



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ангарский государственный технический университет»

С а в е н к о в А н д р е й И в а н о в и ч

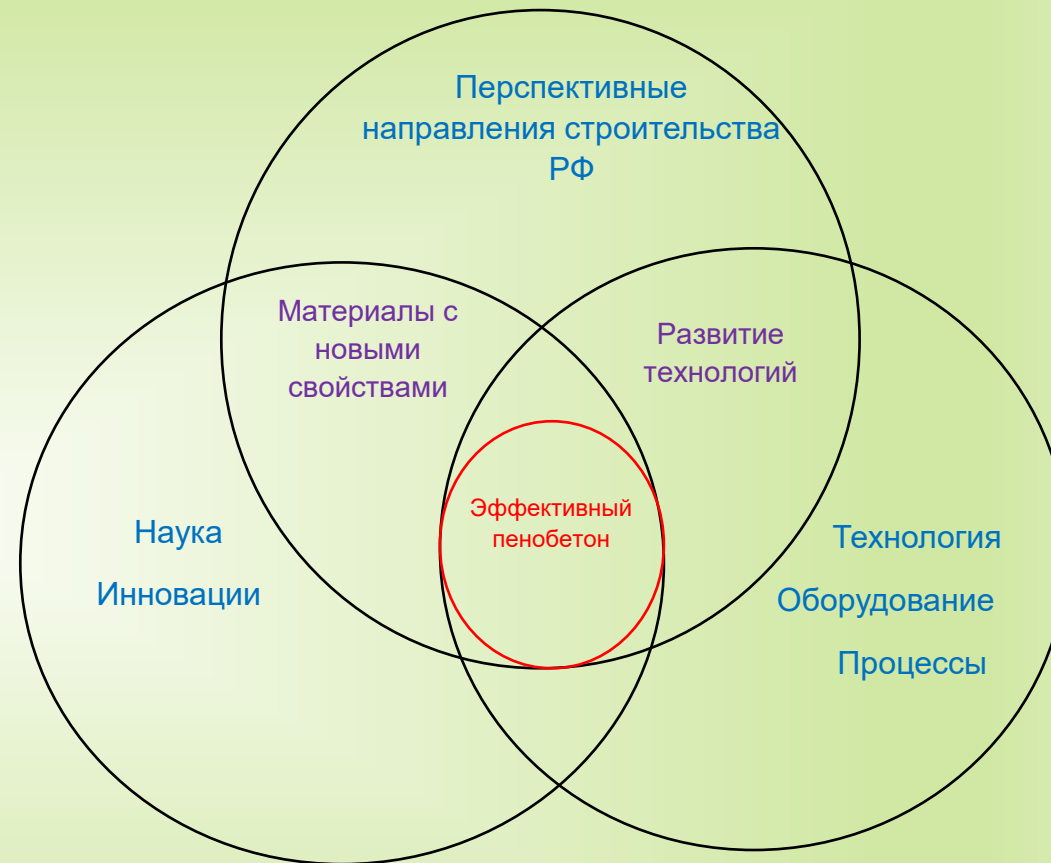
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ
НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор
Р.С. Федюк

Пенобетон- элемент развития строительной отрасли

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ
"ЖИЛЬЕ И ГОРОДСКАЯ СРЕДА"



Пенобетон- Элемент развития строительной отрасли (диаграмма Эйлера)



Распоряжение Правительства Российской Федерации № 3268-р от 31 октября 2022 года «Стратегия развития строительной отрасли, жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года».

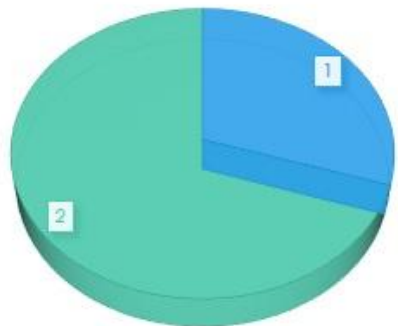
Неавтоклавный пенобетон- эффективный строительный материал



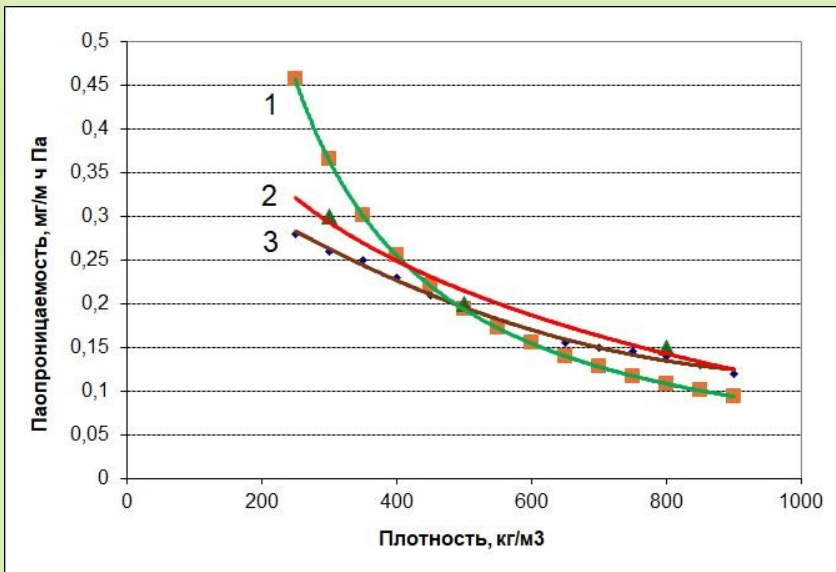
Проблемы:

- Прочность пенобетона
- Устойчивость пеносмеси: подача, укладка
- Развитие сталепенобетонной технологии

ДОЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОБЕТОНА



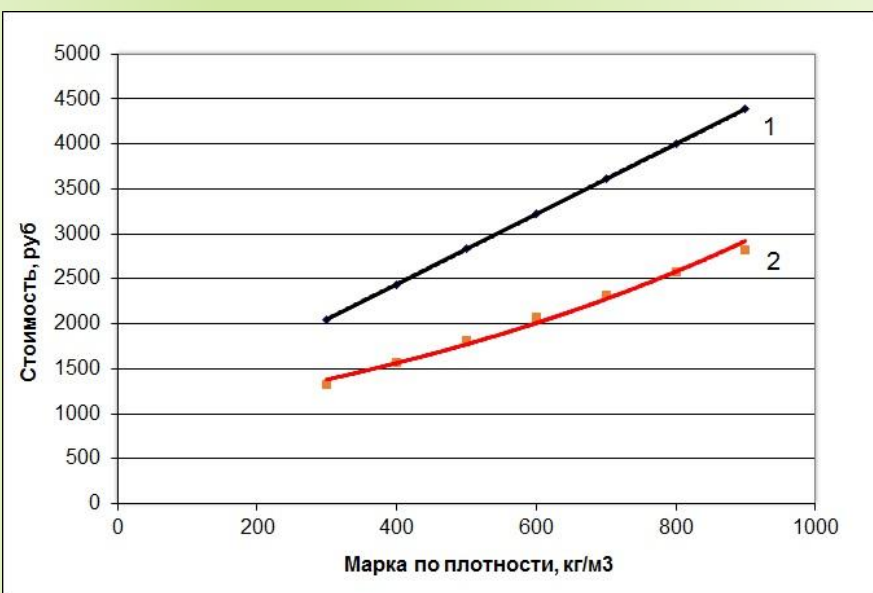
1 – неавтоклавный пенобетон
2 – лёгкие бетоны, включая газобетон и газозолосиликат



Неавтоклавный пенобетон-экономичный и экологичный строительный материал

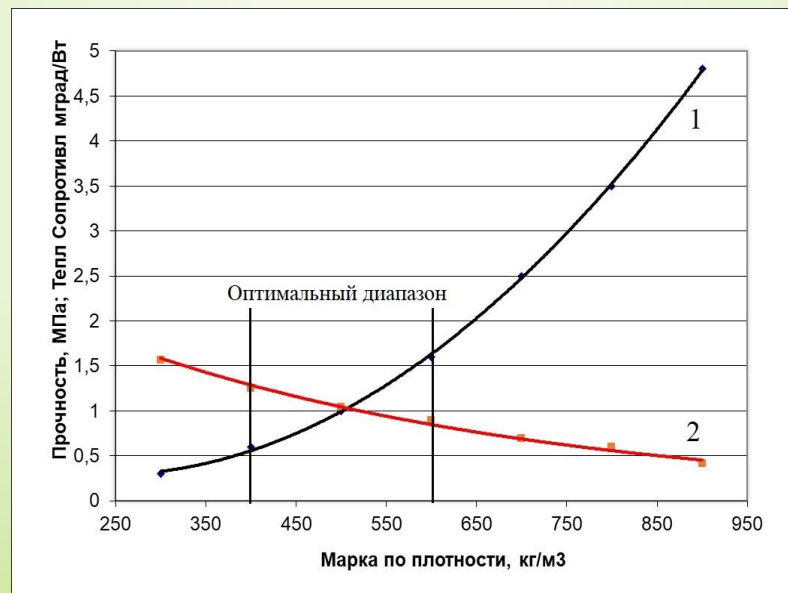


Паропроницаемость пенобетона:
1- по Пушкиной В.В. (2010)
2- по Моргун Л.В. (2025);
3- по ГОСТ 25898.



Стоимость пенобетона:

1 – автоклавный; 2 – неавтоклавный.



Оптимальный диапазон применения пенобетона

1 – прочность; 2 – удельное тепловое сопротивление



Диапазон применения автоклавного и неавтоклавного пенобетона (Диаграмма Парето)

Цель работы:

Разработка научных основ управления структурообразованием неавтоклавно пенобетона, развитие теоретических и методических основ получения оптимальных составов высококачественного пенобетона, обладающего надежными теплофизическими и механическими свойствами, повышение эффективности его производства и исследование перспективных направлений использования пенобетона в составе строительных систем и композитов.

Задачи:

1. Разработать методику определения рациональных составов неавтоклавных пенобетонов, а также исследовать реологические характеристики смесей, физико-механических свойства и эксплуатационные характеристики пенобетонов;
2. Научно обосновать концепцию формирования оптимальной ячеистой структуры неавтоклавного пенобетона с учетом многообразных факторов влияния на качество смеси и готового изделия. Установить зависимости прочности, средней плотности неавтоклавного пенобетона от водотвердого отношения, расхода вяжущего различных видов, заполнителя и пенообразователя;
3. Определить критерии и особенности процессов структурообразования матрицы и вспененного тела с заданной пористостью. Изучить условия устойчивости пеноцементных систем и физико-химические процессы твердения цементных систем в присутствии ПАВ. Разработать технологические приемы замешивания, укладки и транспортировки пеносмеси с учетом ее максимальной сохранности характеристик;
4. Научно обосновать и экспериментально подтвердить механизм схватывания и твердения цементных систем с позиций фрактально-перколяционной модели, закономерности фазового взаимодействия и структурообразования в неавтоклавных материалах в присутствии поверхностно активных веществ;
5. Количественно подтвердить гипотезу о прочности твердого пористого тела как фрактальной функции пористости;
6. Предложить формулу прочности пенобетона с учетом физико-химических особенностей составных компонентов смеси для требуемой его марки по плотности и класса прочности;
7. Определить перспективные направления использования пенобетона в строительных системах и композитах.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ



Блок:	I Актуальность Цель Задачи	II Проектирование состава	III Исследование влияния компонентов состава (сырьевые факторы)				IV Структуро образование.	V Физ-хим процессы в смеси. Перколяция	VI Исследование пористого тела Фрактал	VII Перспективные направления Композит Сейсмика
			Вяжущее	Заполнитель	Пластификация Активация	Пена				
П. по паспорту 2.1.5.		П.1 П.9	П15	П9			П3 П5		П17	П6 П12
№ Положения на защиту		№1	№2	№2			№2 №3	№4	№5 №6	№7
№ слайда	2,3,4,5	6, 7, 8, 9, 10	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18	20, 21, 24, 25, 26, 27	19, 22, 23	29, 30, 31, 32	33	34, 35, 36, 37, 38	39, 40, 41, 42, 43, 44	45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52

Проектирование состава пенобетона

Шаблон для введения экспериментальных данных подвижности растворной смеси по Суттарду

N опы	пер. фактор		Целевая функция			Для расчета к-тов регрессии						отклонение					
	X1	X2	Y1	Y2	Y3	Yср	X1Y	X2Y	X1X2Y	X1^2Y	X2^2Y	Y''	(Y''-Y1Y''-Y2	Y''-Y3	(Yср-Y'')^2		
1	-1	-1	7,62	6,3	6,5	6,81	-6,81	-6,81	6,81	6,81	6,81	6,11	2,27	0,03	0,15	0,48118	
2	-1	0	13,9	13,4	13,5	13,6	-13,6	0	0	13,6	0	14,1	0,04	0,43	0,36	0,23396	
3	-1	1	16,1	15,5	15,7	15,8	-15,8	15,8	-15,8	15,8	15,8	16,1	0,01	0,31	0,13	0,07982	
4	0	-1	15,3	16,9	16,2	16,1	0	-16,1	0	0	16,1	17,3	3,98	0,16	1,15	1,33238	
5	0	0	25,4	25,4	25,4	25,4	0	0	0	0	0	25,1	0,09	0,09	0,1	0,09303	
6	0	1	26,5	29,5	27	27,7	0	27,7	0	0	27,7	26,9	0,13	6,97	0,02	0,64991	
7	1	-1	26,3	30	28	28,1	28,1	-28,1	-28,1	28,1	28,1	27,7	1,88	5,06	0,09	0,15441	
8	1	0	35,3	35,1	36	35,5	35,5	0	0	35,5	0	35,3	0,01	0,04	0,46	0,01838	
9	1	1	36,5	36,1	36,4	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,9	0,18	0,63	0,28	0,34018	
						205	63,7	28,8	-0,72	136	131		8,57	13,7	2,74	3,38327	
			22,5	23,1	22,7	22,8	7,08	3,2	-0,08	15,1	14,5			4,17			
						b0	b1	b2	b12	b11	b22					критерий	0,81087
						25,1	10,6	4,79	-0,18	-0,37	-3,01					табл.критер	2,24
																модель адекватна	

N оп	Данные					Проверка результата Y1				Проверка результата Y2					
	X1	X2	Y1	Y2	Y3	Сумма кв.от.	Ср.кв.откл.	Величина	Вывод	Сумма кв.от.	Ср.кв.откл.	Величина	Вывод		
1	-1	-1	7,62	6,3	6,5	0,02	0,1414214	8,63	15,6	Учитываем	0,6272	0,791959595	1	15,6	Учитываем
2	-1	0	13,9	13,4	13,5	0,0018	0,0424264	10,1	15,6	Учитываем	0,08	0,282842712	0,9	15,6	Учитываем
3	-1	1	16,1	15,5	15,7	0,02	0,1414214	3,75	15,6	Учитываем	0,09245	0,304055916	1,4	15,6	Учитываем
4	0	-1	15,3	16,9	16,2	0,2312	0,4808326	2,62	15,6	Учитываем	0,4232	0,650538239	1,8	15,6	Учитываем
5	0	0	25,4	25,4	25,4	0,0002	0,0141421	1,41	15,6	Учитываем	0,00045	0,021213203	0,2	15,6	Учитываем
6	0	1	26,5	29,5	27	3,125	1,767767	0,99	15,6	Учитываем	0,125	0,353553391	7,8	15,6	Учитываем
7	1	-1	26,3	30	28	1,90125	1,3788582	1,92	15,6	Учитываем	1,39445	1,180868325	2,4	15,6	Учитываем
8	1	0	35,3	35,1	36	0,37845	0,6151829	0,51	15,6	Учитываем	0,28125	0,530330086	0,9	15,6	Учитываем
9	1	1	36,5	36,1	36,4	0,03645	0,1909188	1,23	15,6	Учитываем	0,005	0,070710678	4,5	15,6	Учитываем

Подбор состава пенобетона. Поле аппроксимированных значений подвижности смеси



В/Т	%Плас x1\х2	0,00	0,030	0,060	0,090	0,120	0,150	0,180	0,210	0,240	0,270	0,300	0,330	0,360	0,390	0,420	0,450	0,480	0,510	0,540	0,570	0,60
0,4	-1,00	6,11	7,18	8,19	9,14	10,03	10,86	11,63	12,33	12,98	13,57	14,10	14,56	14,97	15,32	15,60	15,83	16,00	16,10	16,15	16,13	16,06
0,41	-0,90	7,26	8,33	9,34	10,28	11,17	12,00	12,76	13,47	14,12	14,70	15,23	15,69	16,10	16,44	16,73	16,95	17,12	17,22	17,27	17,25	17,17
0,42	-0,80	8,40	9,47	10,48	11,42	12,31	13,13	13,90	14,60	15,24	15,83	16,35	16,82	17,22	17,56	17,85	18,07	18,23	18,33	18,37	18,36	18,28
0,43	-0,70	9,54	10,60	11,61	12,55	13,43	14,26	15,02	15,72	16,36	16,95	17,47	17,93	18,33	18,67	18,95	19,18	19,34	19,44	19,48	19,46	19,38
0,44	-0,60	10,67	11,73	12,73	13,67	14,55	15,37	16,14	16,84	17,48	18,06	18,58	19,04	19,44	19,78	20,06	20,28	20,43	20,53	20,57	20,55	20,47
0,45	-0,50	11,79	12,85	13,85	14,79	15,67	16,49	17,24	17,94	18,58	19,16	19,68	20,14	20,54	20,87	21,15	21,37	21,53	21,62	21,66	21,64	21,55
0,46	-0,40	12,90	13,96	14,95	15,89	16,77	17,59	18,35	19,04	19,68	20,26	20,77	21,23	21,63	21,96	22,24	22,45	22,61	22,70	22,74	22,71	22,63
0,47	-0,30	14,00	15,06	16,06	16,99	17,87	18,68	19,44	20,14	20,77	21,35	21,86	22,32	22,71	23,04	23,32	23,53	23,69	23,79	23,84	23,79	23,70
0,48	-0,20	15,10	16,16	17,15	18,08	18,96	19,77	20,53	21,22	21,85	22,43	22,94	23,39	23,79	24,12	24,39	24,60	24,75	24,85	24,88	24,85	24,76
0,49	-0,10	16,19	17,24	18,21	19,17	20,04	20,85	21,61	22,30	22,93	23,50	24,01	24,46	24,86	25,19	25,46	25,67	25,82	25,91	25,94	25,90	25,81
0,5	0,00	17,27	18,33	19,32	20,25	21,12	21,93	22,68	23,37	24,00	24,57	25,08	25,53	25,92	26,25	26,51	26,72	26,87	26,96	26,99	26,95	26,86
0,51	0,10	18,33	19,40	20,39	21,32	22,19	23,00	23,74	24,43	25,06	25,63	26,14	26,58	26,97	27,30	27,56	27,77	27,92	28,00	28,03	27,99	27,90
0,52	0,20	19,42	20,47	21,45	22,38	23,25	24,06	24,80	25,49	26,11	26,68	27,19	27,63	28,02	28,34	28,61	28,81	28,96	29,04	29,07	29,03	28,93
0,53	0,30	20,48	21,53	22,51	23,44	24,30	25,11	25,85	26,54	27,16	27,73	28,23	28,67	29,06	29,38	29,64	29,85	29,99	30,07	30,09	30,06	29,96
0,54	0,40	21,53	22,58	23,56	24,48	25,35	26,15	26,89	27,58	28,20	28,76	29,26	29,71	30,09	30,41	30,67	30,87	31,01	31,09	31,11	31,08	30,98
0,55	0,50	22,58	23,62	24,60	25,53	26,39	27,19	27,93	28,61	29,23	29,79	30,29	30,73	31,11	31,43	31,69	31,89	32,03	32,11	32,13	32,09	31,99
0,56	0,60	23,62	24,66	25,64	26,56	27,42	28,22	28,96	29,64	30,26	30,82	31,31	31,75	32,13	32,45	32,71	32,90	33,04	33,12	33,14	33,09	32,99
0,57	0,70	24,65	25,69	26,67	27,59	28,44	29,24	29,99	30,66	31,27	31,83	32,33	32,76	33,14	33,46	33,71	33,91	34,04	34,12	34,13	34,09	33,98
0,58	0,80	25,67	26,71	27,69	28,60	29,46	30,26	30,99	31,67	32,28	32,84	33,33	33,77	34,14	34,46	34,71	34,91	35,04	35,11	35,13	35,08	34,97
0,59	0,90	26,69	27,73	28,70	29,62	30,47	31,26	32,00	32,67	33,29	33,84	34,33	34,77	35,14	35,45	35,70	35,90	36,03	36,10	36,11	36,06	35,95
0,6	1,00	27,70	28,73	29,71	30,62	31,47	32,27	33,00	33,67	34,28	34,83	35,32	35,76	36,13	36,44	36,69	36,88	37,01	37,08	37,09	37,04	36,93

D800
D600
D500

Поле числовых значений аппроксимированной функции подвижности растворной смеси от В/Т отношения и концентрации пластификатора. Указаны действительные значения переменных.

Линии равноподвижных смесей

Требуемая подвижность растворной смеси по Суттарду (СН 277-80)

Уравнение подвижности смеси по Суттарду в условных координатах

$$d_c = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_{12} X_1 X_2 + B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2$$

D, кг/м ³	400	500	600	700	800
d _c , см	38	30	24	20	18

Подбор состава пенобетона

Масса вяжущего вещества в килограммах на

$$\text{кубометр пенобетонной смеси } \rho = \frac{D}{1.2 + \frac{3}{\rho}},$$

Где D - средняя плотность пенобетона, кг/м³;

$\frac{3}{\rho}$ - отношение заполнителя к вяжущему,

заданное изначальное.

Масса заполнителя на кубометр

$$\text{пенобетонной смеси, килограмм: } Z = \frac{3}{\rho} \rho$$

Количество затворителя от водотвердого

$$\text{отношения, литров: } V = \frac{V}{T} T \quad \frac{V}{T} = X_1 = \frac{1}{2B} (-B_1 - B_{12}X_2) \pm \sqrt{(-B_1 - B_{12}X_2)^2 - 4B_{11}(B_{22}X_2 + B_2X_2 - d_c)^2}$$

Необходимо определить состав пены. Требуемый объем пены,

$$\text{литров: } V_{\text{п}} = 1000 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ц}}} - \frac{3}{\rho_3} - B$$

В данном объеме содержится раствор пенообразующего препарата заданной кратности $K_{\text{п}}$.

$$\text{Объем воды в пене, литров: } V_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{K_{\text{п}}}$$

По содержанию пенообразователя в растворе %ПО определяется необходимое его количество $\text{ПО} = \% \text{ПО} * V$

Заданная плотность ячеистой смеси, кг/м ³	500	600	700	800	900
Коэфф., учитыв. гидратную воду $K_g =$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Водотвердое отношение $V/T =$	0,44	0,4	0,44	0,40	0,35
Диаметр распыла по Суттарду, см	30	26	22	18	14
К-во воды на куб.м, кг $V =$	198	216	277	288	284
Расход пенообразователя, л/куб.м $\text{ПО} =$	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5
Масса сухих компонентов на куб.м $T =$	450	540	630	720	810
Отношение кремнезем/вяжущее $m=3/\rho$	0	0,5	0,75	0,75	0,75
К-во цемента на куб.м, кг $\rho =$	450	365	360	411	463
К-во заполнителя на куб.м, кг $Z =$	0	183	270	308	347
Расход пластификатора, кг/куб.м	1,15	1,20	1,25	1,25	1,20

Для сравнения:

Метод расчета состава Вох-Wilson (2012):

Цемент - (35-45)% от общей массы смеси;

Вода – (25-40)% от общей массы смеси;

Пенообразователь – (3-5)% от общей массы смеси;

Мелкий заполнитель – (25-30)% от общей массы;

Добавки дополнительных химикатов – (0,1-0,15)%

от общей массы смеси.

Алгоритм формирования структуры пенобетона

Формулирование технических требований к пенобетону

Проектирование объектов с технологией ЛСТК + пенобетон

Проектирование состава

Определение В/Т отношения

Масса вяжущего, кг: $\text{Ц} = \frac{E}{1.2 + \frac{3}{\text{Ц}}}$

Масса заполнителя, кг: $\text{З} = \frac{3}{\text{Ц}} \text{Ц}$

Количество затворителя, л: $\text{В} = \frac{\text{В}}{\text{Т}}$

Объем пены, л: $V_{\text{п}} = 1000 - \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} - \frac{\text{З}}{\rho_{\text{з}}} - \text{В}$

Объем воды в пене, л: $V_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{K_{\text{п}}}$

$\text{ПО} = (2-2,5)\% V_{\text{п}}$

Подготовка и контроль качества сырьевых материалов

Вяжущее

Заполнитель

Затворитель

Добавки

Пенообразователь

Лабораторный этап

Пробный замес

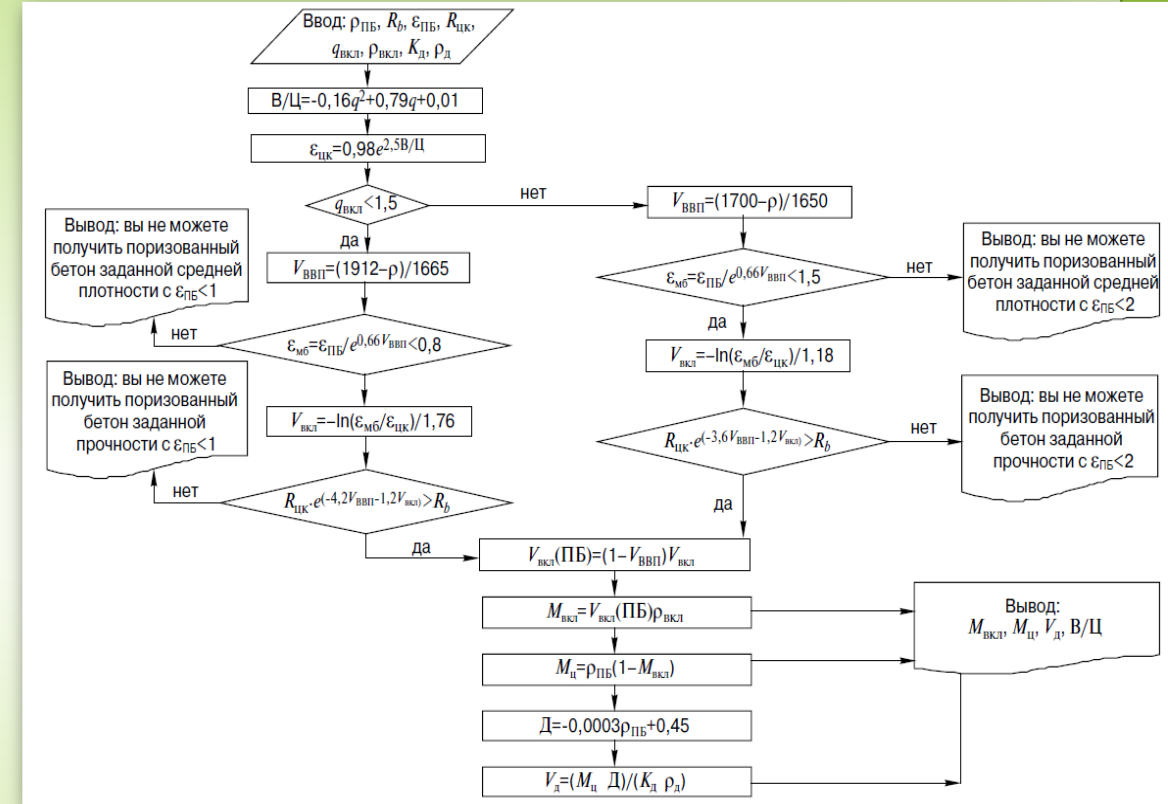
Корректировка состава

Строительный этап (ЛСТК + пенобетон)

Приготовление пеносмеси в смесителе

Укладка смеси

Набор прочности пенобетона



Алгоритм конструирования структуры пенобетона марок D800-D1600 по Славчевой-Чернышову (2016).

