

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ВОДОПОГЛОЩЕНИЕ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ПЕНОМАТЕРИАЛОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПУТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Жакипбаев Б.Е., Есимов Б.О., Кунтубаева М.Н., Абдуллин А.А.

РГП на ПХВ «Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова», (160012, Казахстан, г.Шымкент, пр-т Тауке хана 5), e-mail: *bibol_8484@mail.ru*

В настоящей работе рассматривается исследование влияния температуры термообработки на водопоглощение, теплопроводность и прочность пеноматериалов и оптимизация процессов путем математического моделирования. План проведения эксперимента построен как двухфакторный комбинированный с четырьмя и пятью уровнями, распределёнными равномерно в исследуемых диапазонах, выбранных на основе анализа результатов исследований, которые позволили сузить диапазоны изменения входных параметров и зафиксировать на постоянном уровне факторы, мало влияющие на показатели качества.

Ключевые слова: водопоглощение, теплопроводность, прочность, пеноматериал, опока, гидроксид натрия, математическое моделирование, оптимизация процесса

RESEARCH DEPENDENCE OF THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT TEMPERATURE WATER ABSORPTION, THERMAL CONDUCTIVITY AND STRENGTH FOAM MATERIALS AND PROCESS OPTIMIZATION BY MATHEMATICAL MODELING

Zhakupbayev B.E., Yessimov B.O., Kuntubayeva M.N., Abdullin A.A.

RSE on the RB «M.Auezov South-Kazakhstan State University» (160012, Kazakhstan, Shymkent, Tauke khan avenue, 5), e-mail: *bibol_8484@mail.ru*

In the present work regarded research the influence of heat treatment temperature on the water absorption, thermal conductivity and strength of the foam materials and process optimization by mathematical modeling. The plan of the experiment is built as two-factor combined of four and five levels, uniformly distributed in the investigated range selected on the basis of analysis of the results of research that allowed narrow down ranges of change input parameters and fix at a constant level factors little effect on parameters of quality.

Keywords: water absorption, thermal conductivity, strength, foam material, opok, sodium hydroxide, mathematical modeling, process optimization

Водопоглощение возрастает с увеличением температуры вспенивания [1]. Прирост водопоглощения тем значительнее, чем меньше диаметр частиц порошка опоки.

Водопоглощение образцов при различной температуре термообработки показано на рисунке 1.

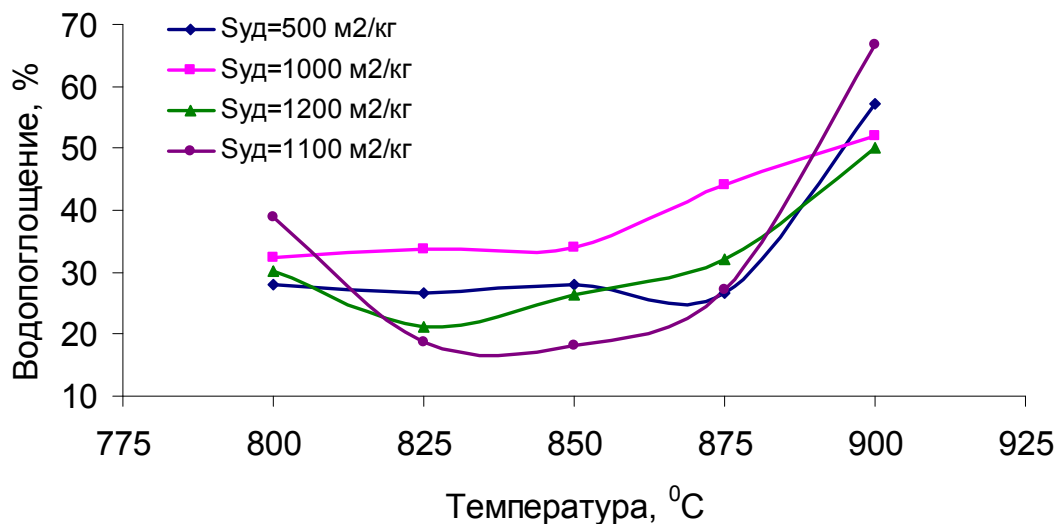


Рисунок 1 – Зависимость водопоглощения пеноматериала от удельной поверхности исследуемой опоки и температуры вспенивания

Рассматривая возрастание водопоглощения как следствие увеличения числа сообщающихся пор, можно заключить, что с увеличением температуры вспенивания при равных прочих условиях количество сообщающихся пор возрастает. К образованию сообщающихся пор может привести также недостаточный отжиг пеностекла. Возникающие внутренние неравномерные напряжения могут быть не столь велики, чтобы разрушить образец, но достаточны для образования мельчайших трещин в стенках пор [1].

