

УДК 699.86

## ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

А.И. ДУБАТОВКА

(Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С.С., Минск);

Р.В. ТВЕРДОХЛЕБОВ

(ЭКСПОБУД, Москва)

Рассматривается изоляция из целлюлозного волокна, производимого из переработанной бумаги, обладающего низкой энергоемкостью производства и хорошей теплопроводностью. Однако из-за недостатка информации на русском языке о ее технических свойствах и опыте применения она мало используется в сравнении с традиционными изоляционными материалами. Представлен обзор и упорядочивание существующих научных сведений о целлюлозной изоляции. Рассмотрены история и объемы её применения, состав и технология производства, экологические, механические, теплофизические, влажностные, акустические, противопожарные, фунгицидные, коррозионные свойства, долговечность, временное техническое регулирование. Полученная информация отвечает на ряд насущных вопросов и подтверждает актуальность применения такой изоляции в строительстве. Относительно высокие эксплуатационные свойства ее зарубежных производителей очерчивают перспективы совершенствования отечественной целлюлозной изоляции.

**Ключевые слова:** целлюлозная изоляция, эковата, макулатура, переработанная бумага, органические волокнистые материалы, изоляционные материалы, оценка жизненного цикла, осадка, парозащита, пароизоляция, свойства.

**Введение.** К традиционным изоляционным материалам относятся минеральная вата, пенополистирол и пенополиуретан. Несмотря на то, что эти материалы эффективно сохраняют тепло в зданиях, их производят из невозобновляемых ресурсов с большими затратами энергии. Поэтому в мире растет интерес к натуральным органическим экологически чистым и безопасным изоляционным материалам (далее – альтернативным изоляционным материалам, АИМ), получаемых из возобновляемых или переработанных источников [1]. К ним относятся (в порядке распространенности и возрастания рыночной стоимости): целлюлозная изоляция, древесное волокно, солома/тростник, лен/конопля, овечья шерсть/хлопок, кокос, пробка, а также перлит. Некоторые факторы, такие как высокая гигроскопичность, потенциал горючести и роста плесени ограничивают более широкое использование АИМ в проектах строительства и реконструкции. Надлежащее знание этих пределов, их причин и их влияния на свойства изоляционного материала позволят увеличить объемы применения АИМ и снизить энергоемкость строительства.

Свойства целлюлозной изоляции (далее – ЦИ) не представлены в действующих ГОСТах и сводах Правил, а значения ее параметров в технических свидетельствах производителей разнятся. Скучная нерекламная информация о ЦИ на русском языке распределена по интернет-источникам<sup>1,2</sup>, студенческим работам<sup>3,4</sup> и немногочисленным научным статьям [2–6]. Отсутствие достоверных данных по таким важным характеристикам, как сорбционное увлажнение, паропроницаемость, удельная теплоемкость, расчетный коэффициент теплопроводности и др., значительно ограничивает возможность корректного проектирования и применения ограждающих конструкций с ЦИ. Поэтому обзор мировых научных исследований технических свойств ЦИ является актуальным.

**История и рынок**

История ЦИ насчитывает уже более 100 лет – технология производства была запатентована в Англии в 1893 году [9]. Первое применение насыпной ЦИ в качестве строительной изоляции можно отследить до 1919 года в Канаде, что упоминается в книгах, посвященных ЦИ [10; 11], и 1926 года в США [12]. В современном виде ЦИ используется в США с 1940-х годов, в Южной Корее с 1980-х [13; 14], в странах Северной Европы более 30 лет, в России и Литве – с 1993 года [6; 15; 16].

В США существует около 50 компаний-производителей ЦИ, тогда как в начале 1970-х годов их было менее 5 [12], а на пике спроса в 1977 году, связанного с «нефтяным эмбарго», их было порядка 950. На долю ЦИ в 1978 году приходилось 20...25% всего рынка теплоизоляции зданий в США. В 1993 году –

<sup>1</sup> Мальцев, В.В. Эковата-монолит и Эковата-плит – альтернатива Эковате. <http://www.ecrushim.ru/articles/pg150.php>.

<sup>2</sup> Письменский, В.Д. Эковата без прикрас. <http://forum.vashdom.ru/attachments/ekovata-i-ekologia-pdf.20291>.

<sup>3</sup> Мошкова, Е.А. Влияние теплоизоляционного материала на теплотехнические характеристики ЛСТК-панелей / Е.А. Мошкова, Т.В. Туева, Я.В. Панова // Проблемы и перспективы современной науки. – 2015. – № 5. – С. 133–138.

<sup>4</sup> Пестряков, И.И. Теплотехнические характеристики рыхлых теплоизоляционных материалов в зависимости от влажности на примере МТЦ «Файбертекс» / И.И. Пестряков, А.В. Корсун // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 8 – С. 60–71.

10% рынка изоляции для односемейных жилых домов. Производство ЦИ на 1994 год составляло от 270 000 до 420 000 т/год [17].

Европейское производство ЦИ осуществляется 40...50 компаниями и на 2015 год составляло порядка 250 000 тонн с оценочной рыночной стоимостью таких объемов ЦИ около 100 миллионов евро в год [18].

В Финляндии на 2005 году ЦИ применялась в 10% деревянных каркасных домов [19]. В Германии на 2010 год органические натуральные изоляционные материалы занимали на рынке теплоизоляции 4...5%, из которых наибольшую долю (32%) представляла ЦИ [20]. В Южной Корее сегодня на долю ЦИ приходится 0,3% рынка изоляции при производстве около 1000 т/год [13].

Современной тенденцией является применение ЦИ в передовых пилотных объектах зеленого энергоэффективного строительства по всему миру<sup>5,6</sup>.

В 1997 году ЦИ являлась для Дании относительно новым продуктом, и Датское энергетическое агентство профинансировало многолетний исследовательский проект по изучению и внедрению ЦИ и других АИМ. Материалы проекта вместе с обширным списком литературы по АИМ представлены на сайте<sup>7</sup>, основные результаты опубликованы Датским НИИ строительства [7; 8]. Ниже приведены основные результаты этих и других исследований.

В Республике Беларусь первое производство ЦИ действует в Молодечно с 2007 года. С 2010 года ОАО «Гродножилстрой» применяет ЦИ в деревянных каркасно-панельных малоэтажных жилых домах<sup>8</sup>, а Частное проектное унитарное предприятие «Моноракурс» совместно с ООО «ЭКСПОБУД» внедряет в отечественную строительную практику металлокаркасно-обшивную панель с ЦИ для наружных стен многоэтажных каркасных зданий [21–23]. Подобные стеновые панели с ЦИ были впервые применены в России в Воронеже при вводе в эксплуатацию в 2010 году четырех 20-этажных домов из комплекса «Бульвар Победы, 50».

#### Состав и технология производства

Целлюлозная изоляция, «эковата» (далее – ЦИ) – это органический натуральный рыхлый коротковолокнистый изоляционный материал серого цвета (рисунок 1), представляет собой смесь из целлюлозных волокон (около 81...92% по массе) и добавок – биоцидов и антипиренов, которые используются для предотвращения появления плесени и улучшения огнезащитных свойств. Химический состав и физическая форма ЦИ отличается от чистой целлюлозы.



Рисунок 1. – Целлюлозная изоляция

Химический состав бумаги по разным источникам приведен в таблице 1. Основными компонентами газетной бумаги являются соединения целлюлозы (66...69%) и лигнин (22...24%). Не рекомендуется применение мелованной и качественной бумаги в качестве исходного сырья для ЦИ, поскольку химические добавки плохо сцепляются с их волокнами [24].

Целлюлоза – стойкое сложное вещество нерастворимое в воде, слабых кислотах и большинстве органических растворителей; Является гидрофильной, то есть способна хорошо впитывать воду. При длительном (недели, месяцы) воздействии света на целлюлозу происходит ее деструкция<sup>9</sup>.

<sup>5</sup> Karuna House. <https://www.wbdg.org/additional-resources/case-studies/karuna-house>

<sup>6</sup> Passive House Database. Passive House Buildings. <http://passivehouse-database.org>

<sup>7</sup> <http://www.alternativisolering.dk>

<sup>8</sup> Квартал усадебной и блокированной застройки «Лососно-4» в Гродно. <http://www.ghb.by/ru/design/gallery/89>.

<sup>9</sup> Никитин, Н.И. Химия древесины и целлюлозы / Н.И. Никитин, А.В. Оболенская, В.П. Щеголев. – М. : Лесная пром-сть, 1978. – 368 с.

Таблица 1. – Соотношение компонентов газетной и офисной бумаги

Содержание, %	Газетная бумага [25]	Газетная бумага [1]	Офисная бумага [1]
Целлюлоза	54,3	48,3	67,4
Лигнин	23,7	22,1	0,93
Гемицеллюлоза	14,5	18,1	13
Экстракты	1,9	1,6	0,7
Протеины	1,4	0,44	0,31
Зольность	3,4	2	11,6
Всего:	99,2	92,54	93,94

Лигнин – полимер, скрепляющий целлюлозные волокна и обуславливающий прочность древесины. Лигнин заполняет главным образом пространство между клетками растения, но проникает и в поверхностные слои волокон; почти нерастворим в известных растворителях, оптически неактивен; имеет разветвленную, часто трехмерную пространственную структуру и поэтому придает целлюлозным волокнам жесткость и упругость, улучшает взаимное сцепление хлопьев ЦИ.