Блок-схема формирования структуры пенобетона
Расчётно-эмпирический метод.

Производство пенобетона



- методом раздельного приготовления возможно получение пенобетонов теплоизоляционных марок по плотности
- минимальный износ оборудования
- Нет необходимости в автоклавировании, поскольку в неавтоклавном пенобетоне можно добиться характеристик автоклавного рациональным составом и добавками.



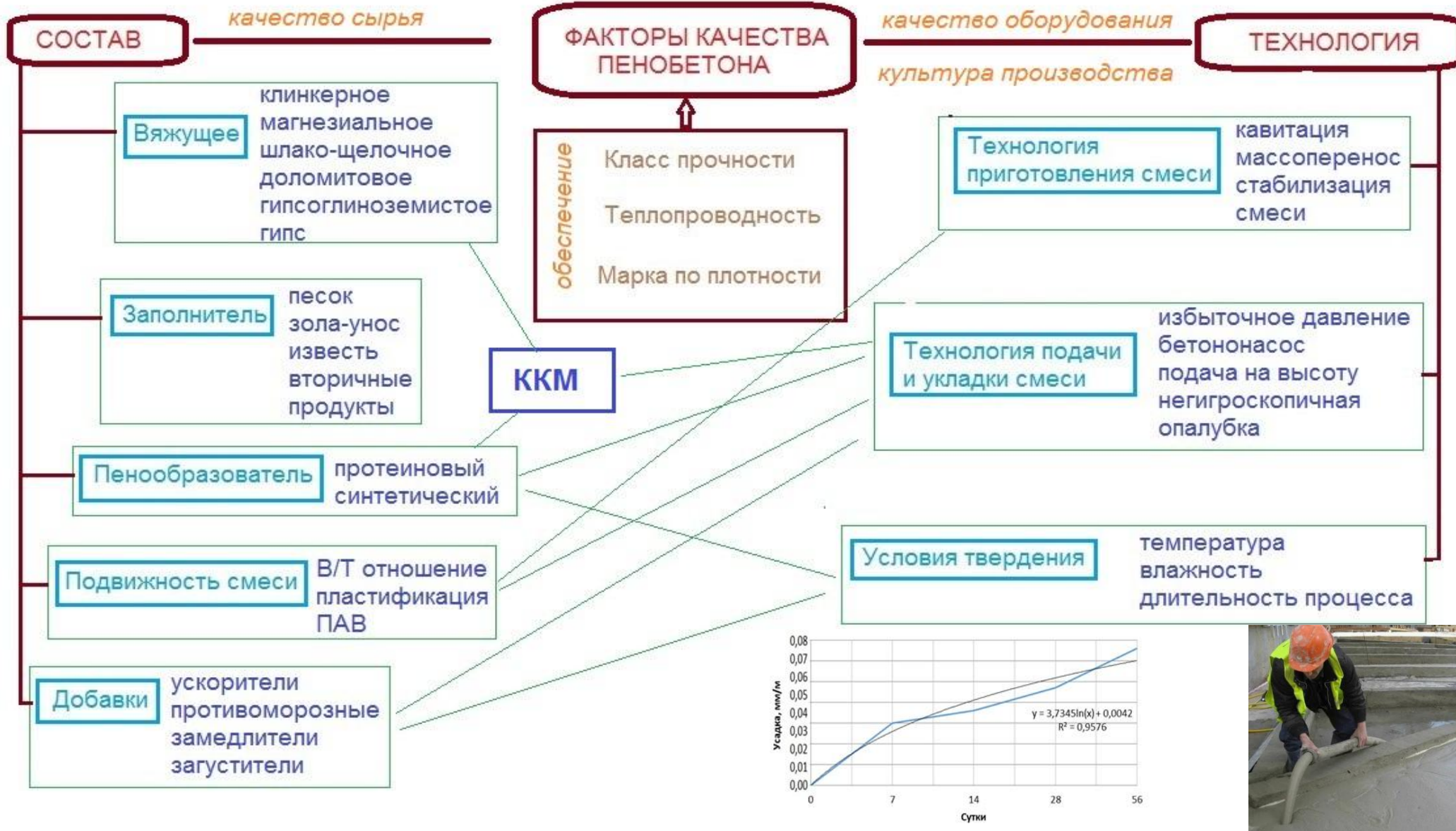
Процессы приготовления пенобетонной смеси



Прочность пенобетона марки D600 от продолжительности перемешивания пеносмеси

Схема производства пенобетона и физико-химических процессов в смеси

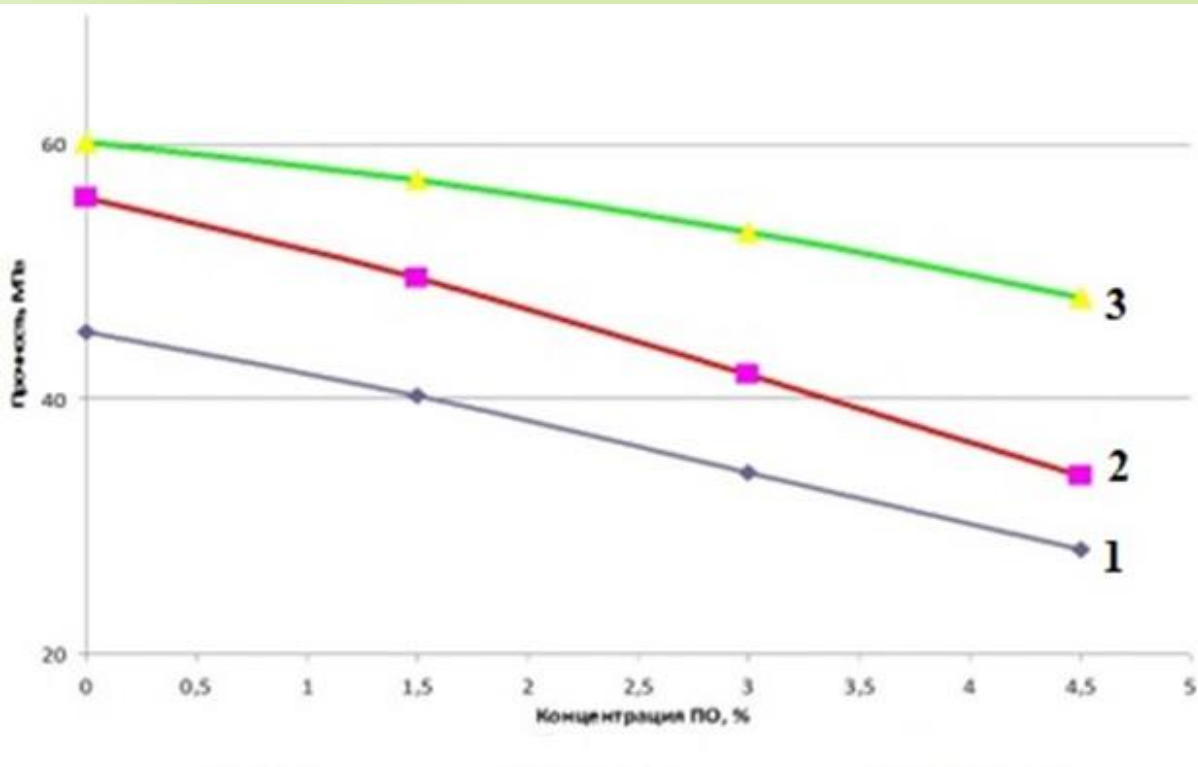
Факторы качества пенобетона



Структурообразование неавтоклавного пенобетона представляет собой сложный физико-химический процесс формирования пористой структуры материала с заданными характеристиками прочности, плотности и теплоизоляционных свойств.

2. Концепция формирования оптимальной ячеистой структуры пенобетона с учетом влияния вяжущего и матрицы

Вяжущее для пенобетона (глинчатое)



Прочность материала межпоровой перегородки от концентрации протеинового пенообразователя:
1 – на цементе ЦЕМ I 32,5Н, 2 – на цементе ЦЕМ I 42,5Н,
3 – на цементе ЦЕМ I 52,5Н.

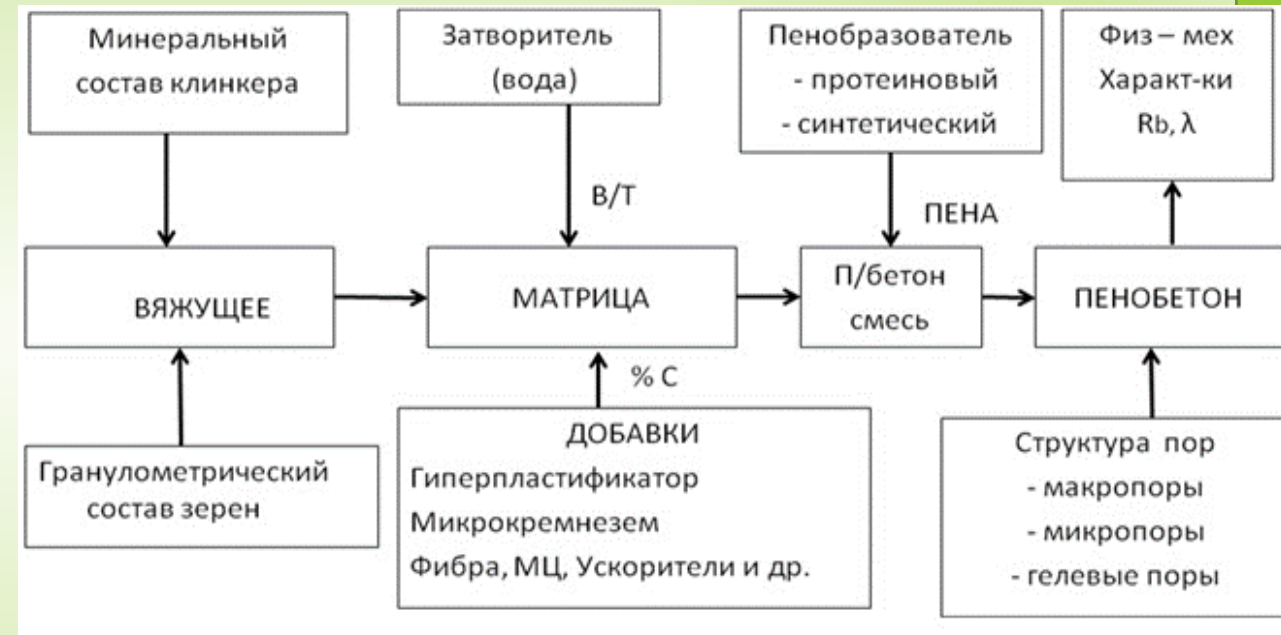


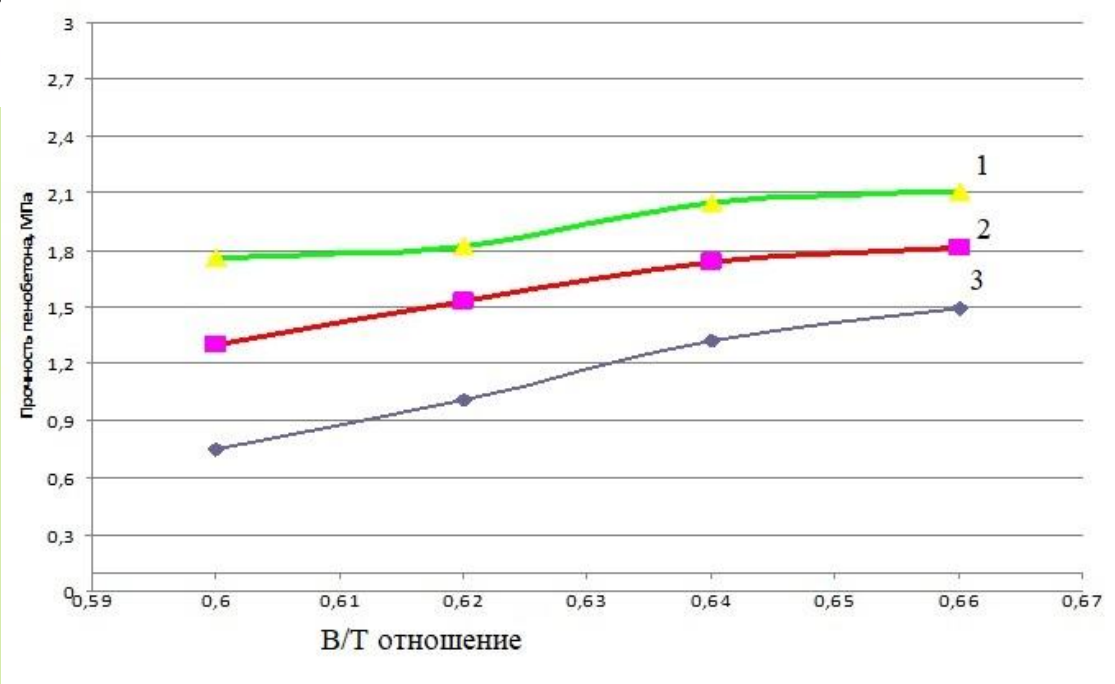
Схема взаимосвязи характеристик вяжущего с матрицей и пенобетоном

RU 2 569 115 C1
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ СОБЛАДЕНИЮ
 ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ
 RU 2569115 C1
 RU 2569115 C1

Концепция формирования оптимальной ячеистой структуры пенобетона с учетом влияния вяжущего и матрицы

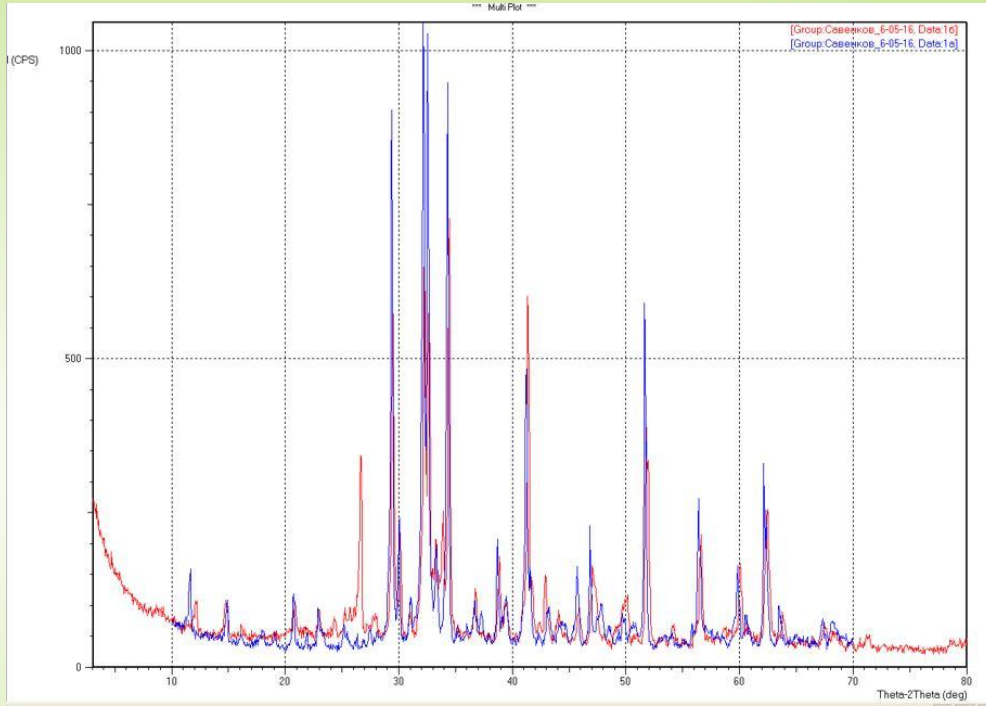


Пенобетон на цементе высокого класса прочности



Прочность на сжатие пенобетона плотностью D500 в зависимости от V/T

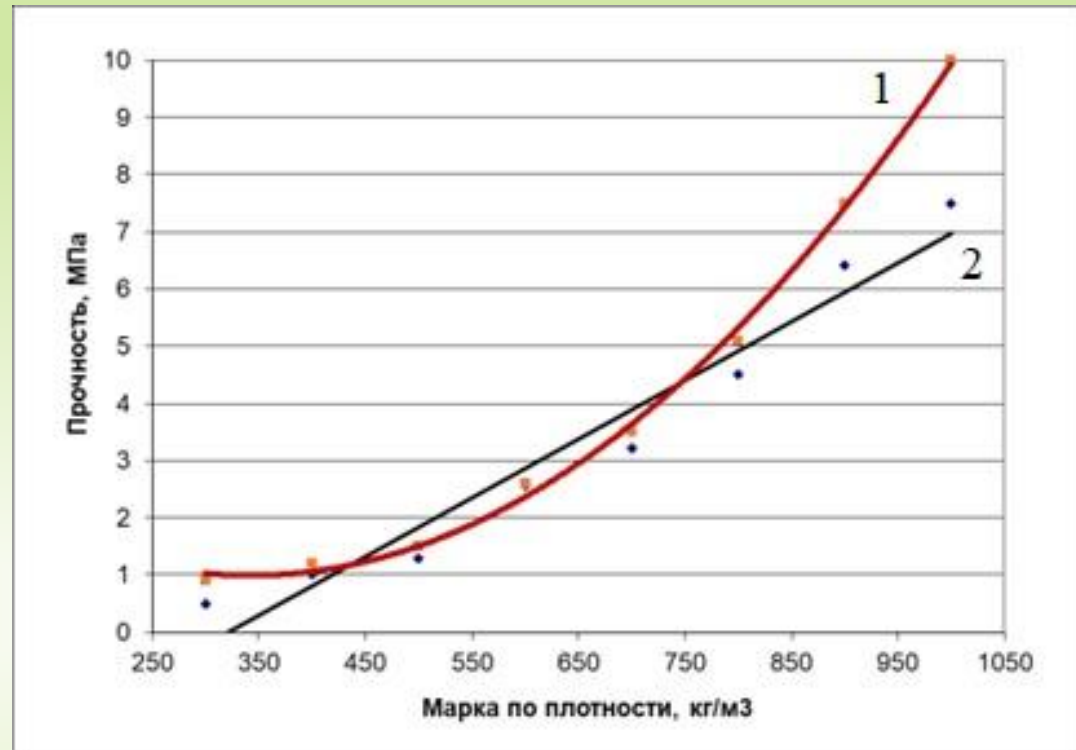
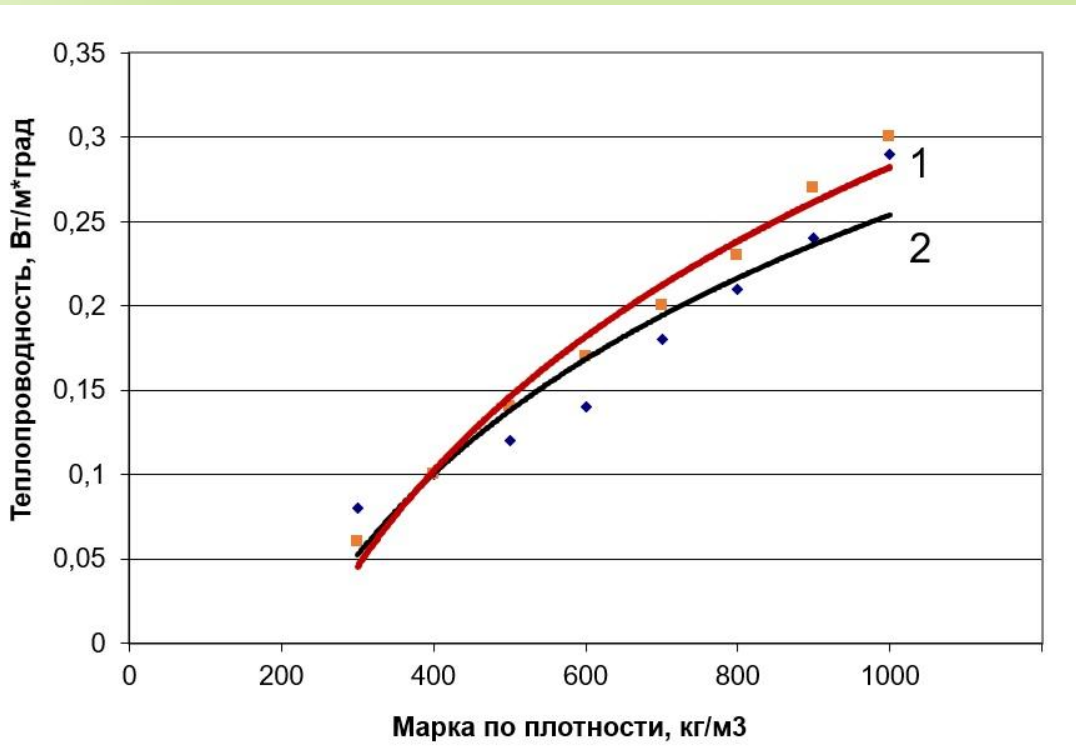
- 1- На цементе ЦЕМ I 52,5Н; 2- на цементе ЦЕМ I 42,5Н; 3- на цементе ЦЕМ I 32,5Н.



РФА камня матриц на цементе ЦЕМ I 52,5Н

Заданная плот-ть бетона , кг/м3		300	400	500	600	700	800	900
К-во воды на куб.м, кг	V =	133	170	204	241	262	286	321
К-во цемента на куб.м, кг	Ц =	250	333	417	315	368	420	473
К-во заполнителя на куб.м, кг		0	0	0	221	257	294	331
Расход пластификатора, кг/куб.м		0,00	0,00	0,00	0,79	0,92	1,05	1,18

Пенобетон на магнизиальном вяжущем

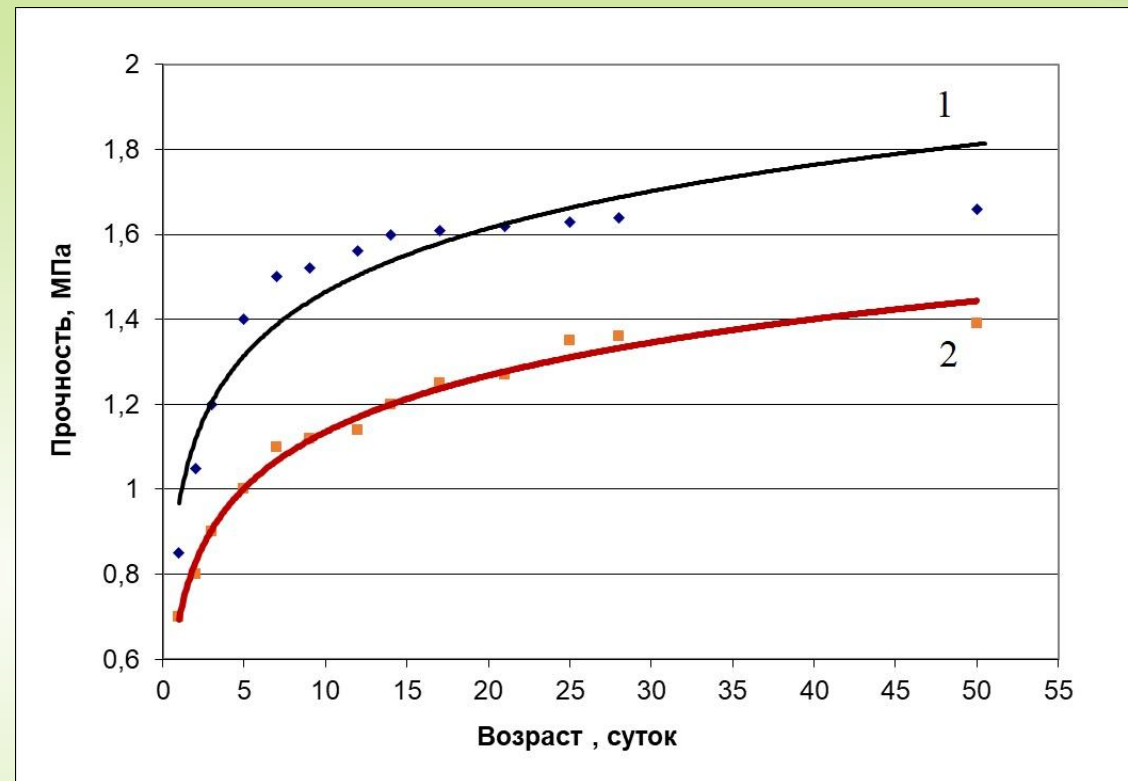
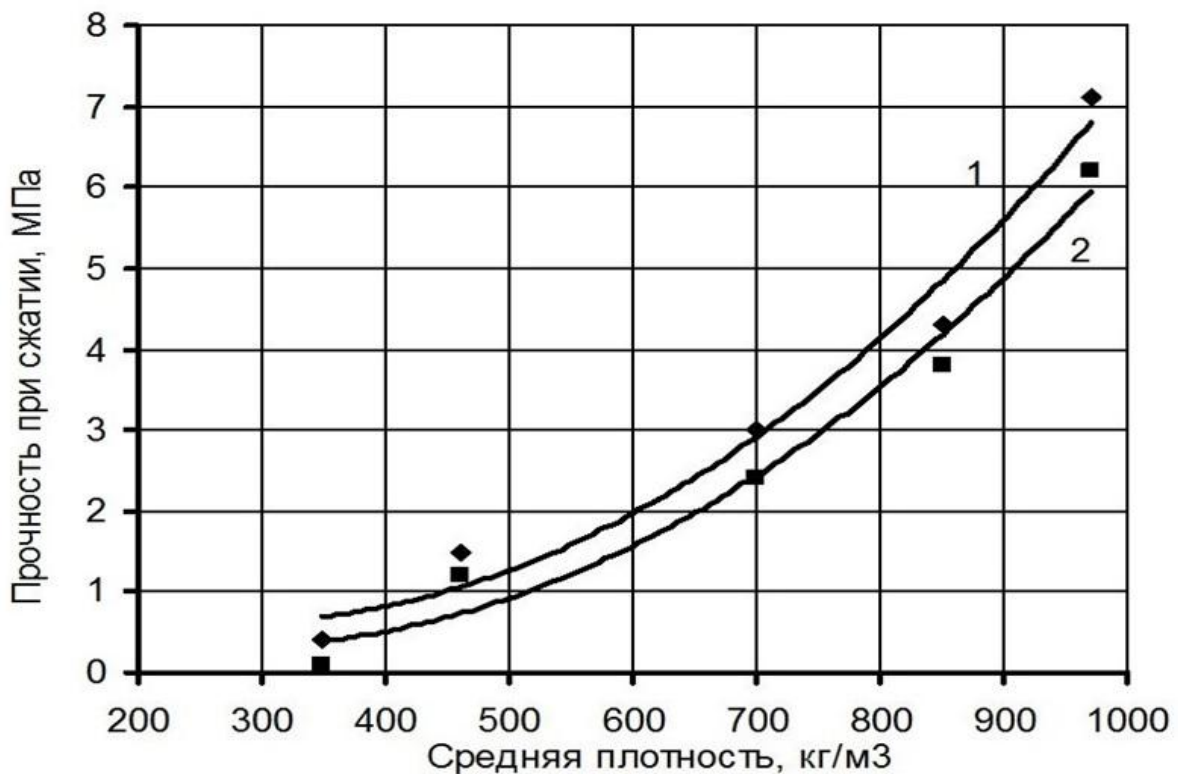


Коэффициент теплопроводности пенобетона на магнизиальном вяжущем:
 1 – полученные данные, 2 – по ГОСТ 31359-2007;

Зависимость прочности на сжатие пеномагнезита от плотности 1 – Полученные данные;
 2 – данные TecEco (John Harrison, 1999)

Заданная плот-ть бетона , кг/м ³	300	400	500	600	700	800	900
К-во затворителя на куб.м, кг	133	170	204	241	262	286	321
К-во магнизиального цемента на куб.м, кг	250	333	417	315	368	420	473
К-во заполнителя на куб.м, кг	0	0	0	221	257	294	331