Для оптимизации процесса и математического моделирования [2] влияния параметров X_1 (удельная поверхность опоки) и X_3 (температура вспенивания) на водопоглощение полученного образца пеноматериала используется уравнение математической модели:

$$\hat{Y}_1 = a_{03} + a_{13} \cdot X_1 + a_{23} \cdot X_3 + a_{33} \cdot X_1^2 + a_{43} \cdot X_1 \cdot X_3 + a_{53} \cdot X_3^2 \quad (1)$$

и результат моделирования при фиксированных значениях концентрации NaOH ($X_2=13\%$) и времени выдержки ($X_4 = 30$ минут) (по температуре) приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты компьютерного моделирования зависимости водопоглощения полученного образца пеностекла от X_1 (удельная поверхность опоки) и X_3 (температура вспенивания)

№ опыта	Входные переменные		Выход (водопоглощение)		Погрешность (ошибка), %	
	X_1	X_3	$Y_{4\text{эксп.}}$	$Y_{4\text{расч.}}$	абсолютная	относительная
1	500,00	850,00	28,000	26,3623	1,6377	5,8489
2	1000,00	850,00	34,100	32,4754	1,6246	4,7642
3	1200,00	850,00	26,500	24,5664	1,9336	7,2965
4	1100,00	850,00	23,300	29,2605	-5,9605	-25,5816
5	500,00	860,00	26,000	26,1798	-0,1798	-0,6917
6	1000,00	860,00	37,800	32,3589	5,4411	14,3946
7	1200,00	860,00	26,000	24,4762	1,5238	5,8606
8	1100,00	860,00	24,800	29,1571	-4,3571	-17,5691
9	500,00	875,00	26,600	31,3956	-4,7956	-18,0287
10	1000,00	875,00	44,000	37,6736	6,3264	14,3783
11	1200,00	875,00	32,000	29,8305	2,1695	6,7797
12	1100,00	875,00	27,100	34,4916	-7,3916	-27,2753
13	500,00	890,00	43,800	43,1989	0,6011	1,3724
14	1000,00	890,00	48,800	49,5757	-0,7757	-1,5895
15	1200,00	890,00	42,000	41,7722	0,2278	0,5424
16	1100,00	890,00	49,700	46,4135	3,2865	6,6126
17	500,00	900,00	57,300	54,7274	2,5726	4,4897
18	1000,00	900,00	52,000	61,1701	-9,1701	-17,6349
19	1200,00	900,00	50,000	53,3930	-3,3930	-6,7860
20	1100,00	900,00	66,700	58,0212	8,6788	13,0118
суммарная ошибка					-6,6324E-07	-29,81
среднее значение ошибки					-3,3162E-08	-1,49

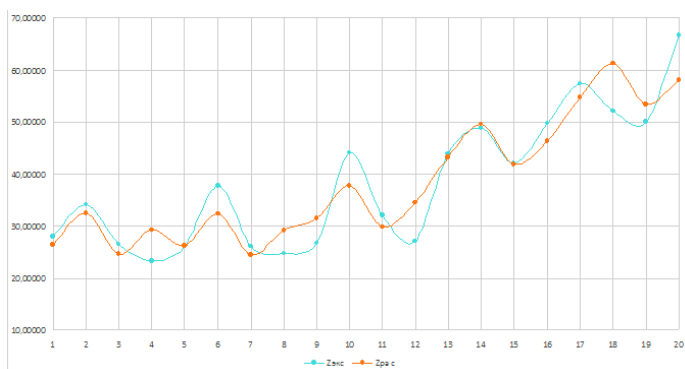


Рисунок 2 – График сравнения экспериментальных и расчетных значений водопоглощения для каждого из 20 опытов

