

УДК 66.045.3

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-32-38

Т.А. Нестерова<sup>1</sup>, А.В. Зуев<sup>1</sup>, М.М. Платонов<sup>1</sup>**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ДЛЯ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА САМОЛЕТОВ**

*Представлены результаты исследований по разработке теплоизоляционного материала на основе органического волокна Арселон, предназначенного для экранирования трубопроводов систем кондиционирования воздуха самолетов.*

*На основе органического волокна Арселон (полимер полиоксадиазол) изготовлены 8 вариантов образцов нетканого иглопробивного материала, отличающихся толщиной и плотностью, и исследованы их свойства: поверхностная и объемная плотности, коэффициент теплопроводности в интервале температур 20–250°C, горючесть в исходном состоянии и после теплового старения. Определен перепад температуры на внешней поверхности образцов при одностороннем нагреве нижней плиты пресса – до 250°C. По результатам исследований выбран оптимальный образец нетканого иглопробивного материала.*

*Для защиты материала от механических повреждений, загрязнений и влаги выбран облицовочный материал. На основе выбранных материалов изготовлен теплоизоляционный материал с защитным слоем и исследованы его свойства. Соединение материалов проводилось с помощью клея.*

**Ключевые слова:** трубопровод, система кондиционирования воздуха, теплоизоляционный материал, органическое волокно, коэффициент теплопроводности.

*The research results on heat-insulating material development, based on arselon organic fiber for shielding of pipelines of aircraft air condition systems are presented in this article.*

*Eight types of nonwoven needled material samples based on arselon (polyoxydiazole polymer) organic fiber, having different thickness and density, have been manufactured and their properties were investigated: surface and volume density, thermal conductivity coefficient in temperature range from 20 to 250°C, combustion in initial state and after heat aging. Temperature change on exterior surface of samples is defined during one-sided heating of the lower press plate up to 250°C. The optimum sample of nonwoven needled material has been chosen on results of investigations.*

*The facing material is chosen to protect the material against mechanical damages, pollution and moisture. The heat-insulating material with protection layer is produced on the base of chosen materials, its properties are investigated. Material adhering was carried out by glue.*

**Keywords:** pipeline, air condition systems, heat-insulating material, organic fiber, conductivity coefficient.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Теплоизоляционные материалы широко применяются во многих областях авиационной техники и отличаются большим разнообразием ассортимента. Они подразделяются на рыхловолокнистые, стеганные ( $d=40-105$  кг/м<sup>3</sup>), плетеные (шнуры), формованные ( $d=150-500$  кг/м<sup>3</sup>) и тканые (кремнеземные и асбестовые). Ранее для теплоизоляции трубопроводов разработаны материалы на основе стеклянных, базальтовых, кварцевых волокон и различных связующих. Наибольшее применение для изоляции трубопроводов нашли гибкие материалы – рыхловолокнистые и стеганные маты.

В настоящее время из разработанных ранее материалов выпускаются теплоизоляционные материалы следующих марок [1]:

– АТМ-3 (ТУ1-595-29-663–2002) – мат размером (110×60)±5 см, из рыхлого слоя супертонких

штапельных стеклянных волокон диаметром не более 2 мкм, облицованный с двух сторон стеклотканью и прошитый стеклянными нитками; выпускается толщиной 5, 10, 15, 20 мм, влажность – не более 2%, коэффициент теплопроводности (при  $d=40$  кг/м<sup>3</sup> и температуре среды 260°C) равен 0,07 Вт/(м·К), рабочая температура – от -190 до +450°C (длительно).

– АТМ-10 (ТУ1-595-855–2005) – мат размером (110×60)±5 см, из рыхлого слоя базальтовых ультратонких штапельных волокон, облицованный с двух сторон соответственно базальтовой (марки АТМ-10б) или кремнеземной тканью (марки АТМ-10к) и прошитый соответствующими нитями; выпускается толщиной 5, 10, 15, 20 мм, массой 1 м<sup>2</sup> – не более 960, 1130, 1160, 1310 г (марки АТМ-10б) и 525, 690, 850, 1000 г (марки АТМ-10к) соответственно. Влажность материала не более 1,5%, коэффициент теплопроводности

при  $d=50$  кг/м<sup>3</sup> равен 0,056 Вт/(м·К) (температура среды 260°C) и 0,070 Вт/(м·К) (температура среды 365°C), рабочая температура – до +800°C.