Пенобетон на доломитовом вяжущем



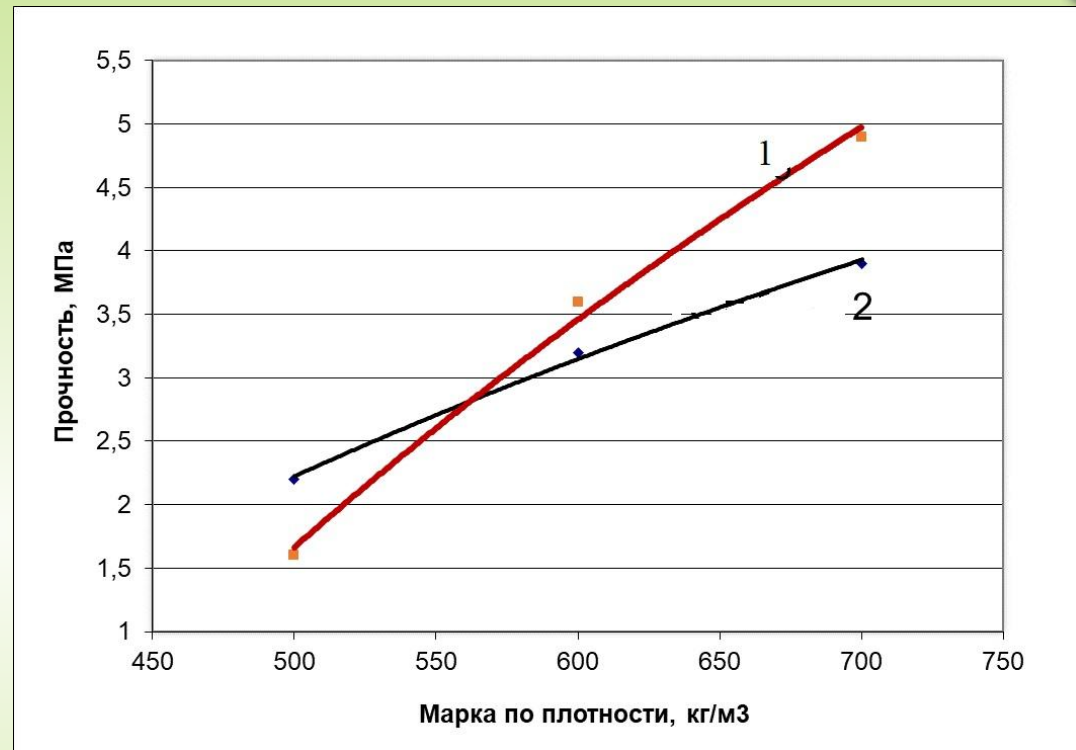
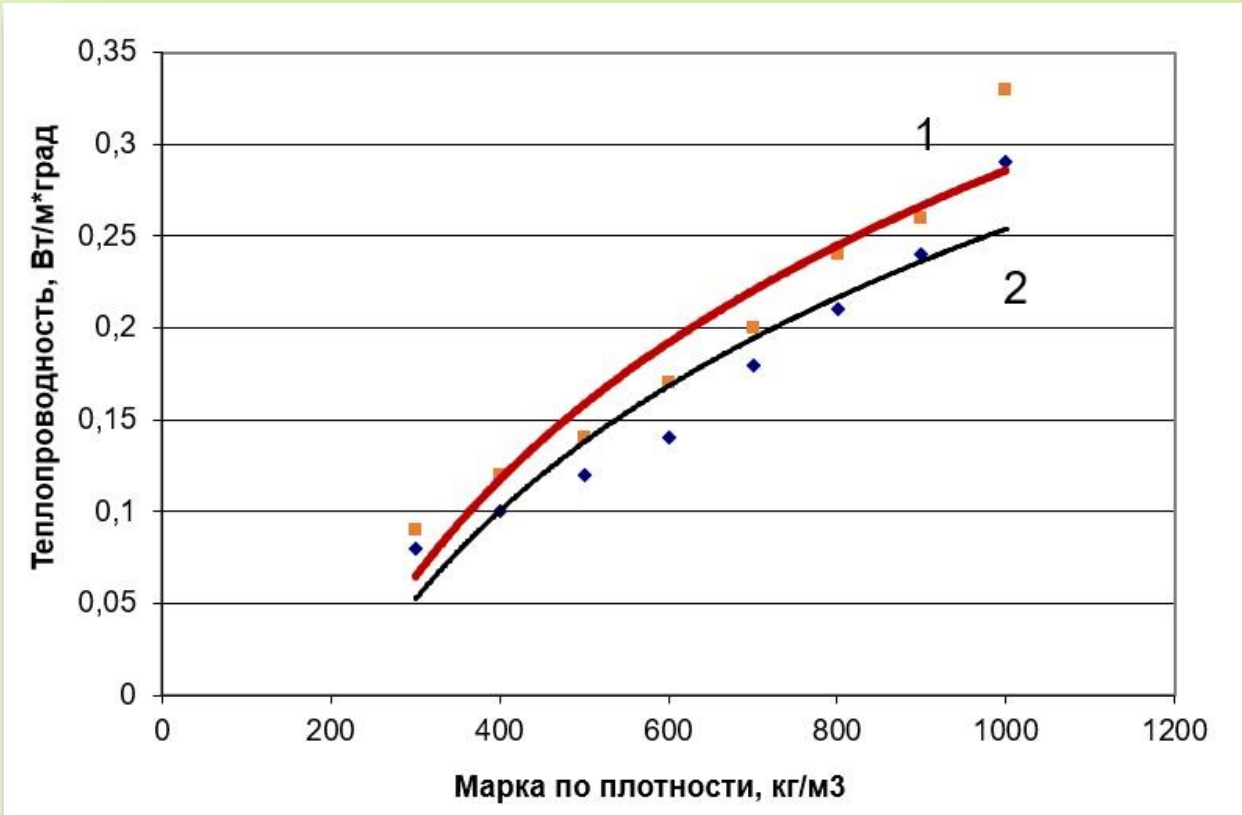
Зависимость прочности на сжатие пенодоломита от плотности и от вида пенообразователя. 1 – синтетический пенообразователь; 2 – Протеиновый пенообразователь

Рост прочности на сжатие пенодоломита средней плотностью 500 кг/м³ при использовании в составе пенообразователей:

- 1 – синтетический пенообразователь;
- 2 – протеиновый пенообразователь

Заданная плот-ть бетона , кг/м ³	300	400	500	600	700	800	900
К-во затворителя на куб.м, кг	133	170	204	241	262	286	321
К-во доломита на куб.м, кг	250	333	417	315	368	420	473
К-во заполнителя на куб.м, кг	0	0	0	221	257	294	331

Пенобетон на основе шлакощелочного вяжущего



Коэффициент теплопроводности пенобетона на шлакощелочном вяжущем:

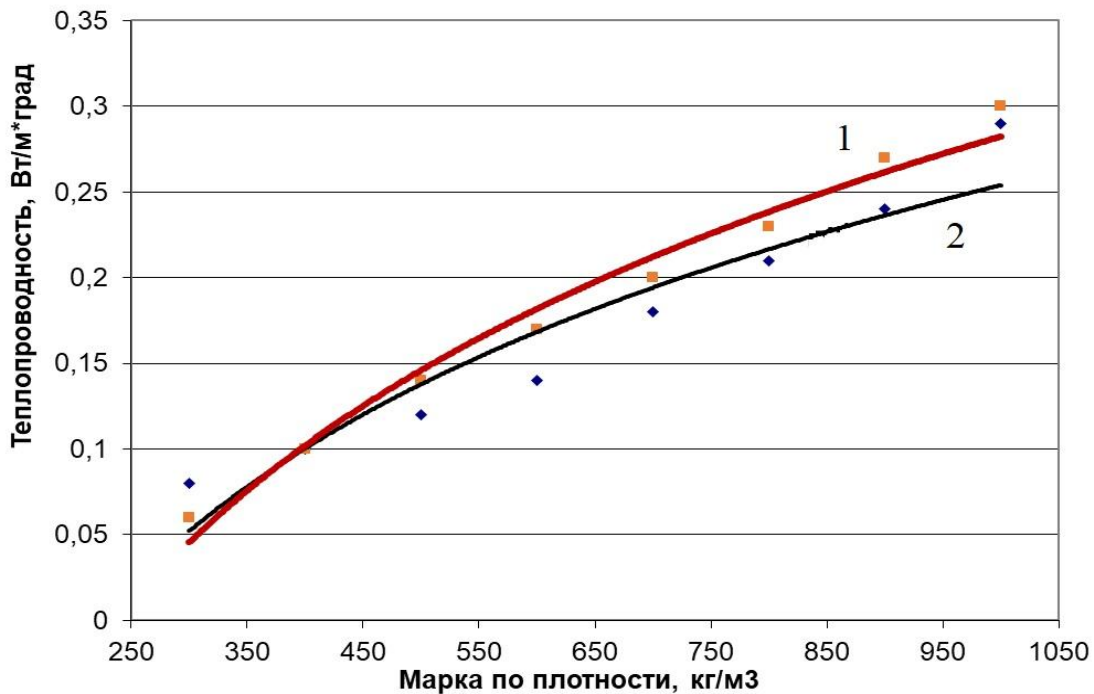
1 – полученные данные, 2 – по ГОСТ 31359-2007;

Зависимость прочности на сжатие шлакощелочного пенобетона от плотности:

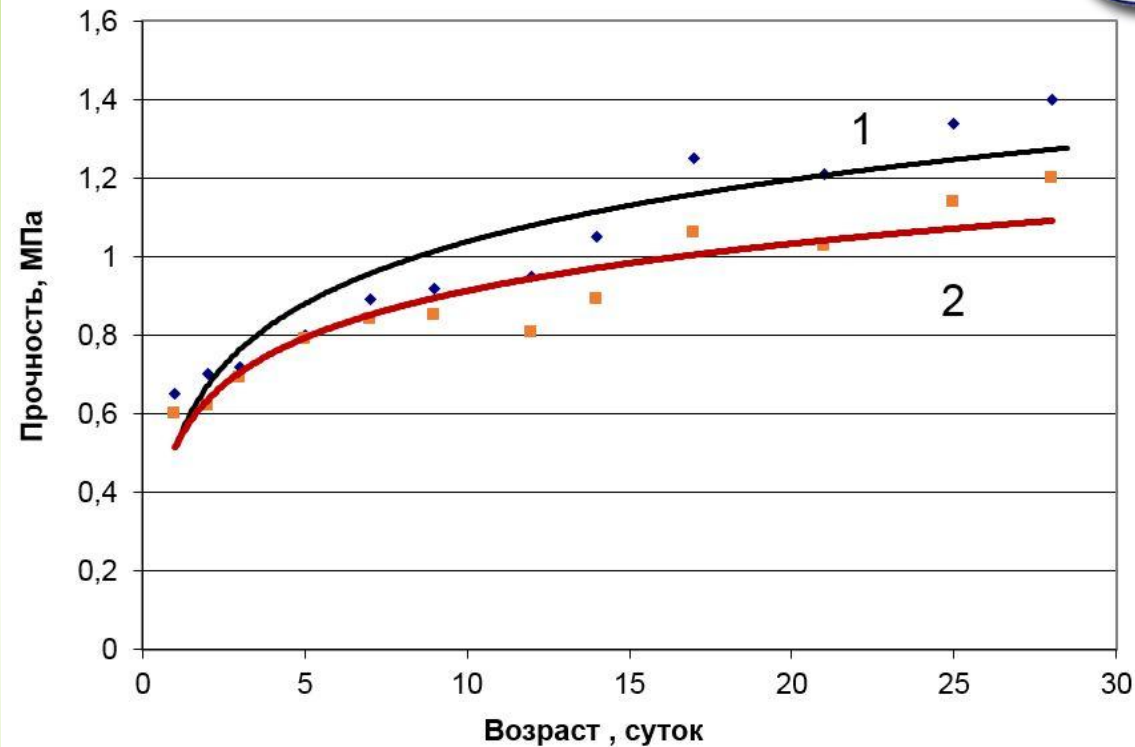
1 – полученные данные; 2 – данные J.G. Sanjayan (2008).

Заданная плот-ть бетона , кг/м ³	300	400	500	600	700	800	900
К-во воды на куб.м, кг	150	180	220	255	280	310	340
К-во цемента на куб.м, кг	250	333	417	315	368	420	473
К-во заполнителя на куб.м, кг	0	0	0	221	257	294	331
Расход пластификатора, кг/куб.м	0,00	0,00	0,00	0,9	0,95	1,15	1,25

Пенобетон на гипсоглиноземистом расширяющемся цементе



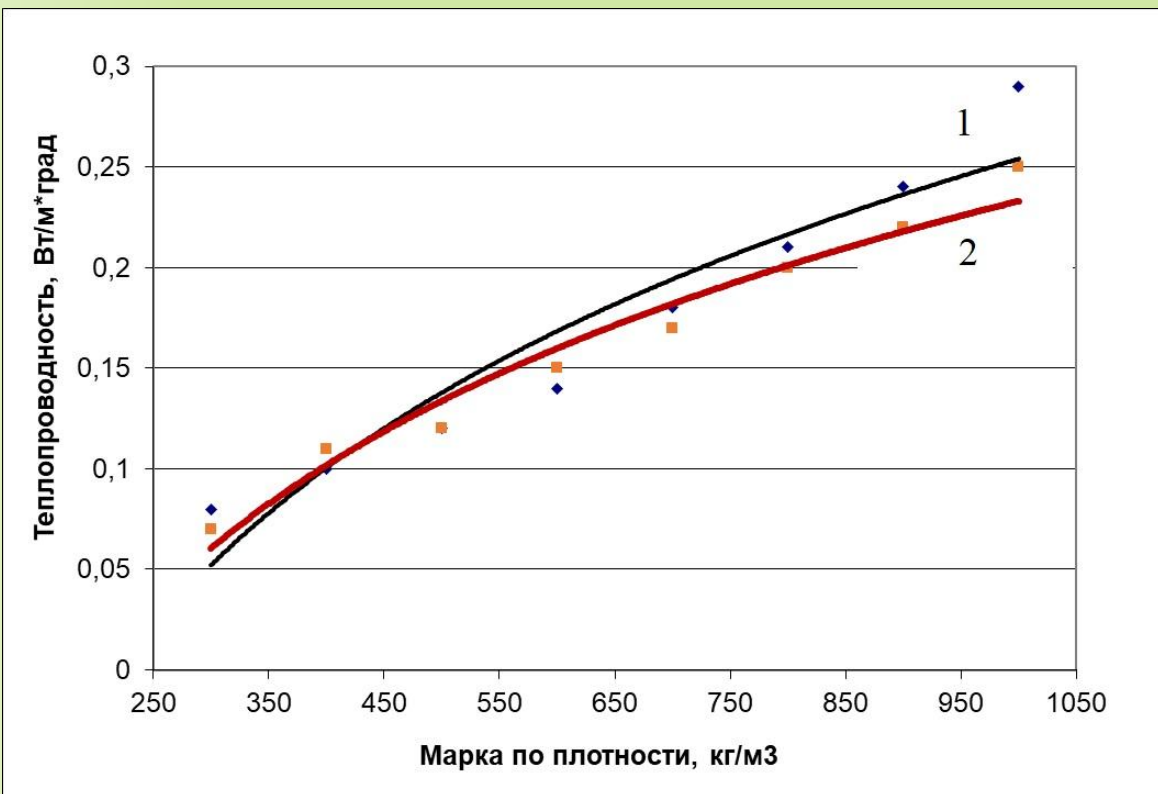
Коэффициент теплопроводности пенобетона на ГГРЦ:
1 – по ГОСТ 31359-2007; 2 – полученные данные.



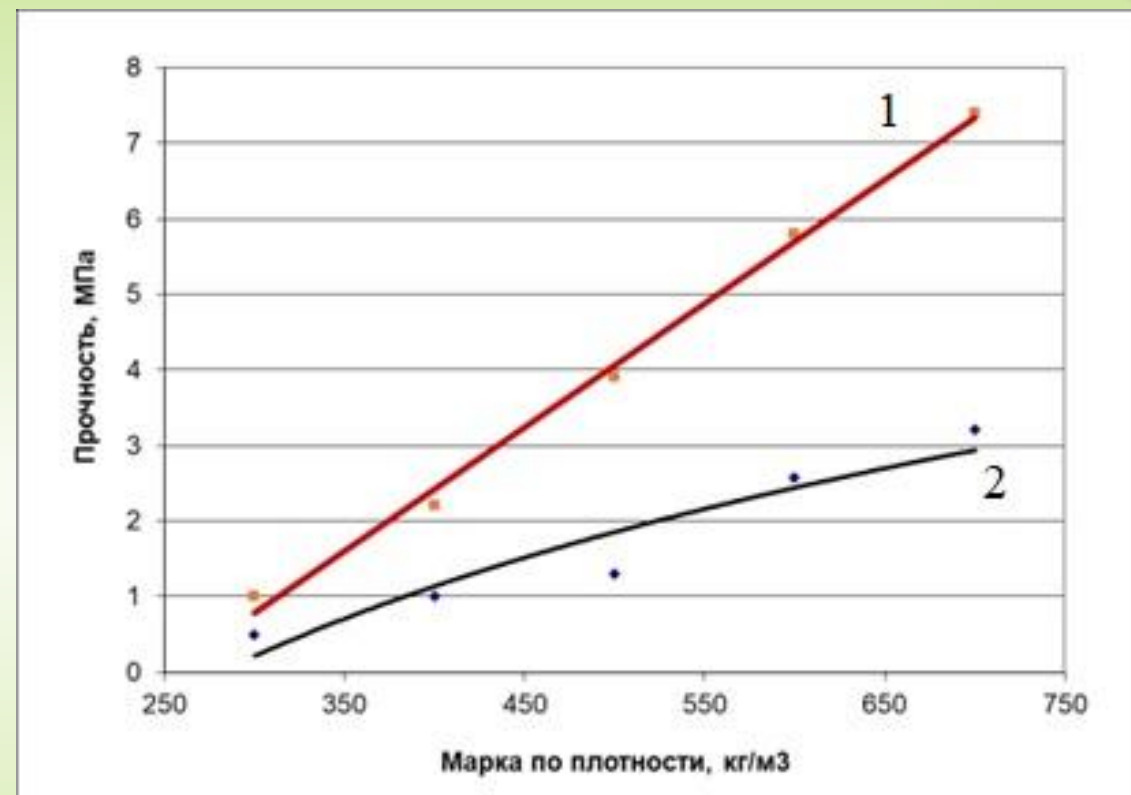
Характер роста прочности на сжатие пенобетона D500 на гипсоглиноземистом вяжущем:
1 – полученные данные; 2 – данные Пушкиной В.В. (2010).

Заданная плот-ть бетона , кг/м ³	300	400	500	600	700	800	900
К-во воды на куб.м, кг	В = 133	170	204	241	262	286	321
К-во цемента на куб.м, кг	Ц = 250	333	417	315	368	420	473
К-во заполнителя на куб.м, кг	0	0	0	221	257	294	331
Расход пластификатора, кг/куб.м	0,00	0,00	0,00	0,79	0,92	1,05	1,18

Пенобетон на сухой строительной смеси



Коэффициент теплопроводности пенобетона на сухой смеси.
1 – по ГОСТ 31359-2007; 2 – полученные данные.



Прочность на сжатие пенобетона на сухой смеси.
1 – полученные данные; 2 – по ГОСТ 25485-2019

Заданная плот-ть бетона , кг/куб.м	300	400	500	600	700	800	900
К-во воды на куб.м, кг	140	180	216	251	270	292	330
Расход сухой смеси на куб.м,	250	333	417	315	368	420	473
К-во заполнителя на куб.м, кг	0	0	0	224	260	296	334
Расход пластификатора, кг/куб.м	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2814693

Сырьевая смесь для изготовления конструкционно-теплоизоляционного материала

Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ангарский государственный технический университет" (RU)

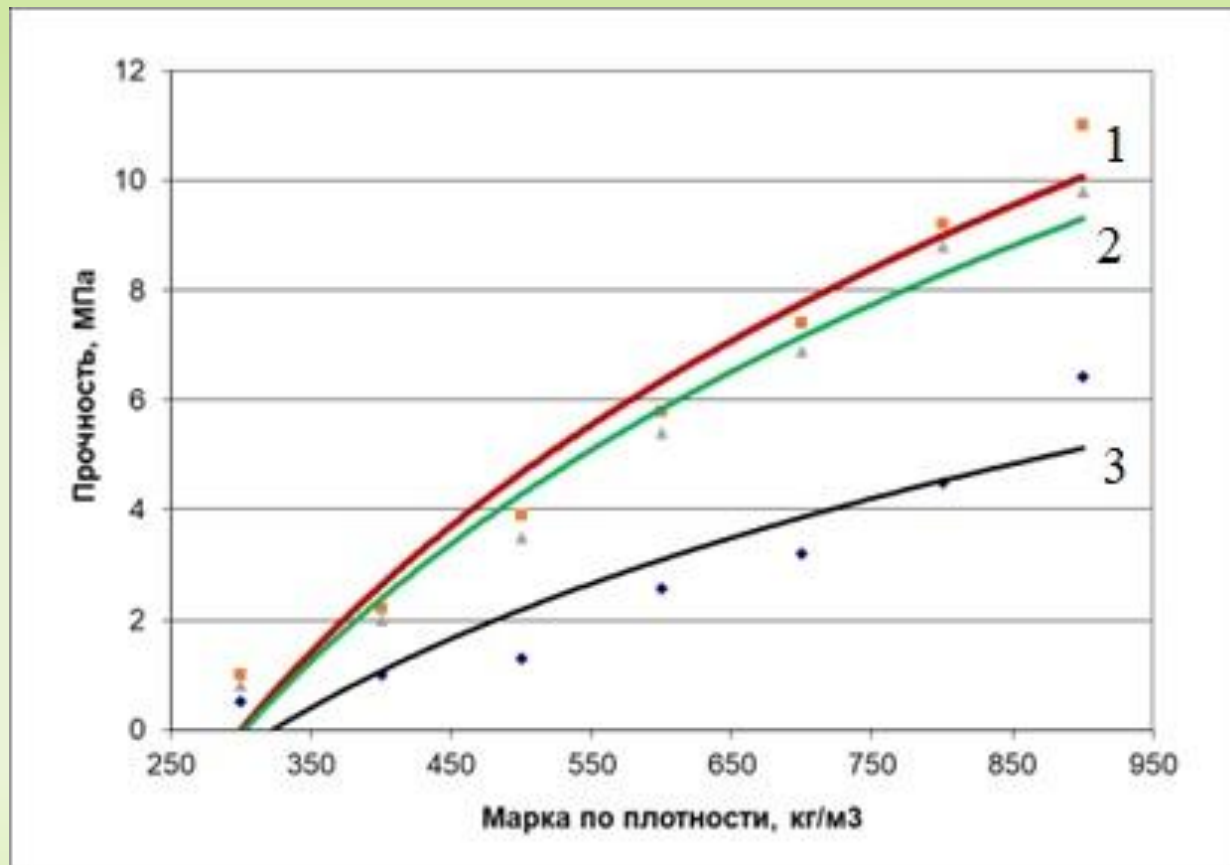
Авторы: Радаев Сергей Сергеевич (RU), Королёва Ольга Игоревна (RU), Кузнецова Татьяна Николаевна (RU), Баранова Альбина Алексеевна (RU), Савенков Андрей Иванович (RU)

Заявка № 2023113116
Приоритет изобретения 19 мая 2023 г.
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 04 марта 2024 г.
Срок действия исключительного права на изобретение истекает 19 мая 2143 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

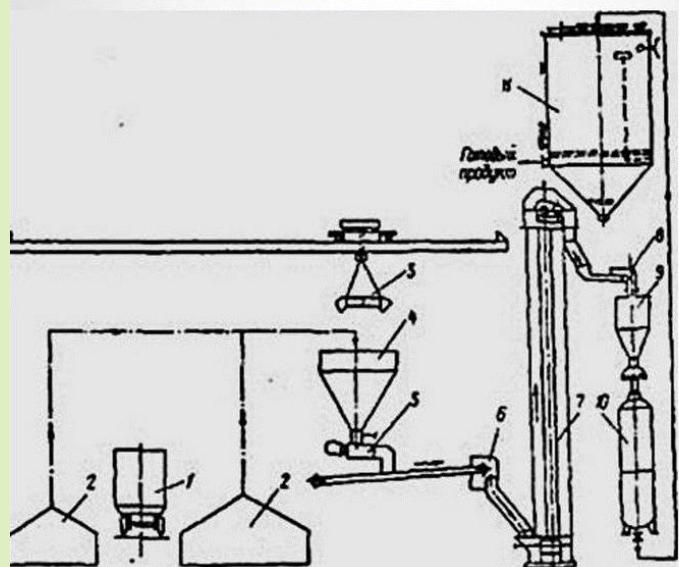
Ю.С. Зубов

Пенобетон на основе жидкого стекла



Зависимость прочности на сжатие жидкостекольного пенобетона от плотности. 1 – полученные данные; 2 – данные Martin Tchingnabe Palou (2017); 3 – ГОСТ 25485-2019 неавтоклавный пенобетон

Получение жидкого стекла в стационарных автоклавах



- 1 - вагон
- 2 - завальная яма
- 3 - грейферный кран
- 4 - бункер-воронка
- 5 - питатель
- 6 - транспортер
- 7 - элеватор
- 8 - ленточный транспортер со сбрасывателем
- 9 - бункер
- 10 - стационарный автоклав
- 11 - отстойник

Активация вяжущего и смеси

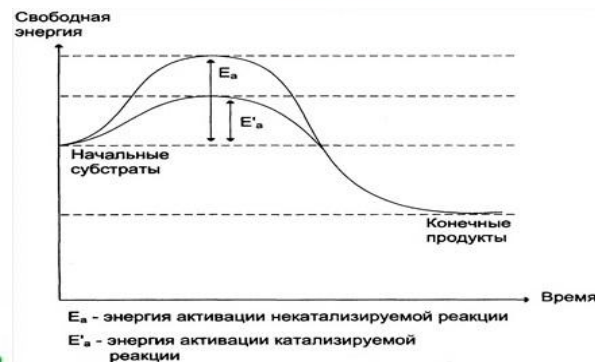
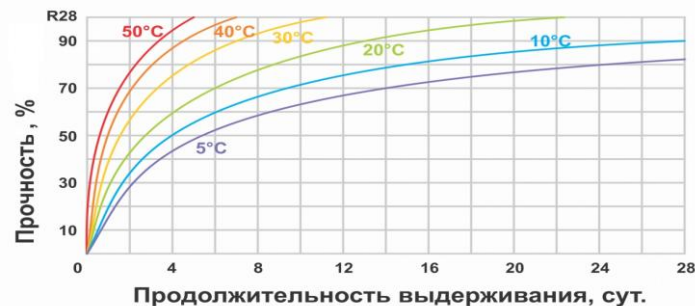
Методы механохимической активации вяжущего и смеси

