

НЕТРАДИЦИОННЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОСТЕКЛА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ВЫДЕРЖКИ НА ПЛОТНОСТЬ И ПОРИСТОСТЬ ВСПЕНЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПУТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Есимов Б.О., Адырбаева Т.А., Жакипбаев Б.Е., Кунтубаева М.Н.

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 и времени выдержки на плотность и пористость вспененных материалов и оптимизация процессов путем математического моделирования. Для решения данной задачи были использованы статистические методы обработки эксперимента и специально разработанное программное обеспечение для персонального компьютера реализованное в среде пакетов прикладных программ (ППП) Mathcad-15 и Statstica-10. 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: плотность, пористость, пеноматериал, опока, гидроксид натрия, математическое моделирование, оптимизация процесса

NONTRADITIONAL METHOD PRODUCING FOAMED GLASS AND RESEARCH OF INFLUENCE TEMPERATURE AND RESIDENCE TIME FOR DENSITY AND POROSITY FOAM MATERIALS AND PROCESS OPTIMIZATION BY MATHEMATICAL MODELING

Yessimov B.O., Adyrbayeva T.A., Zhakipbayev B.E., Kuntubayeva M.N.

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

In this work considers research of influence of temperature and time of exposure to the density and porosity of the foamed materials and process optimization by mathematical modeling. For solving this problem have been used statistical methods of experimental and specially developed software for the personal computer environment, implemented in software packages (IFR) Mathcad-15 and Statstica-10. 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: density, porosity, foam material, opok, sodium hydroxide, mathematical modeling, process optimization

Одним из направлений энергосбережения является улучшение теплозащиты зданий и энергоэффективность жилищно-коммунального хозяйства. Современные требования по энергосбережению ограждающих конструкций диктуют использование высокотехнологичных материалов и систем, позволяющих решить проблему эффективной теплозащиты зданий. По данным специалистов каждый уложенный в строительство 1 м³ теплоизоляции обеспечивает в среднем экономию 1,45 тонн условного топлива в год [1, 2].

Основными видами утеплителей применяемых в Республике Казахстан являются минераловатные изделия, доля которых в общем объеме производства и потребления составляет более 60%. Наряду с этим около 8% приходится на стекловатные материалы, 20% на пенополистирол и другие пенопласты. Доля теплоизоляционных ячеистых бетонов в общем объеме производимых утеплителей не превышает 3%, вспученного перлита - менее 0,3% [1, 2].

Однако, несмотря на то, что в последние годы вопросам расширения номенклатуры и повышения качества теплоизоляционных материалов уделяется большое внимание, на строительном рынке Казахстана по-прежнему ощущается дефицит этой продукции.

Недостаточное внимание уделяется оценке надежности новых разработанных материалов в ограждающих конструкциях, зачастую не увязанных с климатическими, материально-техническими и экономическими условиями отдельных регионов нашей страны, а также научно-технологическими основами.

В связи с этим разработку физико-технических и конструктивно-технологических основ для создания теплоэффективных ограждающих конструкций, повышающих эффективность тепловой защиты жилых и общественных зданий на основе внедрения ресурсосберегающих технологий с использованием наряду с общеизвестными теплоизоляционными материалами еще большую актуальность приобретает проблема производства отечественных высокоэффективных утеплителей в основном представленные неорганическим материалом ячеистой структуры в виде блочного пеностекла [1, 2].

Пеностекло – высокопористый материал (80-95%), состоящий из воздушных ячеистых замкнутых или сообщающихся пор, разделенных перегородками из стекловидного вещества [3, 4]. Традиционно пеностекло получают на основе вторичного стекольного боя или специально сваренного стекла (стекольного гранулята), с полным или частичным его введением в состав пенообразующей шихты [5].