Целлюлозные волокна в ЦИ получают механическим измельчением газетной бумаги и макулатуры до однородной массы малой плотности. Важно качество целлюлозных волокон – средняя длина волокон рекомендуется не менее 2 мм. Некоторые производители не могут достичь этого требования, и волокно рубится практически в пыль, что приводит к повышению плотности сухой задувки в стенах до 65...90 кг/м<sup>3</sup> и снижению коэффициента теплопроводности материала. Поэтому рекомендуется применение ЦИ, производимой, в частности, по технологии и на оборудовании финского концерна «Макрон»<sup>10</sup> [12].

В процессе эксплуатации либо при влажном способе укладки ЦИ целлюлозные волокна впитывают влагу, что приводит к разбуханию лигнина, активации его клеящего эффекта, изменению и фиксации структуры ЦИ, а также к усилению адгезии ЦИ к строительным конструкциям (caking of cellulose [26]).

#### Экологические свойства

Экологичность – безопасность для природы, влияние на сохранность чистоты окружающей среды.

К экологичным строительным материалам можно отнести следующие материалы:

- производимые из возобновляемых природных ресурсов;
- не загрязняющие окружающую среду в жизненном цикле;
- требующие минимальных затрат энергии в жизненном цикле;
- рециклируемые или разлагающиеся в конце срока службы.

Целлюлозная изоляция соответствует нижеуказанным требованиям:

- целлюлоза это наиболее распространенное возобновляемое органическое вещество на Земле [27];
- среди всех изоляционных материалов ЦИ обладает одной из самой низкой воплощенной энергией (таблица 2),
- способствует переработке вторичных материальных ресурсов (на 81...92% состоит из макулатуры);
- создает сравнительно небольшое загрязнение окружающей среды, как и все материалы на основе древесины, секвестрирует (связывает) в себе углекислый газ CO<sub>2</sub> на протяжении срока службы.

Воплощенная энергия (embodied energy) – суммарная величина потребления энергии для обеспечения жизненного цикла материала. Для строительных материалов<sup>11</sup> воплощенная энергия включает в себя затраты на: добычу сырья, производство, транспортировку, монтаж в строительные конструкции, эксплуатацию, утилизацию. Данные по воплощенной энергии некоторых строительных материалов представлены в таблице 2, из которой видно, что воплощенная энергия ЦИ по оценкам разных источников отличается. Например, в [30] показано, что если учитывать затраты на производство газетной бумаги – исходного сырья для ЦИ, то эквивалентные затраты для ЦИ составят 20,50 МДж/кг, тогда как затраты непосредственно на процесс производства ЦИ составляют всего 0,824 МДж/кг. При этом энергоёмкость каменной ваты там же оценена в 17,52 МДж/кг. По данным [31; 32] переход от каменной ваты в качестве теплоизоляции к ЦИ может снизить выбросы парниковых газов и затраты воплощенной энергии зданий на 15%.

Таким образом, ЦИ обладает рядом ключевых экологических преимуществ по сравнению с традиционными изоляционными материалами.

Вопрос экологической безопасности антипиреновых добавок на основе соединений бора в составе ЦИ рассмотрен в отдельной публикации [33], где обсуждается необходимость снижения количества борсодержащих добавок в отечественной ЦИ с 19% по массе до европейского уровня – не более 5%.

<sup>10</sup> Makron. Технология производства эковаты. Линии Fibretec.

<sup>11</sup> Соколовский, Л.В. Почему необходимо нормировать энергоёмкость в строительстве? / Л.В. Соколовский. <http://www.effbuild.by/publications/download/0/259/>.

Таблица 2. – Энергоемкость некоторых строительных материалов

Строительный материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Воплощенная энергия, МДж/кг		Потенциал глобального потепления, кг CO <sub>2</sub> /кг		Потребление воды, л/кг
	по [28]	по [28]	по [29]	по [28]	по [29]	по [29]
Целлюлозная изоляция	50	0,94...3,3	10,487	–	1,831	20,789
Солома	120*	0,24	–	0,01	–	–
Древесное волокно	50*	10,8	–	–	–	–
Древесное волокно (плиты)	180	20,0	20,267	0,98	0,124	2,763
Пробка	150	4	51,517	0,19	0,807	30,337
Каменная вата	60	16,8	26,393	1,05	1,511	32,384
Стекловата	32*	28,0	–	1,35	–	–
Лен	32*	39,5	–	1,70	–	–
Пенополистирол (EPS)	30	88,6	105,486	2,55	7,336	192,729
Пенополиуретан (PUR)	30	101,5	103,782	3,48	6,788	350,982
Гипс	2300*	1,8	–	0,12	–	–
Цемент	3150	5,5	4,235	0,93	0,819	3,937
Цементный раствор	1525	1,33	2,171	0,21	0,241	3,329
Бетон	2380	0,75	1,105	0,1	0,137	2,045
Железобетон	2546	1,92	1,802	0,185	0,179	2,768
Кирпич пустотелый (на 1 шт.)	1020	6,9	6,265	0,53	-0,004	1,415
Ячеистый бетон	500*	3,5	–	0,24...0,375	–	–
Гипсокартонный лист	800*	6,75	–	0,38	–	–
Фиброцементный лист	1700*	10,4	–	1,09	–	–
ОСП (OSB)	600	15,0	36,333	0,96	0,620	24,761
Древесина (пиломатериалы)	600	10,0	18,395	0,71	0,267	4,192
Сталь	7900	26,2	24,336	1,90	1,526	26,149
Алюминий	2700	155,0	–	8,24	8,571	214,341
ПВХ (PVC)	1400	77,2	–	2,61	–	511,999
Стекло	2500	15,0	–	0,86	–	16,537

\* – добавлено автором.

### Плотность и осадка

Целлюлозная изоляция – это полуфабрикатный изоляционный материал, который используется в окончателном виде после нанесения одним из следующих способов [34]:

- пневматическим сухим насыпанием на перекрытия (loose-fill, 23...40 кг/м<sup>3</sup>);
- пневматическим сухим задуванием в стены (blown dry dense-pack, 40...65 кг/м<sup>3</sup>);
- пневматическим сухим задуванием в скатные крыши (blown dry dense-pack, 40...60 кг/м<sup>3</sup>);
- пневматическим влажно-клеевым набрызгиванием (wet spray-applied, 30...80 кг/м<sup>3</sup>).

Максимально достижимая плотность сухой задувки качественной ЦИ составляет 65 кг/м<sup>3</sup>, на ощупь при плотности от 50 кг/м<sup>3</sup> появляется некоторая «пружинистость». Плотность смонтированной ЦИ определяют по EN 15101-2<sup>12</sup> путем деления фактически смонтированной массы продукта на объем конструкции, массу получают исходя из количества израсходованных мешков с ЦИ.

Осадка ЦИ определяется по ISO/CD 18393:2002-08<sup>13</sup> и не должна превышать на горизонтальных конструкциях 10...15% – эту осадку обычно компенсируют насыпанием дополнительного слоя ЦИ толщиной 15...25% от расчетной. Осадка в вертикальных конструкциях не допускается, что обеспечивается достижением минимально необходимой безусадочной плотностью задувки, отличающейся в зависимости от производителя и технологии производства ЦИ.

В работах [35–39] разработан аналитический метод, позволяющий вычислить необходимую плотность ЦИ для предотвращения ее осадки в вертикальных конструкциях. Например, для гипсокартонной стены высотой 2,4 м толщиной 0,1 м шириной 1 м при температуре 25 °С и постоянной относительной влажности воздуха φ = 50% (далее – RH) безусадочная плотность ЦИ составляет 48 кг/м<sup>3</sup>. Увеличение толщины полости до 30 см при RH 50% потребует плотности около 53 кг/м<sup>3</sup>, а при RH 80% для обеспечения стабильности объема потребует 63 кг/м<sup>3</sup> (рисунок 2).

<sup>12</sup> EN 15101-2 2013 Thermal insulation products for buildings. In-situ formed loose fill cellulose (LFCI) products. Specification for the installed products.

<sup>13</sup> ISO/CD 18393:2002-08 Thermal insulation – Accelerated ageing of thermal insulation materials – Assessment of settling of loose-fill thermal insulation used in attic and closed cavity application.

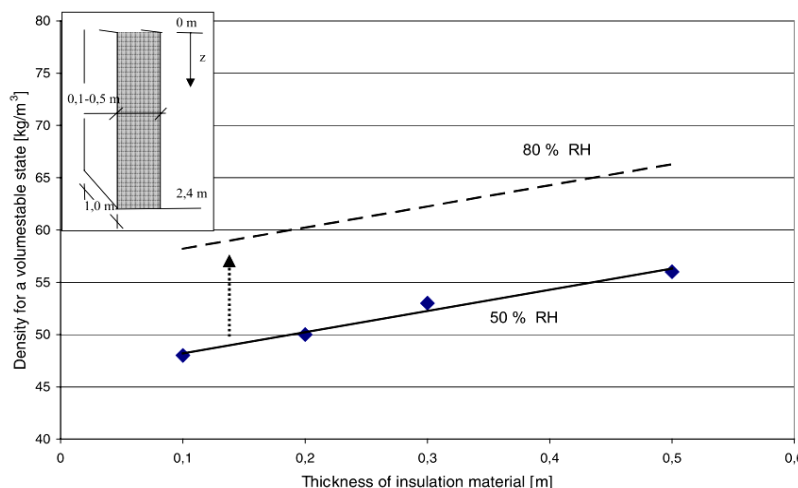


Рисунок 2. – Расчетная безусловная плотность ЦИ в зависимости от толщины стены

Источник: [35].

