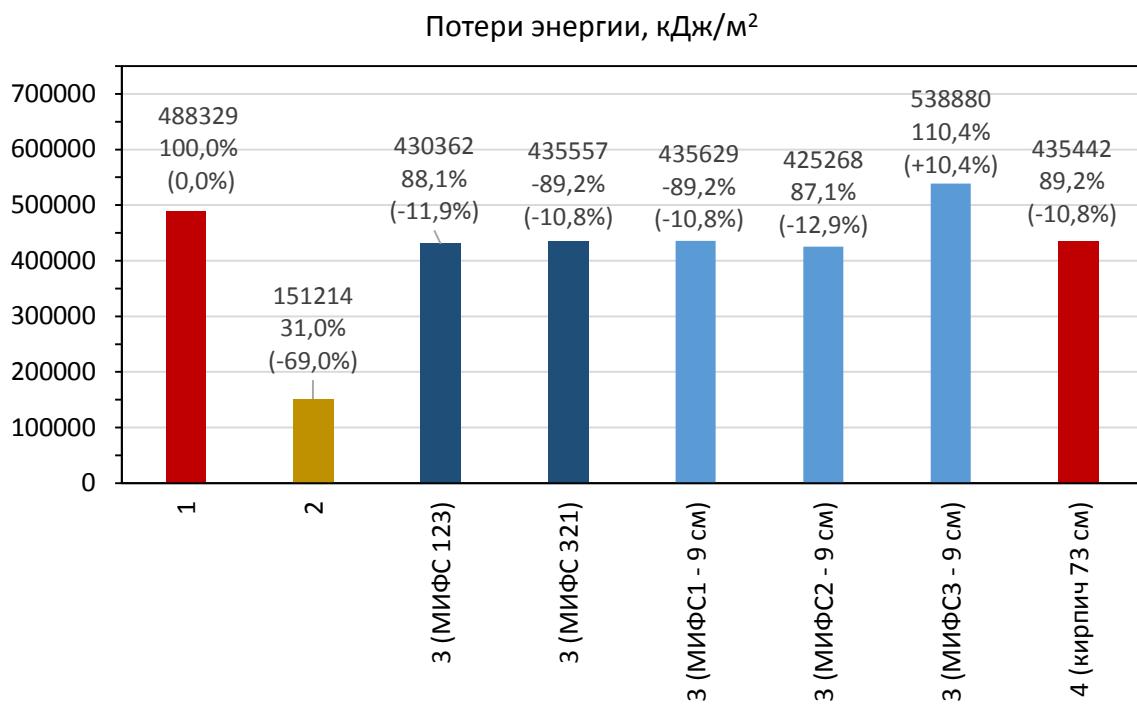


Рисунок 30 – Потери энергии и ее экономия (в % от стены первого типа)

Таким образом, максимальная экономия энергии наблюдается при использовании МИФС2 толщиной 9 см.

3.7 Включение фазовых переходов с неотрицательными температурами

На рисунках 28 и 29 показано, что в области положительных температур лежит большое количество переходов через 0°C и 10°C. В связи с этим, было решено рассмотреть новые варианты стен (рисунок 31), применив в их конструкции МИФС с гораздо меньшей теплопроводностью.

Тип стены 3 (МИФС4 – 9 см)



* 90 640 *

Тип стены 3 (МИФС5 – 9 см)



* 90 640 *

Тип стены 3 (МИФС6 – 9 см)



* 90 640 *

Тип стены 3 (МИФС7 – 9 см)



* 90 640 *

Рисунок 31 – Последовательности размещения МИФС с малой

теплопроводностью

В таблице 10 даны характеристики используемых МИФС. Переходная зона $dT = 1^{\circ}\text{C}$.

Таблица 10 – Характеристики МИФС

Наименование	МИФС 4 [21]	МИФС 5 [26]	МИФС 6 [26]	МИФС 7 [21]
Марка	Minus 22	HS01	OM03	9.5
T_{melt} , $^{\circ}\text{C}$	-23,0	1,0	4,0	9

Окончание таблицы 10

T_{freeze} , °C	-24,0	1,0	3,0	9
L , кДж/кг	120	270	140	135
C_S , кДж/(кг·°C)	2,2	2,0	1,76	2,2
C_L , кДж/(кг·°C)	2,6	3,9	1,91	2,1
λ_S , Вт/(м ² ·°C)	0,16	2,2	0,224	0,24
λ_L , Вт/(м ² ·°C)	0,19	0,55	0,146	0,15
ρ_S , кг/м ³	903	924	912	963
ρ_L , кг/м ³	887	1010	835	858

Полученные значения потерь тепловой энергии отражены на рисунке 32.