Учитывая ряд технологических и экономических особенностей производства пеностекла, целью и задачей данной работы является определение возможности получения пеностекла теплоизоляционного назначения путем низкотемпературной обработки сырьевой смеси на основе аморфных кремнеземистых пород, исключив при этом из схемы

традиционной технологии энергоемкий и экономически невыгодный весьма трудоемкий процесс высокотемпературной варки и грануляции специальной многокомпонентной стекломассы.

С целью изучения изменения плотности пеноматериала в зависимости от температуры вспенивания смеси термообработывалась при 800, 825, 850, 875 и 900⁰С в течение 30 минут. Результаты опытов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость плотности образцов пеностекла от удельной поверхности порошка опоки и температуры термообработки

Удельная поверхность, S, м ² /кг	Продолжительность термообработки, мин	Плотность образцов (ρ, кг/м ³) от температуры термообработки (°С)				
		800	825	850	875	900
500	30	440	390	390	390	410
1000	30	410	410	380	350	400
1200	30	360	370	350	330	360
1100	30	380	390	380	340	350

Образцы, термообработанные при 800⁰С и 30 минутной выдержке, вспенились и имеют равномерную структуру с порами средней величины 0,1-0,5 мм. При 825⁰С получен образец с резко различными по диаметру порами.

С повышением температуры термообработки в пределах 850-875⁰С уменьшается плотность образцов, т.е. разница в плотности образцов, спекавшихся при различных температурах, тем меньше, чем длительнее процесс термообработки. Однако при температуре 900⁰С видно, что плотность образцов вновь начинает расти. По-видимому, это связано с тем, что поверхность образцов начинает остекловываться (рисунок 1).

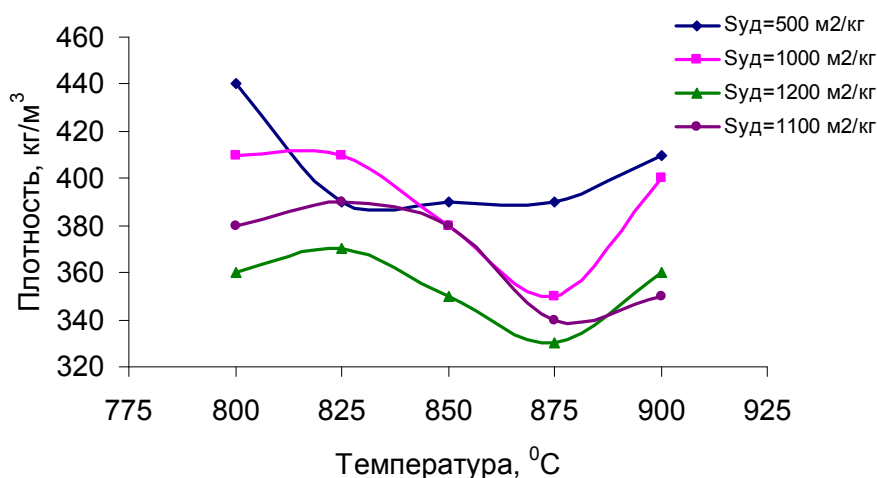


Рисунок 1 – Зависимость плотности пеноматериала от удельной поверхности исследуемой опоки и температуры вспенивания

Для оптимизации процесса и математического моделирования [6] влияния параметров X_1 (удельная поверхность опоки) и X_3 (температура вспенивания) на плотность полученного образца пеноматериала используется уравнение математической модели:

$$\hat{Y}_1 = a_{01} + a_{11} \cdot X_1 + a_{21} \cdot X_3 + a_{31} \cdot X_1^2 + a_{41} \cdot X_1 \cdot X_3 + a_{51} \cdot X_3^2 \quad (1)$$