– АТМ-9-500 (ОСТ1.41370) – относится к теплоизоляционным материалам и представляет собой жестко формованную плиту размером (780×720 мм), толщиной 10 и 20 мм и объемной плотностью 480–500 кг/м<sup>3</sup> из супертонких стекловолокон с кремнийорганическим связующим. Влажность материала – не более 0,5%, коэффициент теплопроводности 0,075 Вт/(м·К) (при  $d=500$  кг/м<sup>3</sup> и температуре среды 260°C), рабочая температура – от -60 до +300°C.

Анализ технической и патентной литературы по теплоизоляционным материалам показал, что ведущими зарубежными фирмами в данной области являются: Knauf Insulation, Owens Corning Fiberglas Technology, Johns Manville International, Certain Teed Corp., Du Pont, Superior Air Ducts и др.

Фирма Knauf Insulation для систем нагрева и кондиционирования воздуха выпускает материал, выполненный из упругих стекловолокон, соединенных терморезактивной смолой, с защитным покрытием марок FSK или PSK, (FSK – фольга/сетка/крафт-бумага; PSK – полипропилен/сетка/крафт-бумага).

Фирма Johns Manville International изготавливает изоляцию марок Spin-Glas и Microlite на основе теплоизоляционного материала с пропиткой связующим и температурой эксплуатации 232°C.

Фирма Certain Teed Corp. разработала изоляцию из стекловолокон и связующего (например, на основе фенолформальдегидной смолы резольного типа) с облицовкой в виде армированной фольги.

Фирма Du Pont выпускает для использования в изоляционных материалах в качестве облицовки огнестойкие полиимидные пленки толщиной 8–45 мкм и высокоплотную полиимидную пену для теплоизоляции.

Фирма Superior Air Ducts разработала гибкий материал для обертывания воздухопровода, состоящий из внешнего паропроницаемого облицовочного слоя (нейлон, полиэфир, полиэтилен, полистирол) и изоляционного слоя не только из стекловолокна, но и из хлопка с пропиткой боратсодержащими препаратами для придания негорючести. Соединение изоляционного слоя с внешним облицовочным производится с помощью клея (эпоксидного или PSA, или тепло/УФ активируемого негорючего клея).

Для систем кондиционирования воздуха также следует выделить производимую фирмой Owens Corning Fiberglas Technology изоляцию из стекловолокна торговой марки SOFTR, которая выпускается различной толщины и позволяет регулировать паровыделение. Изоляция по горючести и дымовыделению удовлетворяет требованиям ASTM-84, грибостойка и позволяет снизить температуру на внешней поверхности изделия до 66°C.

Интервал рабочих температур такой изоляции – от 4 до 121°C [2–8].

В настоящее время среди зарубежных теплоизоляционных материалов для изоляции трубопроводов в самолетах широкое применение находят материалы: «Микролайф» – стекломат, обработанный связующим и защищенный в пакет из полиимидной пленки, и «Солимид» – пеноизоляция из полиимида с односторонней внешней облицовкой из полиэтиленхлорсульфированного эластомера.

Материалы, предназначенные для систем кондиционирования воздуха, предлагают изготавливать из теплоизоляционных материалов на основе:

- нетканых материалов (из синтетических волокон, их смеси со льном) с пропиткой раствором связующего и облицовочного материала;
- материалов из микро-, ультра-, супертонких волокон из горных пород с пропиткой раствором связующего;
- волокон тугоплавких соединений [9];
- вспененных отвержденных полиуретанов, полиэпоксидов и др.;
- керамических матов.

### Результаты

Современные теплоизоляционные материалы, предназначенные для изоляции трубопроводов систем кондиционирования воздуха, должны отвечать следующим техническим требованиям:

- температура эксплуатации – не менее 250°C;
- коэффициент теплопроводности – не более 0,050–0,065 Вт/(м·К);
- объемная плотность – не более 60–80 кг/м<sup>3</sup>;
- влагопоглощение – не более 2,3% (за 24 ч при  $\varphi=98\%$ );
- отвечать требованиям Авиационных правил АП-25 по горючести [10].

Материалы на основе органических волокон имеют ряд преимуществ перед материалами на основе стеклянных волокон: они обладают упругими свойствами, устойчивостью к вибрационным нагрузкам и способностью сохранять форму в процессе эксплуатации.