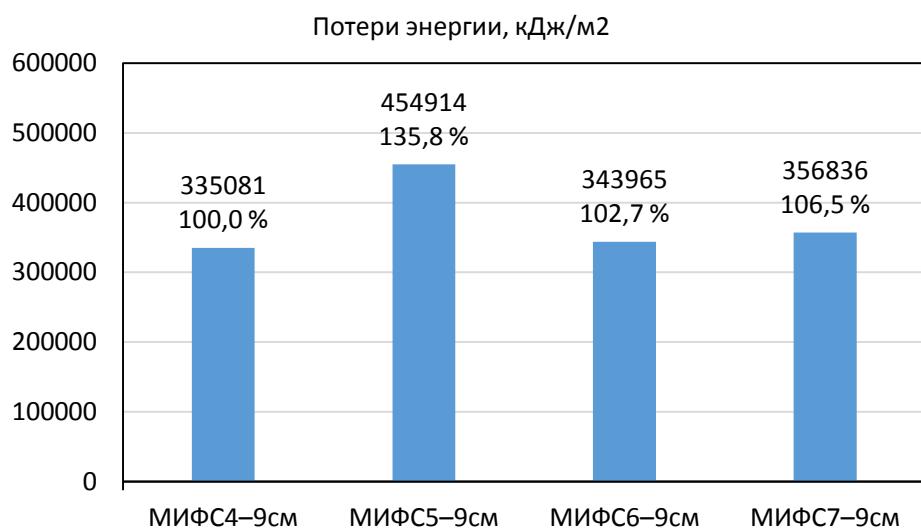


Рисунок 32 – Количество теряющей энергии

Исходя из рисунка выше, была составлена новая комбинация размещения материалов с изменяющимся фазовым состоянием, в которую не был включен МИФС марки HS01 (МИФС 5), т.к. он показал наихудший результат в сохранении тепла. Новая последовательность расположения МИФС показана на рисунке 33.

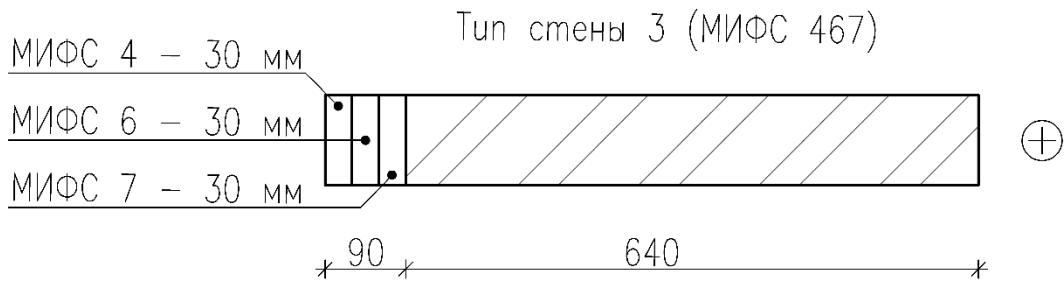


Рисунок 33 – Размещение трех МИФС с малой теплопроводностью

Потери тепловой энергии этой стены за отопительный период составили 341813 кДж/м². Чтобы достичь большей экономии энергии, из конструкции, изображенной на рисунке 33, был исключен МИФС марки 9.5 (МИФС 7), т.к. после МИФС HS01 он хуже остальных материалов сохранял тепло (рисунок 32). Новая конструкция стены показана на рисунке 34.

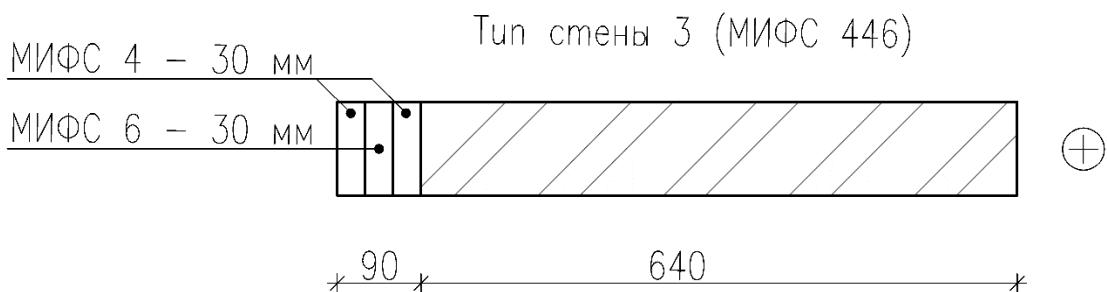


Рисунок 34 – Скорректированное расположение МИФС с малой теплопроводностью

Данная конструкция показала наилучшие результаты среди стен третьего типа (рисунок 35).