В США<sup>14</sup> безусловная плотность ЦИ принята равной 56,1 кг/м<sup>3</sup> (3.5 lb/ft<sup>3</sup>).

По данным отечественных испытаний<sup>15</sup> ЦИ осадка отсутствует при плотности 60 кг/м<sup>3</sup>.

При качественно выполненном монтаже ЦИ влажного напыления не оседает [40; 41].

#### Теплопроводность

Значение коэффициента теплопроводности ЦИ, как и большинства АИМ, составляет порядка 0,040 Вт/(м·К) [42], при этом оно может незначительно меняться в зависимости от сырья и способа производства [14], а также зависит от плотности засыпки [4]. По данным [43], на основании 282 измерений ЦИ всех плотностей от 17 до 115 кг/м<sup>3</sup> минимальная теплопроводность ЦИ составляет  $\lambda_{\min(10,\text{dry})} = 0,0351$  Вт/(м·К), а 99% значений теплопроводности (99-перцентиль) ниже, чем  $\lambda_{(10,\text{dry})} = 0,0421$  Вт/(м·К). Зависимость теплопроводности АИМ от RH довольно мала и соответствует увеличению на 0,005 Вт/(м·К) до тех пор, пока среднее содержание влаги в материале меньше содержания влаги в воздухе при RH 75%. На практике конденсация внутри органических волокон будет весьма пагубной. Поэтому ЦИ, а также утеплители из льна и шерсти не должны эксплуатироваться при RH свыше 85%. Содержание влаги в ЦИ при RH 75% составляет 12...16% по массе, а при RH 90% – 20...25%. Таким образом, практическое значение теплопроводности ЦИ составляет порядка 0,045 Вт/(м·К) [3].

Целлюлозная изоляция обладает значительной гигроскопичностью, которая может достигать 34% при RH 97%. Основная масса сорбируемой влаги поглощается при влажности более 80%, что объясняется капиллярным механизмом сорбции. Повышение влажности литовских образцов ЦИ на 1% приводило к повышению теплопроводности ЦИ на 1,6...2,0%. Исходя из этого для 11% массовой влажности ЦИ ее теплопроводность составит  $0,037 + 0,037 \cdot 2 \cdot 11\% = 0,045$  Вт/(м·К) [4]. Влажность оказывает небольшое влияние (1...3%) на изменение коэффициента теплопередачи конструкции с ЦИ при RH ниже 90% и колебании содержания влаги в ЦИ от 14 до 19% по массе [44]. Тепловой поток через стену с ЦИ был на 22% выше, чем через стену с каменной ватой (отметим, что пирог стены с каменной ватой незначительно отличался от стены с ЦИ).

Целлюлозная изоляция влажного напыления имеет коэффициент теплопроводности на 14% больше, чем ЦИ сухой задувки [13]. Исследования теплопроводности ЦИ также проводились в работах [45; 46].

#### Влажностные свойства

Влажностные свойства ЦИ и других АИМ всесторонне исследованы в [47; 48]. Полученные изотермы сорбции и десорбции водяного пара ЦИ представлены на рисунке 3. Аналогичные кривые сорбции получены и в других исследованиях [4; 45; 49; 50]. Несмотря на высокий уровень влажности изоляции сухой задувки в период зимней эксплуатации ЦИ может успешно высыхать в течение лета [26].

Высыхание ЦИ влажного нанесения исследовалось в [40; 51], где показано, что при нанесении ЦИ влажным способом в зимние месяцы в холодных регионах слой напыления может не высохнуть, особенно при использовании пароизоляции [52], поэтому метод влажного набрызгивания предпочтительнее

<sup>14</sup> Standard Work Specifications for Home Energy Upgrades. Exterior Wall Dense Packing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sws.nrel.gov/spec/411011>.

<sup>15</sup> Мошкова, Е.А. Исследование теплотехнических свойств эковаты / Е.А. Мошкова // Эволюция современной науки : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 15.04.2015 г. : в 2 ч. Ч. 1. – 2015. – С. 29–31.

применять летом в теплых климатических условиях. Органическая структура целлюлозных волокон обуславливает высокую гигроскопичность ЦИ, что может снижать ее характеристики. Расчеты конструкций показывают возможность накопления влаги в ЦИ более 90% по массе, что потенциально может привести к росту плесени в конструкциях [49; 53].

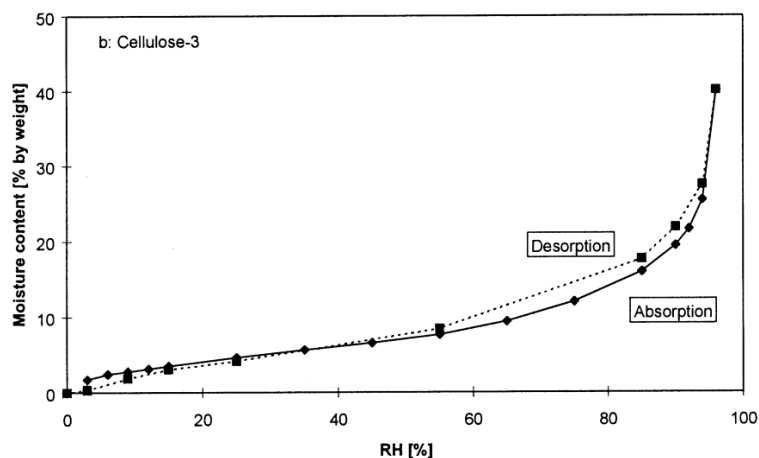


Рисунок 3. – Изотермы сорбции и десорбции водяного пара целлюлозной изоляцией

Источник: [47; 48].

Несмотря на гигроскопические свойства ЦИ, в [54] не было обнаружено никакой существенной способности ЦИ по сглаживанию и равномерному распределению содержания влаги в конструкциях в течение года. Согласно другим данным, ЦИ обладает способностью к накоплению, удержанию и высвобождению избыточной влаги (moisture buffering value, MBV [55]) и тем самым отличается от минераловатной изоляции, что при определенных условиях позволяет исключить паровой барьер из конструкции стены [56].

Коэффициент паропроницаемости ЦИ по [48] представлен в таблице 3, находится в пределах<sup>16</sup> 0,3...0,68 мг/(м·ч·Па) и может приниматься в среднем равным 0,54 мг/(м·ч·Па) [2].

Таблица 3. – Коэффициент паропроницаемости ЦИ по [48]

Градиент относительной влажности при 23 °С	Сопротивление паропроницаемости, мг/(м·ч·Па), при плотности, кг/м <sup>3</sup>	
	40	65
50...94%	0,41...0,64	0,33
50...1%	0,42...0,68	0,41

В [57] исследовалось влажностное состояние деревянных каркасных стен с наружной обшивкой из ориентированно-стружечной плиты (далее – ОСП) толщиной 11 мм, различными вариантами парозащиты и утеплителями (стекловата в матах, ЦИ и стекловата сухой задувки). Условия испытаний были довольно сложные: постоянная RH 50...55% в течение первого года и RH 40% в течение двух последующих лет при температуре в помещении 21 °С в течение зимы с 5500 градусо-сутками отопительного периода. По окончании испытания все 3 конструкции без парозащиты показали неприемлемо высокие уровни плесени, все 4 конструкции с пароизоляцией из полиэтилена оставались на безопасном уровне влажности и не имели роста плесени.

В США необходимость, проницаемость и расположение парозащиты зависят от климатической зоны [58]. Для холодных климатических зон 5 и 6 рекомендуется парозащита класса 2 (0,1...1 perm, например, мембрана с изменяемой проницаемостью или полупаронепроницаемая краска) – она уменьшит влажностные риски в стенах с ЦИ до более целесообразных уровней. Парозащита класса 1 (полиэтилен) рекомендуется только в очень холодной 7 и субарктической зоне 8, поскольку он полностью исключает возможность высыхания ЦИ в сторону помещения.

В [59] проводился влажностный мониторинг конструкции стены с двойным разнесенным деревянным каркасом в новом коттедже в климатической зоне США 5А. В качестве утеплителей использовались ЦИ

<sup>16</sup> Протасевич, А.М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций и микроклимат помещений / А.М. Протасевич. – Минск : БНТУ, 2016. – 452 с.

и напыляемый пенополиуретан с открытыми ячейками. На всех стенах имелась внутренняя парозащита класса 3 – покраска по гипсокартонному листу, наружная обшивка была из ОСП. Паропроницаемость ЦИ толщиной 305 мм составила 7...10 perms, или 0,44...0,63 мг/(м·ч·Па), напыляемого ППУ с открытыми ячейками – 7.3 perms, или 0,46 мг/(м·ч·Па). Оба утеплителя в данном случае относятся к 3 классу парозащиты, т.е. они полупаропроницаемы. Содержание влаги в наружных обшивках из ОСП в стенах с ЦИ толщиной 305 мм на протяжении трех зим достигало достаточно больших значений – до 20...33%. Но за лето все стены высыхали до безопасных значений влажности, составляющих 9...12%. При контрольной разборке конструкции стены никаких видимых повреждений вроде роста плесени, изменений цвета, размеров обшивки или наличия влаги обнаружено не было, все материалы были сухие, тогда как предварительные расчеты и ожидания были пессимистичными.