Обычные волокна органического происхождения можно эксплуатировать при температуре не выше 150–170°C. От термостойких же волокон требуется, чтобы они выдерживали (при сохранении необходимых физико-механических свойств) температуру 200–350°C и выше [11, 12].

Известно, что теплоизоляционные свойства материала зависят от его пористости. При увеличении плотности следует ожидать снижения термического сопротивления и увеличения теплопроводности высокопористого теплоизоляционного материала. Материалы из упругих и жестких волокон, обеспечивающие сохранение пористости, лучше сохраняют теплоизолирующие свойства, поэтому материал в процессе эксплуатации должен сохранять свой объем и таким образом обеспечивать стабильность теплофизических свойств [13, 14].

Теплостойкость текстильных материалов и изделий из них в основном определяется теплостойкостью составляющих их волокон [15].

Для изготовления нетканого теплоизоляционного материала выбрано волокно Арселон (полимер полиоксадиазол), технология изготовления – иглопробивная [16]. Выбор данного способа изготовления основан на получении текстильных нетканых материалов с комплексом свойств, возможных только при использовании данной технологии.

Полиоксадиазольные волокна обычно получают двухстадийным способом. Сначала формируют из растворов полигидразидные волокна, которые затем подвергают термической циклодегидратации – термообработке при 280–300°C в течение 40–70 ч. Волокна после этого становятся неплавкими, нерастворимыми, приобретают высокую термостойкость.

Достоинствами волокна Арселон, по данным производителя, являются:

- высокая стойкость к воздействию повышенных температур;
- хорошие электроизоляционные свойства;
- высокая прочность;
- стойкость к воздействию химических реагентов;
- более дешевое исходное сырье (по сравнению

с известными синтетическими термо- и огнестойкими волокнами).

Показатели свойств волокна Арселон приведены в табл. 1.

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что волокно Арселон обладает достаточно высокой прочностью, линейная плотность, длина и извитость волокна позволяют использовать его для изготовления нетканых материалов по иглопробивной технологии.

Для технологического процесса немаловажное значение имеет то, что поверхность волокна отличается гладкостью, равномерностью структуры. По внешнему виду волокно Арселон сходно с традиционными химическими волокнами, используемыми в текстильной промышленности.

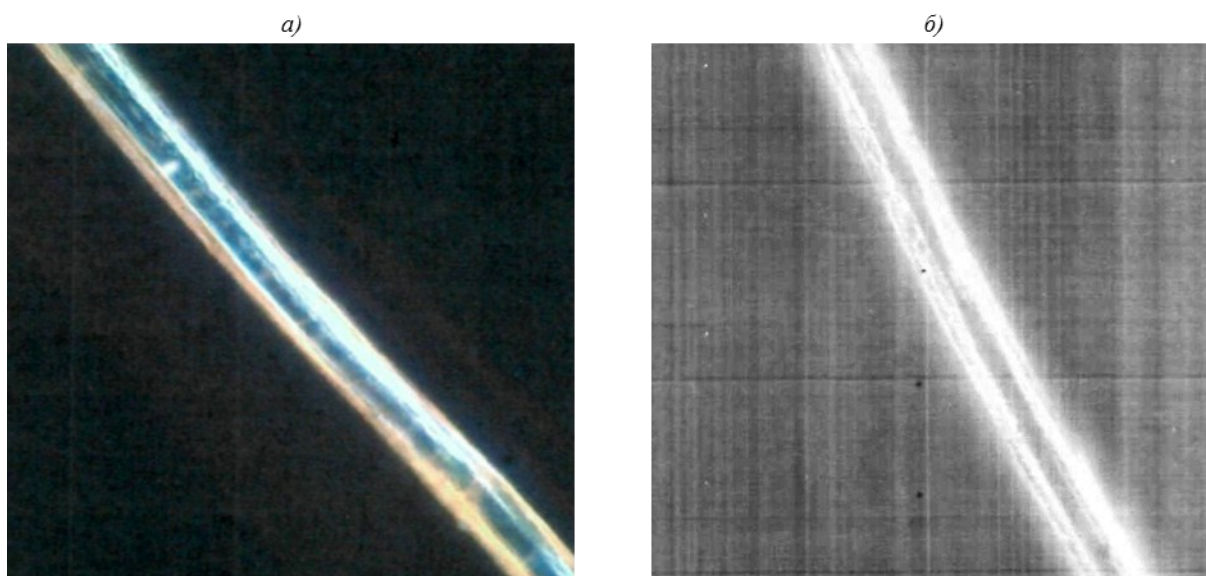
Визуальное наблюдение за поведением волокна Арселон при нагревании в течение 30 мин показало, что, начиная с температуры 260°C, видны незначительные приповерхностные и поверхностные изменения в виде размягчения. После охлаждения до комнатной температуры на поверхности волокна наблюдается незначительная шероховатость.