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

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

№ опыта	Входные переменные		Выход (плотность)		Погрешность (ошибка)	
	X_1	X_3	$Y_{1\text{эксп.}}$	$Y_{1\text{расч.}}$	абсолютная	относительная %
1	500,00	850,00	390,00	396,99	-6,9885	-1,7919
2	1000,00	850,00	380,00	381,38	-1,3807	-0,3634
3	1200,00	850,00	350,00	356,56	-6,5647	-1,8756
4	1100,00	850,00	380,00	370,30	9,7006	2,5528
5	500,00	860,00	390,00	385,95	4,0468	1,0377
6	1000,00	860,00	365,00	366,82	-1,8211	-0,4989
7	1200,00	860,00	340,00	340,60	-0,5953	-0,1751
8	1100,00	860,00	365,00	355,03	9,9652	2,7302
9	500,00	875,00	390,00	383,41	6,5912	1,6901
10	1000,00	875,00	350,00	358,99	-8,9902	-2,5686
11	1200,00	875,00	330,00	330,65	-0,6498	-0,1969
12	1100,00	875,00	340,00	346,15	-6,1466	-1,8078
13	500,00	890,00	400,00	397,67	2,3252	0,5813
14	1000,00	890,00	375,00	367,97	7,0304	1,8748
15	1200,00	890,00	345,00	337,51	7,4853	2,1697
16	1100,00	890,00	340,00	354,07	-14,0688	-4,1379
17	500,00	900,00	410,00	416,52	-6,5245	-1,5913
18	1000,00	900,00	400,00	383,30	16,7050	4,1762
19	1200,00	900,00	360,00	351,43	8,5697	2,3805
20	1100,00	900,00	350,00	368,69	-18,6893	-5,3398
суммарная ошибка					-0,0000079	-1,15
среднее значение ошибки					-0,0000004	-0,057

На рисунке 2 показан график сравнения расчетных и экспериментальных значений плотности для каждого из 20 опытов и относительная ошибка аппроксимации для каждого опыта. Видно, что ошибка невелика и не превышает 3-5%. Рисунки 3 и 4 отражают графическую картину зависимости плотности от значений X_1 и X_3 .

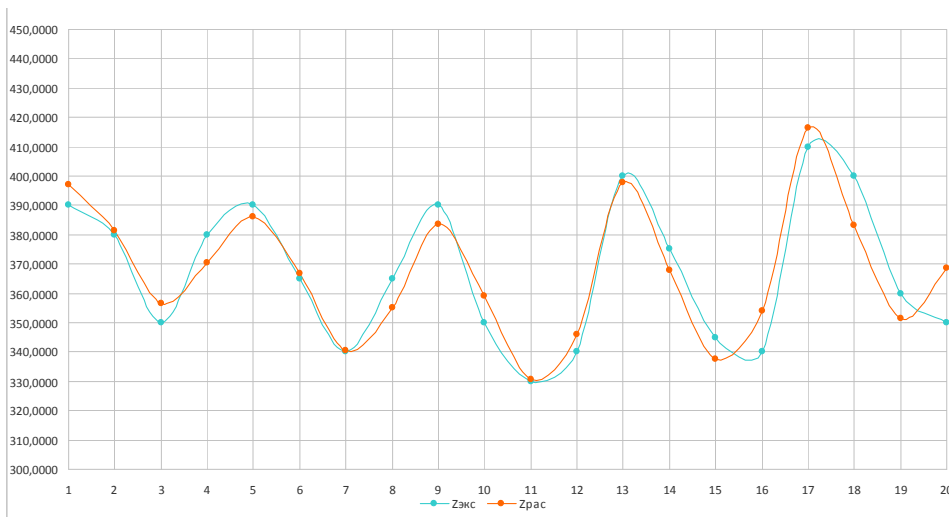


Рисунок 2 - График сравнения экспериментальных и расчетных значений плотности для каждого из 20 опытов