Химические добавки

Измельчение вяжущего

Микроволновой (диэлектрический) нагрев смеси

Активация смеси электрогидротеплосиловым полем



Активация затворителя

Магнитная активация

Ультразвуковая обработка

Термическая активация

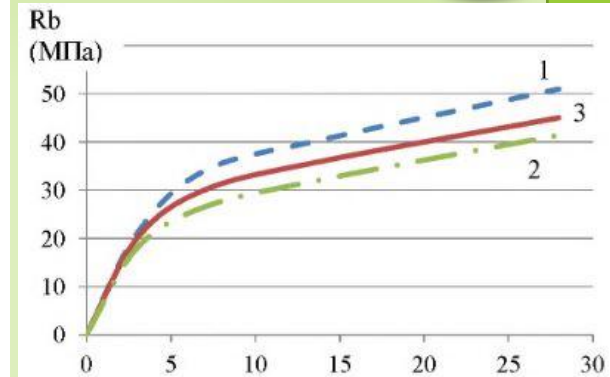
Гидродинамическая активация

Жидкофазная механоактивация

Электрофизическая активация

Электрохимическая активация

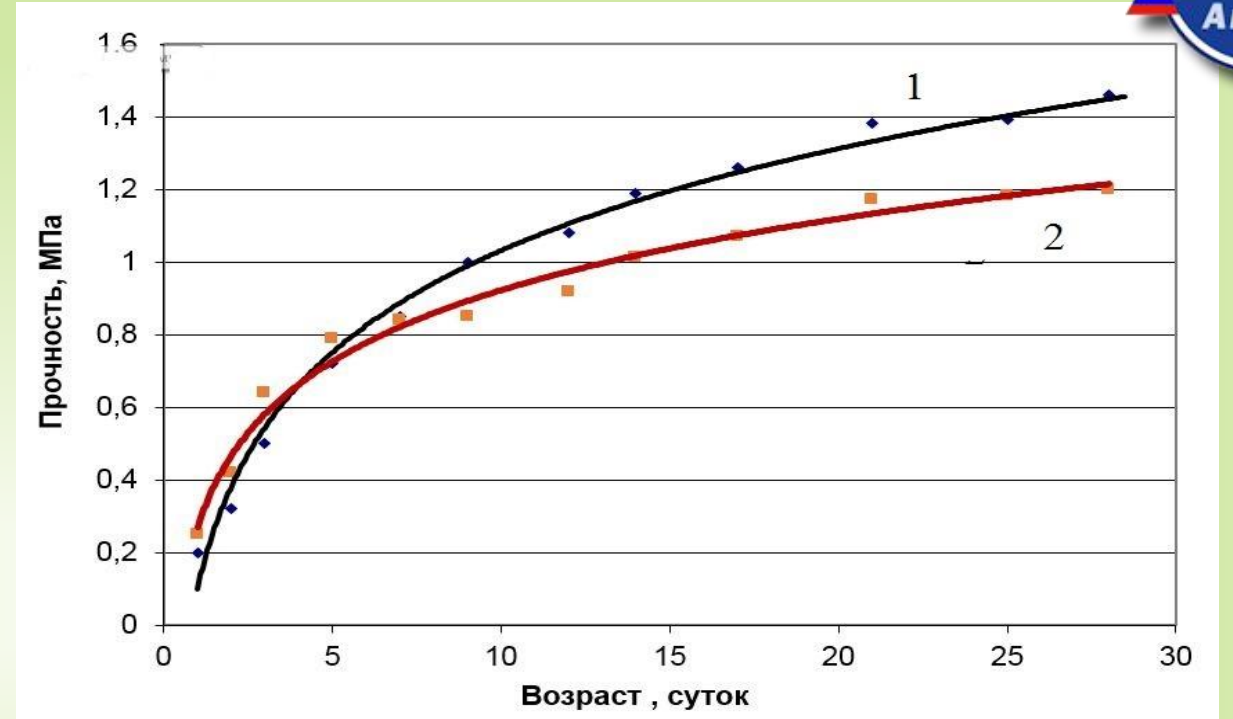
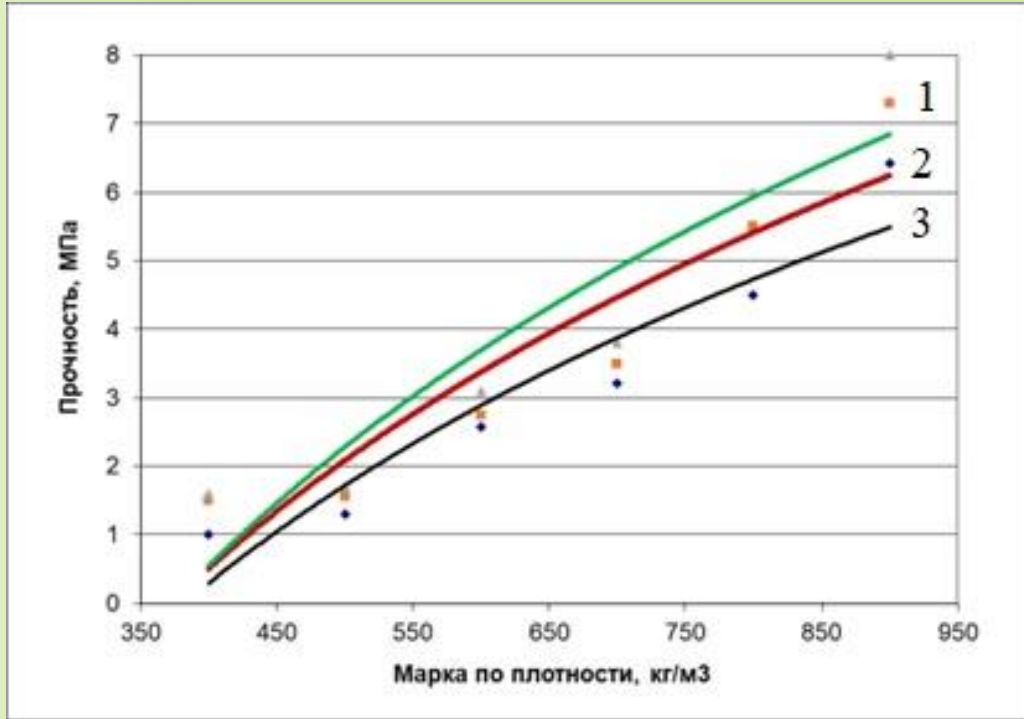
Высоковольтная импульсная активация



Рост прочности матриц, затворитель:
 1 – (электрохим активация) катодит
 2 – (электрохим активация) анолит
 3 - контроль

Активация пенобетона это:

- Ускорение процесса гидратации вяжущего.
- Повышение прочности изделий.
- Сокращение расхода цемента и воды.
- Повышение морозостойкости
- Улучшение структуры.



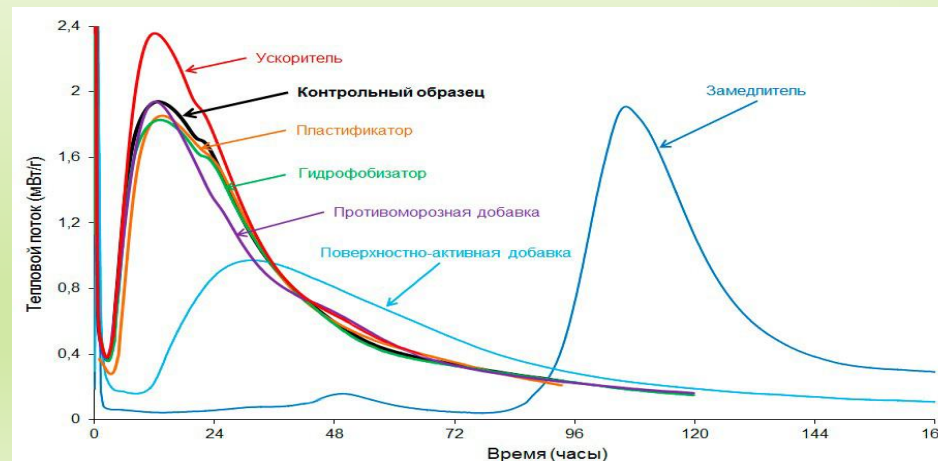
Прочность на сжатие пенобетона от плотности:

1 – с добавкой 2% композиции нитрит натрия + пластификатор;

2 – с добавкой 1% композиции нитрит натрия + пластификатор;

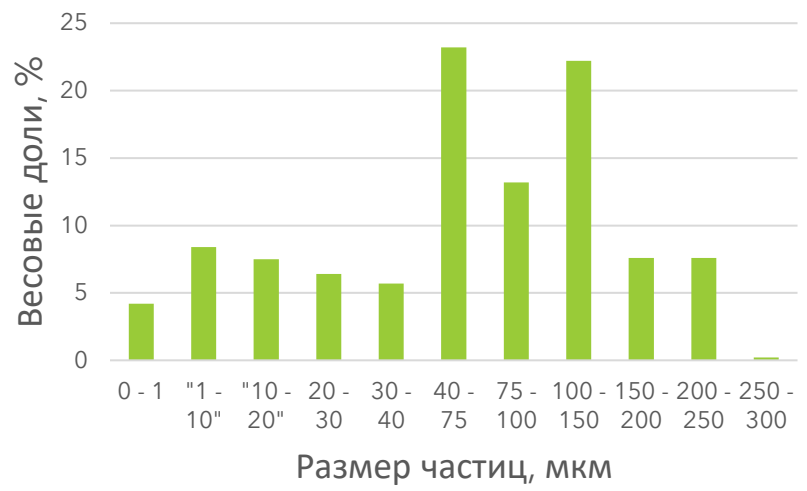
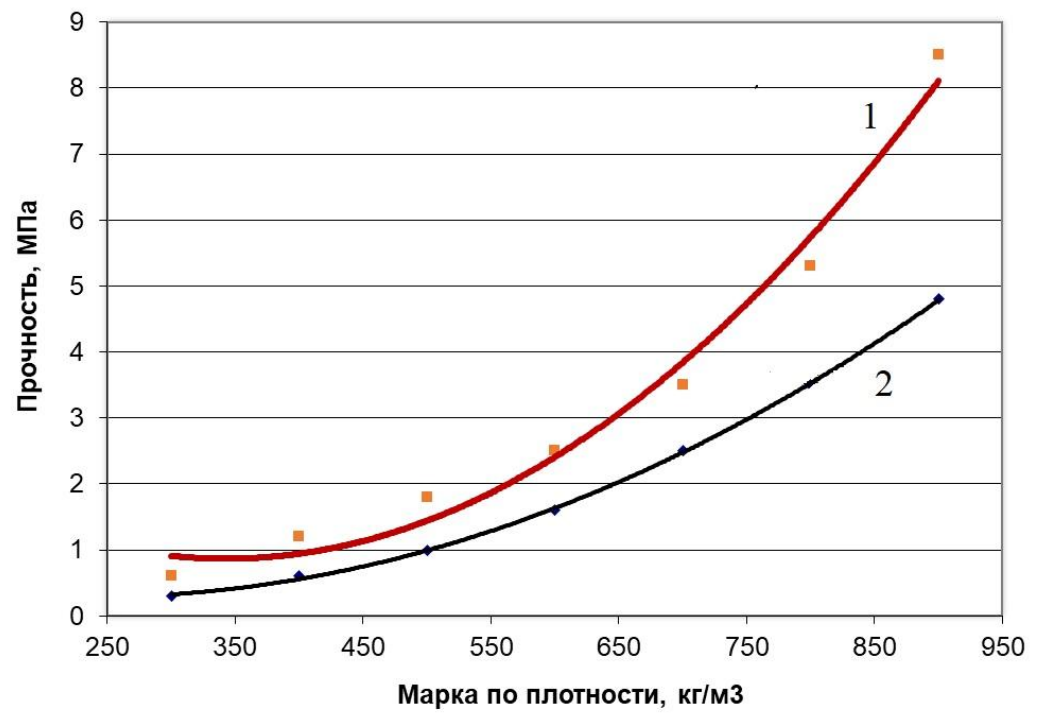
3 – ГОСТ25485-2019 неавтоклавный пенобетон

Характер роста прочности на сжатие пенобетона D500, на цементе класса ЦЕМІ32,5Н 1 – контроль; 2 – с добавкой 1,5% $CaCl_2$



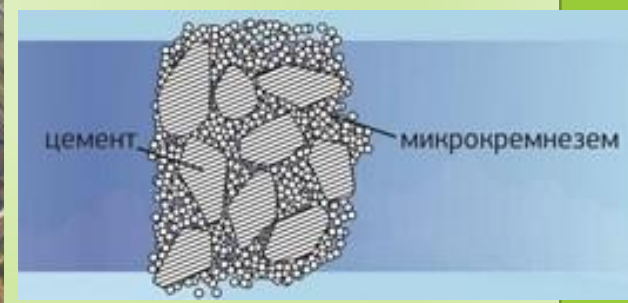
Оценка термического эффекта (Энтальпии) различных добавок в твердеющей матрице

Микрокремнезём



Гранулометрический состав микрокремнезема ЗАО «Кремний» г. Шелехов

Прочность на сжатие пенобетона от плотности:
 1 – с содержанием микрокремнезёма 20%
 2 – ГОСТ 25485-2019

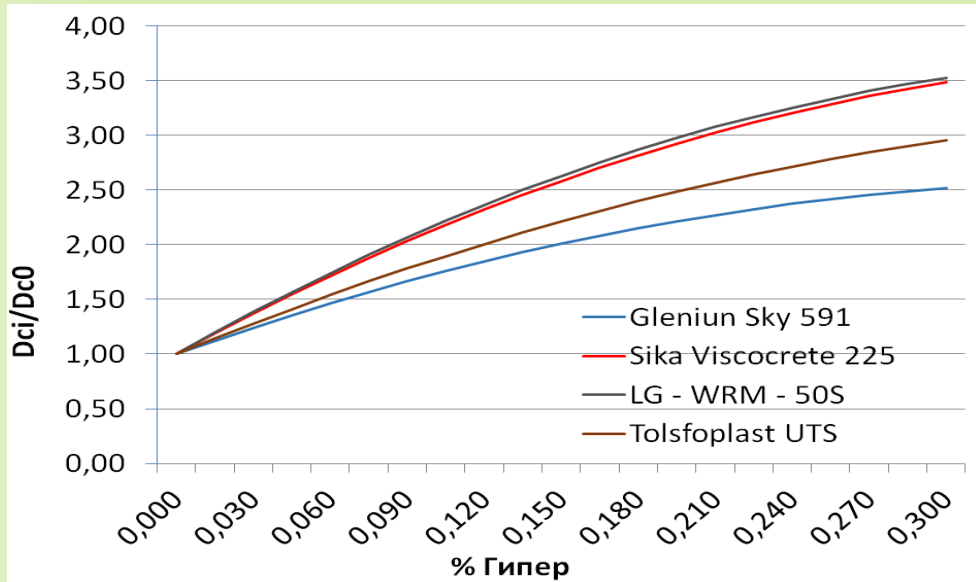


Шлам-бассейны микрокремнезема с предприятия ЗАО «Кремний»

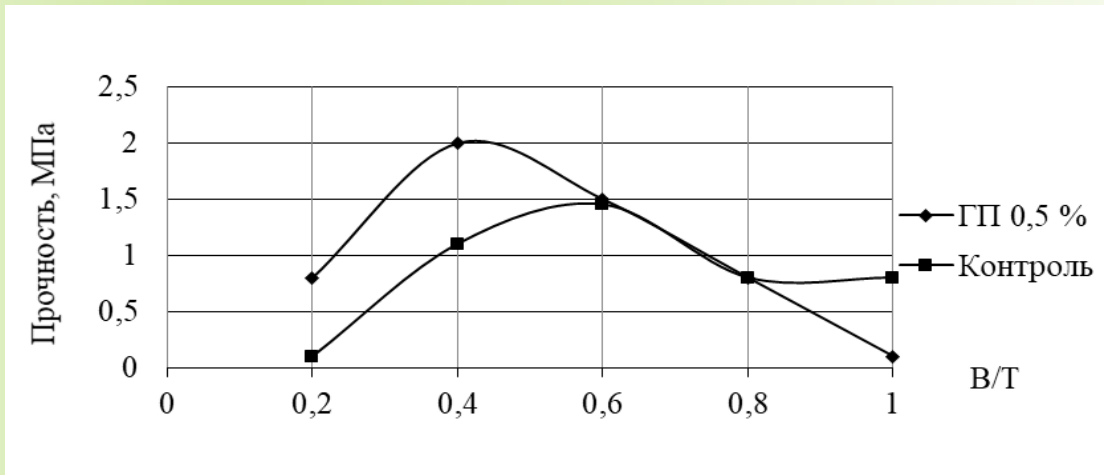
Химический состав микрокремнезёма ЗАО «Кремний»

Наименование соединения	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₄	CO ₂	F	C _{общ}	C _{своб}
Содержание, % по массе	91,1	0,021	0,04	1,4	0,44	0,36	0,01	0,04	6,9	6,08

Пластификация пенобетонной смеси



Сравнительный редуцирующий эффект (суперводоредуцирующих добавок)



Прочность на сжатие пенобетона D500 от водотвердого отношения с добавкой гиперпластификатора на основе поликарбоксилатов

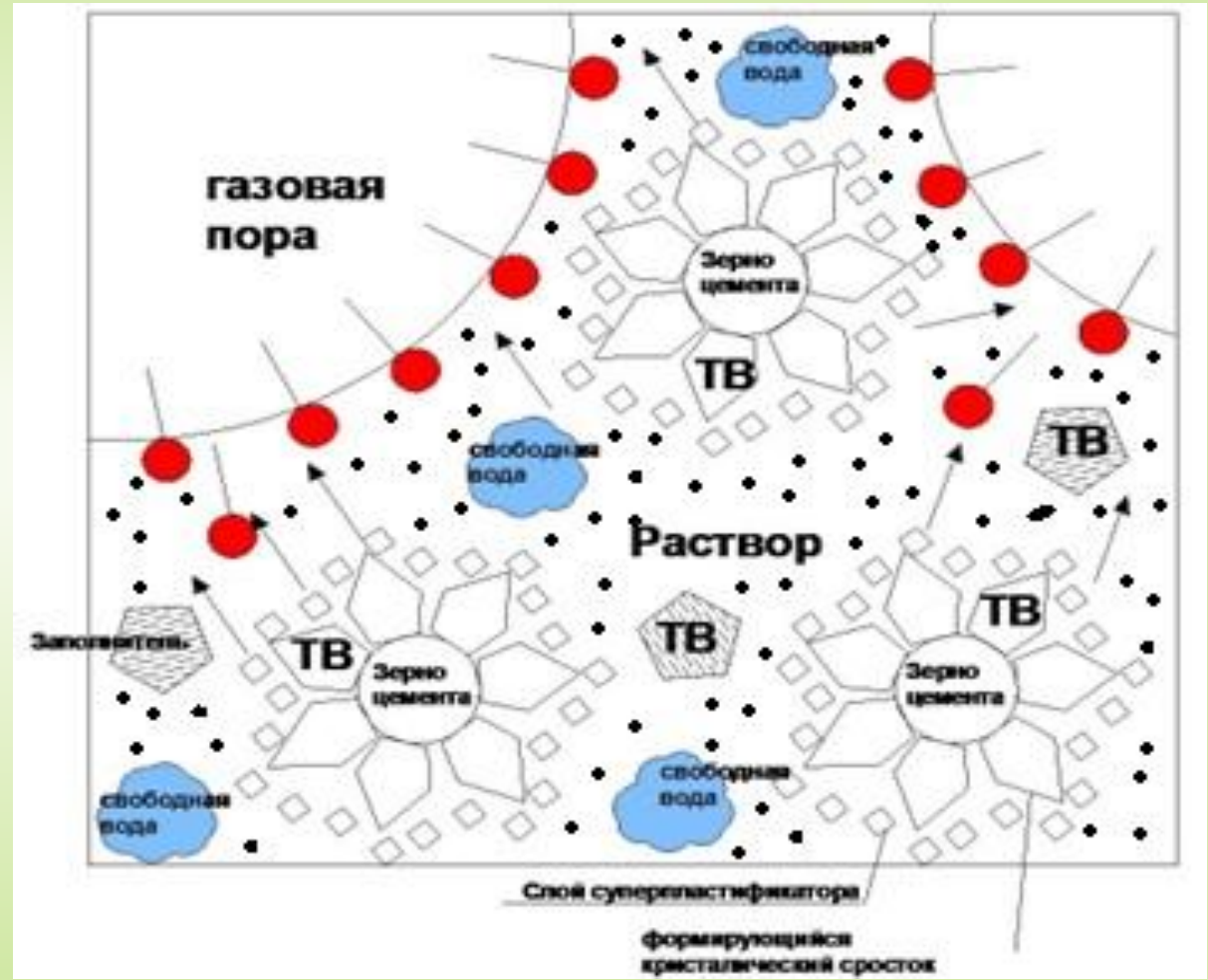
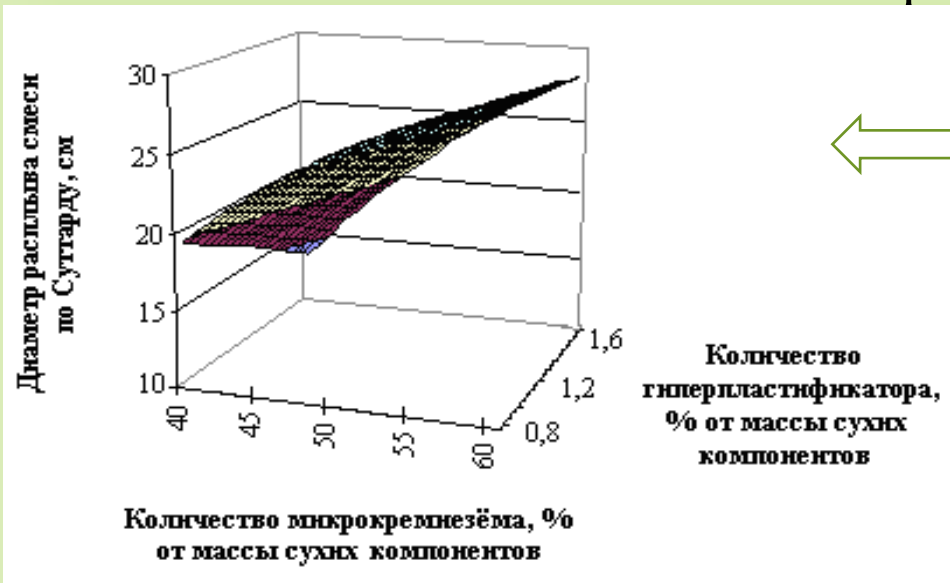
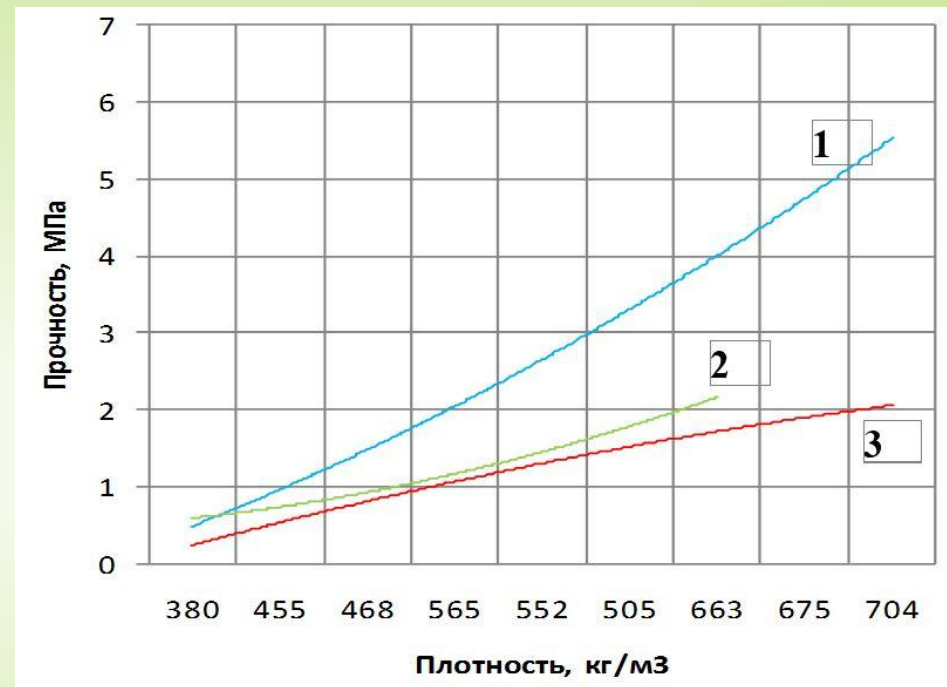


Схема взаимодействия пластификатора и пенообразователя в пенобетонной смеси

Пластификация пенобетонной смеси



Подвижность раствора (цемент+микрокремнезём) в зависимости от количества микрокремнезёма и гиперпластификатора.

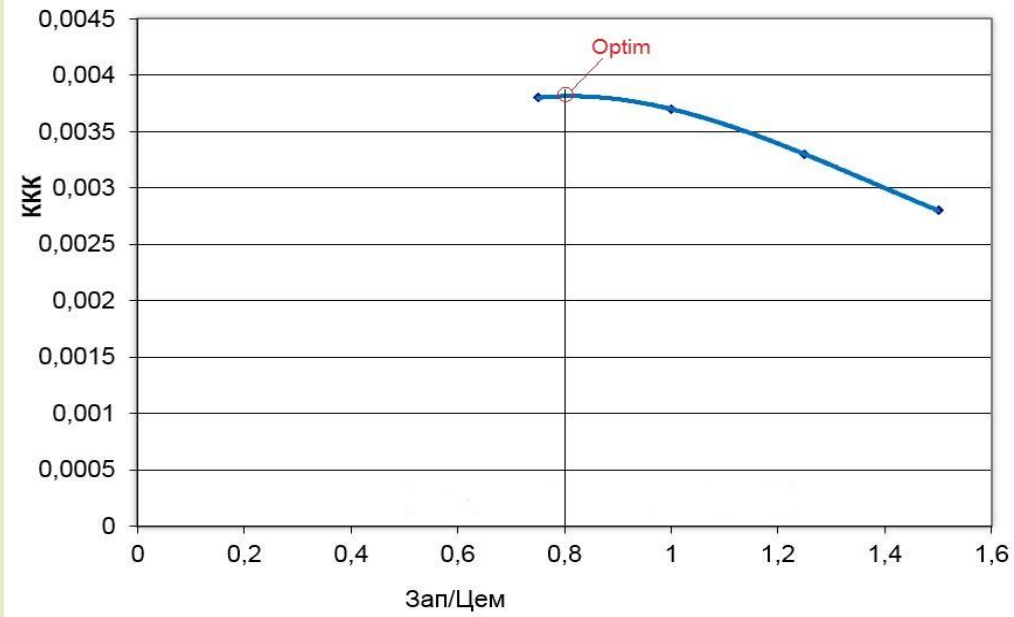


Зависимость прочности пенобетона от плотности

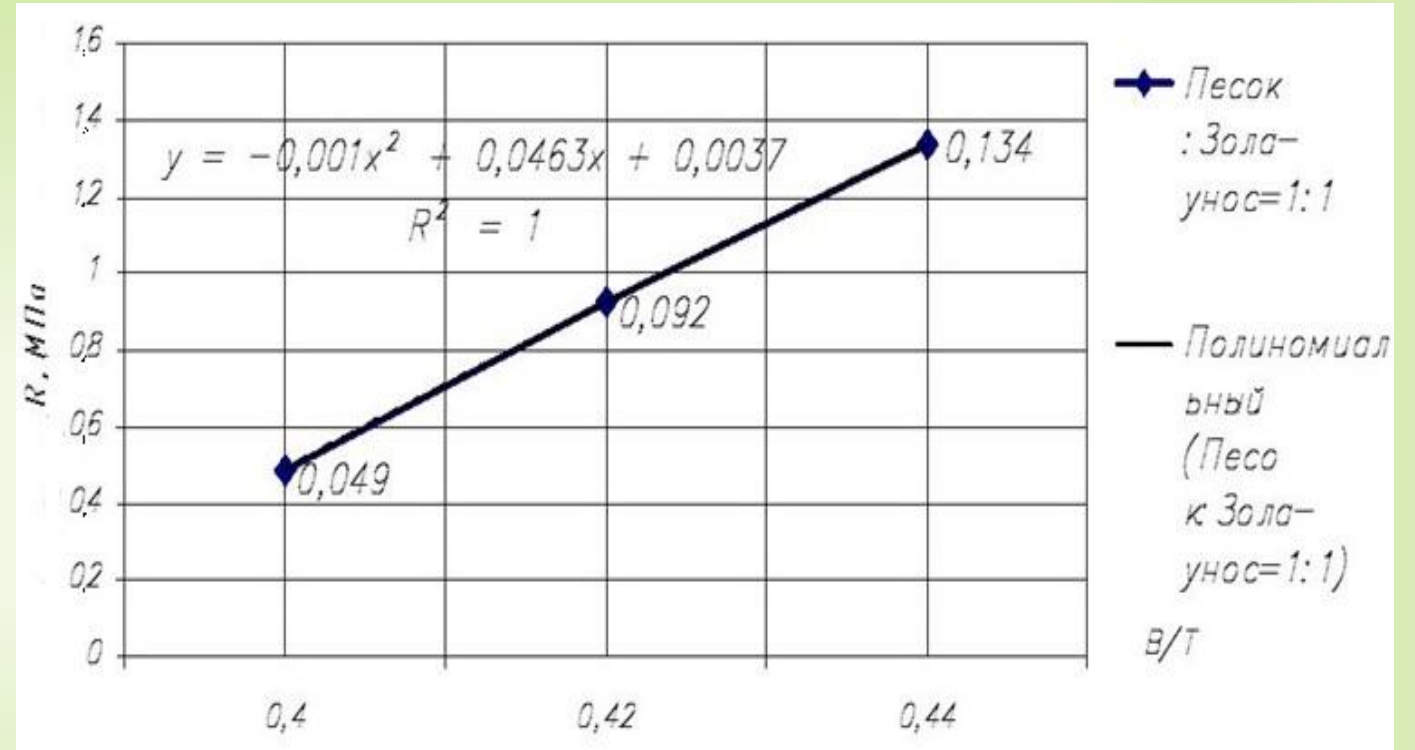
- 1 - С добавкой гиперпластификатора;
- 2 - С добавкой пластификатора С-3;
- 3 - Без добавок (контроль).