Внешний вид волокна Арселон до нагревания и после охлаждения до комнатной температуры представлен на рис. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний волокна Арселон

Показатели	Значения показателя	Документация по методам испытаний
Линейная плотность, текс	0,33	ГОСТ 10213.1–2002
Фактическая длина, мм	57,4	То же
Частота извитости на 1 см	2,3	ГОСТ 13411–90
Разрывная нагрузка волокна, мН	104	ГОСТ 10213.2–2002
Удлинение, %	57	То же
Удельная разрывная нагрузка, мН/текс	315	««
Влажность, %	7,5	ГОСТ 10213.3–2002

Рис. 1. Волокно Арселон ( $\times 750$ ) перед нагреванием (а) и после охлаждения (б)

Для проведения исследований на основе органического волокна Арселон изготовлены 8 вариантов образцов нетканого иглопробивного материала, отличающихся толщиной и плотностью. Исследование теплопроводности образцов теплоизоляционных материалов проводили в интервале температур от 20 до 250°C по РТМ1.2.0.88–86 на установке, разработанной в ВИАМ, – ММ 1.595.36-307–2006 «Измерение теплопроводности теплоизоляционных материалов при температурах до 1500°C» (срок введения установки с 01.01.2007 г.). В этой установке созданы новая измерительная ячейка и измерительная схема на базе установки, сделанной в Институте высоких температур АН СССР, рассчитанной на цилиндрические образцы, – РТМ1.2.110–88 «Метод определения теплопроводности неметаллических материалов в интервале температур 100–1800°C» (рис. 2, а) [17]. При комнатной температуре измерения дублировали по ГОСТ 7076–99 на установке ИТ-3 (рис. 2, б), созданной в Институте технической теплофизики АН УССР. В обоих случаях измерения проводили на образцах в виде пластин размером 100×100×10 мм. В основе обоих методов измерения лежит решение одномерного стационарного уравнения теплопроводности. В качестве датчиков температуры использовали хромель-алюмелевые термопары с диаметром электродов 0,1 мм. На установке, предназначенной для измерения теплопроводности до 1800°C, в качестве нагревателя используется танталовая фольга. Образцы расположены симметрично относительно нагревателя.

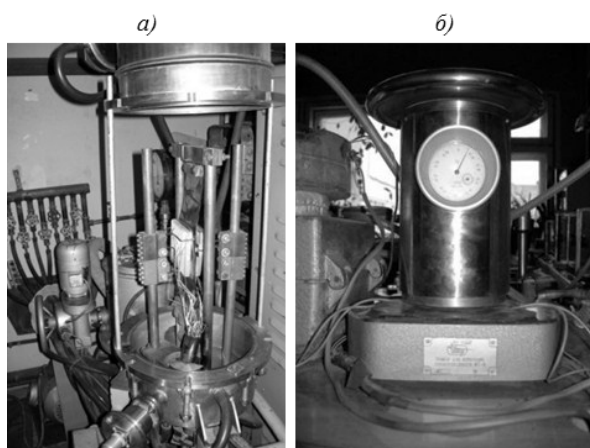


Рис. 2. Внешний вид:

а – установки, созданной в ВИАМ; б – базовой установки ИТ-3 (Институт технической теплофизики АН УССР)

Характеристики изготовленных образцов и результаты определения теплопроводности представлены в табл. 2.

Из данных, представленных в табл. 2, видно, что лучшую теплопроводность в интервале температур 20–250°C имели образцы б и 8.

В зависимости от области применения текстильных материалов существуют различные методы их испытания на горючесть [18, 19]. Испытания изготовленных образцов проводили по ОСТ 1.90094–79 на образцах размером 290×80 мм, в вертикальном положении. Результаты исследования приведены в табл. 3.