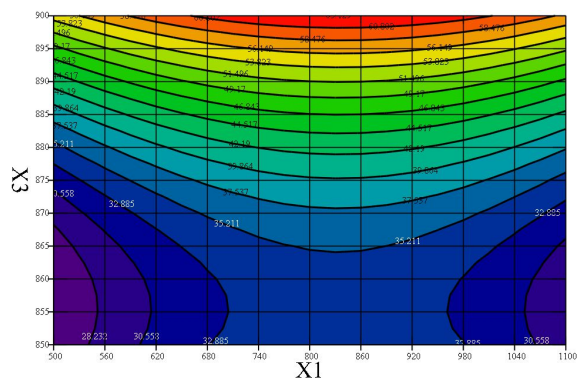


Рисунок 3 – Линии уровня зависимости водопоглощения пеностекла от X_1 и X_3

По своему применению пеностекло является типичным заполнительным и частично самонесущим теплоизоляционным материалом, у которого коэффициент теплопроводности в большей степени обуславливается его структурой, состоящий из двух основных веществ: твердой фазы (скелета) и газообразного содержимого ячеек (пор), тепло в которых распространяется в твердой фазе и через пустоты с находящимися в них газами. Поскольку газы, содержащиеся в ячейках и порах, являются плохими проводниками тепла, то теплоизоляционная способность материала будет тем выше, чем больше его пористость и меньше плотность. Но передача тепла внутри пор снижается с уменьшением их диаметра, так как при определенной величине ее диаметра может достигаться минимальная теплопроводность [3-5].

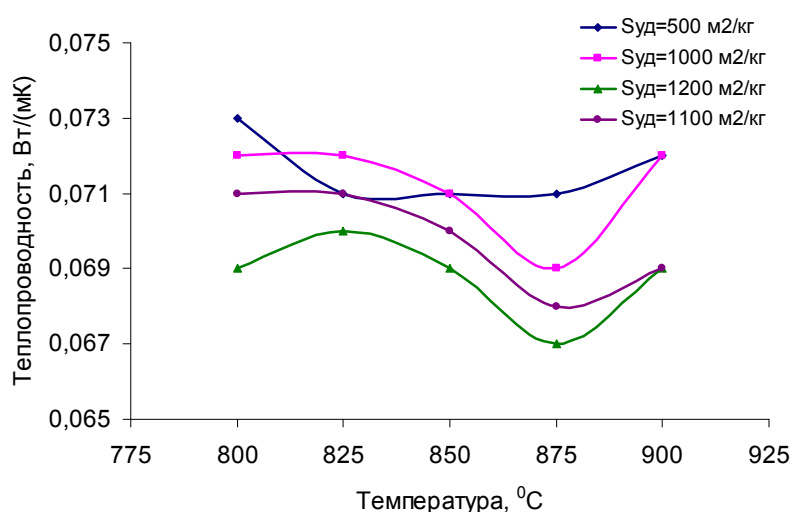


Рисунок 4 – Зависимость теплопроводности пеноматериала от удельной поверхности исследуемой опоки и температуры вспенивания

Как видно из рисунка 4, по мере повышения температуры максимума вспенивания пеностекла, идет увеличение разрежения в замкнутых ячейках, в результате чего теплопроводность пеностекла возрастает, а при низкой температуре теплопроводность снижается в связи с уменьшением скорости теплового движения частиц газов, замкнутых в ячейках.

Для оптимизации процесса и математического моделирования [2] влияния параметров X_1 (удельная поверхность опоки) и X_3 (температура вспенивания) на теплопроводность полученного образца пеноматериала используется уравнение математической модели:

$$\hat{Y}_2 = a_{04} + a_{14} \cdot X_1 + a_{24} \cdot X_3 + a_{34} \cdot X_1^2 + a_{44} \cdot X_1 \cdot X_3 + a_{54} \cdot X_3^2 \quad (2)$$

и результат моделирования при фиксированных значениях концентрации NaOH ($X_2=13\%$) и времени выдержки ($X_4 = 30$ минут) (по температуре) приведён в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты компьютерного моделирования зависимости теплопроводности полученного образца пеностекла от X_1 (удельная поверхность опоки) и X_3 (температура вспенивания).