Прочность пенобетона марки D500 в зависимости от содержания гиперпластификатора, изготовленного на цементах: 1 - ЦЕМ I 32,5Н; 2 - ЦЕМ I 42,5Н; 3 - ЦЕМ I 52,5Н.

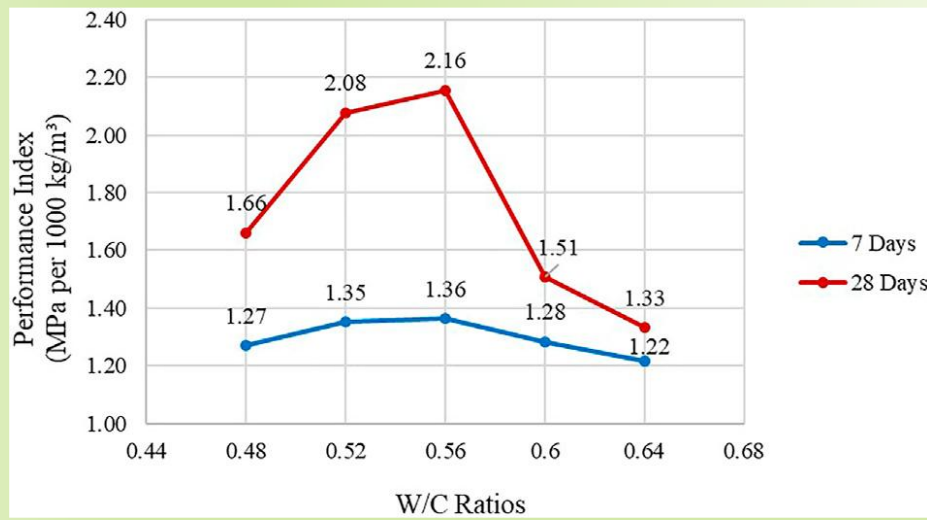
Заполнители



Зависимость коэффициента конструкционного качества (ККК) от соотношения заполнителя к вяжущему в матрице пенобетона

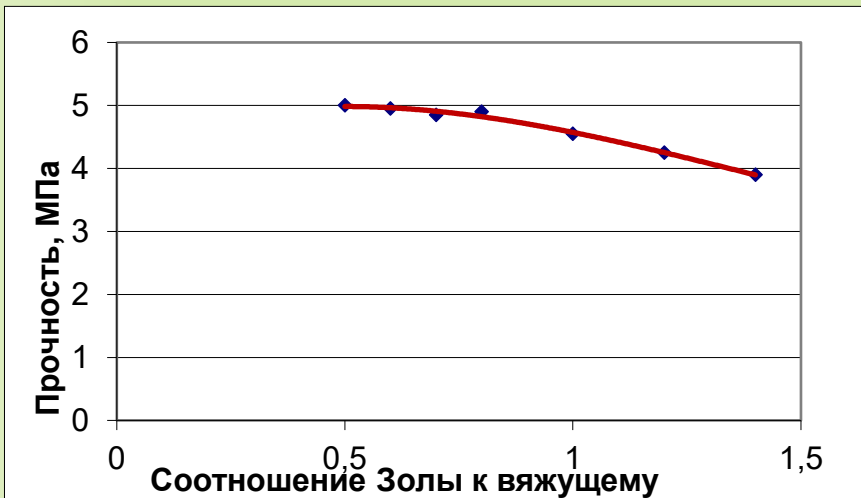


Прочность пенобетона D500 в первые сутки твердения . Заполнитель – Песок:Зола-унос=1:1

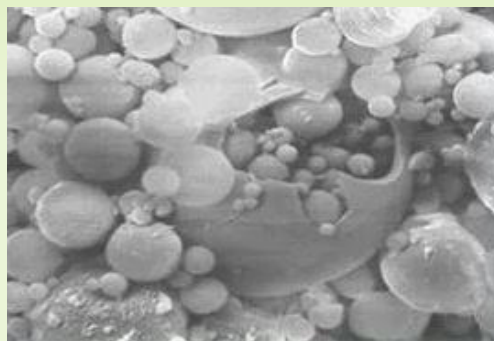


Исследования Ming Kun Yew, Foo Wei Lee (2012) прочности пенобетона от В/Т. Заполнитель – керамические отходы

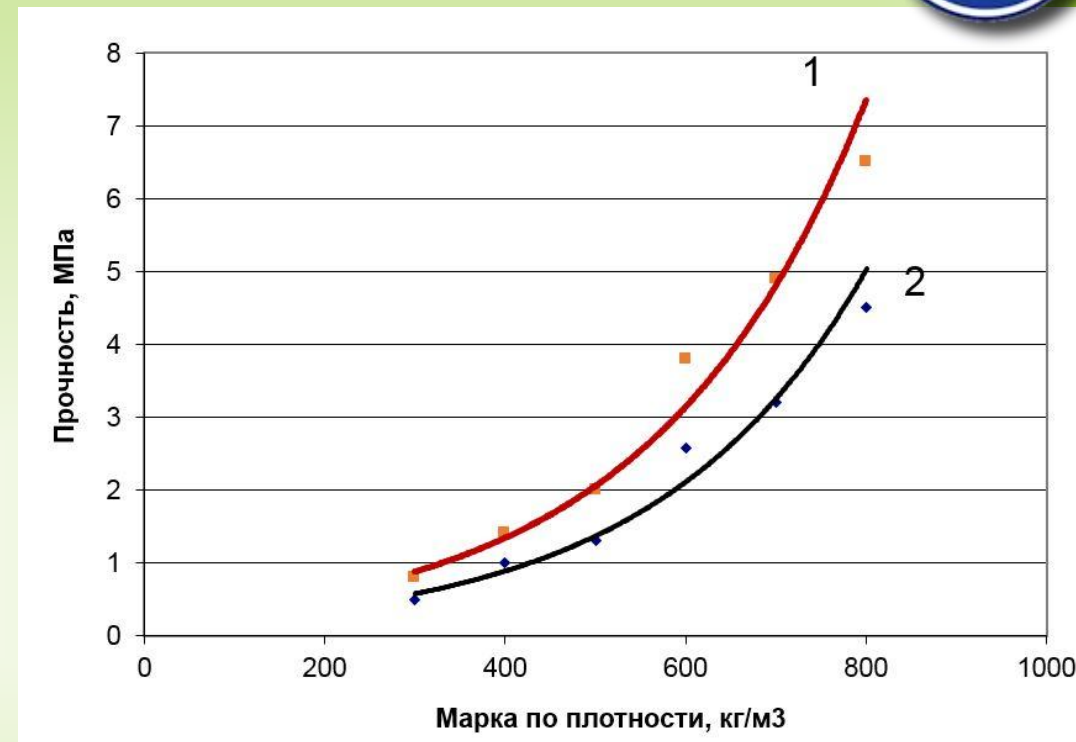
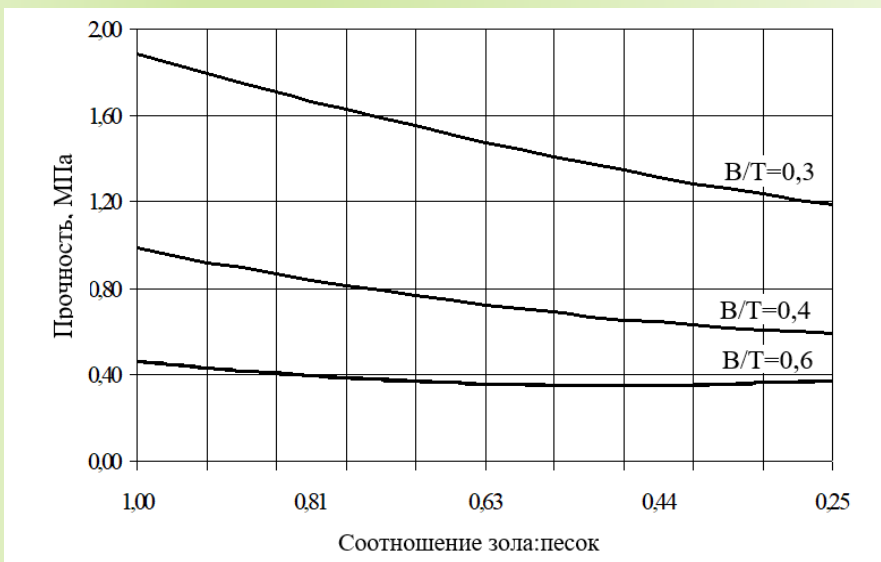
Заполнитель зола-унос ТЭЦ



Прочность пенобетона D700 при соотношениях зола/цемент



Влияние массового соотношения зола:песок на прочность пенобетона



Прочность пенобетона от средней плотности
Заполнитель: зола-унос ТЭЦ
1 – полученные данные
2 – ГОСТ 25485-2019 неавтоклавный пенобетон

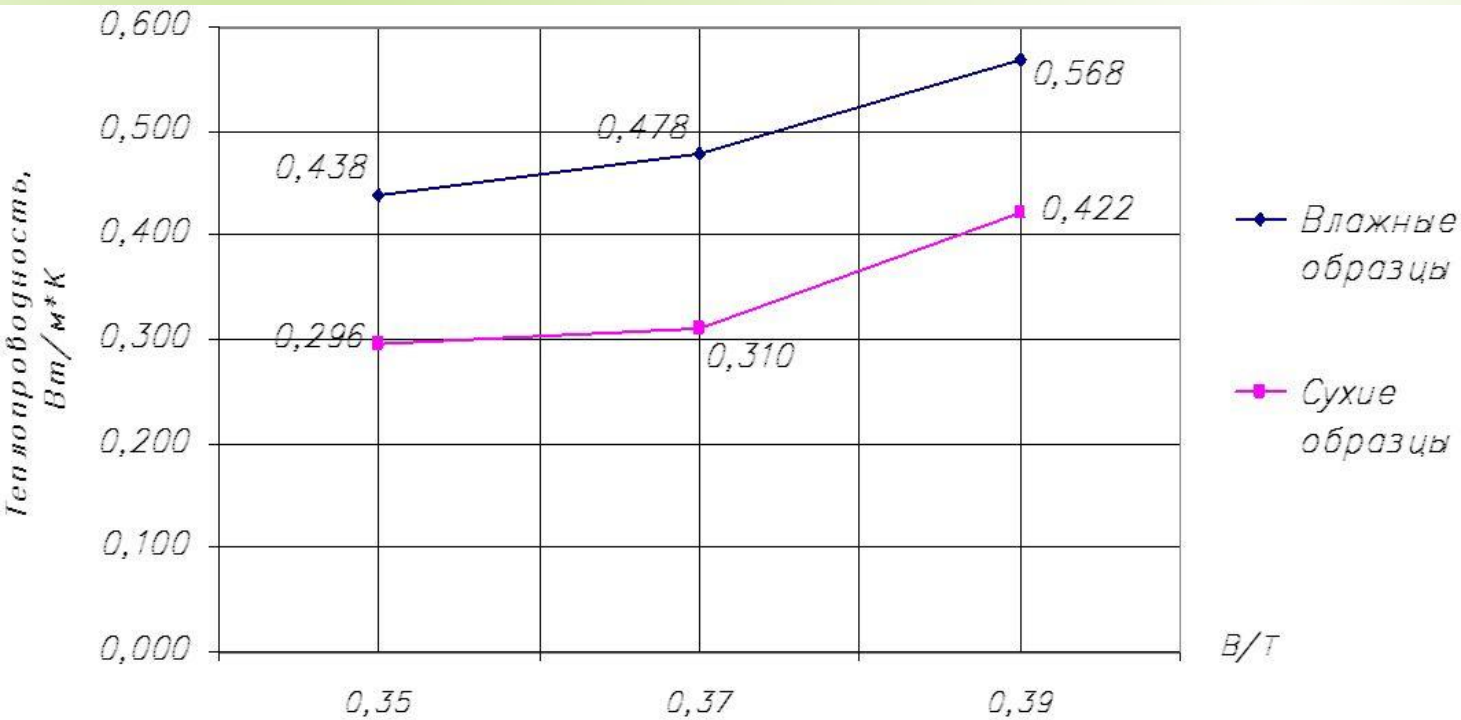
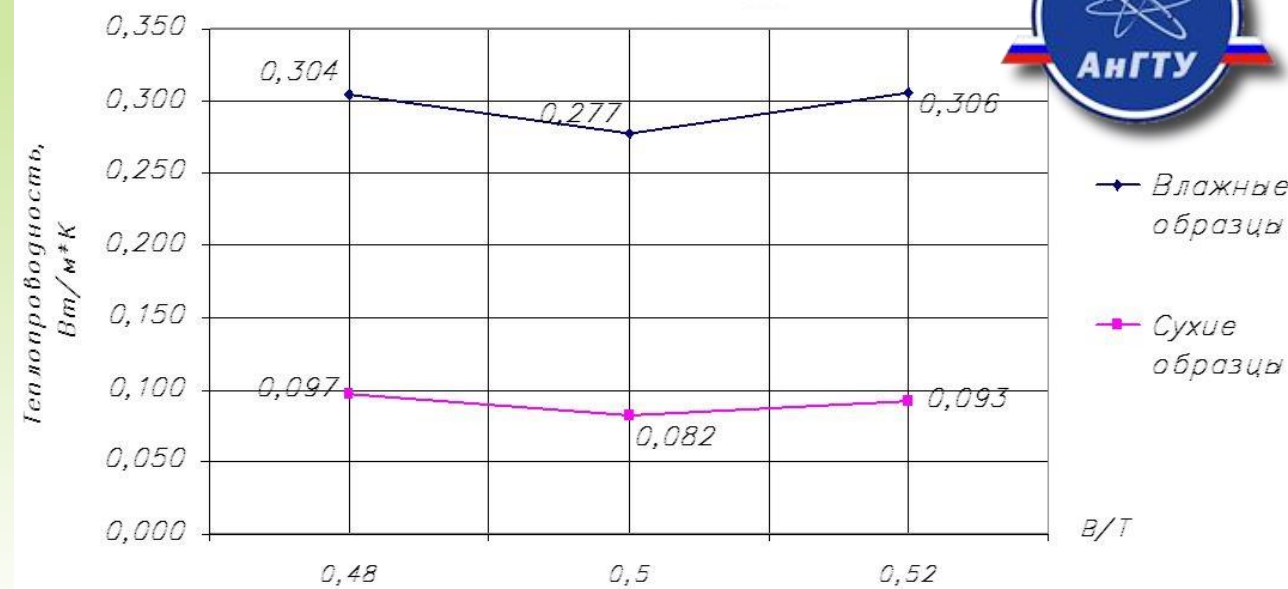
Химический состав золы-уноса ТЭЦ -10 ОАО Иркутскэнерго

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	ППП	Сум	K _{осн}
0,11	1,33	32,9	50,1	0,2	0,11	0,72	6,37	0,1	6,17	1,55	99,9	-0,25

Вторичные продукты

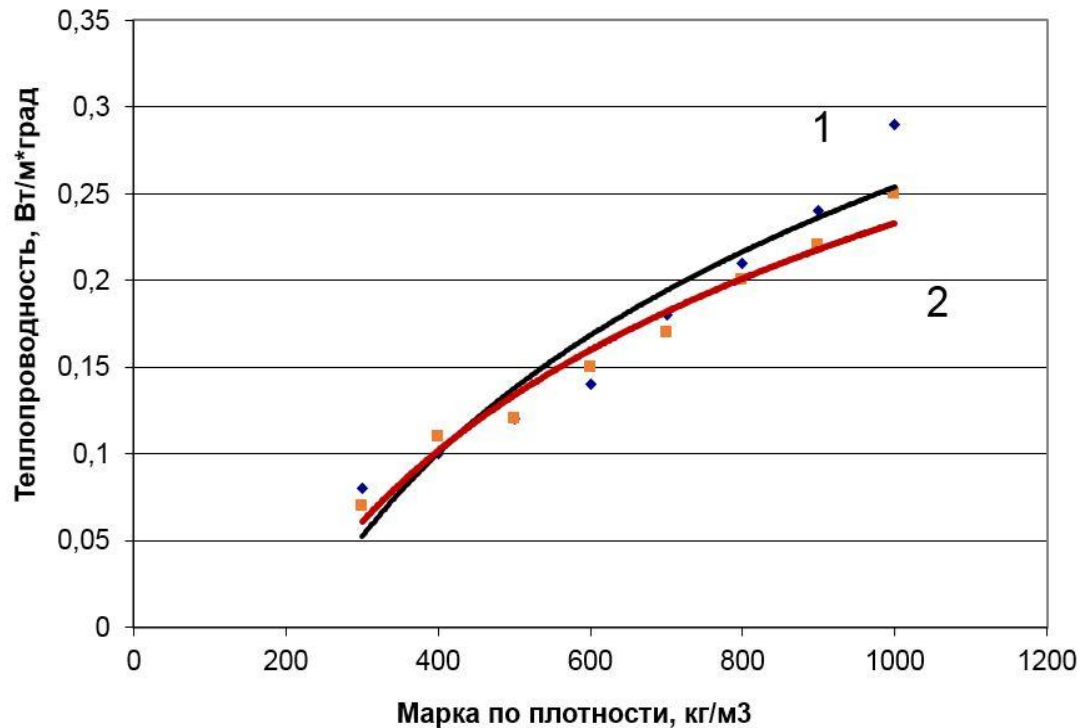


Теплопроводность пенобетонных образцов D500 при 5% влажности и сухих.
Заполнитель – Микросферы

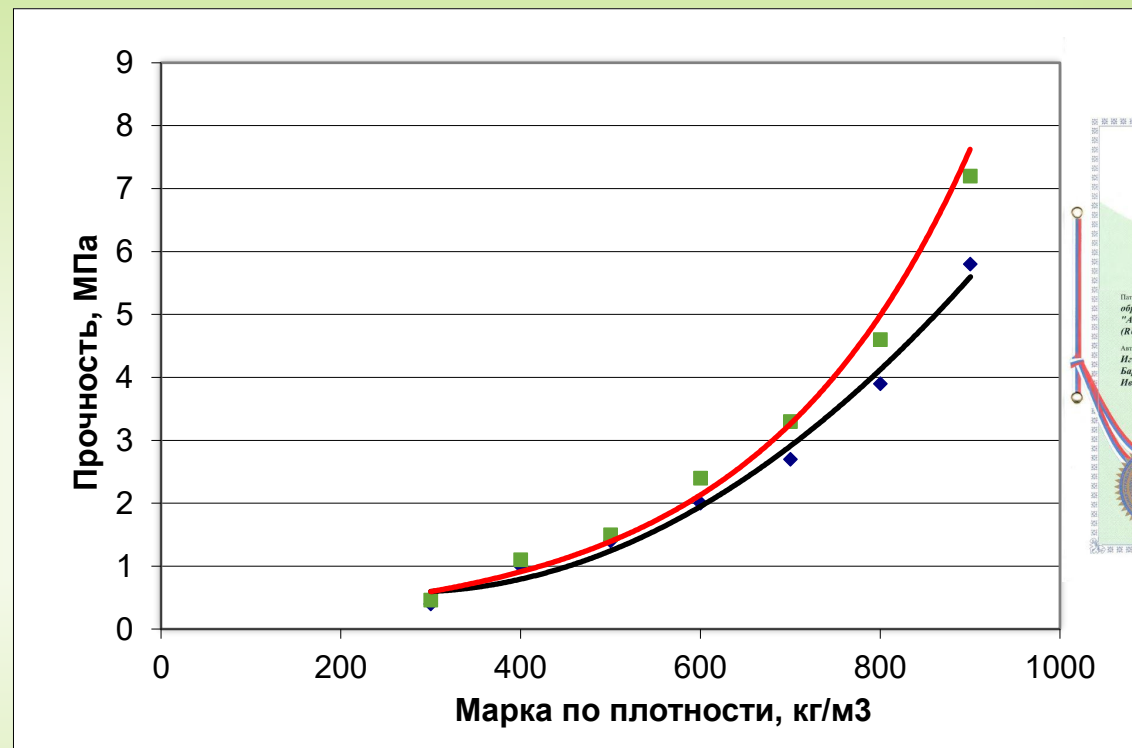


Теплопроводность пенобетонных образцов D500 при 5% влажности и сухих.
Заполнитель – Карбидный ил.

Дисперсное армирование



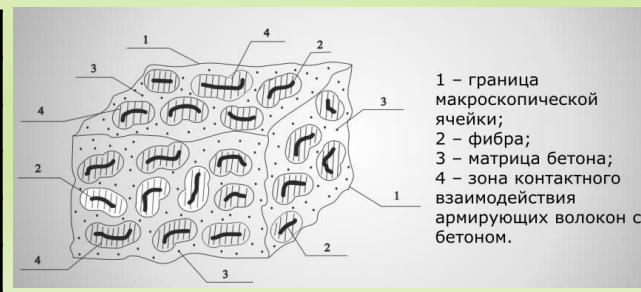
Коэффициент теплопроводности фибропенобетона от средней плотности в сухом состоянии
 1 – полученные данные
 2 – ГОСТ 31359-2007



Прочность фибропенобетона от средней плотности
 1 – полученные данные 2 – ГОСТ 25485-2019



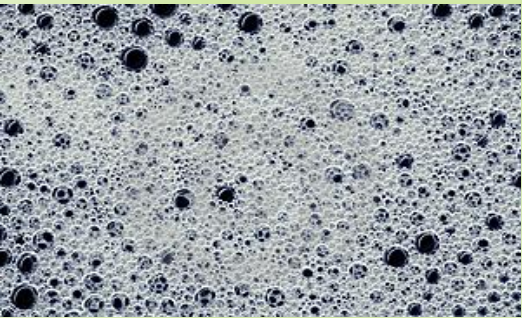
Заданная плот-ть бетона , кг/м3	300	400	500	600	700	800	900
К-во воды на куб.м, кг	133	170	204	241	262	286	321
К-во цемента на куб.м, кг	250	333	417	315	368	420	473
К-во заполнителя на куб.м, кг	0	0	0	221	257	294	331
Расход пластификатора, кг/куб.м	0,63	0,83	1,04	0,79	0,92	1,05	1,18
Расход фиброволокна, кг/куб.м	1,25	1,667	2,083	1,575	1,838	2,1	2,363



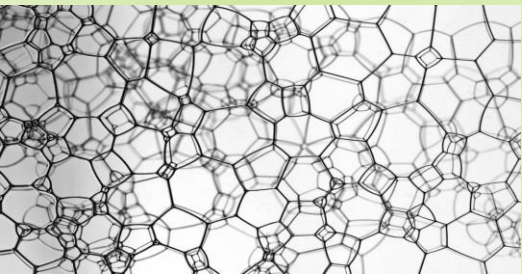
1 – граница макроскопической ячейки;
 2 – фибра;
 3 – матрица бетона;
 4 – зона контактного взаимодействия армирующих волокон с бетоном.

3. Условия устойчивости пеноцементных систем и технологические приемы замешивания, укладки и транспортировки пеносмеси с учетом ее максимальной сохранности и не потери характеристик

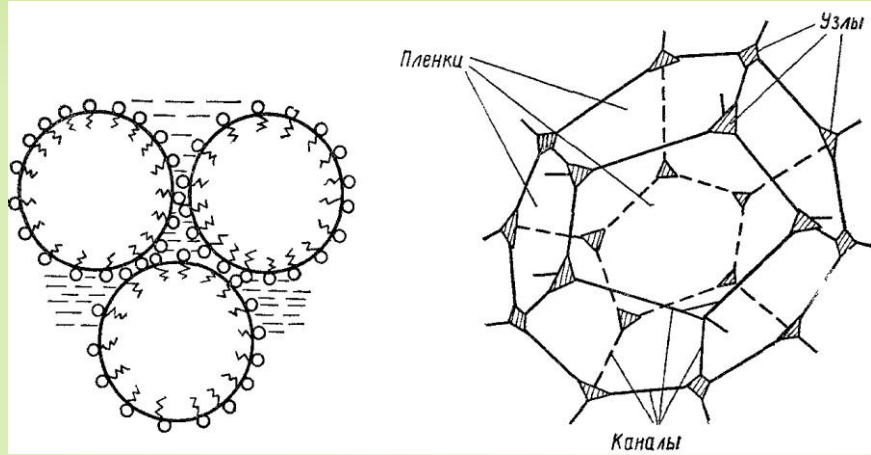
Пены, пенообразователи, ГЛБ



Низкократная пена



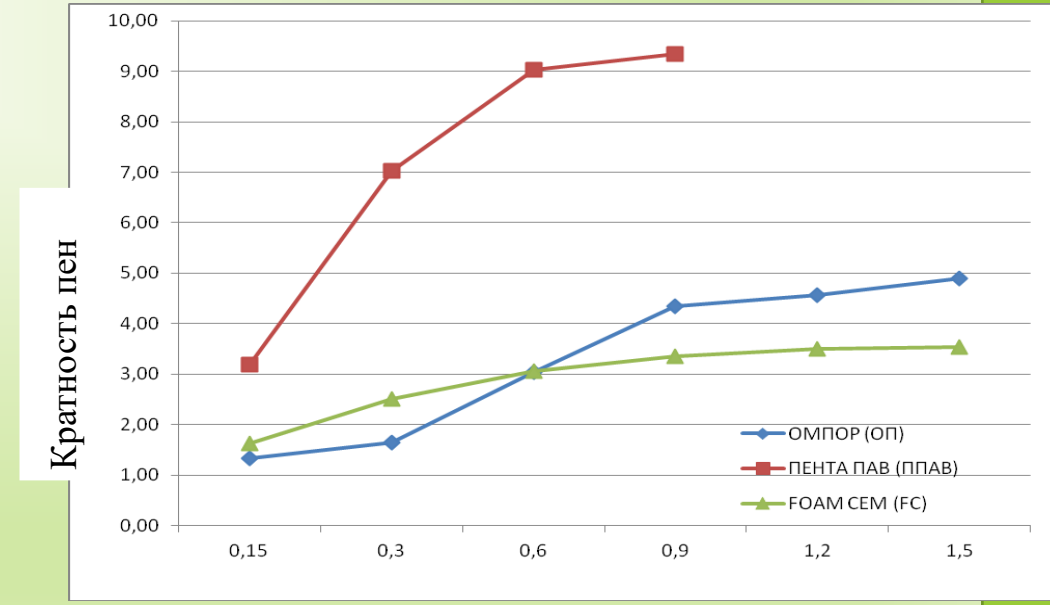
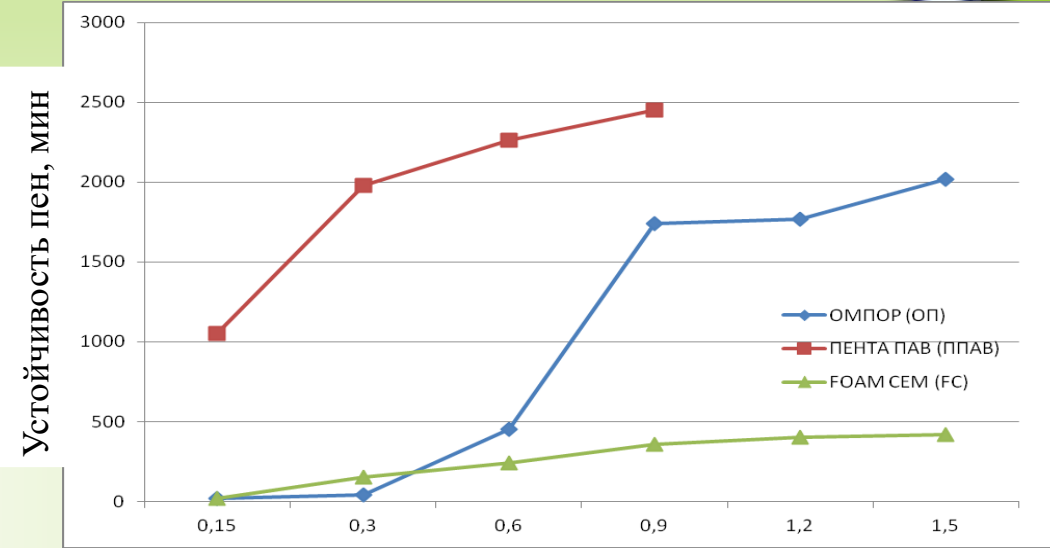
Высокократная пена