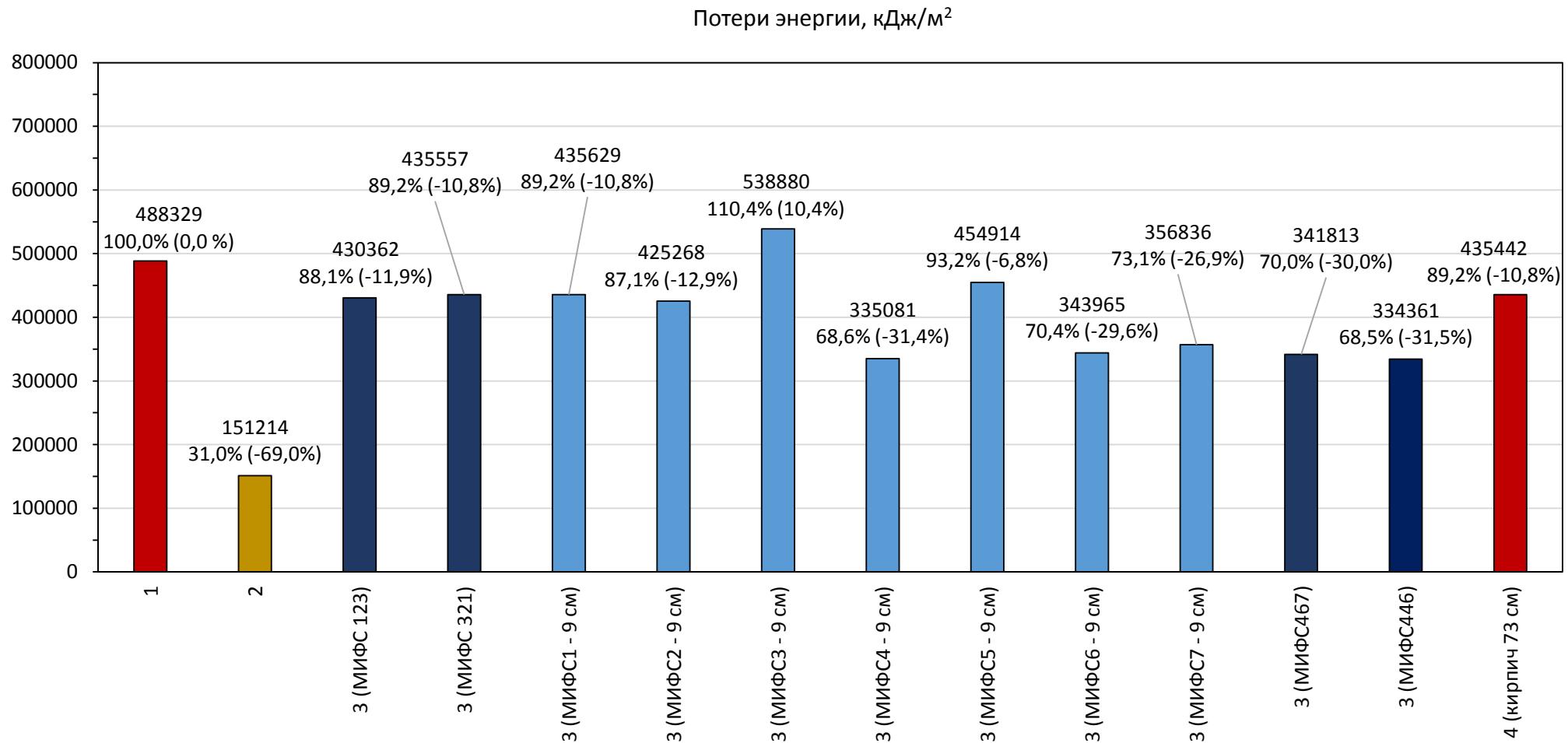


Рисунок 35 – Потери энергии и ее экономия (в % от стены первого типа), толщена стен с МИФС 730 мм

По рисунку 35 хорошо видно, что использование в конструкции стены материалов с изменяющимся фазовым состоянием с малой теплопроводностью (МИФС4, МИФС6 и МИФС7) значительно снизило количество теряемой энергии. Примечательно, что экономия энергии от МИФС4-МИФС7 меньше ожидаемой согласно рисунку 24, что может быть объяснено прежде всего меньшей величиной скрытой энергии у этих материалов. Также замечено, что МИФС с отрицательными температурами фазового перехода в целом дают лучшую экономию энергии, чем МИФС со схожими значениями теплопроводности и скрытой энергии, но с положительными температурами плавления и кристаллизации (МИФС1-3 и МИФС5, МИФС4 и МИФС6-7).