№ опыта	Входные переменные		Выход (теплопроводность)		Погрешность (ошибка), %	
	X_1	X_3	Y_5 эксп.	Y_5 расч.	абсолютная	относительная
1	500,00	850,00	0,071	0,0715	-0,0005	-0,6698
2	1000,00	850,00	0,071	0,0709	0,0001	0,1576
3	1200,00	850,00	0,069	0,0688	0,0002	0,2391
4	1100,00	850,00	0,070	0,0700	0,0000	0,0122
5	500,00	860,00	0,071	0,0707	0,0003	0,4010
6	1000,00	860,00	0,070	0,0699	0,0001	0,0764
7	1200,00	860,00	0,068	0,0678	0,0002	0,2633
8	1100,00	860,00	0,069	0,0690	0,0000	-0,0197
9	500,00	875,00	0,071	0,0705	0,0005	0,7248
10	1000,00	875,00	0,069	0,0694	-0,0004	-0,6444
11	1200,00	875,00	0,067	0,0672	-0,0002	-0,3139
12	1100,00	875,00	0,068	0,0685	-0,0005	-0,6726
13	500,00	890,00	0,072	0,0713	0,0002	0,2124
14	1000,00	890,00	0,071	0,0700	0,0005	0,6589
15	1200,00	890,00	0,068	0,0677	0,0003	0,4524
16	1100,00	890,00	0,069	0,0690	-0,0005	-0,7209
17	500,00	900,00	0,072	0,0725	-0,0005	-0,7366
18	1000,00	900,00	0,072	0,0710	0,0010	1,3383
19	1200,00	900,00	0,069	0,0686	0,0004	0,5496
20	1100,00	900,00	0,069	0,0700	-0,0010	-1,3891
суммарная ошибка					-1,5262E-09	-0,08

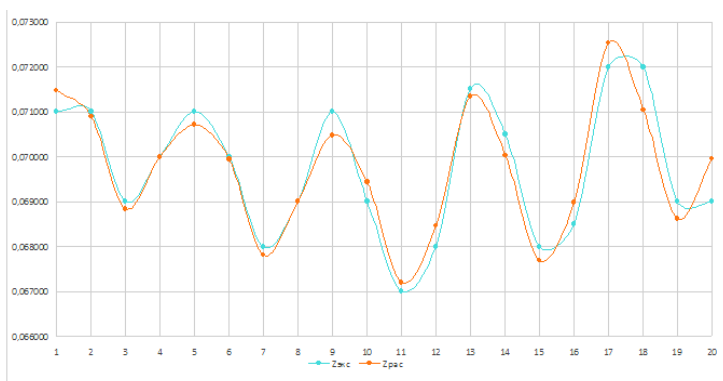


Рисунок 5 – График сравнения экспериментальных и расчетных значений теплопроводности для каждого из 20 опытов

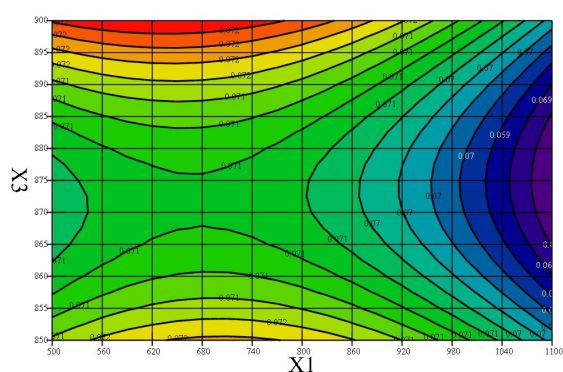


Рисунок 6 - Линии уровня зависимости теплопроводности пеностекла от X_1 и X_3

При испытании пеностекла на сжатие (рисунок 7) почти никогда не наблюдается резкого разрушения образцов, характерного для хрупких материалов.