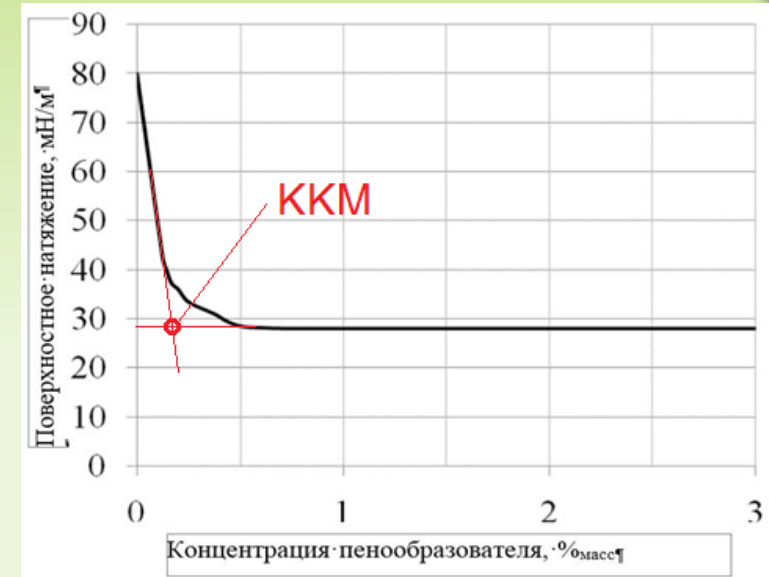
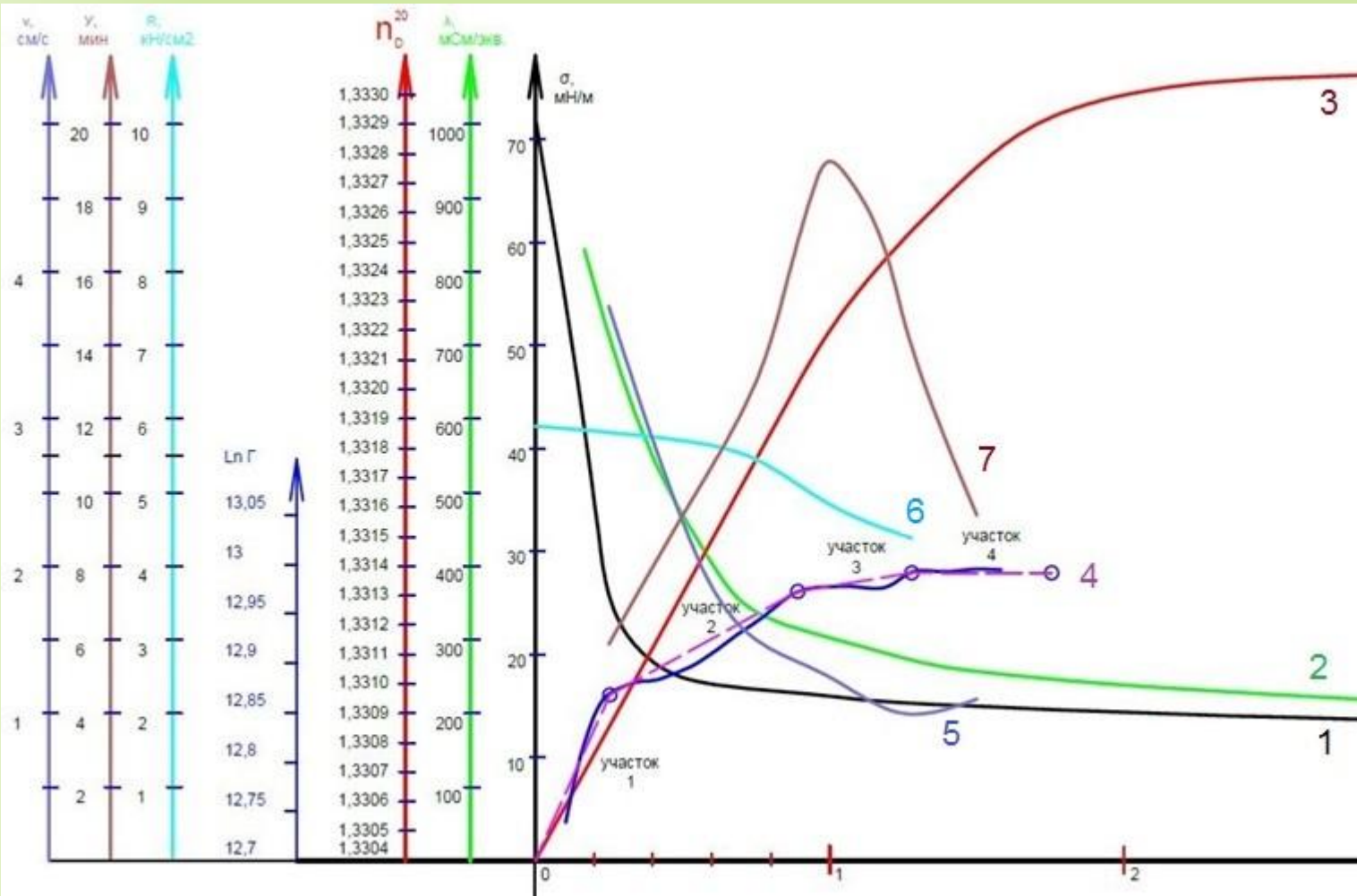
$$\sigma = \left(\frac{\partial U}{\partial s} \right)_{S, V, n_i q}$$

Поверхностное натяжение

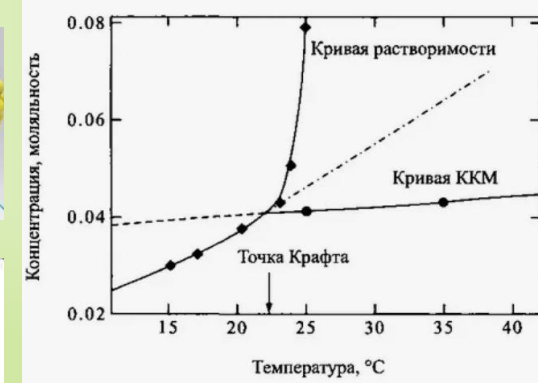
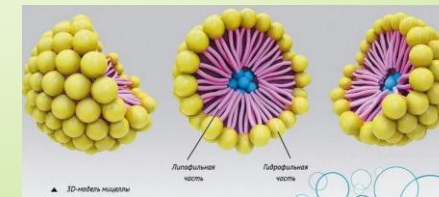
ГЛБ (HLB) – соотношение гидрофильных и липофильных свойств в молекуле ПАВ.
 Определение ГЛБ:



Пенообразователи, поверхностное натяжение Критическая концентрация мицеллообразования



Зависимость поверхностного натяжения раствора, на цементной «вытяжке», от концентрации ПАВ по отношению к цементу



Зависимость свойств раствора протеинового ПАВ от концентрации
1 – коэффициент поверхностного натяжения, мН/м; 2 – коэффициент преломления; 3 – удельная электропроводность, мСм/экв; 4 – адсорбция; 5 – скорость погружения образца, см/с; 6 – Прочность матрицы, кН/см²; 7 – устойчивость пены, мин.

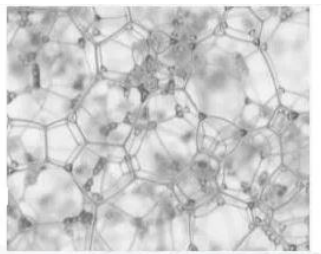
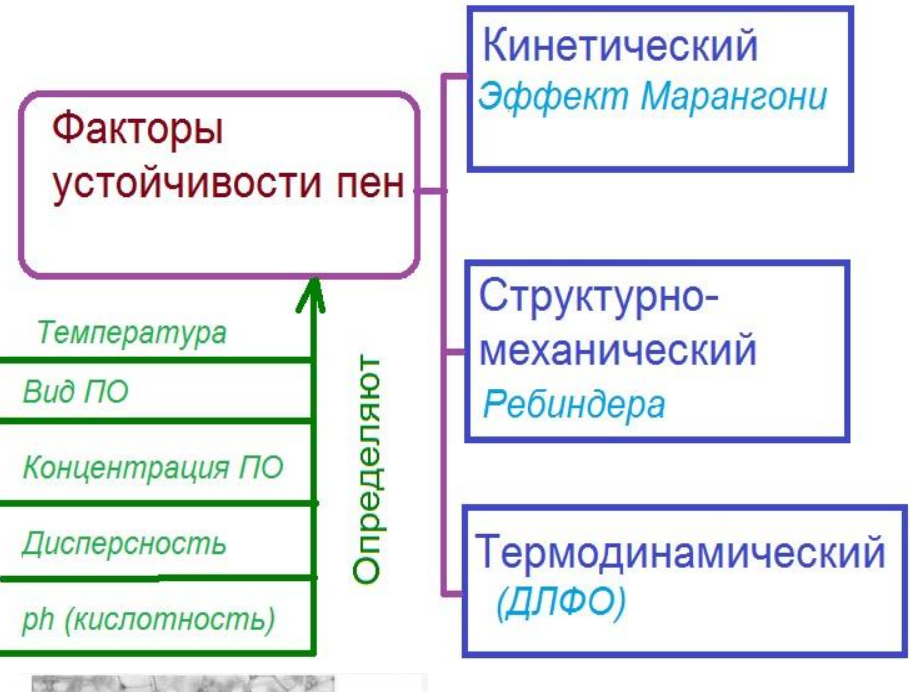
Наименование пенообразователя	ККМ, %
Пента ПАВ 430 А	2,59
Ареком	3,21
Биопор	3,16
Пеностром	3,47
ПВ-2000	2,2

Точка Крафта

3. Критерии и особенности процессов структурообразования матрицы и вспененного тела с заданной пористостью. Условия устойчивости пеноцементных систем

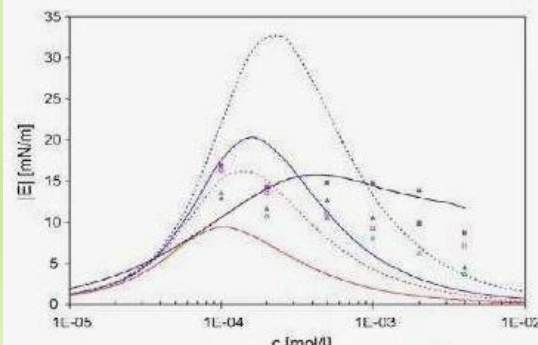
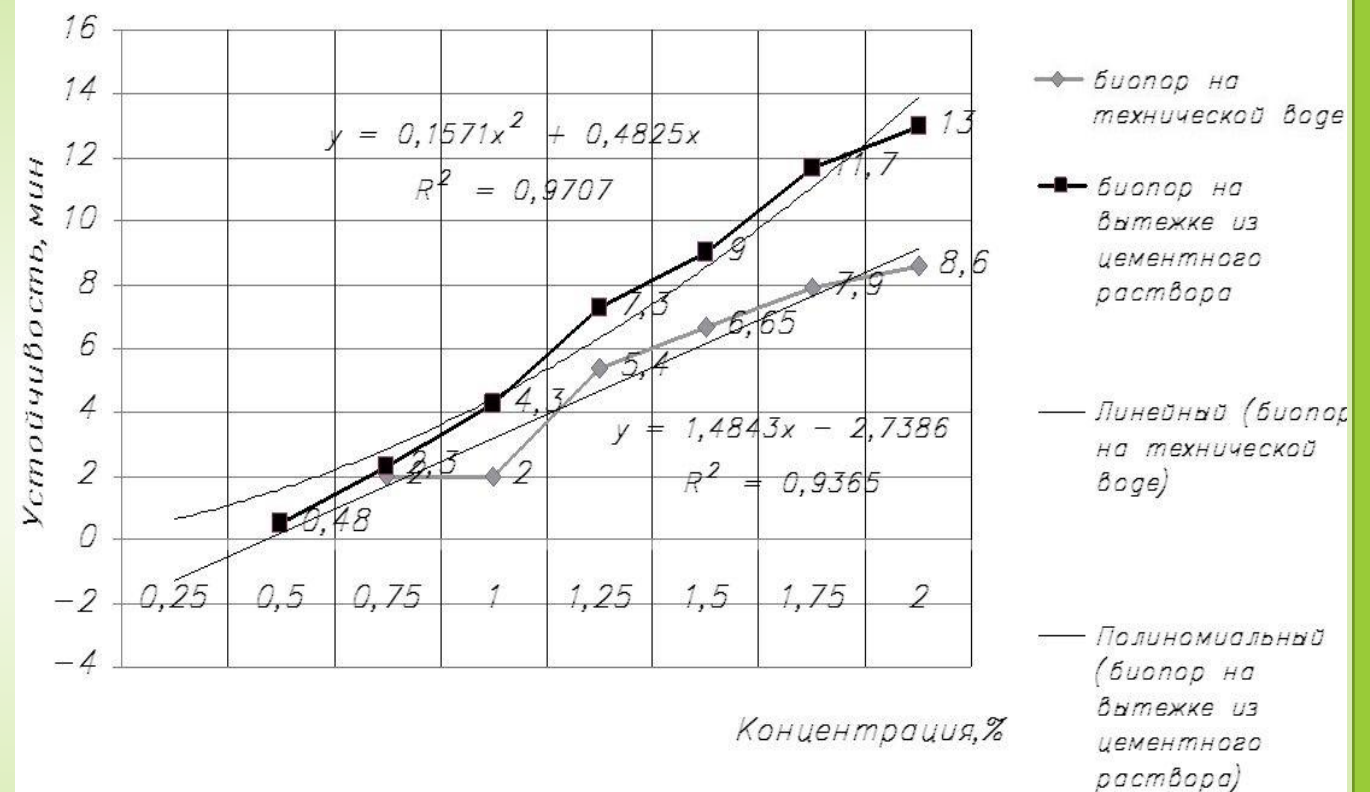


Устойчивость пен. Основные характеристики пен на различных ПО в цементном растворе



Условие закрепления частицы радиусом a на границе вода/воздух ($\Theta = 90 \pm 5^\circ$). Стабилизация пенных пузырьков достигается вследствие убыли свободной энергии системы:

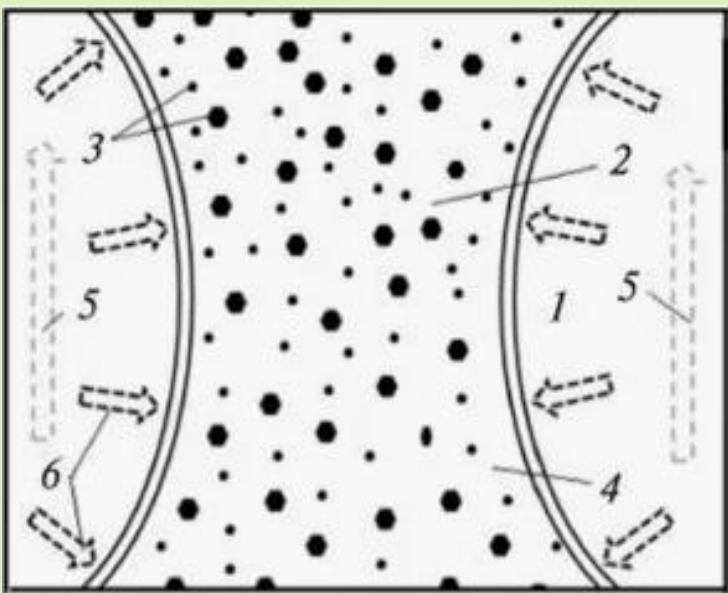
$$\Delta G = \gamma_{aw} \pi a^2 (1 \pm \cos \theta_{aw})^2$$



1. Величина ζ -потенциала
2. Величина электродинамического потенциала (ϕ)
3. Толщина диффузного слоя
4. Величина заряда гранулы

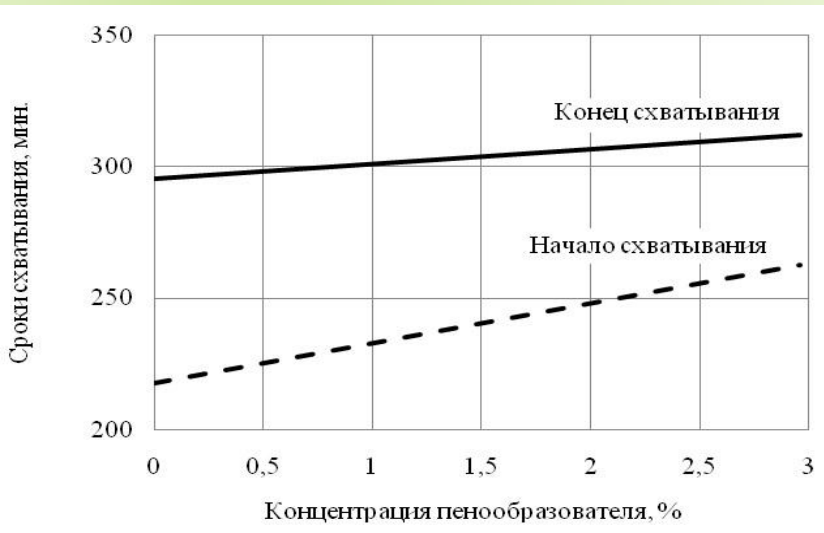
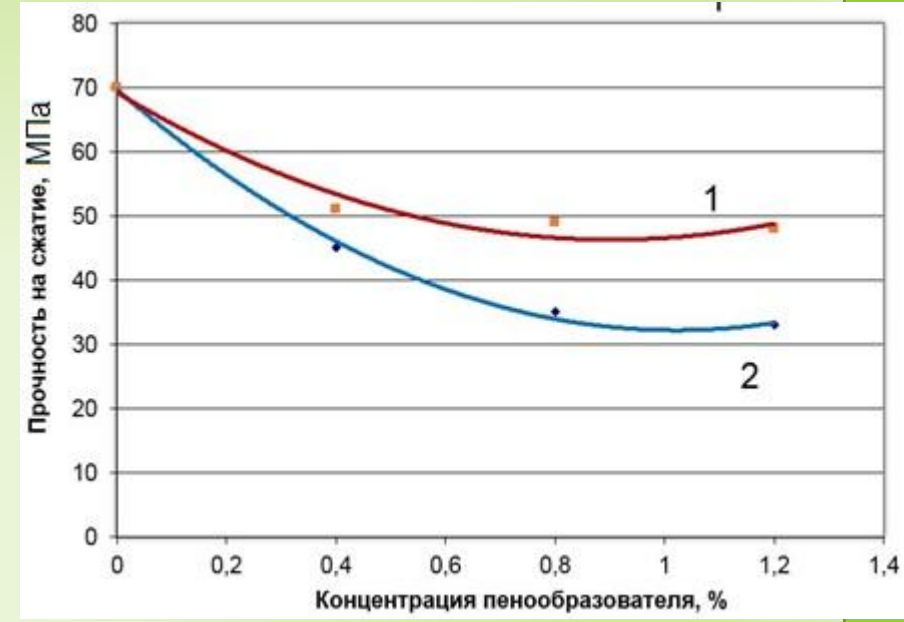
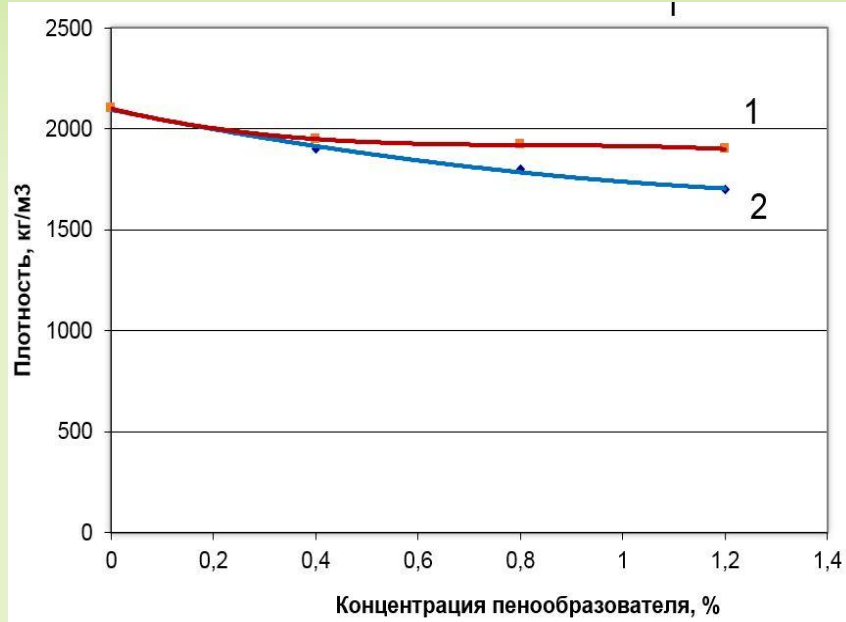
Устойчивость пены на технической воде и вытяжке из цементного раствора. Пенообразователь - Биопор

Плотность и прочность межпоровой перегородки пенобетона от содержания пенообразователя (ПО). Влияние ПО на сроки схватывания раствора



Межпоровая перегородка:

- 1- газовая пора; 2- цементный раствор;
- 3- наполнитель; 4- жидкая фаза;
- 5- вектор силы на всплытие газового пузырька; 6- давление газа в пузырьке.



Плотность и прочность материала межпоровой перегородки пенобетона от концентрации пенообразователя.
1 – протеиновый ПО; 2 – синтетический ПО

Влияние пенообразователя на сроки схватывания цементного раствора межпоровой перегородки

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ С ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕМ В ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД

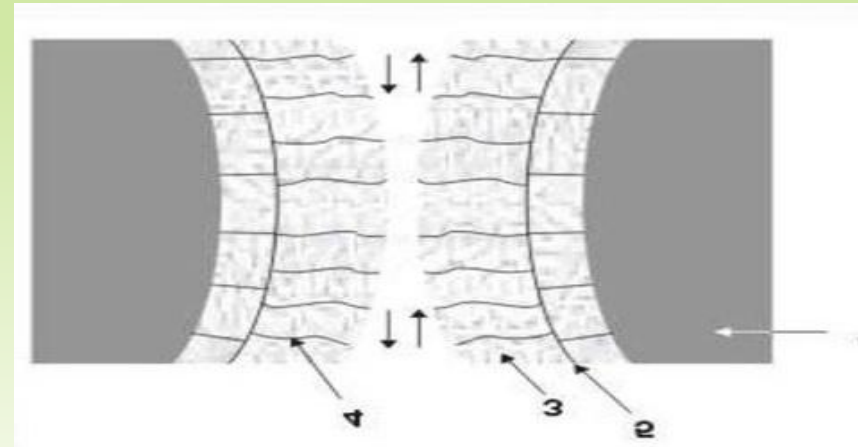
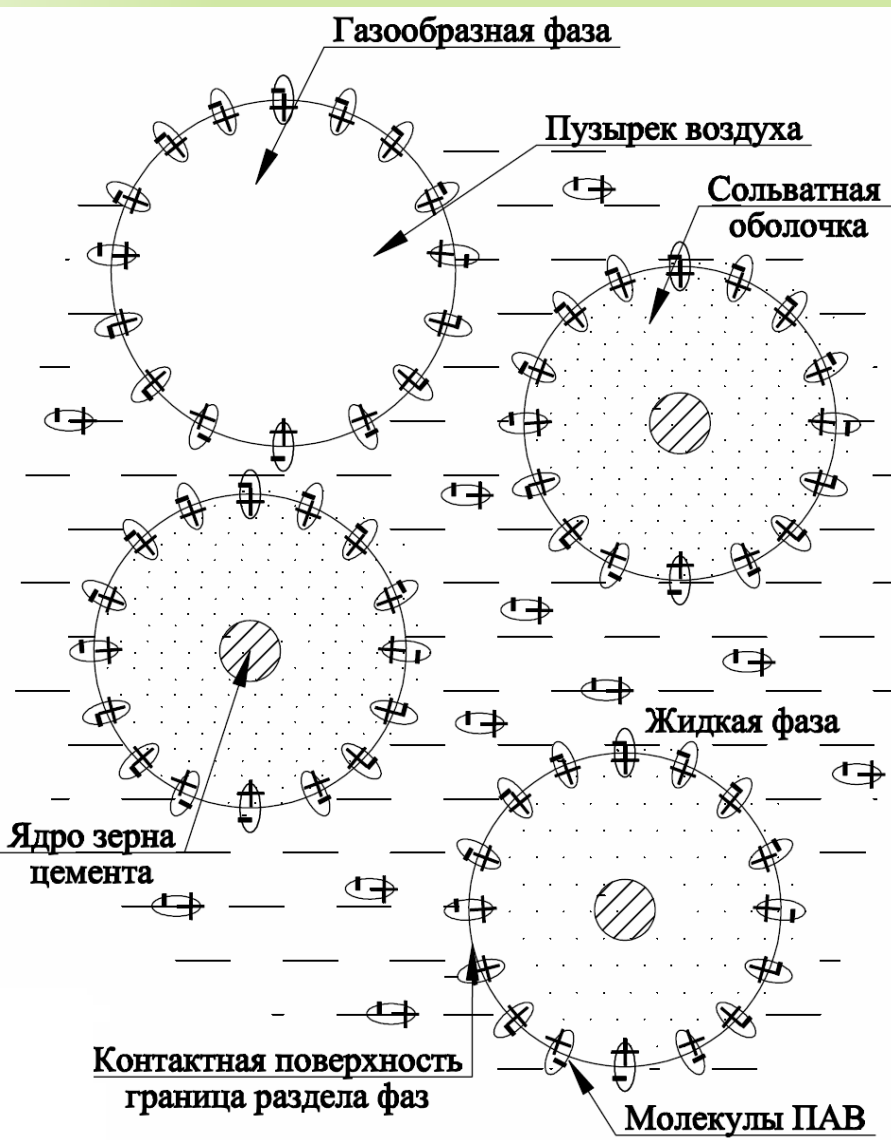
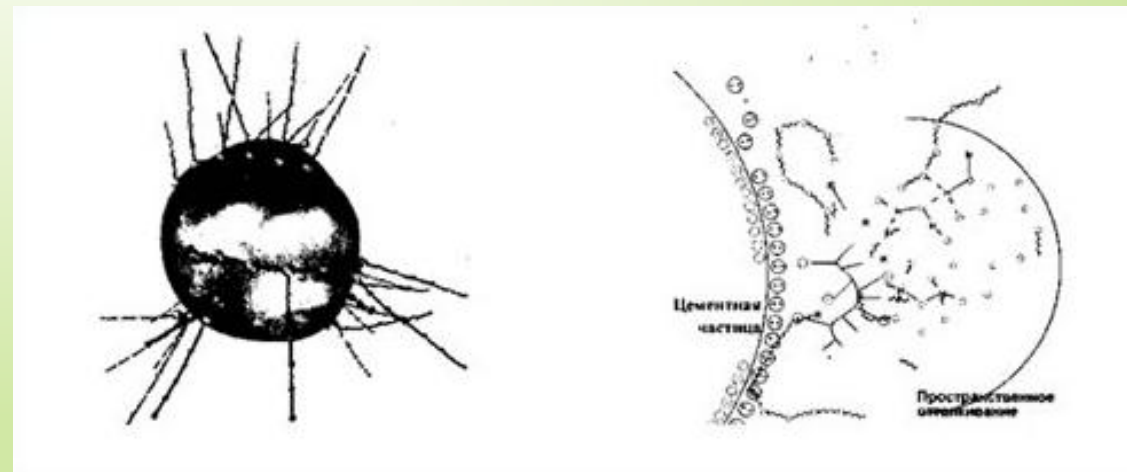


Схема проявления стерического эффекта. 1- частица цемента; 2- контактная поверхность сольватной оболочки; 3- адсорбционный слой; 4- поперечная полимерная цепь; 5- продольная полимерная цепь.