Для более правильного сравнения стены, в которой расположены слои МИФС, со стеной с утеплителем, толщина, занимаемая материалами с изменяющимися фазовыми в конструкции стены, была увеличена с 90 мм до 120 мм. Рассмотрены новые варианты ограждения с различным соотношением МИФС 4 и МИФС 6 (рисунок 36).

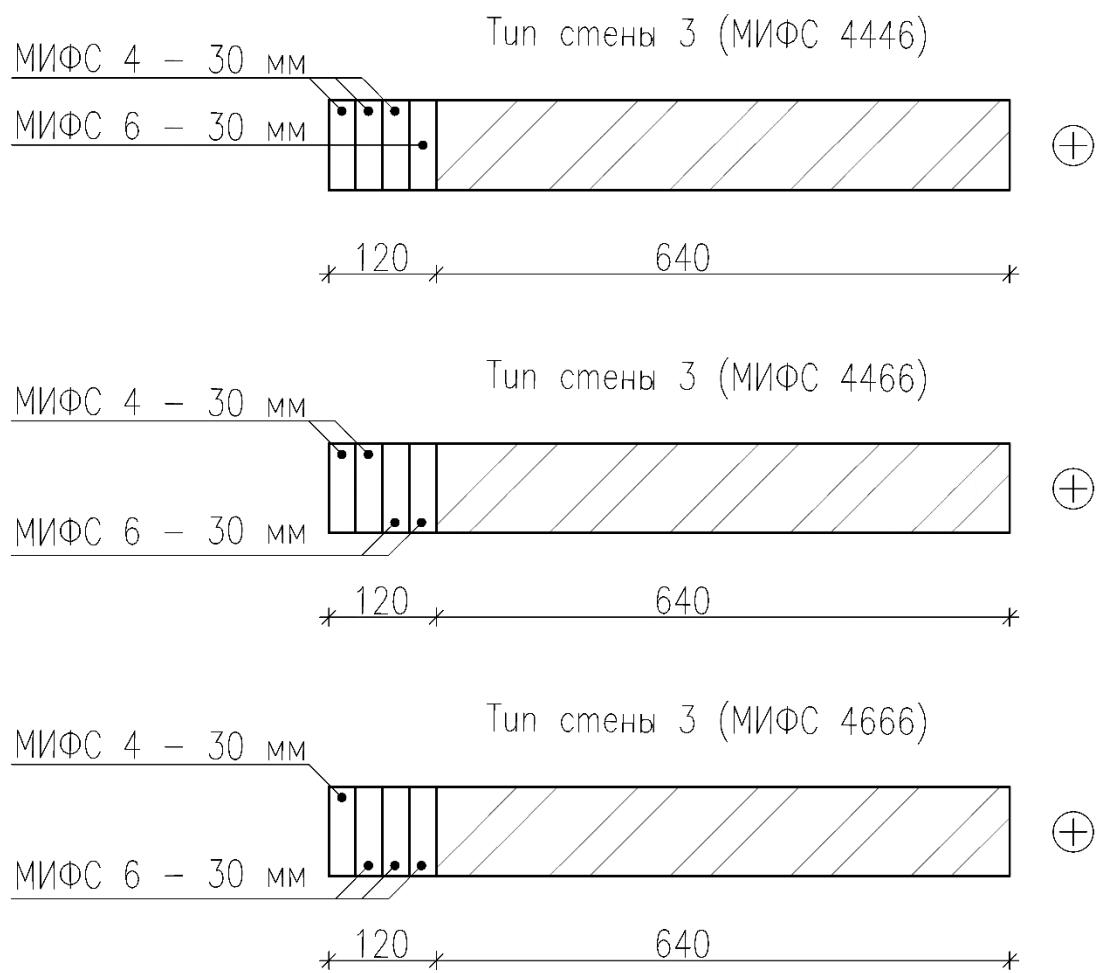


Рисунок 36 – Варианты размещения МИФС 4 и МИФС 6

Сравнение стен со слоями МИФС общей толщиной 120 мм с другими типами стен представлено на рисунке 37.