Из представленных в табл. 3 данных видно, что плотность образцов не влияет на горючесть – все образцы отвечают требованиям АП-25 по горючести.

Большое значение для материалов данного назначения имеет их устойчивость к воздействию теплового и климатического старения [20, 21], поэтому проведены исследования по влиянию теплового старения (при 250°C в течение 250 и 500 ч) на свойства материала. Испытания проводили на образцах с объемной плотностью 55 (образец 5) и 39 кг/м<sup>3</sup> (образец 8) в сравнении с зарубежным аналогом – материалом «Микролайт». Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Из данных табл. 4 видно, что при испытании после воздействия температуры 250°C в течение 250 и 500 ч происходит потеря массы образцов (от 1,8 до 8,7% и от 5,5% до 13,6% соответственно), причем более значительная – у образцов более рыхлой структуры (образец 8 и материал «Микролайт»). Значение коэффициента теплопроводности теплоустойкого нетканого материала на основе волокон полиоксадиазола и материала «Микролайт» после термостарения изменяется незначительно.

По горючести (продолжительность экспозиции в пламени газовой горелки составляет 12 с) образцы нетканых материалов из волокна Арселон после теплового старения классифицируются как самозатухающие, а «Микролайт» – трудногорящие. Цвет образцов, изготовленных из волокна Арселон, после термостарения не изменился. Проведенные исследования подтверждают работоспособность теплоизоляционных материалов при температуре 250°C.

Одним из требований, предъявляемых к теплоизоляционному материалу для трубопроводов, является температура внешней поверхности образца, которая не должна превышать 80°C [22]. Определение температуры на внешней поверхности образца теплоизоляционного материала проводили на 10-тонном прессе при одностороннем нагреве нижней плиты до 250°C. Замер температуры на поверхности образца осуществляли термопарой, закрепленной в центре образца, и с помощью инфракрасного термометра модели 8861/8866. Исследования проводили на образцах 5 и 6. Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Видно, что нетканый материал толщиной 8 мм (образец б) обеспечивает необходимый перепад температур – на поверхности образца температура составила 78°C. По результатам проведенных испытаний в качестве оптимального варианта тепло-

Таблица 2

## Характеристики образцов нетканого иглопробивного материала на основе волокна Арселон

Показатели	Значения показателя для образца с условным номером						
	1	2	3	5	6	7	8
Поверхностная плотность, кг/м <sup>2</sup> (ГОСТ 3811-72)	0,335	0,360	0,300	0,330	0,360	0,617	0,312
Толщина, мм, при удельном давлении 2 кПа (ГОСТ 12023-93)	5	5	4	6	8	9,5	8
Объемная плотность, кг/м <sup>3</sup> (ГОСТ 15902.2-2003)	67	72	77	55	45	65	39
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), при температуре, °С:	20	0,051	0,051	0,052	0,051	0,047	0,051
	50	0,052	0,052	0,053	0,054	–	0,052
	100	0,055	0,055	0,056	0,055	–	0,055
	150	0,058	0,058	0,059	0,058	0,057	0,058
	200	0,061	0,062	0,062	0,061	–	0,061
	250	0,064	0,065	0,065	0,064	0,064	0,064

Таблица 3

## Горючесть образцов нетканого иглопробивного материала на основе волокна Арселон

Условный номер образца	Продолжительность экспозиции в пламени горелки, с	Продолжительность остаточного горения, с	Длина обугливания, мм	Продолжительность горения капель, с	Классификация
		среднее значение			
1	12	2	30	Нет	Самозатухающий
3	12	2	30	Нет	-«-
5	12	1	29	Нет	-«-
6	12	1	37	Нет	-«-

Таблица 4

## Свойства теплоизоляционных материалов после воздействия теплового старения

Условный номер и наименование образца	Режим теплового старения	Поверхностная плотность, кг/м <sup>2</sup>	Объемная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность при 50–250°С, Вт/(м·К)	Потеря массы, %
5	В исходном состоянии	0,330	55,0	0,051–0,064	–
	При 250°С, 250 ч	0,324	54,0	0,052–0,063	1,8
	При 250°С, 500 ч	0,312	52,0	0,053–0,064	5,5
8	В исходном состоянии	0,287	39,5	0,047–0,058	–
	При 250°С, 250 ч	0,262	38,0	0,048–0,060	8,7
	При 250°С, 500 ч	0,248	31,0	0,049–0,061	13,6
Теплоизоляционный материал «Микролайт» (толщина 115 мм)	В исходном состоянии	0,120	9,9	0,045–0,056	–
	При 250°С, 250 ч	0,099	8,6	0,047–0,058	17,5
	При 250°С, 500 ч	0,111	8,9	0,046–0,057	7,5