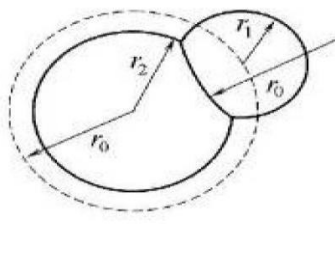
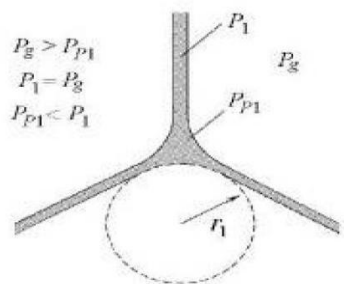
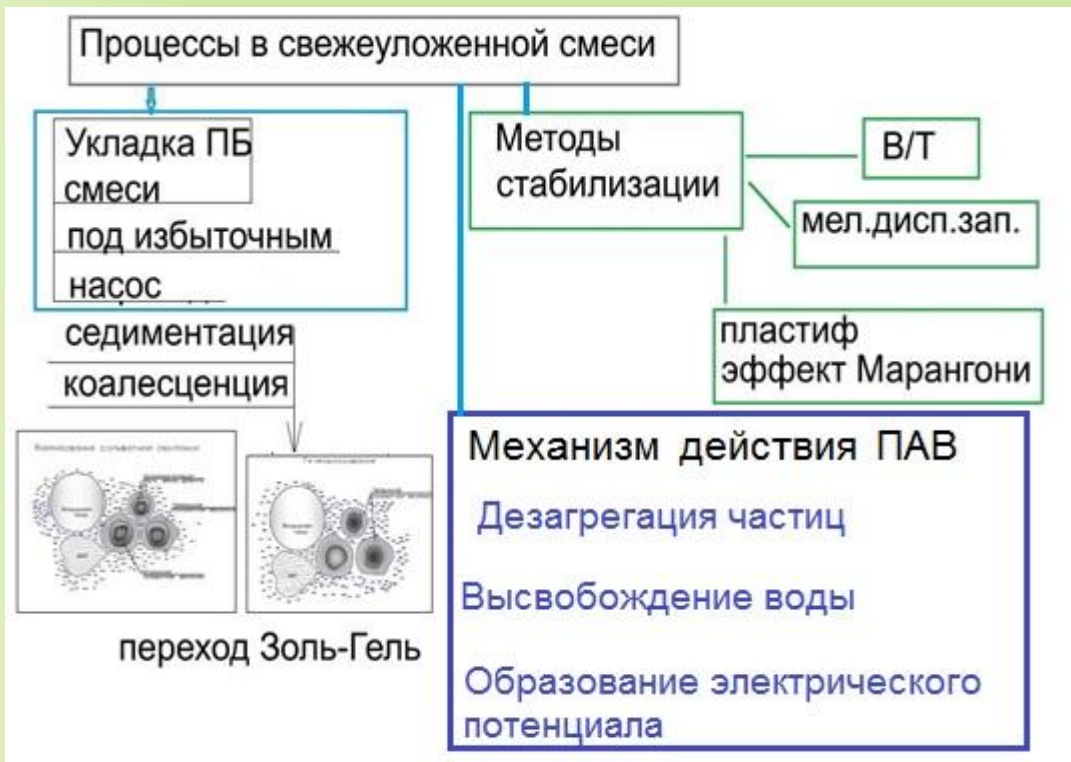
Стерический эффект отталкивания в растворе

Взаимодействие сольватной оболочки цемента с молекулами ПАВ, снижающее прочность пенобетона.

3. Физико-химические процессы твердения цементных систем в присутствии ПАВ



ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ В ПРИСУТСТВИИ ПАВ В ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД



$$F = - \frac{A \cdot r}{m \cdot H^n},$$

Схема разрушения пенобетонной смеси.
Коалесценция

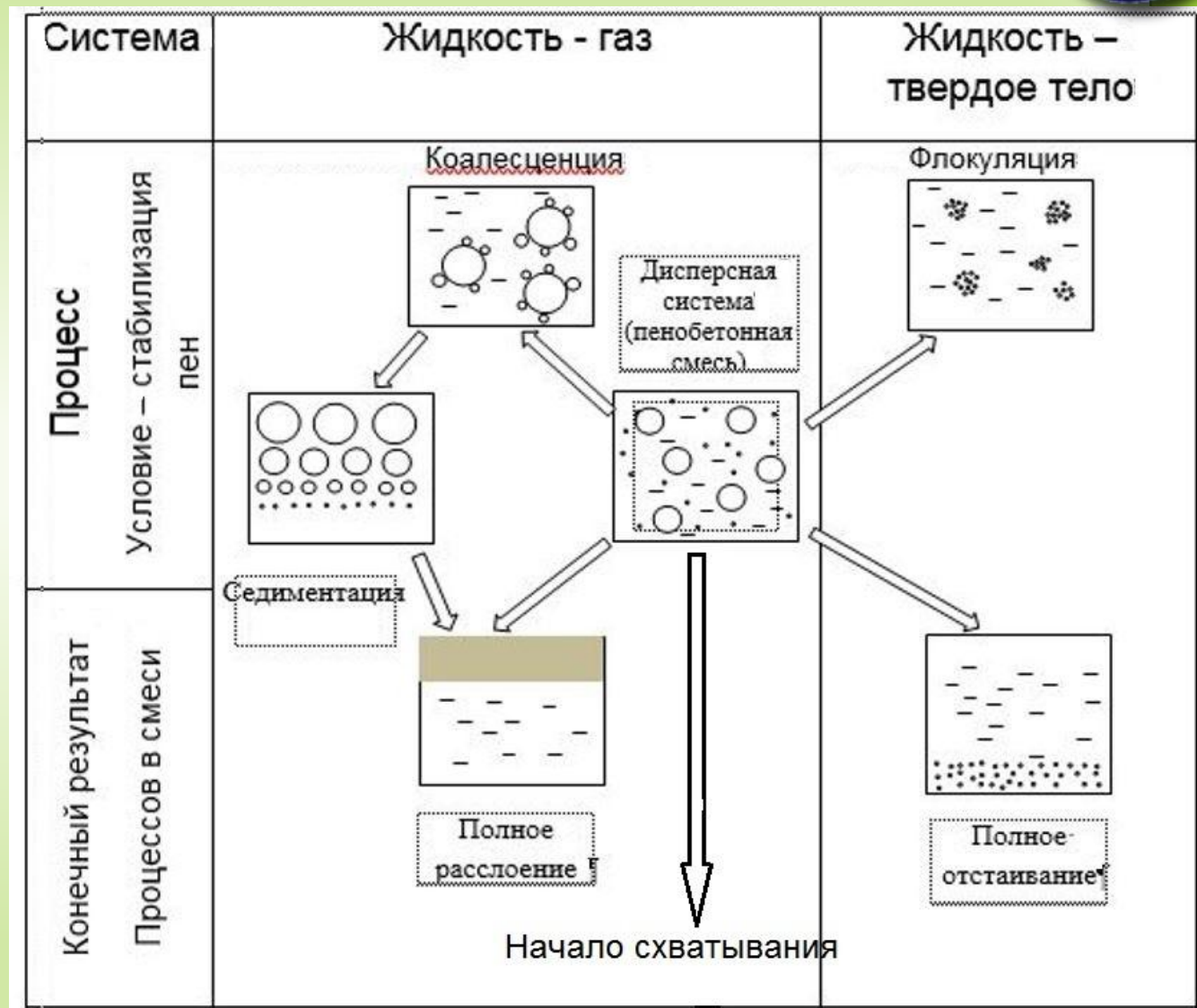


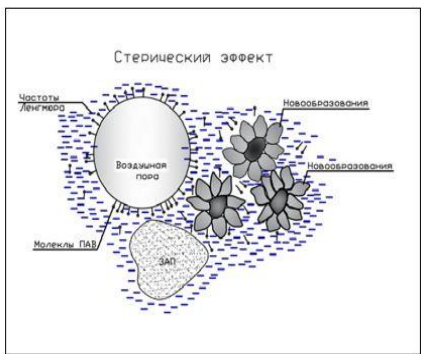
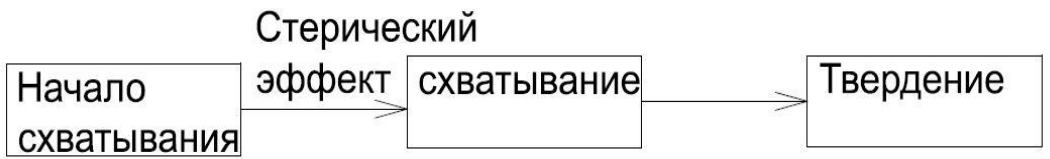
Схема первоначальных физических процессов в пенобетонной смеси

P_{p1} - давление в канале Плато; P_1 - давление в ламелле; P_g - давление газа в пузырьках

4. Механизм схватывания и твердения цементных систем с позиций фрактально-перколяционной модели, закономерности фазового взаимодействия и структурообразования в неавтоклавных материалах в присутствии ПАВ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ В ПРИСУТСТВИИ ПАВ

Процессы твердения и набора прочности



Условия:
t, градус;
W, %;
28 суток.

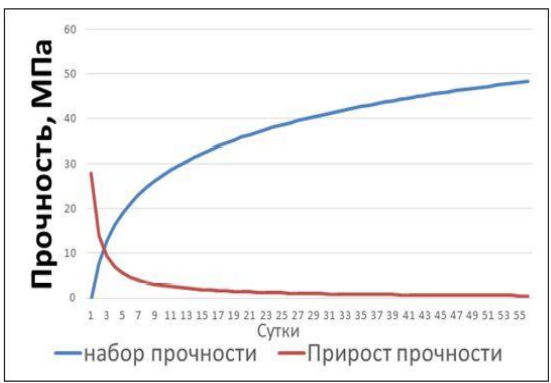
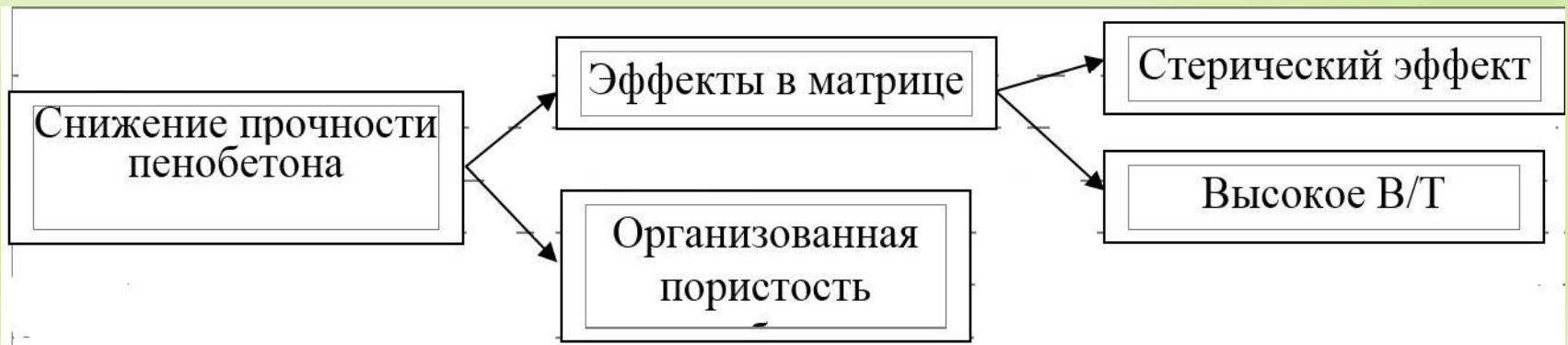
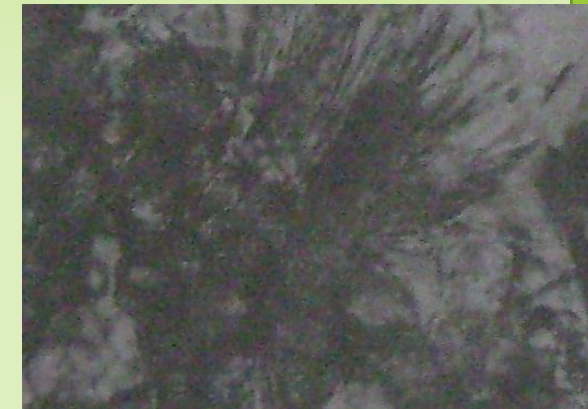
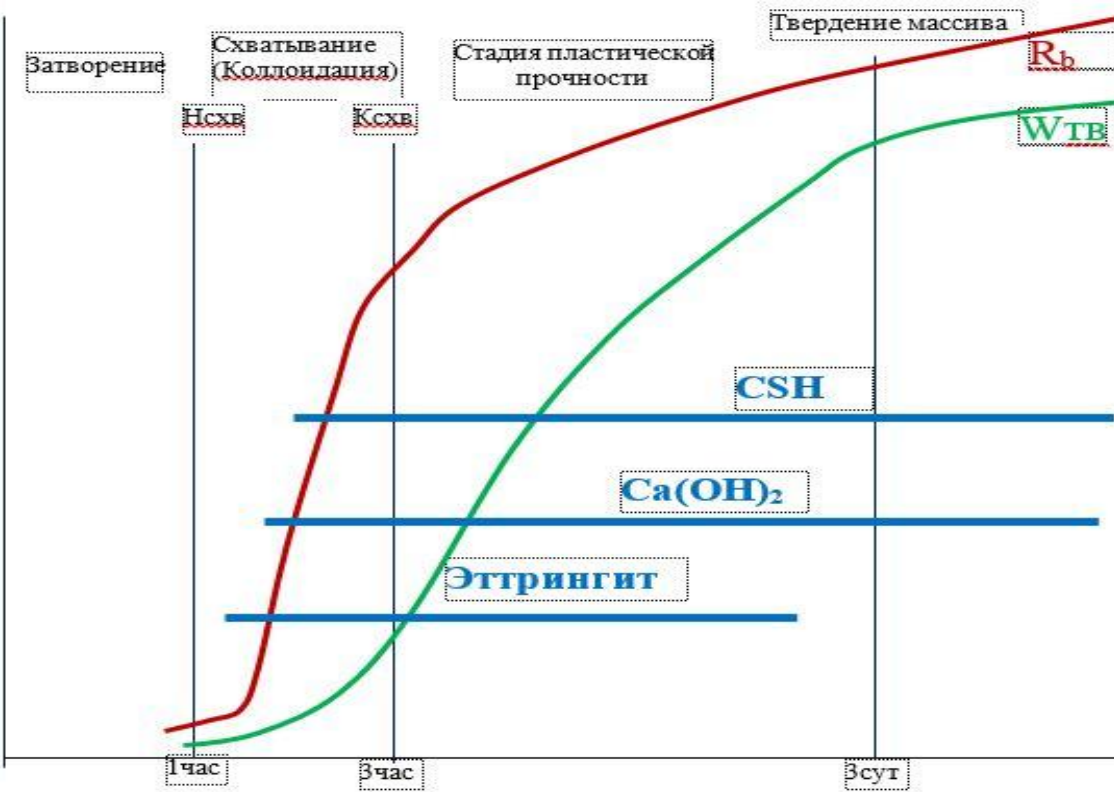


Схема физико-химических процессов в пенобетонной смеси при схватывании

Группы факторов, снижающих прочность пенобетона по отношению к твёрдому телу.



ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ В ПРИСУТСТВИИ ПАВ



а)

б)

Новообразования в твердеющем пенобетоне:
а) – пластинчатые; б) - волокнисто-игольчатые

1 стадия	2 стадия	3 стадия
Растворение, образование гидратированных соединений, формирование сольватных оболочек.	Выпадение новообразований в виде геля, формирование кластеров, Частичное срастание гелевых кластеров. Стерический эффект отталкивания.	Кристаллизация. Рост гелеобразных новообразований, полное срастание гелевых кластеров, полный переход золь-гель, формирование сплошного кристаллического сроска. Увеличение доли твердого вещества, снижение содержания свободной воды.

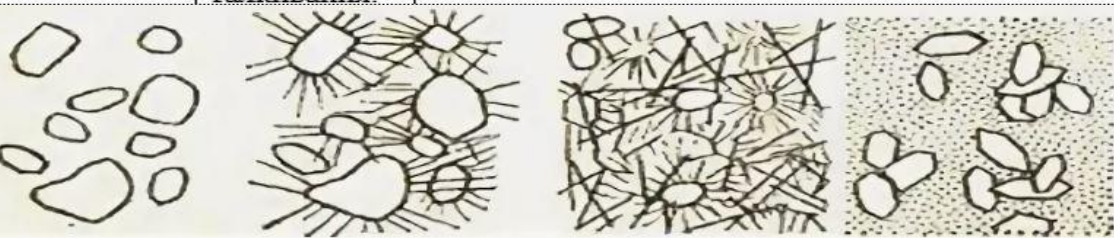
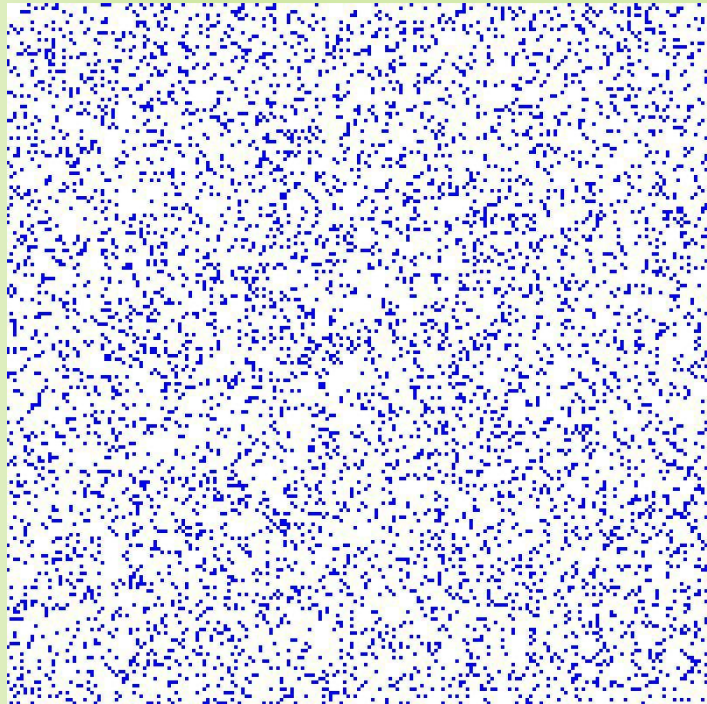


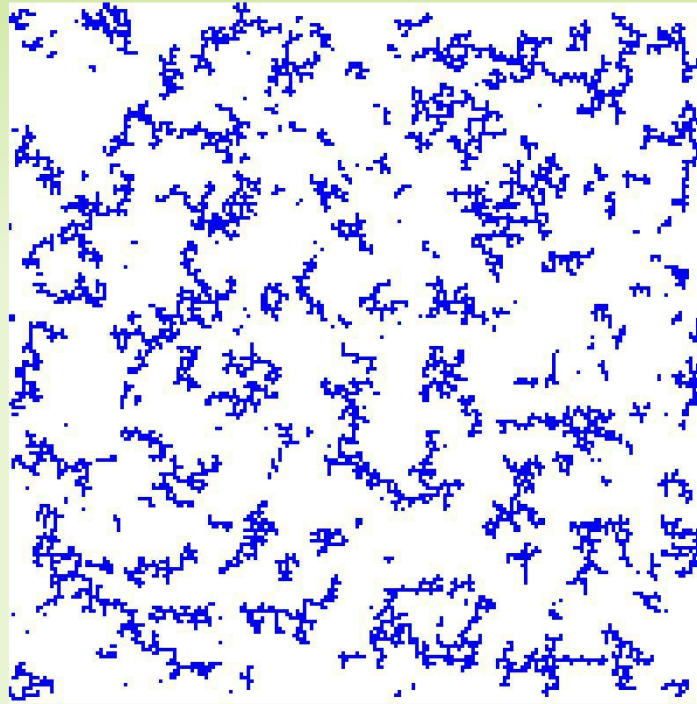
Схема процессов при гидратации матрицы пенобетона в первоначальный период твердения в логарифмическом масштабе времени.

R_b – прочность твердеющего массива;
 $W_{ТВ}$ – доля твердого вещества

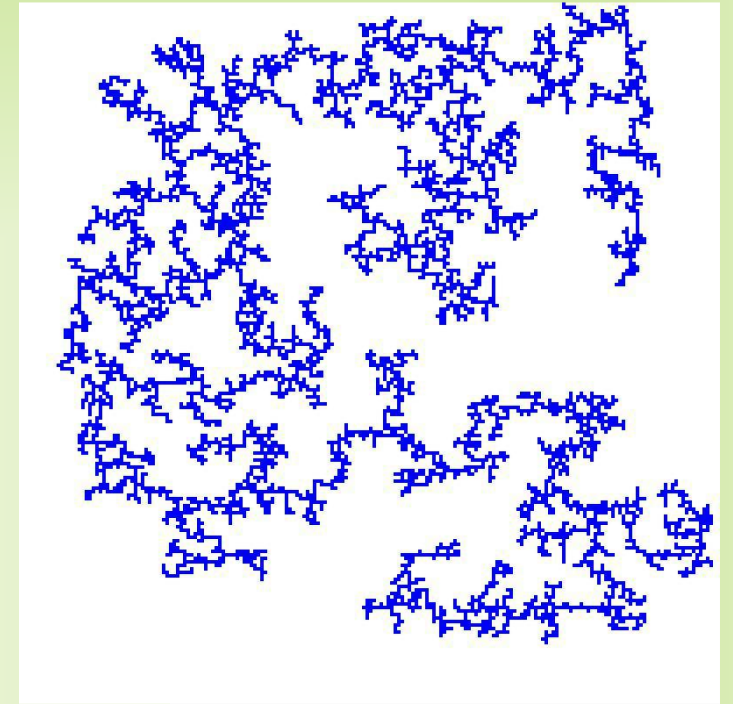
Фрактально-перколяционная модель процесса схватывания по типу кластер-кластерной агрегации, ограниченной диффузией (diffusion-limited cluster aggregation, DLCA)



1



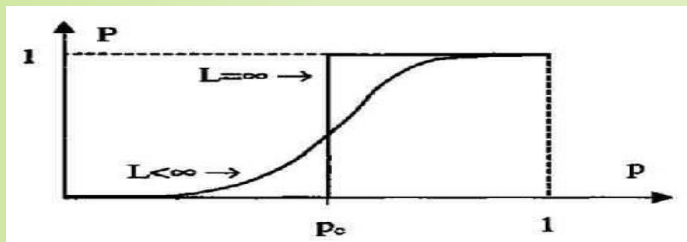
2



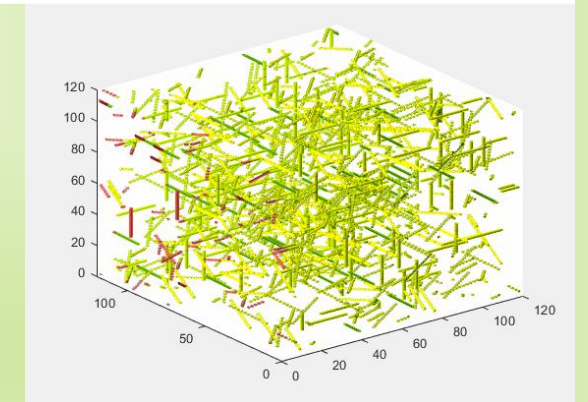
3

Формирование фрактальных кластеров.

1 - начальная стадия; 2 – формирование сростков; 3 – порог перколяции

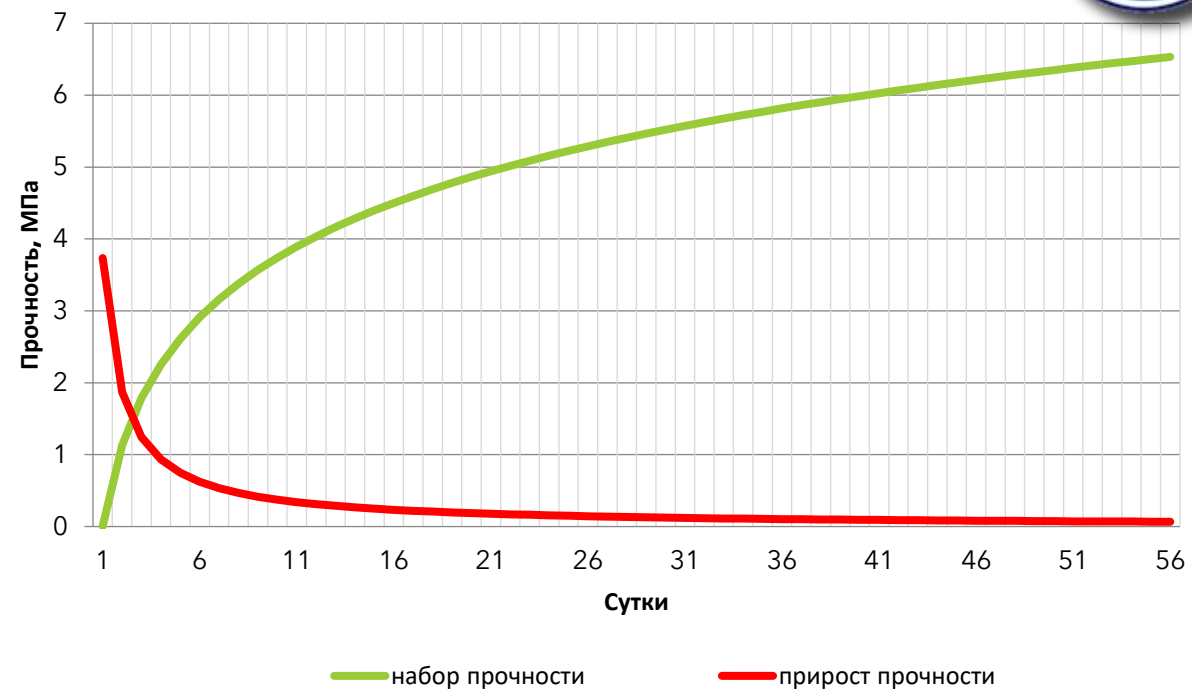


Кластерная 3D модель схватывания цементного раствора



Графическая модель фазового перехода, где P – концентрация твердых частиц, P_c – порог перколяции, L – размер системы

Динамика роста прочности пенобетона



Сравнительный график роста прочности матрицы пенобетона на цементе класса ЦЕМ I 42,5
1 – контроль; 2 – с 5% протеинового пенообразователя;
3 – с 5% синтетического пенообразователя.
Ингибирующий эффект ПАВ.

Аппроксимированный график роста прочности и дифференцированная кривая прироста прочности пенобетона D600 на цементе ЦЕМ I 42,5Н.

5. Количественное подтверждение ранее предложенной гипотезы о прочности твердого пористого тела как фрактальной функции пористости.