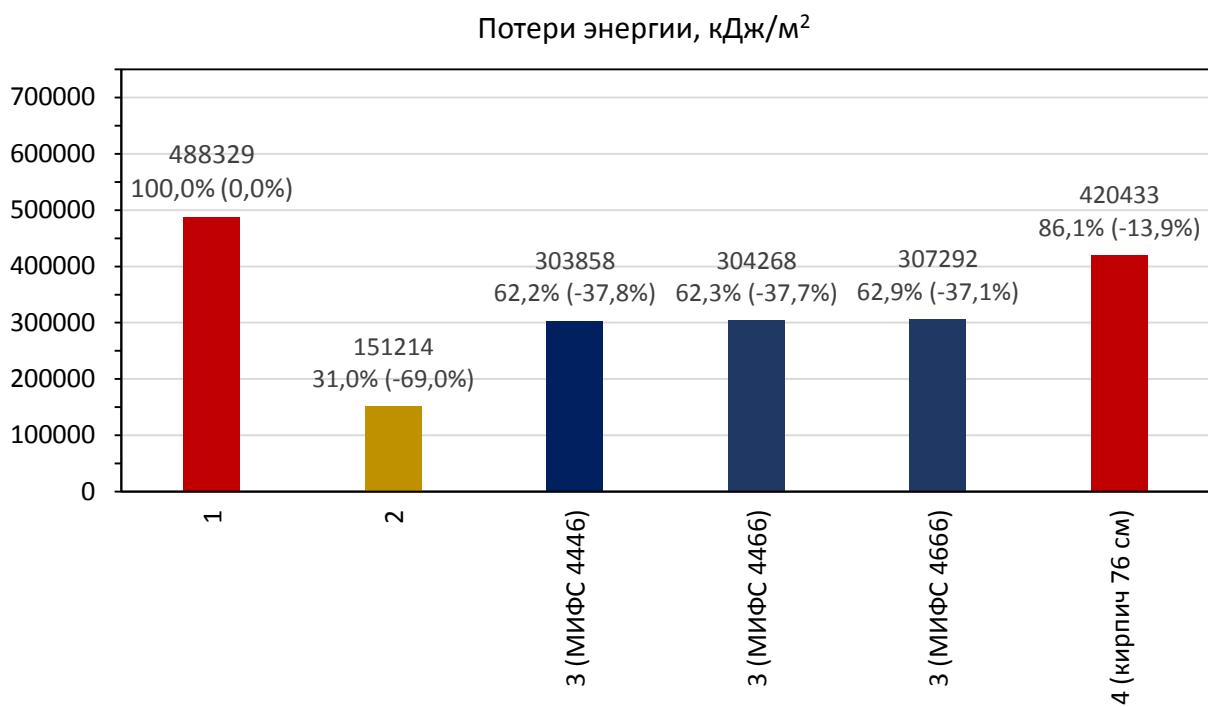


Рисунок 37 – Потери энергии и ее экономия (в % от стены первого типа), толщина стен с МИФС 760 мм

Таким образом, увеличение общей толщины МИФС с 9 см до 12 см привлекло увеличение экономии энергии лишь на 6,3% (МИФС446 и МИФС 4446).

Лучший эффект экономии тепла среди стен третьего типа показала кирпичная стена, на внешней поверхности которой размещены три слоя МИФС4 и один слой МИФС6 (стена по схеме МИФС4446). По сравнению с кирпичной кладкой толщиной 64 см (первый тип стены), такое расположение материалов с изменяющимся фазовым состоянием снизило потери энергии на 37,8 %. Средняя теплопроводность всех слоев МИФС в такой конструкции в расплавленном состоянии составила 0,179 Вт/(м²·°C), а в кристаллическом состоянии 0,176 Вт/(м²·°C).

Увеличение толщины кирпичной кладки с 64 см до 76 см понизило потери энергии только на 13,9%.

Использование минеральной ваты в конструкции стены обеспечило самую большую экономию тепловой энергии – 69,0%, что больше максимальной

экономии при применении МИФС (37,8%) на 83%. Необходимо заметить, что теплопроводность утеплителя ($0,045 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) была в 3,96 раза меньше средней теплопроводности материалов с фазовым переходом в стене МИФС4446.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучена номенклатура материалов с изменяющимся фазовым состоянием, а также опыт их использования в наружных ограждающих конструкциях.

Изучены основные способы моделирования скрытой энергии фазовых переходов. Установлено, что при фазовом переходе наблюдается эффект гистерезиса, который характеризуется петлей гистерезиса. В работе разработан алгоритм расчета, учитывающий явление гистерезиса при плавлении-кристаллизации. Для верификации алгоритма расчета результаты расчета с опытными данными сравнивались с результатами экспериментального исследования замораживания и оттаивания модельного материала – воды. Показана хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Выявлена целесообразность размещения в ограждающей конструкции нескольких слоев МИФС с отличными друг от друга температурами фазовых переходов. Несмотря на то, что за рассмотренный период времени распределение температур выше и ниже нуля по времени было почти одинаковым, МИФС с отрицательными температурами плавления и кристаллизации способствовали сохранению тепловой энергии более эффективно, чем МИФС с положительными температурами фазовых переходов.