Термовлажностный мониторинг и термографирование конструкций 24 домов с ЦИ приведены в [60; 61]. Среднее содержание влаги, измеренное во всех АИМ в стенах, составляло 13,3%, а в минеральной вате – 13,6%, что говорит об отсутствии существенной разницы в характере накопления влаги различных изоляционных материалов в условиях эксплуатации.

Опыт Швеции и Финляндии свидетельствует о том, что нет необходимости использовать парозащиту в конструкциях с АИМ, но ее применение приводит к более низкому содержанию влаги в строительной оболочке и, следовательно, к более низкому риску отказа конструкции. Примеры строительных конструкций с ЦИ из этих стран характеризуются тем, что практически непроницаемая пароизоляция (полиэтилен) заменяется более проницаемой парозащитой [54]. Ограждающую конструкцию с ЦИ без парозащиты тоже можно построить, но при этом конструкция должна иметь хорошую степень воздухопроницаемости [56].

В [62] исследовалась диффузия водяного пара в каркасных стенах в финском климате. Заключено, что если внутренняя поверхность стен имеет надлежащую воздухо- и парозащиту, то ЦИ может использоваться наравне с минеральной ватой. Различие между ними в том, что изоляция из натуральных волокон накапливает влагу и сохнет медленнее, чем минеральная вата, но окончательные значения относительной влажности находятся на одном уровне. Результаты испытаний в частности показали:

- в паронепроницаемой (с пароизоляцией) стене нет существенной разницы в значениях RH внутри стены вне зависимости от применения в качестве утеплителя минеральной ваты или гигроскопичного материала из натуральных волокон;
- в паропроницаемой стене возможна конденсация, несмотря на используемый утеплитель – разница лишь в том, что при использовании ЦИ конденсация начинается позже, т.е. влагоемкость гигроскопичных материалов ограничена;
- наличие пароизоляционной пленки не замедляет время сушки конструкции.

Согласно исследованиям, проведенным в Дании [63], при использовании ЦИ в деревянных каркасных конструкциях стен наличие или отсутствие парозащиты не влияет на содержание влаги внутри стены. Поэтому парозащита для ЦИ не обязательна, но при ее отсутствии воздухопроницаемость конструкции должна быть обеспечена другим способом. Результаты испытаний показали:

- в стенах с парозащитой выбор изоляционного материала (минеральная вата или ЦИ) не оказывает критического влияния на содержание влаги, поскольку максимальное содержание влаги составляло 18% для обоих материалов;
- для стены с ЦИ максимальное накопление влаги составляло 18% (влажность древесины каркаса), независимо от того, была парозащита или нет;
- для стены с минватой использование парозащиты оказывает решающее влияние на содержание влаги во внешних частях стены, поскольку максимальное содержание влаги, обнаруженное в стене без парозащиты, составляло 30% (влажность древесины каркаса).

Преимущества и недостатки паропроницаемых «дышащих» конструкций стен рассмотрены в диссертации [19]. Очевидно, паропроницаемые конструкции более подвержены риску конденсации и появлению плесени, чем конструкции с различной степенью парозащиты. А качественно выполненная парозащита дает также и необходимую воздухопроницаемость, препятствующую переносу влаги внутрь конструкции воздухом [64]. В [65] показана возможность применения ЦИ в качестве внутренней теплоизоляции без парозащиты, с нанесением штукатурки поверх ЦИ влажного напыления. Не рекомендуется использование ЦИ и минеральной ваты в качестве внутренней теплоизоляции массивных конструкций без парозадерживающего слоя<sup>17</sup>.

#### **Воздухопроницаемость**

Целлюлозная изоляция эффективно заполняет любые полости, труднодоступные места, щели, зазоры, создает плотный бесшовный изоляционный слой, повышающий герметичность конструкции и энергоэффективность эксплуатации здания. Согласно [66], конструкции с ЦИ обладают сопротивлени-

<sup>17</sup> Блэзи, В. Справочник проектировщика. Строительная физика / В. Блэзи. – М. : Техносфера, 2012. – 616 с.

ем воздухопроницаемости на 38% больше, чем со стекловатой. За счет обеспечения более высокой герметичности здания ЦИ снижает энергозатраты на отопление на 22% в сравнении со стекловатой, а также лучше сохраняет тепло. Более низкая воздухопроницаемость ЦИ приводит к отсутствию естественной конвекции в толще утеплителя и снижает потери тепла зданий, тогда как изоляция из стекловолокна показала снижение термического сопротивления на 35...50%, что было обусловлено тепловым потоком через изоляцию на чердаке, вызванным естественной конвекцией [67]. В [26] сообщается об изменениях влажности ЦИ, возникающих в результате абсорбции воздушной влаги при утечке воздуха через неплотности в конструкции. Несмотря на относительно высокую плотность структуры, ЦИ не может считаться воздушным барьером, и ее использование при новом строительстве или реконструкции следует сочетать с дополнительными мерами по герметизации конструкций.

#### **Акустические свойства**

Измеренные акустические свойства строительных конструкций с АИМ примерно такие же, как и для минеральной ваты. В некоторых случаях минеральная вата может обеспечить более высокую звукоизоляцию на низких частотах. Задувка ЦИ плотностью более 50 кг/м<sup>3</sup> приведет к некоторому ухудшению звукоизоляции [68]. Известно применение влажно-клеевой ЦИ в качестве бесшовного акустического и огнезащитного покрытия<sup>18</sup>.

#### **Пожаробезопасные свойства**

При нагревании до температуры 130 °С свойства целлюлозы изменяются лишь незначительно, при 150 °С начинается процесс медленного разрушения целлюлозы, а при температуре выше 160 °С этот процесс ускоряется<sup>19</sup>. Термическое разложение ЦИ начинается с температуры 188 °С [7]. Экзотермический распад целлюлозы происходит при нагревании до 275 °С и выше, лигнина – 350...450 °С, гемицеллюлозы – 220 °С.

Воспламеняемость целлюлозных волокон требует добавления в ЦИ антипиренов для достижения приемлемых уровней сопротивления горению и тлению. На отечественном рынке типовыми антипиренами в ЦИ являются борсодержащие добавки в количестве 19% по массе: бура – 7%, борная кислота – 12%. Оптимальное соотношение этих антипиренов определяется формулой [69]:

$$\text{борная кислота} = 11,6 + 0,185 \cdot \text{бура}.$$

Другими добавками могут являться сульфат, тригидрат алюминия, фосфат и сульфат аммония [1].

Бура (тетраборат натрия)  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  – соль тетраборной кислоты. Обычная бура (десятиводный гидрат) при нагревании до 80 °С теряет 8 молекул воды, при 100 °С медленно, а при 200 °С быстро отщепляется еще одна молекула воды, в интервале 350...400 °С происходит полное обезвоживание<sup>20</sup>.

Борная кислота (ортоборная кислота)  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – слабая неорганическая кислота в виде бесцветных кристаллов. При нагревании до 50 °С не теряет воду, но уже при 70 °С теряет воду с образованием метаборной кислоты  $\text{HBO}_2$ , а впоследствии обезвоживается до борного ангидрида  $\text{B}_2\text{O}_3$ .

Бура служит для предотвращения горения, а борная кислота также и для предотвращения тления [70]. Таким образом, в случае пожара бура увлажняет утеплитель и задерживает распространение огня.

В [5] ЦИ высушивали при температуре не выше 65 °С, чтобы предотвратить выделение кристаллической воды из буры и деструкцию кристаллической борной кислоты. Согласно немецкому техническому свидетельству Z-23.11-1236<sup>21</sup> температура сушки ЦИ составляет 70 °С.

В работе [71] приведен список публикаций по ЦИ до 1987 года, представленный в основном исследованиями пожарной опасности ЦИ и долговечности антипиренов в ее составе. Долговечность борсодержащих добавок исследовалась в ряде работ, ссылки на которые приведены в [72–74]. В [75] было заключено, что скорость сублимации антипиренов слишком мала, чтобы вызывать опасения. Тем не менее дебаты касательно долговечности добавок продолжаются [76]. В 1986 году в городе Пало-Алто, Калифорния насыпная ЦИ со 133 чердаков была протестирована на тление (smoldering combustion) и восприятие теплового потока (critical radiant flux) – только 8 образцов (6%) прошли оба теста. В 1991 году проводилось исследование 29 образцов ЦИ возрастом старше 2 лет с чердаков из разных районов США – только 17% образцов прошли оба теста на огнестойкость по ASTM C739<sup>22</sup> [77].

Огневые испытания конструкций стен показывают большую устойчивость ЦИ к огню по сравнению со стекловатой [72; 78], что справедливо и для перекрытий [79–81]. Структура целлюлозных волокон получается более плотной, что замедляет приток воздуха для горения. После разрушения обшивки стены со стороны огневого воздействия внутренняя теплоизоляция продолжает какое-то время защищать

<sup>18</sup> SONASPRAY напыляемое покрытие на основе целлюлозы – Acoustic Group [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.acoustic.ru/productions/ceiling/sonaspray/>. – Дата доступа: 13.03.2018.

<sup>19</sup> Метлицкая, Л.Л. Реставрация произведений графики : метод. рекомендации / Л.Л. Метлицкая, Е.А. Костикова. – М. : ВХРП им. акад. И.Э. Грабаря, 1995. – 183 с.

<sup>20</sup> Краткая химическая энциклопедия : в 5 т. ; редкол.: И.Л. Кнунянц (отв. ред.) [и др.]. – М. : Сов. энцикл., 1965.