Таблица 5

## Перепад температур на внешней поверхности образцов при одностороннем нагреве нижней плиты пресса до 250°С

Условный номер образца	Толщина, мм	Поверхностная плотность, кг/м <sup>2</sup>	Объемная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температура на поверхности образца, °С (показания термопары/прибора)
5	6,0	0,33	55,0	(85–105)/(85–103)
6	8,0	0,36	45,0	78/(67–84)

Таблица 6

## Свойства облицовочных материалов

Марка и состав облицовочного материала	Толщина, мм	Поверхностная плотность, кг/м <sup>2</sup>	Влагопоглощение при φ=98% за 24 ч, %	Горючесть, классификация
СТФ+слеклоткань с фторполимерным покрытием (ТУ1-92-82-83)	0,056	0,053	0,14	Трудногорящий
Пленка полиимидная на тканой основе (зарубежный аналог)	0,057	0,051	0,56	-«-

Таблица 7

## Свойства теплоизоляционных материалов

Показатели	Значения показателей			
	по техническим требованиям (ТТ)	теплоизоляционного материала с защитным слоем из СТФ	зарубежных материалов	
			«Солиמיד»	«Микролайт»
Толщина, мм	–	8,06	15,0	11,5
Объемная плотность, кг/м <sup>3</sup>	60–80	61,6	21,9	9,9–10,0
Поверхностная плотность, кг/м <sup>2</sup>	–	0,497	0,307	0,110–0,130
Влагопоглощение при φ=98% за 24 ч, %	Не более 2,3	2,0	8,4	20,5
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), при температуре, °С: 20 150 250	0,05–0,065	0,047 0,057 0,064	0,042 0,084 >0,100 (расчетный)	0,047 0,054 0,058
Горючесть по АП-25, Приложение F, Часть 1	Самозатухающий или трудносгорающий	Самозатухающий	Отвечает требованиям ТТ	Трудно-сгорающий
Температура эксплуатации, °С	От -60 до +250	От -60 до +250	До 250	До 250
Температура на поверхности образца, °С (не более)	80	77 (75–79)	–	–

изоляционного материала на основе волокна Арселон выбраны образцы 6 и 8.

Для защиты от механических повреждений, загрязнений и влаги теплоизоляционного материала из волокна Арселон выбран облицовочный материал СТФ, представляющий собой стеклоткань с фторполимерным покрытием. Материал СТФ по свойствам наиболее близок к зарубежному аналогу (пленке полиимидной), применяемому для облицовки материала «Микролайт». Свойства и состав облицовочных материалов приведены в табл. 6.

Соединение нетканого полотна с облицовочным материалом производится с помощью клея [23].

На основе нетканого материала из волокна Арселон (образец 8) и облицовочного материала СТФ изготовлен теплоизоляционный материал с защитным слоем. Результаты исследования свойств теплоизоляционного материала с защитным слоем СТФ в сравнении с зарубежными аналогами представлены в табл. 7.

Из представленных в табл. 7 данных видно, что теплоизоляционный материал, изготовленный на основе органического волокна Арселон с облицовочным слоем из материала СТФ, отвечает техническим требованиям. По сравнению с зарубежными материалами «Солиמיד» имеет в 3,2 раза меньшее влагопоглощение (2,6 вместо 8,4%) и меньшую теплопроводность при 150°С (0,056 вместо 0,084 Вт/(м·К)) и материалом «Микролайт» – в 7,9 раз меньшее влагопоглощение (2,6 вместо 20,5%), но проигрывает ему по плотности.