Ограждение с традиционным утеплением за отопительный период потеряло на 90% меньше тепловой энергии, чем ограждение с МИФС производимых в настоящее время. Однако, установлено, что при определенных характеристиках МИФС, а именно: осуществление фазовых переходов в отрицательном диапазоне температур, скрытая теплота на уровне 260-310 кДж/кг, теплопроводность жидкой фазы в районе 0,4-0,6 Вт/(м²·°C), а твердой – 3,4-4,2 Вт/(м²·°C), стена с МИФС сохранит тепловую энергию до 22% эффективнее стены с минеральной ватой. Таким образом, перспективной является работа по созданию МИФС с вышеуказанными характеристиками.

По результатам работы выявлено, что материалы с изменяющимся фазовым состоянием способны уменьшить потери тепловой энергии за отопительный период в условиях резко континентального климата. В работе использовались МИФС с температурой фазового перехода, которые были приближены к часто повторяющимся температурам наружного воздуха, и располагались на внешней поверхности наружной стены.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышения энергетической эффективности в Российской Федерации в 2016 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/5197>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).
3. Федеральный закон "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации": ФЗ от 23.11.2009 N 261-ФЗ // СПС «КонсультантПлюс».
4. Приказ Минстроя РФ от 17.11.2017 N 1550/пр «Об утверждении Требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://minjust.consultant.ru/documents/38886>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).
5. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с Изменением N 1) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200095525>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).
6. Россихин Н.А: Расчет и проектирование аккумуляторов теплоты капсульного типа: метод. указания по проектированию аккумуляторов теплоты на фазовых переходах (капсульного типа). – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. - 33 с.

7. Галковский, В.А. Анализ применения аккумуляторов теплоты фазового перехода в системе вентиляции зданий / В.А. Галковский, С.А. Ручкина // Науковедение – 2016 – №6.

8. Воздушно-водяные системы кондиционирования воздуха. Руководство по проектированию [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.trox.ru/downloads/5c1ecf729acc17bd/aws_flyer.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).

9. Бараненко, А.В. Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулирования тепловой энергии / А.В. Бараненко, П.А. Кузнецов, В.Ю. Захарова, А.П. Цой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики – 2018 – №8. – С. 990-1000.

10. Тараненко Д.В. Опыт использования солнечной энергии для создания комфортной среды в зданиях / Д.В. Тараненко // Архитектура и дизайн. – 2018. – № 3. – С. 20-29.

11. Mehling H. Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications / H. Mehling, L.F. Cabeza – Luxembourg: Springer Science+Business Media, 2008 – 308 c.

12. Kosny J. PCM-Enhanced Building Components - An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures / Jan Kosny. – Luxembourg: Springer Science+Business Media, 2015 – 271 c.

13. Назиров, Р.А. Применение материалов с изменяющимся фазовым состоянием в ограждающих конструкциях / Р.А. Назиров, Д.В. Тараненко, П.Ю. Веде // Строительство и реконструкция. – 2019 – № 2. – С. 90-105.

14. Jamekhorshid A. A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium [текст] // A. Jamekhorshid, S.M. Sadrameli, M. Farid – Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2014 – №31 – С.531-542.

15. Xie, N. Salt hydrate/expanded vermiculite composite as a form-stable phase change material for building energy storage [текст] // N. Xiea, J. Luoa, Z. Lia, Z. Huang, X. Gaoa, Y. Fanga, Z. Zhang – Solar Energy Materials and Solar Cells – 2019 – №189 – C. 33-42.
16. Mehling H. Heat and Mass Transfer / Harald Mehling, Luisa F. Cabeza – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008 – 315 c.
17. Zhou, D. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications [текст] // D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian – Applied Energy – 2012 – №92 – C. 593-605.
18. Xiao, M. Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductive [текст] // M. Xiao, B. Feng, K. Gong – Energy Conversion and Management – 2002 – №43 – C. 103-108.
19. Cabeza, L. F. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings [текст] // L. F. Cabeza, C. Castellon, M. Nogues, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga – Energy and Buildings – 2007 – №39 – C.113-119.
20. Climator [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.climator.com/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.09.2018).
21. CRODA [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.croda-therm.com/en-gb>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.09.2018).
22. Insolcorp [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.insolcorp.com>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.09.2018).
23. Microtek laboratories, inc. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.microteklabs.com/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.09.2018).
24. PCM [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.pcmproducts.net>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.09.2018).
25. Phase Change Energy Solutions [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://phasechange.com/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.09.2018).