<sup>21</sup> Z-23.11-1236. Wärmedämmstoff aus losen, ungebundenen Zellulosefasern-DIBt, 2016.

<sup>22</sup> ASTM C739 Standard Specification for Cellulosic Fiber Loose-Fill Thermal Insulation.



обшивку с противоположной стороны. Эта защита составляет примерно 5...10 минут для стекловаты, 10...15 мин – для каменной ваты и 25...30 мин – для ЦИ.

Сухая задувка ЦИ показала на 41% лучшую огнестойкость, чем ЦИ, нанесенная влажным напылением [82]. Огневые испытания конструкций с ЦИ также проводились в работах [83–85].

В США, основываясь на проведенных испытаниях по ASTM E119<sup>23</sup>, принято, что для деревянной каркасной стены применение ЦИ плотностью не менее 41,7 кг/м<sup>3</sup> (а для каменной и стекловаты плотностью не менее 52,9 и 32 кг/м<sup>3</sup> соответственно) дополнительно повышает огнестойкость конструкции на 15 минут согласно IBC<sup>24</sup> п. R722.6.2.5. Целлюлозная изоляция также может использоваться в качестве огнезащитного барьера (толщиной и плотностью не менее 38 мм и 25,5 кг/м<sup>3</sup>) поверх слоя полимерных утеплителей (EPS, XPS, PUR, PIR) согласно IRC<sup>25</sup> п. R316.5.3.

#### **Фунгицидные свойства**

Если целлюлозная изоляция защищена от плесени борсодержащими добавками, риск роста плесени в материале не больше, чем в других изоляционных материалах. Поскольку важно избегать роста плесени и других микроорганизмов в изоляционных материалах, как органических, так и неорганических, важно, чтобы они были сухими [86]. Лабораторные исследования [87–89] показывают, что ЦИ, обработанная соединениями бора, вряд ли проявит рост плесени, даже если ее подвергать искусственно высоким концентрациям жизнеспособных спор грибов. Тот факт, что темпы роста уменьшались в контрольных образцах и отсутствие очевидного роста грибков на зараженных образцах, говорит, что ЦИ является сложным субстратом для разрушения и, следовательно, требует высокой активности воды и специализированных видов грибов, приспособленных к разрушению целлюлозы и росту в ЦИ.

При отсутствии возможности высыхания ЦИ влажного нанесения возможно появление плесени, особенно при использовании пароизоляции [52]. Рост плесени в конструкциях с ЦИ влажного нанесения исследовался в [90; 91]. Плесень была обнаружена в некоторых местах. Сделан вывод, что бораты в качестве фунгицида могут быть эффективными при определенных концентрациях против определенных видов плесени, но не против других. В работах [57; 59] упоминается, что в ЦИ рост плесени меньше чем в стекловате при равных условиях. Согласно Декларации экологического продукта от Европейской ассоциации целлюлозной изоляции [34] ЦИ не является благоприятной средой для роста грибов.

#### **Коррозионные свойства**

Несмотря на то, что ЦИ является почти нейтральной химической средой – водородный показатель  $pH = 7,2...7,3$ <sup>26</sup> – химические добавки в ее составе при повышенной влажности могут вызывать коррозию контактирующих с ней металлических конструкций, труб, проводов и крепежных элементов. В [92; 93] на протяжении 190 дней испытывались конструкции стен с различными утеплителями. Все образцы купонов в ЦИ показали коррозию, но без значительной потери массы металлов. При этом в образцах с каменной и стеклянной ватой коррозии не наблюдалось, из-за низкой сорбции водяного пара у этих материалов. В [94] проводились долгосрочные коррозионные испытания (время испытания 35 000 часов или 4 года) стальных тонкостенных профилей в контакте с разными утеплителями. Результаты показывают, что ЦИ способствует коррозии цинка в условиях повышенной относительной влажности воздуха (RH 85%), но продуктов коррозии металла не было обнаружено ни в одном из образцов. Нет никаких признаков коррозии цинка на образцах с минеральной ватой. В случае непрерывной конденсации (RH 100%) поверхностная коррозия стали была найдена во всех образцах. Добавки из буры и борной кислоты были активны – они повторно кристаллизуются на поверхности металла, в результате чего коррозия поверхности металла в образцах с ЦИ усиливается в сравнении с другими образцами. Согласно американскому стандарту ASTM C739 ЦИ должна проходить тест на коррозию. В первую очередь, это относится к распространенным в США смесям ЦИ на основе солей аммония, вызывающих сильную коррозию металлов [57; 95].

Согласно австралийскому стандарту AS/NZS 4859.1<sup>27</sup> п. 5.2.2, если огнезащитная композиция является единственной добавкой и представляет собой смесь борной кислоты и буры, при этом бура составляет от 15 до 35% от массы смеси, а общее количество огнезащитного вещества составляет не менее 17% от конечного продукта по массе, то этот продукт следует рассматривать как не вызывающий коррозию, и проведение испытаний на коррозию не требуется.

#### **Долговечность**

Расчетный срок службы ЦИ принимают равным 50 лет, но фактический может быть значительно больше. В [96] обследовано 32 дома с ЦИ со сроком эксплуатации 2...9 лет – особых проблем, связанных с ЦИ, не выявлено. Циклические испытания ЦИ на температурно-влажностные воздействия в количестве 50 циклов проводились в работе [6]. Для вертикально уложенной ЦИ плотностью 65 кг/м<sup>3</sup> в стене изменение коэффициента теплопроводности составило 3,8%, что позволяет прогнозировать сохранение теп-

<sup>23</sup> ASTM E119 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials.

<sup>24</sup> 2018 International Building Code.

<sup>25</sup> 2018 International Residential Code for One- and Two-Family Dwellings.

<sup>26</sup> Nu-Wool. Fire and Sound Cellulose Insulation. Safety data sheet [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.nuwool.com>.

<sup>27</sup> AS/NZS 4859.1-2002 Materials for the thermal insulation of buildings – General criteria and technical provisions.

лозащитных свойств ЦИ в процессе эксплуатации более 40 лет и свидетельствует о том, что временной ресурс эксплуатации может быть увеличен.

В случае прямого и длительного попадания воды на слой ЦИ (когда вода течет сквозь слой изоляции) бура и борная кислота вымываются, поэтому после подобных аварий рекомендуется производить замену изоляционного слоя. Известно, что в 1 л воды можно растворить 49 г борной кислоты или 51 г буры. Испытания [97] показали, что при погружении образцов ЦИ массой 16...60 г с содержанием 4% борной кислоты и 4% буры в 1 л воды за 30 мин растворялось 50...65% соединений бора, независимо от длительности нахождения ЦИ в воде. Намокание ЦИ приводит к недопустимой усадке. В ИвГПУ<sup>28</sup> проведено исследование ряда утеплителей, в том числе и ЦИ, на предмет их поведения при наступлении форс-мажорной ситуации – прорыва системы отопления или водоснабжения дома. Установлено, что ЦИ, пропитавшись водой, дала усадку около 30% по объему и после высыхания не восстановила исходный объем.

#### Техническое регулирование

Нормативное техническое регулирование использования ЦИ существует в США с 1978 года [70], в Австралии с 1981, в Австрии и Германии – с 1985. Существует ряд ассоциаций производителей ЦИ<sup>29</sup>. Согласно СТБ EN ISO 10456-2011<sup>30</sup> ЦИ имеет следующие свойства: теплоемкость  $c = 1,6$  кДж/(кг·К); сорбционная влажность при 23 °С и 50% относительной влажности воздуха:  $u_{23,50} = 11\%$ ; при 23 °С и 80% влажности:  $u_{23,80} = 18\%$ . Свойства ЦИ в ЕС для каждого производителя оцениваются в технических свидетельствах на основе EAD 040138-00-1201<sup>31</sup>, разработанного с учетом современных технических и научных знаний.

Выборочные свойства ЦИ из некоторых европейских технических свидетельств сведены в таблицу 4.

Таблица 4. – Технические свойства целлюлозной изоляции в ЕС

Наименование показателя	По <sup>32</sup>	По <sup>33</sup>
Термическое сопротивление по EN 12667, Вт/(м·К)		
$\lambda_{(10, dry, 90/90)}$	0,0371	0,0388
$\lambda_{(10, dry, limit)}$	0,0367	–
Декларируемое термическое сопротивление по EN 10456, Вт/(м·К)		
$\lambda_{D(23,50) cat1}$	0,039	0,040
$\lambda_{D(23,50) cat2}$	0,038	–
Сорбционная влажность, %		
$u_{23,50}$ (RH 50%)	6,8	9,2
$u_{23,80}$ (RH 80%)	11,1	15,2
предельная	14	–
Коэффициенты конверсии массового содержания влаги, кг/кг		
$f_{u1}$ (dry – 23/50)	0,47	0,24
$f_{u2}$ (23/50 – 23/80)	0,58	0,42
Осадка по ISO/CD 18393:2002-08, %		
для чердаков при 31 кг/м <sup>3</sup> (Method A)	8	–
для чердаков при 33 кг/м <sup>3</sup> (Method D, 40 °С и RH 90%)	10	–
для чердаков при 37 кг/м <sup>3</sup> (Method A)	–	10
для чердаков при 37 кг/м <sup>3</sup> (Method D, 40 °С и RH 90%)	–	15
для стен при 38 кг/м <sup>3</sup> (Method C)	0	–
для стен при 56 кг/м <sup>3</sup> (Method C)	–	0
Сопротивление воздухопроницаемости по EN 29053, кПа·с/м <sup>2</sup>		
при 30 кг/м <sup>3</sup>	5,3	–
при 40 кг/м <sup>3</sup>	–	9,0
при 50 кг/м <sup>3</sup>	25,1	17,6
Еврокласс горючести по EN 13501-1 (при плотности > 40 кг/м <sup>3</sup> )		
> 40 мм	E	E
> 100 мм	B-s2, d0	D-s2, d0

<sup>28</sup> Письменский, В.Д. Эковата без прикрас [Электронный ресурс] / В.Д. Письменский. – Режим доступа: <http://forum.vashdom.ru/attachments/ekovata-i-ekologia-pdf.20291>.