## Обсуждение и заключения

Разработана технология изготовления теплоизоляционного материала на основе органического волокна Арселон. Иглопробивным способом изготовлены 8 вариантов образцов теплоизоляционного материала из органического волокна Арселон (полимер полифениленоксадиазол) и исследованы их свойства: поверхностная и объемная плотности, коэффициент теплопроводности в интервале температур 20–250°С, горючесть в исходном состоянии и после теплового старения. Определен перепад температур на внешней поверхности образцов при одностороннем нагреве нижней плиты пресса до 250°С. По результатам исследования лучшие показатели имели образцы 6 и 8 толщиной 8 мм с объемной плотностью 45 и 39 кг/м<sup>3</sup>.

Для защиты теплоизоляционного материала от механических повреждений, загрязнений и влаги выбран облицовочный слой – материал СТФ. Соединение материалов производилось с помощью клея.

Исследование свойств теплоизоляционного материала на основе органического волокна Арселон с защитным слоем СТФ показало, что он имеет объемную плотность 61,6 кг/м<sup>3</sup>, поверхностную плотность 0,497 кг/м<sup>2</sup>, влагопоглощение 2,3% при φ=98% за 24 ч, коэффициент теплопроводности в интервале температур от 20 до 250°С составляет 0,047–0,064 Вт/(м·К), классификация по горючести – самозатухающий, температура эксплуатации – до 250°С.

Рассматриваемый теплоизоляционный материал по своим свойствам отвечает техническим требованиям и по отдельным характеристикам превосходит зарубежные аналоги.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авиационные материалы: Справочник в 13-ти томах. 7-е изд., перераб. и доп. /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2011. Т. 9. С. 39–44.
2. Pipe blanket to fit a variety of pipe diameters: pat. 7159620 US; publ. 09.01.2007.
3. Duct insulation having condensate wicking: pat. 7222645 US; publ. 02.12.2004.
4. Faced mineral fiber insulation board with integral glass fabric layer: pat. 6986367 US; publ. 17.01.2006.
5. Insulated duct wrap: pat. 20070131299 US; publ. 14.06.2007.
6. Flexible insulated duct and the method of making the duct: pat. 5947158 US; publ. 07.09.1999.
7. High-density polyimide foam insulation: pat. 20020094443 US; publ. 18.07.2002.
8. Flame-retardant halogen-free polyimide films useful as thermal insulation in aircraft applications and methods relating thereto: pat. 2006019102 US; publ. 26.06.2006.
9. Ивахненко Ю.Л., Бабашов В.Г., Зимичев А.М., Тинякова Е.В. Высокотемпературные теплоизоляционные и теплозащитные материалы на основе волокон тугоплавких соединений //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 380–386.
10. Барботько С.Л. Пожаробезопасность авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 431–439.
11. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
12. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Максимов В.Г., Бабашов В.Г. Звукотеплоизолирующий материал градиентной структуры ВТИ-22 //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 47–49.
13. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н. Текстильное материаловедение. М.: Легпромбытиздат. 1985. С. 73–211.
14. Аненкова И.Н., Бокова Е.С., Дедов А.В. Влияние плотности иглопрокалывания на сопротивление материалов деформации //Химические волокна. 2010. №3. С. 50–51.
15. Кондрашов Э.К., Кузьмин В.В., Минаков В.Т., Пономарева Е.А. Нетканые материалы на основе термостойких полимерных волокон и межплиточные уплотнения //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 51–55.
16. Айзенштейн Э.М. Ассортимент химических волокон для нетканых материалов //Текстильная промышленность. 2002. №12. С. 9–11.
17. Зуев А.В., Просунцов П.В., Майорова И.А. Расчетно-экспериментальное исследование процессов теплопереноса в высокопористых волокнистых теплоизоляционных материалах //Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. №9. С. 410–420.
18. Барботько С.Л., Кириллов В.Н., Шуркова Е.Н. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов авиационного назначения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 56–63.
19. Тютюнник В.В., Братченя Л.А., Кузьмин С.В. Исследование нетканых объемных материалов на огнестойкость и биостойкость //Текстильная промышленность. 2003. №4. С. 29–31.
20. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизм старения //Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 19–27.
21. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения //Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
22. Луговой А.А., Бабашов В.Г., Карпов Ю.В. Температуропроводность градиентного теплоизоляционного материала //Труды ВИАМ. 2014. №2. Ст. 02 (viam-works.ru).
23. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Тюменева Т.Ю., Авдонина И.А., Жадова Н.С. Клеи для авиационных материалов //Российский химический журнал. 2010. Т. IV. №1. С. 46–52.