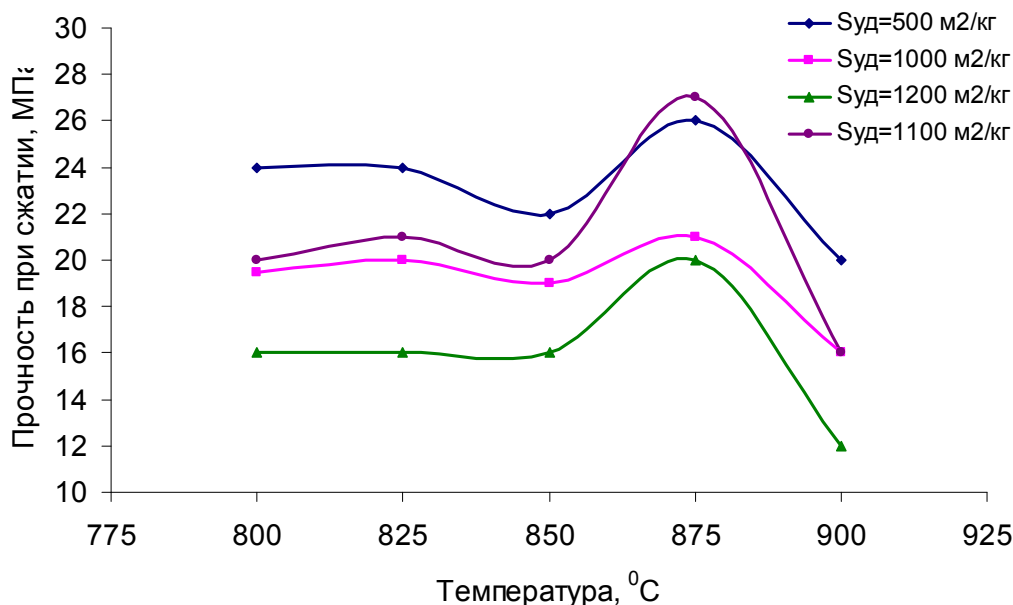


Рисунок 7 – Зависимость прочности пеноматериала от удельной поверхности исследуемой опоки и температуры вспенивания

С повышением нагрузки образец начинает деформироваться, при этом тонкие стенки отдельных ячеек последовательно разрушаются на обеих упорных поверхностях и распадаются в тонкий порошок стекла. Благодаря этому при общем постоянном или незначительном колеблющемся давлении высота испытуемого образца медленно уменьшается, т.е. образец вдавливается сам в себя. Начало деформации образцов наступает при сравнительно небольших нагрузках.

Для оптимизации процесса и математического моделирования [2] влияния параметров X_1 (удельная поверхность опоки) и X_3 (температура вспенивания) на прочность полученного образца пеноматериала используется уравнение математической модели:

$$\hat{Y}_3 = a_{05} + a_{15} \cdot X_1 + a_{25} \cdot X_3 + a_{35} \cdot X_1^2 + a_{45} \cdot X_1 \cdot X_3 + a_{55} \cdot X_3^2 \quad (3)$$

и результат моделирования при фиксированных значениях концентрации NaOH ($X_2=13\%$) и времени выдержки ($X_4 = 30$ минут) (по температуре) приведён в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты компьютерного моделирования зависимости прочности полученного образца пеностекла от X_1 (удельная поверхность опоки) и X_3 (температура вспенивания)

№ опыта	Входные переменные		Выход (прочность)		Погрешность (ошибка), %	
	X_1	X_3	Y_2 эксп.	Y_2 расч.	абсолютная	относительная
1	500,0	850,0	22,0	21,7771	0,2229	1,0134
2	1000,0	850,0	19,0	19,6462	-0,6462	-3,4012
3	1200,0	850,0	17,0	17,7599	-0,7599	-4,4699
4	1100,0	850,0	20,0	18,7769	1,2231	6,1154
5	500,0	860,0	24,5	24,4619	0,0381	0,1555
6	1000,0	860,0	21,0	21,8620	-0,8620	-4,1048
7	1200,0	860,0	19,4	19,7880	-0,3880	-2,0002
8	1100,0	860,0	22,0	20,8989	1,1011	5,0051
9	500,0	875,0	25,4	25,7820	-0,3820	-1,5038
10	1000,0	875,0	22,0	22,4785	-0,4785	-2,1749
11	1200,0	875,0	20,0	20,1231	-0,1231	-0,6153
12	1100,0	875,0	22,5	21,3746	1,1254	5,0017
13	500,0	890,0	23,9	23,8534	0,0466	0,1951
14	1000,0	890,0	19,2	19,8463	-0,6463	-3,3661
15	1200,0	890,0	16,5	17,2094	-0,7094	-4,2996
16	1100,0	890,0	19,8	18,6017	1,1983	6,0519
17	500,0	900,0	21,0	20,7629	0,2371	1,1293
18	1000,0	900,0	15,5	16,2867	-0,7867	-5,0755
19	1200,0	900,0	13,0	13,4622	-0,4622	-3,5556
20	1100,0	900,0	16,0	14,9483	1,0517	6,5730
суммарная ошибка					-5,2021E-07	-3,33
среднее значение ошибки					-2,6010E-08	-0,17