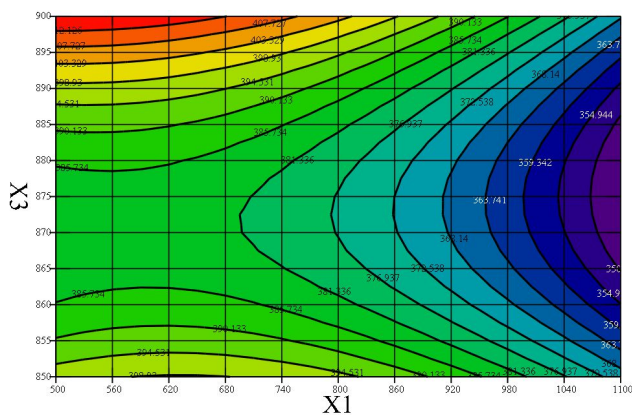


Рисунок 3 - Линии уровня зависимости плотности пеностекла от X_1 и X_3

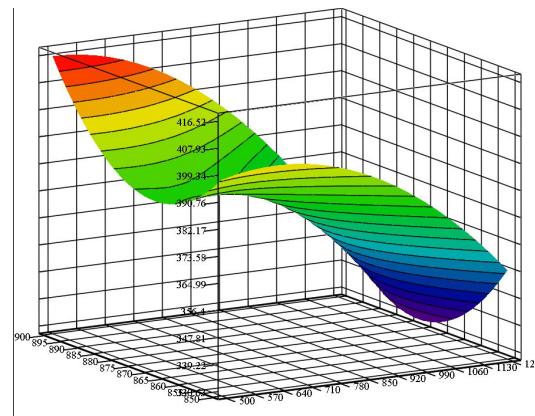


Рисунок 4 - Трёхмерный график зависимости плотности пеноматериала от X_1 и X_3

Из рисунка 5 видно, что при выбранном температурно-временном режиме термообработки в пределах от 800-900⁰С за счет вариации длительности помола и уже экспериментально подобранной концентрации NaOH пористость образцов изменяется в небольших пределах от 80 до 90%. Характер пористой структуры определяется плотностью, которая показывает соотношение твердой и газообразной фаз в материале, и водопоглощением, свидетельствующее о доли открытых (сообщающихся) пор в их общем количестве [7].

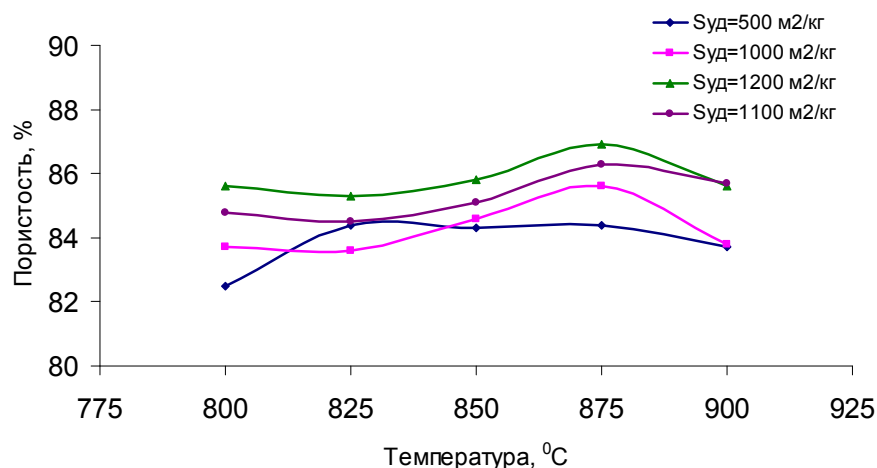


Рисунок 5 – Зависимость пористости пеноматериала от удельной поверхности исследуемой опоки и температуры вспенивания

Для оптимизации процесса и математического моделирования [6] влияния параметров X_1 (удельная поверхность опоки) и X_3 (температура вспенивания) на пористость полученного образца пеноматериала используется уравнение математической модели:

$$\hat{Y}_2 = a_{02} + a_{12} \cdot X_1 + a_{22} \cdot X_3 + a_{32} \cdot X_1^2 + a_{42} \cdot X_1 \cdot X_3 + a_{52} \cdot X_3^2 \quad (2)$$