<sup>29</sup> СИМА. (North American) Cellulose Insulation Manufacturers Association [Electronic resource]. – Mode of access: <http://cellulose.org/index.php> <http://cellulose.org/index.php>.

ECIA. European Cellulose Insulation Association [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.ecia.eu.com/>.

ACIMA. Australian Cellulose Insulation Manufacturers' Association [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.acima.asn.au/>.

<sup>30</sup> Материалы и изделия строительные. Теплотехнические свойства. Методики определения нормируемых и расчетных значений : СТБ EN ISO 10456-2011.

<sup>31</sup> EAD 040138-00-1201 In-situ formed loose fill thermal and/or acoustic insulation products made of vegetable fibres.

<sup>32</sup> Z-23.11-1236. Wärmedämmstoff aus losen, ungebundenen Zellulosefasern.

ETA-06/0076. Dämmstoff aus losen, ungebundenen Zellulosefasern.

<sup>33</sup> ETA-13/0623. In-situ formed loose fill thermal insulation material made of cellulose fibres.

В отечественных стандартах ЦИ присутствует в нескольких СТО<sup>34</sup>. В таблицах 5–6 представлены данные из СТО 67386386-002-2011, которые достаточно хорошо согласуются с зарубежными исследованиями.

Таблица 5. – Технические показатели ЦИ сухого нанесения по СТО 67386386-002-2011

Наименование показателя	Значение показателя при плотности материала, кг/м <sup>3</sup>		
	40±5	60±5	80±5
Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии при температуре 25±2 °С, Вт/(м·°С), не более	0,040	0,041	0,042
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,33±0,05		
Коэффициент воздухопроницаемости, кг/м·ч·Па	0,3±0,05	0,4±0,05	0,1±0,05
Сорбционная влажность, %, соответствующая:			
- условиям эксплуатации «А»	15±2		
- условиям эксплуатации «Б»	20±2		
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), при сорбционной влажности, соответствующей:			
- условиям эксплуатации «А», не более	0,042	0,045	0,048
- условиям эксплуатации «Б», не более	0,052	0,055	0,058
Сжимаемость, под удельной нагрузкой 2000 Па (0,02 кгс/см <sup>2</sup> ), %	28±2	22±2	20±2
Упругость, %	80±2	86±2	90±2
Кислотное число (рН), не более	8		

Таблица 6. – Технические показатели ЦИ влажного нанесения по СТО 67386386-002-2011

Наименование показателя	Значение показателя
Плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	80±10
Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии при температуре 25±2 °С, Вт/(м·°С), не более	0,046
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,3±0,05
Коэффициент воздухопроницаемости, кг/(м·ч·Па)	0,2±0,05
Сорбционная влажность, %, соответствующая:	
- условиям эксплуатации «А»	10±2
- условиям эксплуатации «Б»	20±2
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), при сорбционной влажности, соответствующей:	
- условиям эксплуатации «А», не более	0,065
- условиям эксплуатации «Б», не более	0,090

Пожарно-технические свойства отечественной ЦИ зависят от производителя и количества антипиренов в ее составе и сведены в таблицу 7.

Таблица 7. – Пожарно-технические показатели отечественной ЦИ

Наименование показателя	Значение
Горючесть по ГОСТ 30244, группа	Г1...Г3, в основном Г2
Воспламеняемость по ГОСТ 30402, группа	В1...В3, в основном В2
Дымообразующая способность по ГОСТ 12.1.044, группа	Д1...Д3, в основном Д2
Токсичность продуктов горения по ГОСТ 12.1.044, группа	Т3

### Выводы

В строительстве необходимо внедрять и использовать экономически эффективные и экологически чистые материалы, снижающие энергоемкость строительства. Обзор литературы показал, что целлюлозная изоляция (далее – ЦИ) соответствует всем необходимым требованиям и обладает рядом ключевых экологических преимуществ по сравнению с другими изоляционными материалами. Обоснованы сле-

<sup>34</sup> Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий : СТО 00044807-001-2006.

Организация и проведение работ по утеплению ограждающих конструкций зданий теплозвукоизоляционным материалом «Эковата» : СТО 67386386-002-2011.

Проектные решения наружных стен и перекрытий зданий с применением теплозвукоизоляционного материала «Эковата» СТО 68667359-003-2011.

дующие технические свойства и показатели ЦИ: минимальная величина плотности ЦИ сухой задувки в вертикальных конструкциях, обеспечивающая гарантированную безусадочность – 55...60 кг/м<sup>3</sup>, а на горизонтальных конструкциях осадка составляет до 15%; расчетное значение теплопроводности отечественной ЦИ сухой задувки рекомендуется принимать в среднем не менее 0,045 Вт/(м·К); коэффициент паропроницаемости ЦИ может приниматься в среднем равным 0,54 мг/(м·ч·Па); удельную теплоемкость ЦИ принимать равной 1,6 кДж/(кг·К). Рассмотренные исследования показывают отсутствие существенной разницы в характере накопления влаги целлюлозной и минераловатной изоляции в условиях эксплуатации Дании, Швеции, Финляндии, при этом относительная влажность воздуха при эксплуатации ЦИ не должна превышать 85%. ЦИ обладает низкой воздухопроницаемостью, что приводит к отсутствию естественной конвекции в толще утеплителя и снижает потери тепла зданий. ЦИ не является благоприятной средой для роста грибов. Антипиреновые добавки на основе солей аммония должны применяться в ЦИ осторожно, так как могут вызывать сильную коррозию металлов и являются недолговечными – со временем они разлагаются при эксплуатационной влажности с выделением неприятного аммиачного запаха. Количество антипиреновых добавок на основе соединений бора должно соответствовать европейскому уровню и не превышать 5% по массе ЦИ; температура эксплуатации/сушки такой ЦИ должна быть меньше 70 °С для предотвращения потерь пожаробезопасных свойств соединений бора. Попадание жидкости на ЦИ приводит к вымыванию добавок и необратимой усадке материала до 30%, поэтому в случае аварийного намокания следует производить замену изоляции.

Приведенная информация по свойствам и ограничениям целлюлозной изоляции позволяет с пониманием пределов закладывать ЦИ в проекты и может расширить внедрение ЦИ в строительную практику. Рекомендуется рассмотреть возможность проведения отечественных испытаний ЦИ с официальным внесением ЦИ в действующие технические нормативно-правовые акты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A review on the properties of cellulose fibre insulation / P. Lopez Hurtado [et al.] // *Build. Environ.* – 2016. – Vol. 96. – P. 170–177.
2. Гнип, И.Я. Теплофизические свойства эковаты / И.Я. Гнип, В.И. Кершулис, С.А. Веялис // *Строительные материалы.* – 2000. – № 11. – С. 25–27.
3. Веялис, С.А. Обследование влажности эковаты в облегченных кирпичных стенах зданий с нормальным тепловлажностным режимом / С.А. Веялис, И.Я. Гнип, В.И. Кершулис // *Строительные материалы.* – 2001. – № 7. – С. 19–21.
4. Майсурадзе, Н.В. Исследование теплофизических свойств эковаты в ограждающих конструкциях / Н.В. Майсурадзе, Н.А. Трофимова, А.Г. Петухова // *Строительные материалы.* – 2009. – № 8. – С. 48–49.
5. Кетов, А.А. Исследование экологической опасности теплоизоляционного материала эковата / А.А. Кетов, П.А. Кетов, М.П. Красновских // *Строительные материалы.* – 2016. – № 5 – С. 78–80.
6. Кресова, Е.В. Исследование теплопотерь индивидуального жилого дома, построенного с применением местных теплоизоляционных материалов / Е.В. Кресова, Д.Ю. Кужелко, С.П. Кундас // *Журн. Белорус. гос. ун-та.* – 2017. – № 4. – С. 92–99.
7. Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer / C. Pedersen [et al.], 2003. – 158 p.
8. Rasmussen, T.V. Praktiske erfaringer med alternative isoleringsmaterialer / T.V. Rasmussen, K.F. Hansen. – 2004. – 74 p.
9. Berge, B. The ecology of building materials / B. Berge, 2009. – 447 p.
10. Siddiqui, S.A. A handbook on cellulose insulation / S.A. Siddiqui. – R.E. Krieger Pub. Co, 1989. – 178 p.
11. Triboulot, P. L'isolation en ouate de cellulose principes et mise en oeuvre / P. Triboulot, E. Mougel, J. Brilland. – 2010. – 94 p.
12. Bomberg, M. EE9-1 innovative materials: bio-fiber batts and boards / M. Bomberg, G. Chrenka // *Proceedings of BEST-2 conference.* – 2010. – P. 12–14.
13. Kwon, Y.C. Cellulose Insulation for Use as Building Insulation in Korea / Y.C. Kwon, D.W. Yarbrough. – 2017. – Vol. 70, № Amsce. – P. 75–79.
14. Kwon, Y.C. A Comparison of Korean Cellulose Insulation with Cellulose Insulation Manufactured in the United States of America / Y.C. Kwon, D.W. Yarbrough // *J. Build. Phys.* – 2004. – Vol. 27, № 3. – P. 185–197.
15. Vejelis, S. Performance of Loose-Fill Cellulose Insulation / S. Vejelis, I. Gnipas, V. Keršulis // *Mater. Sci.* – 2006. – Vol. 12, № 4. – P. 2–4.
16. Фриштер, Ю.В. Технология строительства энергоэффективных домов / Ю.В. Фриштер // *Строительные материалы.* – 2009. – № 4. – С. 121–122.
17. National Toxicology Program. NTP Toxicity study report on the atmospheric characterization, particle size, chemical composition, and workplace exposure assessment of cellulose. Toxicity Report Series Number 74. NIH Publication No. 06-5963 / National Toxicology Program. – 2006. – 1-62, A1-C2 p.
18. ECHA. Background document to RAC and SEAC opinions on inorganic ammonium salts / ECHA, 2015. – 227 p.