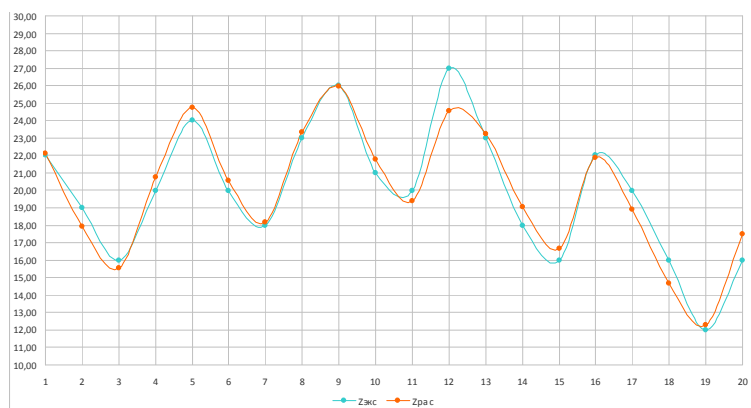


Рисунок 8 – График сравнения экспериментальных и расчетных значений прочности для каждого из 20 опытов

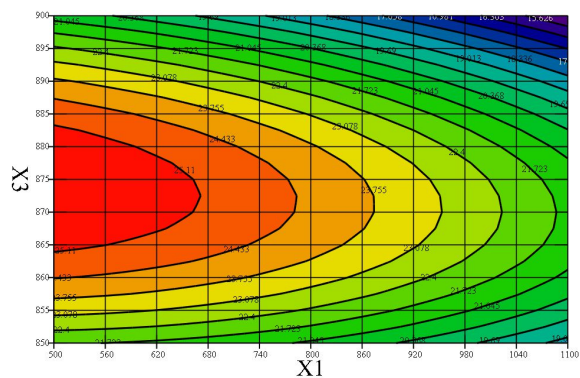


Рисунок 9 - Линии уровня зависимости прочности пеностекла от X_1 и X_3

Как видно из рисунков 7-9, прочность пеностекла в пределах температур 850-875⁰С значительно повышается, а при 900⁰С прочность снижается. По-видимому, это связано с тем, что уже при этой температуре поверхность пеностекла начинает остекловываться, тем самым снижая прочность материала.

Физико-технические характеристики полученных пеноматериалов следующие: водопоглощение – 8-12%; теплопроводность – 0,067-0,070 Вт/(м⁰С); прочность при сжатии – 20-25 МПа.

Разработана технология и получено пеностекло (пенокремнезем) теплоизоляционного назначения непосредственно из широкодоступных кремнеземистых природных опок осадочно-химического происхождения, исключив из схемы традиционной технологии энергоемкий и экономически невыгодный процесс варки и грануляции специальной многокомпонентной стекломассы.

Полученные результаты могут быть использованы в практических работах по выполнению Основных направлений Государственных программ по форсированному индустриально-инновационному развитию РК и по развитию строительной индустрии и производства строительных материалов в Республики Казахстан, где предусмотрены развитие производств конкурентоспособных, энергосберегающих строительных материалов, изделий и конструкций, путем вовлечения и расширения их минерально-сырьевой базы, а также в рамках перехода Республики Казахстан к «зеленой» экономике по реализации Концепции второго ее направления – энергоэффективность жилищно-коммунального хозяйства и участие в Международной выставке «ЭКСПО-2017» с показом опытно-промышленных образцов.

Список использованной литературы

1. Алексеев С.В., Шутов А.И., Воля П.А., Мосьпан В.И. Пеностекло. Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. – 109 с.
2. Ахназарова С.Л., Гордеев Л.С., Глебов М.Б. Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов с неполной информацией о механизме: учеб.пособие - М.: РХТУ им.Д.И.Менделеева, 2010.
3. Бобров Ю.Л., Овчаренко Е.Г., Шойхет Б.М., Петухова Е.Ю. Теплоизоляционные материалы и конструкции: М.: Инфра-М, 2003. – 268 с.
4. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. – М.: 1989. - 384 с.
5. Горлов Ю.П. и др. Технология теплоизоляционных материалов. – М.: 1980. - 399 с.