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

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

№ опыта	Входные переменные		Выход (пористость)		Погрешность (ошибка)	
	X_1	X_3	$Y_{3\text{эксп.}}$	$Y_{3\text{расч.}}$	абсолютная	относительная %
1	2	3	4	5	6	7
1	500,00	850,00	84,300	84,0918	0,2082	0,2469
2	1000,00	850,00	84,600	84,5850	0,0150	0,0177
3	1200,00	850,00	85,800	85,8653	-0,0653	-0,0761
4	1100,00	850,00	85,100	85,1478	-0,0478	-0,0562
5	500,00	860,00	84,400	84,5305	-0,1305	-0,1546
6	1000,00	860,00	85,200	85,1240	0,0760	0,0892
7	1200,00	860,00	86,300	86,4445	-0,1445	-0,1674
8	1100,00	860,00	85,600	85,7069	-0,1069	-0,1249
9	500,00	875,00	84,400	84,6456	-0,2456	-0,2910
10	1000,00	875,00	85,600	85,3898	0,2102	0,2456

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
11	1200,00	875,00	86,900	86,7704	0,1296	0,1491
12	1100,00	875,00	86,300	86,0027	0,2973	0,3444
13	500,00	890,00	84,000	84,1094	-0,1094	-0,1302
14	1000,00	890,00	84,600	85,0042	-0,4042	-0,4777
15	1200,00	890,00	86,300	86,4451	-0,1451	-0,1681
16	1100,00	890,00	86,000	85,6473	0,3527	0,4102
17	500,00	900,00	83,700	83,3900	0,3100	0,3704
18	1000,00	900,00	83,800	84,3852	-0,5852	-0,6983
19	1200,00	900,00	85,600	85,8663	-0,2663	-0,3111
20	1100,00	900,00	85,700	85,0484	0,6516	0,7603
суммарная ошибка					-1,8874E-06	-0,02
среднее значение ошибки					-9,4370E-08	0,00001

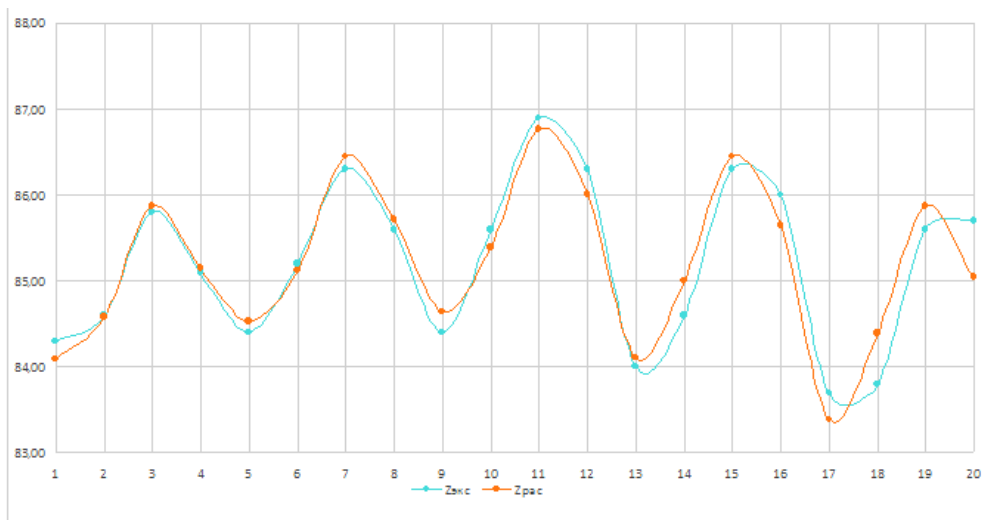


Рисунок 6 - График сравнения экспериментальных и расчетных значений пористости для каждого из 20 опытов