26. Pluss [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.pluss.co.in/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.09.2018).
27. PureTemp [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.puretemp.com/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.09.2018).
28. SavEnrgtm Phase Change Materials [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rgees.com>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 23.03.2019).
29. Rubitherm Phase Change Materials [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.rubitherm.eu/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.09.2018).
30. Phase Change Material PCM Manufacturers for Air Conditioning, Electronics Cooling. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.teappcm.com/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.09.2018).
31. Schroder J. Latent heat storage [Текст] / J. Schroder, K. Gawron // Energy research – 1981 – №5 – С. 103-109.
32. Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting: Materials, Technologies, Optimization and Case Studies / F. Pacheco-Torgal [и др.]; под ред. F. Pacheco-Torgal – Sawston: Woodhead Publishing, 2017 – 633 с.
33. Kuznik, F. Experimental assessment of a phase change material for wall building use [текст] // F. Kuznik, J. Virgone – Applied Energy – 2009 – №86 – С. 2038–2046.
34. Evola G. A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings [текст] // G. Evola, L. Marletta, F. Sicurella – Building and Environment – 2013 – №59 – С. 517-527.
35. Hasse, C. Realization, test and modelling of honeycomb wallboards containing a Phase Change Material [текст] // C. Hassea, M. Grenet, A. Bontemps, R. Dendievel, H. Salleea – Energy and Buildings – 2011 – №43 – С. 232-238.

36. Castell, A. Experimental validation of a methodology to assess PCM effectiveness in cooling building envelopes passively [тект] // A. Castell, M. M. Farid – Energy and Buildings – 2014 – №81 – C. 59-71.

37. Kheradmand, M. Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings [тект] // M. Kheradmand, M. Azenha, J. Aguiar, J. Castro-Gomes – Energy – 2016 – №94 – C. 250–261.

38. Shilei, L. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter [тект] // L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui – Energy and Buildings – 2006 – №38 – C. 18–24.

39. Athienitis, A. K. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage [тект] // A. K. Athienitis, C. LIu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman – Building and Environment – 1997 – №32 – C. 405–410.

40. Shilei, L. Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage [тект] // Lv Shilei, Z. Neng, F. Guohui – Energy and Buildings – 2006 – №38 – C. 708–711.

41. Shilei, L. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter [тект] // Lv Shilei, Z. Neng, F. Guohui – Energy and Buildings – 2006 – №38 – C. 18–24.

42. Shilei, L. Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards [тект] // Lv Shilei, F. Guohui, Z. Neng, D. Li – Energy and Buildings – 2007 – №39 – C. 1088–1091.

43. Banu, D. Evaluation of thermal storage as latent heat in phase change material wallboard by differential scanning calorimetry and large scale thermal testing [тект] // D. Banu, D. Feldman, D. Hawes – Thermochimica Acta – 1998 – №317 – C. 39–45.

44. Feldman D. DSC analysis for the evaluation of an energy storing wall-board [текст] // D. Feldman, D. Banu – Thermochimica Acta – 1996 – №272 – C. 243–251.
45. Scalat, S. Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard [текст] // S. Scalat, D. Banu, D. Hawes, J. Paris, F. Haghishata, D. Feldman – Solar Energy Materials and Solar Cells – 1996 – №44 – C. 49–61.
46. Peippo, K. A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating [текст] // K. Peippo, P. Kauranen, P. D. Lund – Energy and Buildings – 1991 – №17 – C. 259–270.
47. Lai, C. Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM [текст] // C. Lai, R.H. Chen, C.-Y. Lin – Energy and Buildings – 2010 – № 42 – C. 1259–1266.
48. Alawadhi E.M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material gain [текст] // E.M. Alawadhi – Energy and Buildings – 2008 – №40 – C. 351-357.
49. Castell, A. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling [текст] // A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Perez, L.F. Cabeza – Energy and Buildings – 2010 – №42 – C. 534–540.
50. Silva, T. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution [текст] // T. Silva – Energy and Buildings – 2012 – №49 – C. 235-245.
51. Vicente, R. Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach [текст] // R. Vicente, T. Silva – Applied Thermal Engineering – 2014 – №67 – C. 24-34.
52. Haghshenaskashani S. Simulation of Thermal Storage Phase Change Material in Building [текст] // S. Haghshenaskashani, H. Pasdarshahri – International Journal of Civil and Environmental Engineering – 2009 – №10, ч.3 – C.356-360.