19. Vinha, J. Hygrothermal performance of timber-framed external walls in Finnish climatic conditions: A method for determining the sufficient water vapour resistance of the interior lining of a wall assembly / J. Vinha. – Ph.D. thesis, Tampere University of Technology, 2007. – 380 p.
20. BENZ24. Ökologische Dämmstoffe – Der Ratgeber [Electronic resource] / BENZ24. – Mode of access: [https://benz24.de/media/landingpages/ratgeber/ebook/oekologisch\\_daemmen/leitfaden-ratgeber-oekologische-daemmstoffe.pdf](https://benz24.de/media/landingpages/ratgeber/ebook/oekologisch_daemmen/leitfaden-ratgeber-oekologische-daemmstoffe.pdf).
21. Дубатовка, А.И. Огневые испытания стеновых панелей с каркасом из тонкостенных холодноформованных профилей со сборной обшивкой из стекломгнезиевого листа / А.И. Дубатовка // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 8. – С. 57–61.
22. Дубатовка, А.И. Современные конструктивные решения каркасных зданий с применением легких ограждающих конструкций / А.И. Дубатовка // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 1. – С. 102–108.
23. Dubatovka, A.I. Fire tests of cold-formed steel structures. Wall slab with magnesium oxide assembled cladding / A.I. Dubatovka, R.V. Tverdokhlebov, S. Starovoi'tov // Proc. of the 7th European Conference on Steel and Composite Structures EUROSTEEL 2014, 10–12 Sept. 2014. – Naples, Italy : ECCS European Convention for Constructive Steelwork, 2014. – P. 1–6 (11/41–395).
24. McConnell, E.E. Summary of data for chemical selection. Cellulose insulation / E.E. McConnell. – 1994. – 25 p.
25. Chemical and physical properties of processed newspaper compared to wheat straw and wood shavings as animal bedding / P.L. Ward [et al.] // J. Dairy Sci. – 2000. – Vol. 83, № 2. – P. 359–367.
26. Derome, D. Moisture Accumulation in Cellulose Insulation Caused by Air Leakage in Flat Wood Frame Roofs / D. Derome // J. Build. Phys. – 2005. – Vol. 28, № 3. – P. 269–287.
27. Fink, H.-P. Progress in cellulose shaping: 20 years industrial case studies at Fraunhofer IAP / H.-P. Fink, J. Ganster, A. Lehmann // Cellulose. – 2014. – Vol. 21, № 1. – P. 31–51.
28. Jones, C. Embodied Energy and Carbon – The ICE Database v.2.0 [Electronic resource] / C. Jones, G. Hammond. – Mode of access: <http://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html>. – Дата доступа: 22.03.2018.
29. Zabalza Bribián, I. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential / I. Zabalza Bribián, A. Valero Capilla, A. Aranda Usón // Build. Environ. – 2011. – Vol. 46, № 5. – P. 1133–1140.
30. A comparative Life Cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool and flax / A.C. Schmidt [et al.] // Int. J. Life Cycle Assess. – 2004. – Vol. 9, № 1. – P. 53–66.
31. Takano, A. A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: A case study in a Finnish context / A. Takano, M. Hughes, S. Winter // Build. Environ. – 2014. – Vol. 82. – P. 526–535.
32. Tetey, U.Y.A. Effects of different insulation materials on primary energy and CO<sub>2</sub> emission of a multi-storey residential building / U.Y.A. Tetey, A. Doodoo, L. Gustavsson // Energy Build. – 2014. – Vol. 82. – P. 369–377.
33. Дубатовка, А.И. Экологическая безопасность соединений бора в целлюлозной изоляции / А.И. Дубатовка // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. – 2018.
34. ECIA. Environmental Product Declaration. Loose fill cellulose insulation [Электронный ресурс] / ECIA. – Режим доступа: [http://ecia.eu.com/files/news/20180118 EPD\\_Core\\_ECIA-version 2.4.pdf](http://ecia.eu.com/files/news/20180118 EPD_Core_ECIA-version 2.4.pdf). – Дата доступа: 12.03.2018.
35. Rasmussen, T.V. Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering i vægge / T.V. Rasmussen, 2001. – 77 p.
36. Rasmussen, T.V. Modelling Settling of Loose-fill Insulation in Walls, Part I / T.V. Rasmussen // J. Build. Phys. – 2000. – Vol. 25. – P. 129–141.
37. Rasmussen, T.V. Modelling Settling of Loose-fill Insulation in Walls, Part II Determination of Coefficients / T.V. Rasmussen // J. Build. Phys. – 2001. – Vol. 25, № January 2002. – P. 189–208.
38. Rasmussen, T.V. Verification of Density Predicted for Prevention of Settling of Loose-fill Cellulose Insulation in Walls / T.V. Rasmussen // J. Build. Phys. – 2003. – Vol. 27, № 1. – P. 49–69.
39. Rasmussen, T.V. Prediction of density for prevention of settling of hygroscopic and nonhygroscopic loose-fill insulation in walls / T.V. Rasmussen // J. Therm. Envel. Build. Sci. – 2005. – Vol. 28, № 3. – P. 245–267.
40. Salonvaara, M. Impact of Weather on Predicting Drying Characteristics of Spray-Applied Cellulose Insulation / M. Salonvaara, M. Pazera, A. Karagiozis // Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings XI. – 2010. – 14 p.
41. The properties of cellulose insulation applied via the wet spray process / P. Lopez Hurtado [et al.] // Build. Environ. – 2016. – Vol. 107. – P. 43–51.
42. Nielsen, B.L. Alternativ isolering i Tyskland / B.L. Nielsen, M. Pedersen, 1999. – 73 p.
43. Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials / F. Domínguez-Muñoz [et al.] // Energy Build. – 2010. – Vol. 42, № 11. – P. 2159–2168.
44. Nicolajsen, A. Thermal transmittance of a cellulose loose-fill insulation material / A. Nicolajsen // Build. Environ. – 2005. – Vol. 40, № 7. – P. 907–914.
45. An experimental data set for benchmarking 1-D, transient heat and moisture transfer models of hygroscopic building materials. Part II: Experimental, numerical and analytical data / P. Talukdar [et al.] // Int. J. Heat Mass Transf. – 2007. – Vol. 50, № 25–26. – P. 4915–4926.