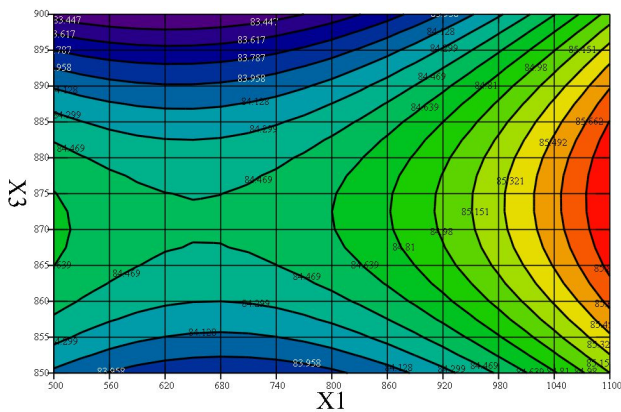


Рисунок 7 - Линии уровня зависимости пористости пеностекла от X_1 и X_3

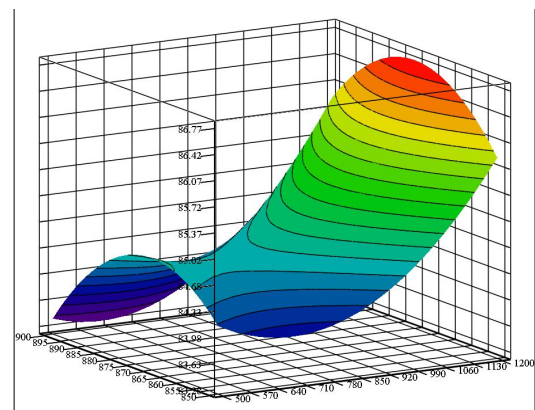


Рисунок 8 - Трёхмерный график зависимости пористости пеноматериала от X_1 и X_3

К улучшению теплоизоляционных свойств пеностекла приводит увеличение содержания пор в материале [8]. С этой точки зрения наилучшие показатели у пеностекла, полученного при применении опоки с удельной поверхностью $S=1000-1200 \text{ м}^2/\text{кг}$ в интервале температур $850-875^\circ\text{C}$.

Таким образом, экспериментальными исследованиями с применением математического моделирования установлен оптимальный температурно-временной режим получения пеноматериала на основе исследуемых опок. Температура загрузки форм с массой в печь – 600°C ; скорость подъема температуры от 600 до 850°C – $6-10^\circ\text{C}/\text{мин}$; выдержка при 850°C – 30 минут и отжиг. Физико-технические характеристики полученного пеноматериала следующие: плотность – $340-370 \text{ кг}/\text{м}^3$; пористость – 85-90%.

Список использованной литературы

1. Астана, Государственная Программа по форсированному индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан на 2010-2014 годы. Астана, 2010. – 95 с.
2. Астана, Государственная Программа по развитию строительной индустрии и производства строительных материалов в Республике Казахстан на 2010-2014 годы. Астана, 2010. – 90 с.
3. Бобров Ю.Л., Овчаренко Е.Г., Шойхет Б.М., Петухова Е.Ю. Теплоизоляционные материалы и конструкции: М.: Инфра-М, 2003. – 268 с.
4. Воля П.А., Алексеев С.В., Шутов А.И., Мосьпан В.И. Пеностекло. Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. – 109 с.
5. В.Н. Сигаев, Жакипбаев Б.Е., Спиридонов Ю.А. Использование горных пород для получения пеностекла. Стекло и керамика // РХТУ им.Д.И.Менделеева – М.: 2013. №4. –С.47-50
6. Гордеев Л.С., Ахназарова С.Л., Глебов М.Б. Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов с неполной информацией о механизме: учеб.пособие - М.: РХТУ им.Д.И.Менделеева, 2010.
7. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. – М.: 1989. - 384 с.
8. Горлов Ю.П. и др. Технология теплоизоляционных материалов. – М.: 1980. - 399 с.