53. Zhang, C. Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures [текст] // C. Zhang, Y. Chen, L. Wu, M. Shi – Energy and Buildings – 2011 – №43 – С. 3514-3520.
54. Huang, M. The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building [текст] // M.J. Huang, P.C. Eames, N.J. Hewitt – Solar Energy Materials and Solar Cells – 2006 – №90 – С. 1951-1960.
55. J. Lei. Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore [текст] // J. Lei, J. Yang, E.-H. Yang – Applied Energy – 2016 – №162 – С. 207–217.
56. USE OF MICROENCAPSULATED PCM IN BUILDINGS AND THE EFFECT OF ADDING AWNINGS [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_8_1%20Sustainable_Cooling/64.pdf, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 19.10.2018).
57. Arce, P. Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings [текст] // P. Arce, C. Castellón, A. Castell, L. F. Cabeza – Energy and Buildings – 2012 – №44 – С. 88-93.
58. Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://revistes.iec.cat/index.php/CtS/article/viewFile/370/369>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 19.10.2018).
59. Alqallaf, H. J. Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain [текст] // H. J. Alqallaf, E. M. Alawadhi – Energy and Buildings – 2013 – №61 – С. 73–80.

60. Alawadhi, E. M. Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study [текст] // E. M. Alawadhi, H. J. Alqallaf – Energy Conversion and Management – 2011 – №52 – C. 2958–2964.
61. Royon, L. Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings [текст] // L. Royona, L. Karima, A. Bontemps – Energy and Buildings – 2013 – №63 – C. 29–35.
62. Lee, T. Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete [текст] // T. Lee, D.W. Hawes, D. Banu, D. Feldman – Solar Energy Materials and Solar Cells – 2000 – №62 – C. 217–237.
63. Pasupathy, A. Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management [текст] // A. Pasupathy, R. Velraj – Energy and Buikdings – 2008 – №40 – C. 193-203.
64. Bianco L. Energy assessment of a novel dynamic PCMs based solar shading: results from an experimental campaign [текст] // L. Bianco, V. Serra, I. Vigna – Energy and Buildings – 2017 – №1 – C. 608-624.
65. Тараненко Д.В. Выбор материала с фазовым переходом для повышения энергоэффективности зданий / Д.В. Тараненко // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 6.
66. Расчет термических напряжений в образце горной породы при его нагревании средствами COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://scientificmagazine.ru/images/PDF/2016/8/raschet-termicheskikh-napryazhenij.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 09.02.2020).
67. Анализируйте тепловые процессы с помощью модуля Теплопередача [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/heat-transfer-module>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: (дата обращения: 09.02.2020).

68. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-30494-2011>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).

69. Архив погоды в Опытном Поле [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rp5.ru/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).

70. Самарский, А. А. Вычислительная теплопередача./ А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – Москва: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

71. Modelling of latent heat storage in PCM modified components [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://suw.biblos.pk.edu.pl/downloadResource&mId=1332346>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).

72. Modified Effective Specific Heat Method of Solidification Problems [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/47/11/2737.pdf>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).

73. Thermal Modeling of Phase-Change Materials with Hysteresis [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.comsol.com/blogs/thermal-modeling-of-phase-change-materials-with-hysteresis/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).

74. Плотность льда и снега, теплопроводность, теплоемкость льда [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/materialy-raznye/plotnost-lda-i-snega-teploprovodnost-teploemkost-lda>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).

75. Полная таблица теплопроводности различных строительных материалов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://termoizol.com/polnaya-tablitsa-teploprovodnosti-razlichnyh-stroitelnyh-materialov.html>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).

76. Постановление Правительства РФ от 06.05.2011 N 354 "О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в

много квартирных домах и жилых домов" [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902280037>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2020).

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт
институт
Проектирования зданий и экспертизы недвижимости
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель магистерской
программы

подпись Р. А. Назиров
инициалы, фамилия
« _____ » 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Энергосберегающие ограждающие конструкции с использованием материа-
лов с изменяющимся фазовым состоянием»
тема

08.04.01 «Строительство»
код и наименование направления

08.04.01.04 «Проектирование зданий. Энерго - и ресурсосбережение»
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель 
подпись, дата профессор, д.т.н
должность, ученая степень

Р. А. Назиров
инициалы, фамилия

Выпускник 
подпись, дата

Д. В. Тараненко
инициалы, фамилия

Рецензент 
подпись, дата к.т.н.
должность, ученая степень

Е. Плещиков
инициалы, фамилия

Красноярск 2020