46. Sandberg, P.I. Determination of the Effects of Moisture on the Thermal Transmissivity of Cellulose Fiber Loose-Fill Insulation / P.I. Sandberg // *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings III*. – 1992. – P. 517–525.
47. Experimental Investigation of the Hygrothermal Performance of Insulation Materials / K.K. Hansen [et al.] // *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VIII*, 2001. – 10 p.
48. Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer [Электронный ресурс] / K.K. Hansen [et al.]. – Режим доступа: <http://www.alternativisolering.dk/resumeer/bkm-ibe.htm>. – 1999. – 37 p.
49. Rode, C. Organic Insulation Materials : Effect on Indoor Humidity and Necessity of a Vapor Barrier / C. Rode // *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII*. – 1998. – P. 109–121.
50. Hansen, K.K. Sorption isotherms – A catalogue / K.K. Hansen, 1986. – 142 p.
51. CMHC. Wet-Sprayed Cellulose Insulation in Wood-Frame Construction Introduction, Research & Development Highlights Technical Series 90-240, Edmonton, Canada / CMHC. – 1990.
52. Godish, T.J. Mold Infestation of Wet Spray-Applied Cellulose Insulation / T.J. Godish, D.R. Godish // *J. Air Waste Manag. Assoc.* – 2006. – Vol. 56, № 1. – P. 90–95.
53. Vrána, T. Comparison of fibrous insulations – Cellulose and stone wool in terms of moisture properties resulting from condensation and ice formation / T. Vrána, K. Gudmundsson // *Constr. Build. Mater.* – 2010. – Vol. 24, № 7. – P. 1151–1157.
54. Hansen, M.H. Brug af alternativ isolering i Finland og Sverige / M.H. Hansen, S.S. Eriksen. – 2000. – 64 p.
55. Moisture Buffer Value of Materials in Building / C. Rode [et al.] // *J. ASTM Int.* – 2007. – Vol. 4, № 5. – 12 p.
56. Niemelä, T. Carbon Dioxide Permeability of Cellulose-Insulated Wall Structures / T. Niemelä, J. Vinha, R. Lindberg, 2000. – P. 55.
57. Rose, W.B. Temperature and Moisture Performance of Wall Assemblies with Fiberglass and Cellulose Insulation / W.B. Rose, D.J. McCaa // *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII*. – 1998. – P. 133–144.
58. Guide to determining climate regions by county / M.C. Baechler [et al.]. – Vol. 7.3, 2015. – 50 p.
59. Ueno, K. BA-1501: Monitoring of Double-Stud Wall Moisture Conditions in the Northeast About / K. Ueno, 2015. – 72 p.
60. Rasmussen, T.V. Måling på alternative isoleringsmaterialer / T.V. Rasmussen, A. Nicolajsen. – 2004. – 96 p.
61. Rasmussen, T.V. Assessment of the performance of organic and mineral-based insulation products used in exterior walls and attics in dwellings / T.V. Rasmussen, A. Nicolajsen // *Build. Environ.* – 2007. – Vol. 42, № 2. – P. 829–839.
62. Vinha, J. Drying rate of timber-framed external wall assemblies in Nordic climate / J. Vinha, P. Käkälä // *Performance of Exterior Envelopes of Buildings IX*. – Florida, 2004. – P. 11.
63. Fugtsikre træfacader. Fugtindhold i højisolerede træfacader (in Danish. Moisture-safe timber frame walls. Moisture content insuperinsulated timber frame walls) / T. Andersen [et al.], 2002. – 95 p.
64. Hagentoft, C.-E. Moisture Conditions in a North Facing Wall with Cellulose Loose Fill Insulation: Constructions with and without Vapor Retarder and Air Leakage / C.-E. Hagentoft, L.-E. Harderup // *J. Build. Phys.* – 1996. – Vol. 19, № 3 – P. 228–243.
65. Kautsch, P. Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre / P. Kautsch. – Wien, 2005. – 112 p.
66. Boonyartikarn, S. Fiber Glass vs. Cellulose Installed Performance / S. Boonyartikarn, S.R. Spiezle, 1990.
67. Wilkes, K.E. Thermal performance of fiberglass and cellulose attic insulations / K.E. Wilkes, P.W. Childs // *Performance of the Exterior Envelopes of Buildings V*. – Clearwater Beach, Florida, 1992. – P. 357–367.
68. Pedersen, D.B. Bygningsakustiske egenskaber for bygningsdele med alternative isoleringsmaterialer / D.B. Pedersen, 2003. – 55 p.
69. Day, M. Combustibility of loose fiber fill cellulose insulation: The role of borax and boric acid / M. Day, D.M. Wiles // *J. Therm. Envel. Build. Sci.* – 1978. – Vol. 2, № 1 – P. 30–39.
70. Sprague, R.W. The Use of Boron Products in Cellulose Insulation / R.W. Sprague, K.K. Shen // *J. Therm. Insul.* – 1979. – Vol. 2, № 4 – P. 161–174.
71. Chiou, N. A Review of the Literature: Fire Retardants in Cellulosic Insulation / N. Chiou, D.W. Yarbrough // *J. Therm. Envel. Build. Sci.* – 1987. – Vol. 10, № 3 – P. 219–224.
72. National Fiber. Cellulose Insulation and Fire Safety [Электронный ресурс] / National Fiber. – Режим доступа: <http://www.nationalfiber.com/docs/CelluloseInsulationandFireSafety0909.pdf>.
73. Applegate Insulation. New Data on Fire Safety of Aged Cellulose Insulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.applegateinsulation.com/Product-Info/Technical-Pages/249492.aspx>. – Дата доступа: 12.03.2018.
74. Lea, D. Cellulose: Building insulation with high recovered content, low embodied energy / D. Lea // *Green Build. Mater. 96 Conf.* – 1996. – Vol. 1. – 4 p.
75. Chiou, N. Permanency of boric acid used as a fire retardant in cellulosic insulation / N. Chiou, D. Yarbrough // *Energy Build.* – 1990. – Vol. 14. – P. 351–361.

76. Fallis, A. Thermal properties and use of cellulosic insulation produced from recycled paper / A. Fallis // J. Chem. Inf. Model. – 2013. – Vol. 53, № 9. – P. 1689–1699.
77. Dowds, T.J.J. A Field Study of the Fire Resistance Characteristics of Aged Loose-Fill Insulations: An Update / T.J.J. Dowds, L.J.J. Infante, E. Pentz // J. Therm. Envel. Build. Sci. – 1991. – Vol. 15, № 1. – P. 45–56.
78. CIMA. The burning question: the truth about cellulose insulation & fire [Электронный ресурс] / CIMA. – Режим доступа: <http://cellulose.org/userdocs/SpecialReport01-TheBurningQuestion.pdf>. – Дата доступа: 13.03.2018.
79. Sultan, M.A. Results of Fire Resistance Tests on Full-Scale Floor Assemblies / M.A. Sultan, Y.P. Sèguin, P. Leroux. – 1998. – 189 p.
80. Results of Fire Resistance Tests on Small-Scale Floor Assemblies / M.A. Sultan [et al.], 2000. – 80 p.
81. Results of Fire Resistance Tests on Full-Scale Floor Assemblies – Phase II / M.A. Sultan [et al.], 2005. – 661 p.
82. CMHC. Results of Fire Resistance Tests on Small-Scale Insulated and Non-Insulated Gypsum Board Protected Wall Assemblies // J. Build. Phys. – 1997. – Vol. 21, № 2. – P. 128–136.
83. Sultan, M.A. Results of Fire Resistance Tests on Full-Scale Gypsum Board Wall Assemblies / M.A. Sultan, Lougheed. – 2002.
84. Lionel, A. Fire Performance of Loose Fill Cellulosic Insulation in Residential Occupancies – A Progress Report / A. Lionel, 1980. – 58 p.
85. Kolarkar, P.N. Structural and Thermal Performance of Cold-formed Steel Stud Wall Systems under Fire Conditions / P.N. Kolarkar. – Ph.D. thesis, Queensland University of Technology, 2010. – 412 p.
86. Hansen, M.H. Skimmelsvampevækst i organiske isoleringsmaterialer / M.H. Hansen, 2002. – P. 15.
87. Herrera, J. Assessment of fungal growth on sodium polyborate-treated cellulose insulation / J. Herrera // J. Occup. Environ. Hyg. – 2005. – Vol. 2, № 12. – P. 626–632.
88. Herrera, J. The sporocidal and sporostatic effect of sodium polyborate and boron-treated cellulose insulation on common indoor fungal species / J. Herrera, M.E. Omodon, C.L. Dillavou // Micol. Apl. Int. – 2007. – Vol. 19, № 2. – P. 35–49.
89. Herrera, J. Sodium Polyborate-Based Additives on Recycled Cellulose Insulation Kill or Prevent Germination of Common Indoor Fungi / J. Herrera // Building Enclosure Science and Technology (BEST). – Minneapolis, 2008. – P. 1–10.
90. Moisture Performance of a Contemporary Wood-Frame House Operated at Design Indoor Humidity Levels / C. Carll [et al.], – 2007.
91. Occurrence of Mold in a Two-Story Wood-Frame House Operated at Design Indoor Humidity Levels / C.A. Clausen [et al.], 2009.
92. Sheppard, K. Corrosiveness of Residential Thermal Insulation Materials under Simulated Service Conditions / K. Sheppard, R. Weil, A. Desjarlais // Insulation Materials, Testing and Applications. – ASTM International, 1990. – P. 634–653.
93. Comparisons of Several Accelerated Corrosiveness Test Methods for Thermal Insulating Materials / K. Sheppard [et al.] // Corros. Met. Under Therm. Insul. – 1985. – P. 220–230.
94. Nieminen, J. Hygrothermal performance of light steel-framed walls / J. Nieminen, M. Salonvaara, 2000. – 29 p.
95. Cellulose Insulation and Corrosion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chemaxx.com/cellulose.html>. – Дата доступа: 11.03.2018.
96. Nielsen, B.L. Alternativ isolering – undgå byggeskader / B.L. Nielsen, L. Olsen, 2004. – 102 p.
97. Dahi, Z. Recyclingfähige Dämmstoffe aus Altpapier für Syrien : Dr.-Ing. Dissertation / Z. Dahi ; Universität Kassel, 2012. – 195 p.

Поступила 15.06.2018

## A REVIEW OF THE TECHNICAL PROPERTIES OF CELLULOSE INSULATION

A. DUBATOUKA, R. TVERDOKHLEBOV

*Cellulose insulation (CI) made from recycled paper, has a low embodied energy and good thermal conductivity. However, due to a lack of information in Russian on the technical properties of CI and the experience of application, CI is little used in comparison with traditional insulating materials. A review and structure of existing scientific information on CI was conducted. The history and volumes of CI application, its composition and production technology, ecological, mechanical, thermal, moisture, acoustic, fire, fungicidal, corrosive properties, durability, modern technical regulation are considered. The provided information answers a number of the vital issues and confirms relevance of the use of CI in construction. Relatively high operational properties of foreign CI manufacturers indicate the prospects of further improvement of the domestic CI.*

**Key words:** cellulose insulation, waste paper, recycled paper, organic fibrous materials, insulating materials, life cycle assessment, settling, vapor retarder, vapor barrier, properties.