Поровая структура пенобетона. Фрактальность

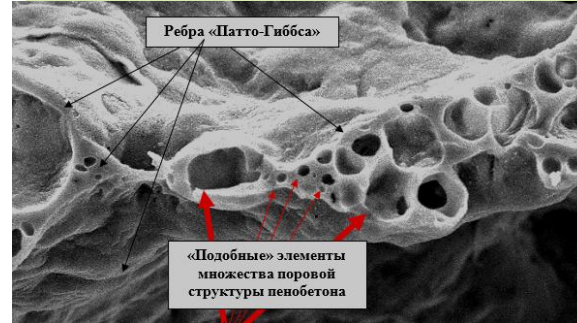
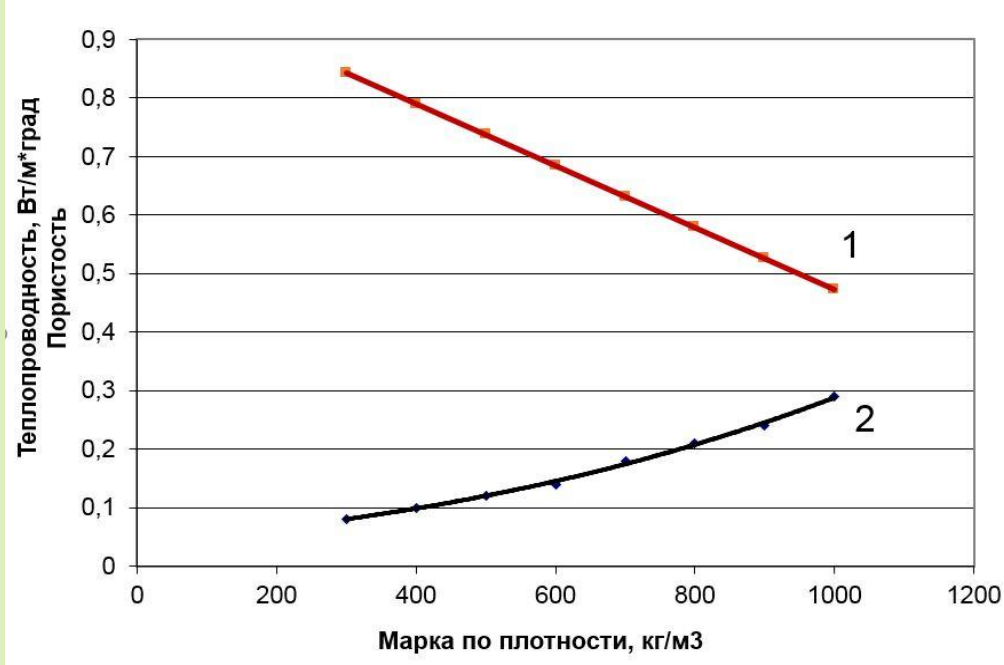
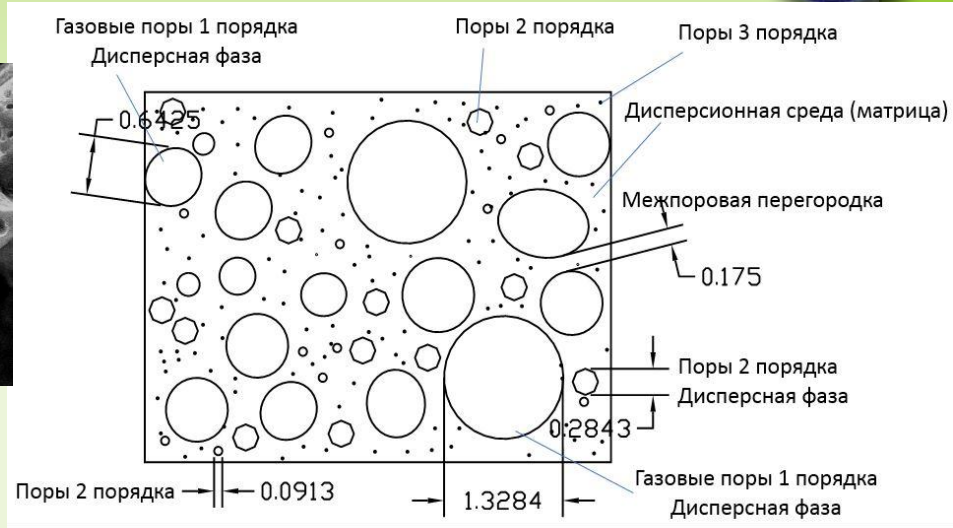


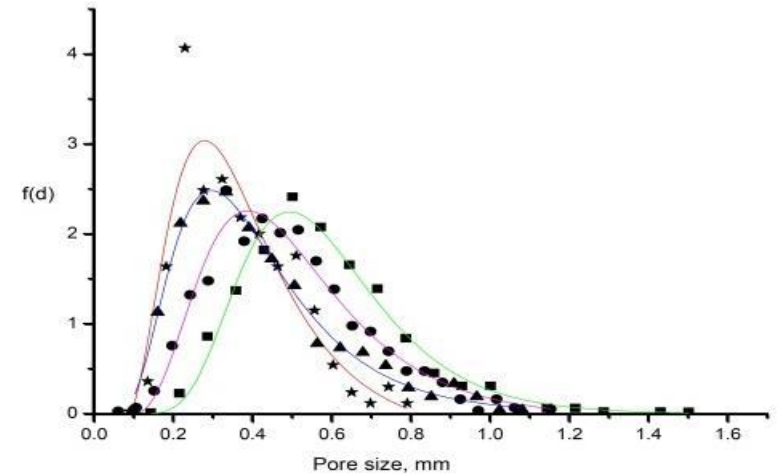
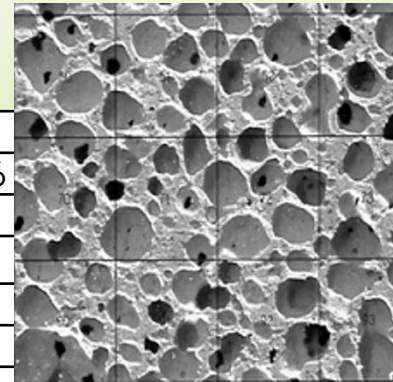
Фото электронного микроскопа фрактальной структуры капиллярно-порового пространства пенобетона



Теплопроводность и пористость пенобетона

1 – пористость; 2 – теплопроводность, Вт/м град

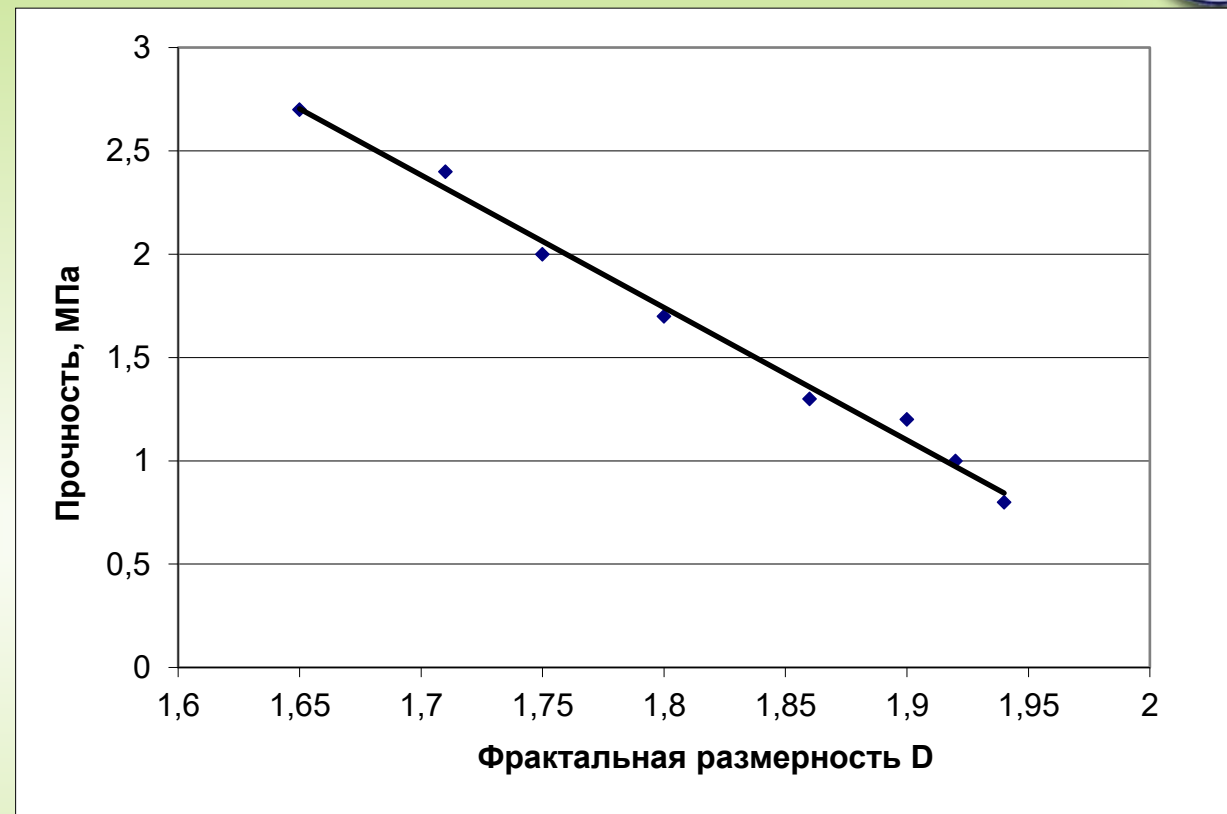
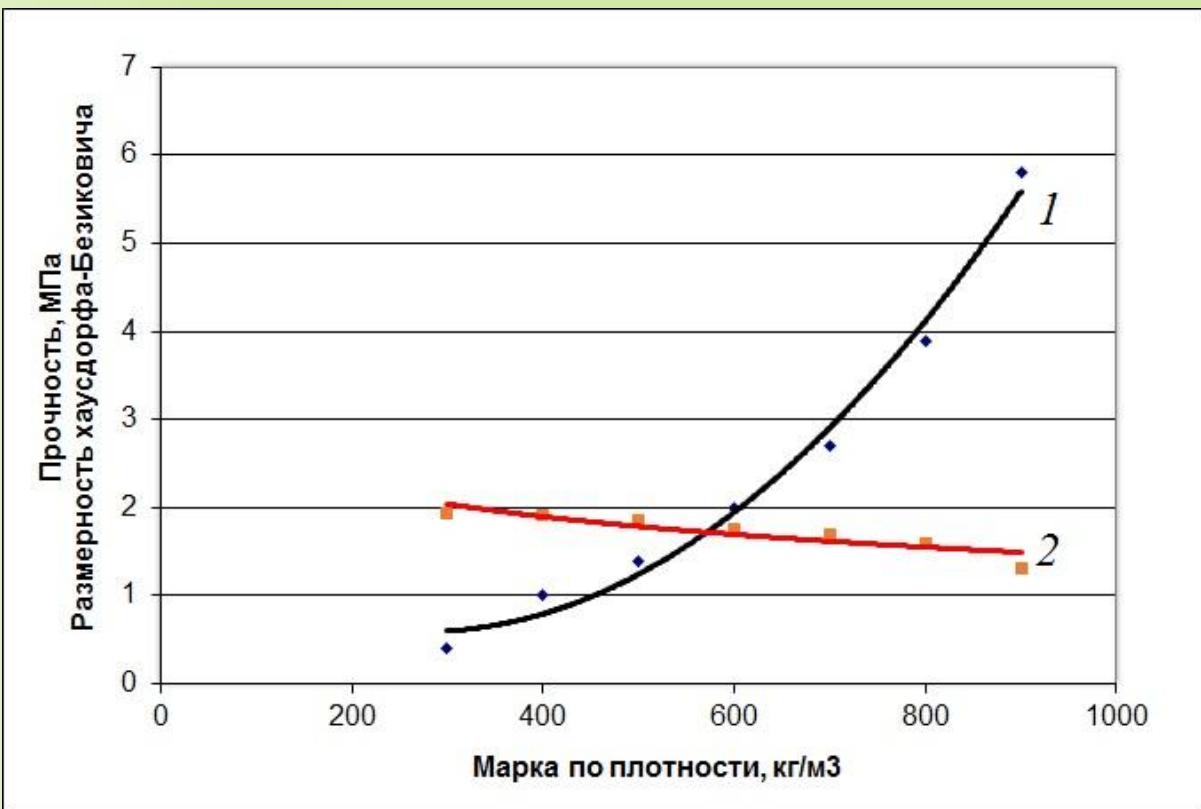
Шаг ряда i	0	1	2	3	4	5
Размер ячеи S_i	1	0,25	0,0625	0,01565	0,00390625	0,00097656
Размер пор p_i	0,15	0,03	0,009	0,0023	0,0005859	0,0001464
Кол-во пор N_i	3	19	1228	78643	5033164	322122547
$\lg p_i$	-	-0,60	-1,20	-1,81	-2,41	-3,01
$\lg N_i$	0,52	1,28	3,09	4,90	6,70	8,51
Размерность D	-	2,13	2,57	2,71	2,78	2,83



Распределение числа пор по размерам в пенобетоне (п. Меркину) плотностью: ■ - 500 кг/м3; ● - 600кг/м3; ▲ - 800 кг/м3.

Фрактальная размерность пространственного пористого тела выделенным объемом ячеи $l_0=1$, при $K=4$

Прочность с учетом фрактальности пористой структуры



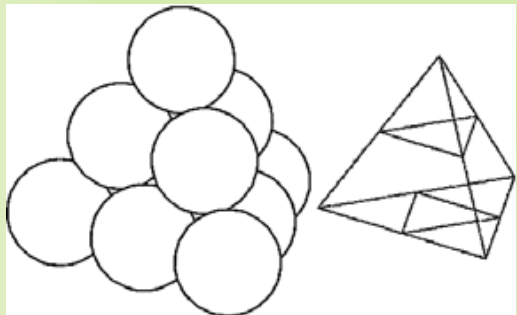
Прочность пенобетона от средней плотности -
1 - Прочность неавтоклавного пенобетона по ГОСТ25485-2019
2 - фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича

Прочность неавтоклавного пенобетона от фрактальной размерности Хаусдорфа-Безиковича.

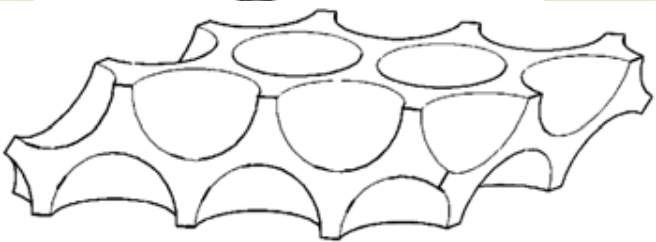
Фрактальная размерность D ,
где N – число элементов в выборке кластером δ

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln(1/\delta)}$$

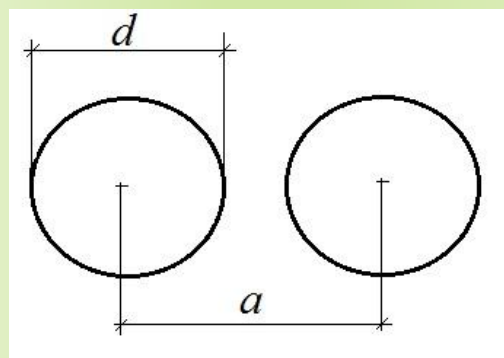
Прочность с учетом фрактальности пористой структуры



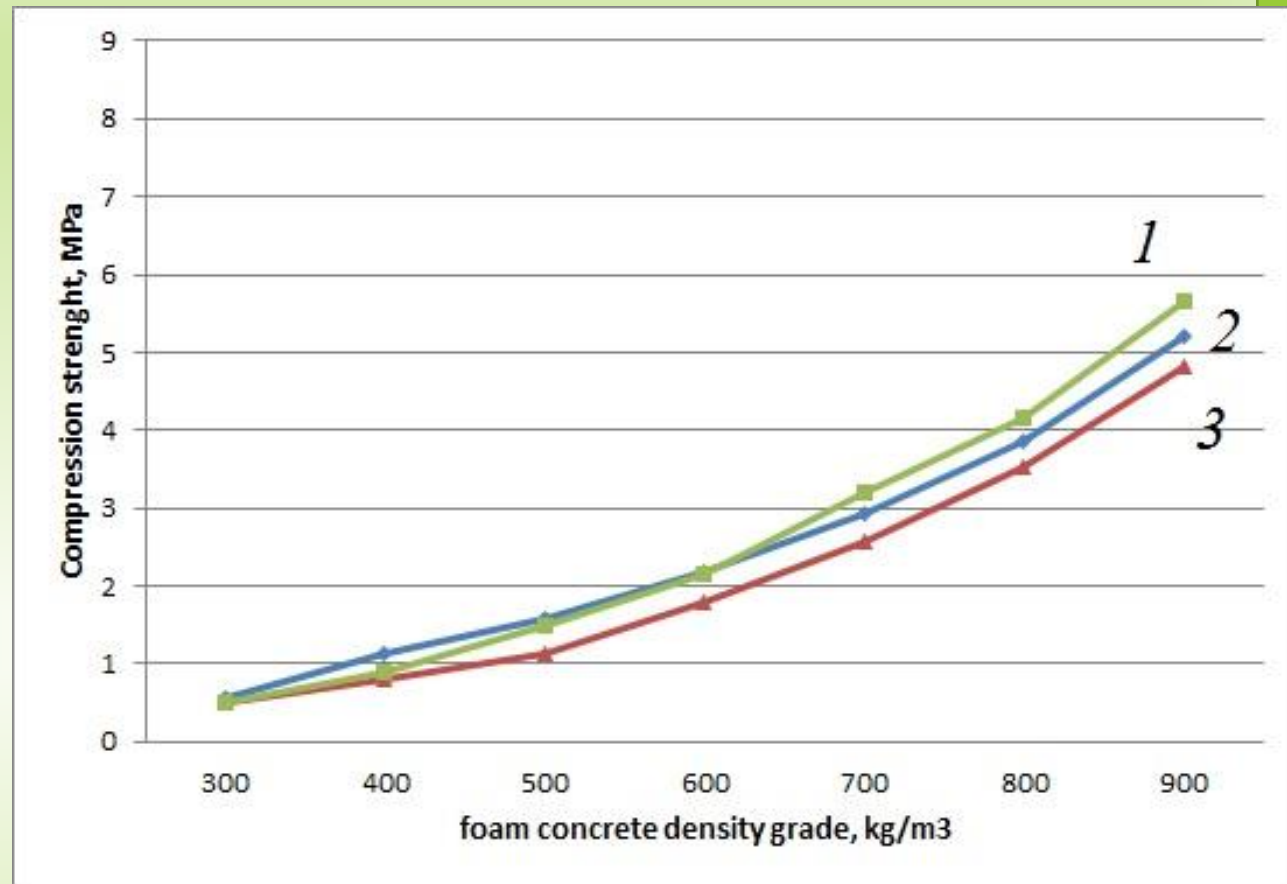
Гексагональная упаковка
и расположение центров ячеек



Губчатое пористое тело
(пористость 50%)



d - диаметр ячейки;
 a - шаг ячеек;
 d/a - относительный шаг
ячеек пенобетона.



Формула Энгельмана
(Hans-Jürgen Engelmann)
 D – средняя плотность

$$R_b = K_d \left(\frac{D^{1,5}}{D^2 + 0,006} \right)^{1/n} \quad (1)$$

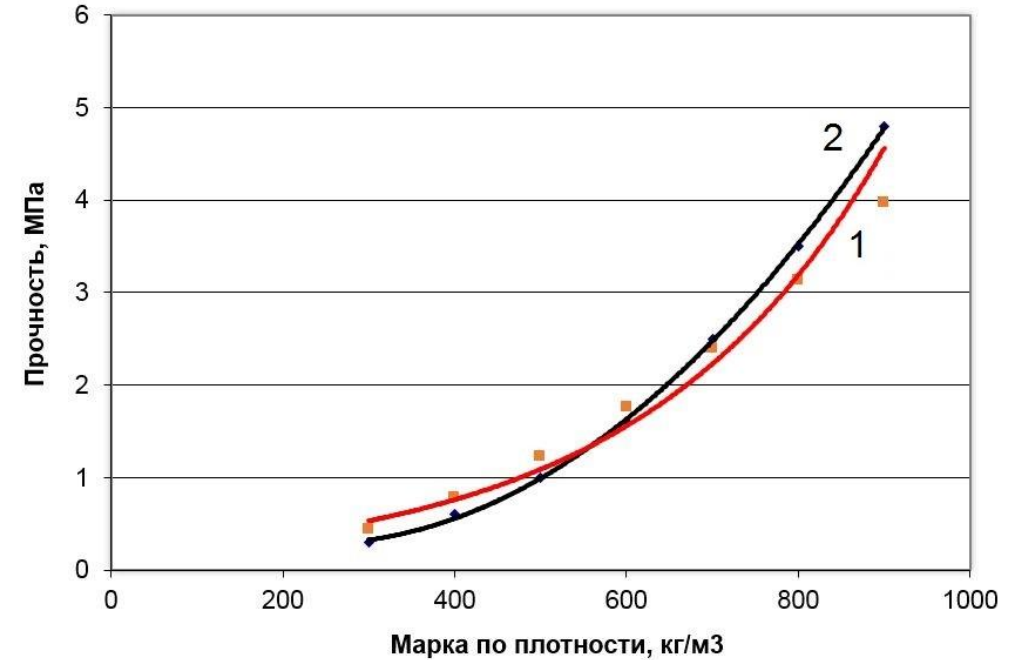
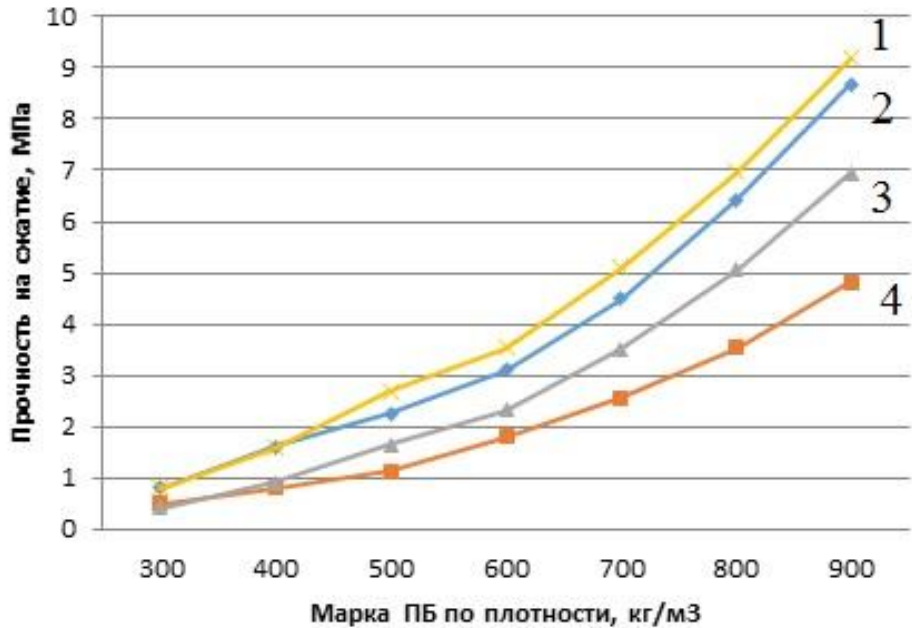
Предлагаемая формула с
учетом фрактальности,
где φ – общая пористость,
 R_m - прочность матрицы.

$$R_b = \frac{R_m}{\varphi \cdot A \left(1 - \frac{\sqrt{3\pi}}{6} \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right)} \quad (2)$$

Прочность пенобетона от средней плотности.
1 – по формуле Hans-Jürgen Engelmann (1989). (1);
2 – рассчитанное по формуле (2) при прочности матрицы
при $R_m=50$ Мпа;
3 – неавтоклавный, значения по ГОСТ 25485;

6. Формула прочности пенобетона с учетом физико-химических особенностей составных компонентов смеси для требуемой его марки по плотности и класса прочности

Модели прочности пенобетона от плотности



Прочность пенобетона от плотности с учетом стерического эффекта в матрице,

1 - по формуле (3) при $R_0=60$ МПа;

2 - по ГОСТ 25485-2019 (автоклавный пенобетон);

3 - по формуле(3) при $R_0=35$ МПа;

4 - по формуле (4) Кирслея-Вайнрайта (Kearsley E.P., Wainwright P.J. 2002).

$$R_b = (R_0 - k \cdot c) \cdot \left(\frac{\rho_b}{\rho}\right)^b \quad (3) \quad R_b = AR_m \left(\frac{\rho_b}{\rho_m}\right) \quad (4)$$

где R_0 – прочность матрицы без пенообразователя, МПа; k – линейный коэффициент снижения прочности матрицы от вида пенообразователя. Он определен для протеинового ПАВ $k=1,338$, для синтетического Пав $k=2,757$; c – концентрация пенообразователя в цементном тесте, % от массы цемента

Зависимость прочности неавтоклавного пенобетона на вяжущем

ЦЕМ I 42,5Н от плотности: 1 – По формуле (5); 2 – Формула Кирслея-Вайнрайта (2002).

Прочность пенобетона $R_b = R_c K_f K_A 10^{-7} D^2$, (5)

где K_A – коэффициент, учитывающий автоклавную обработку; D – марка пенобетона по средней плотности, кг/м³; R_c – прочность цементного камня матрицы; K_f – коэффициент, снижения прочности матрицы в присутствии ПАВ;

Прим: Значения коэффициентов даны в таблицах.

Диаграмма напряжений неавтоклавно пенобетона, начальный модуль упругости

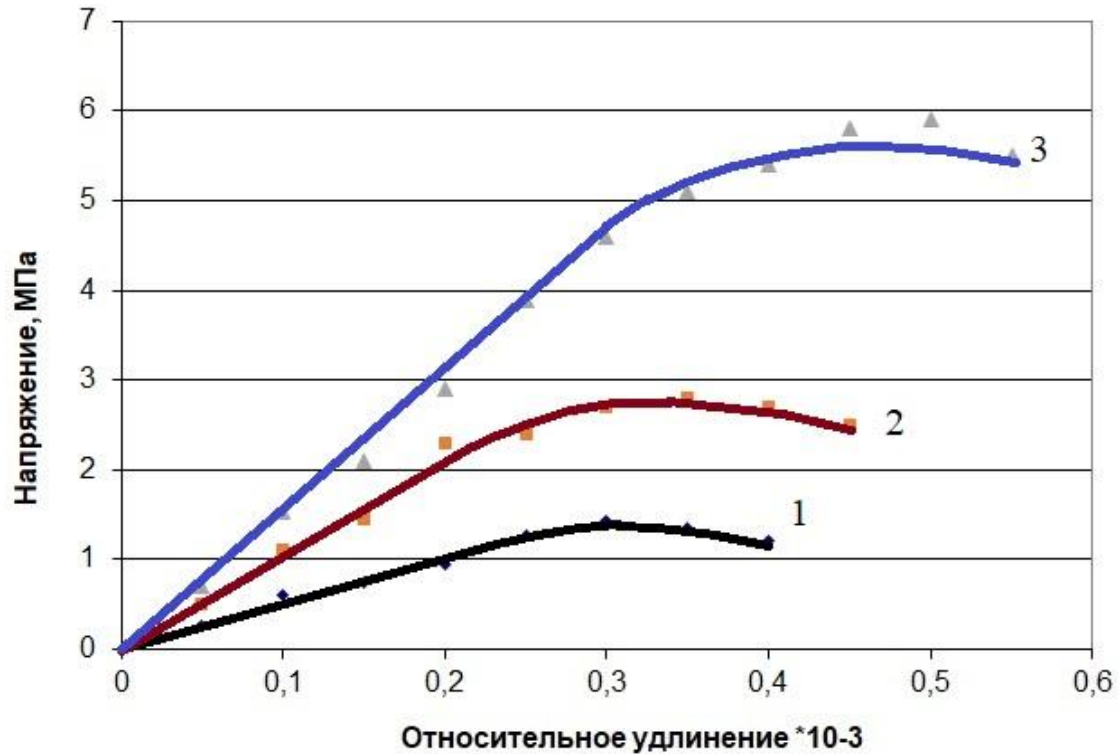
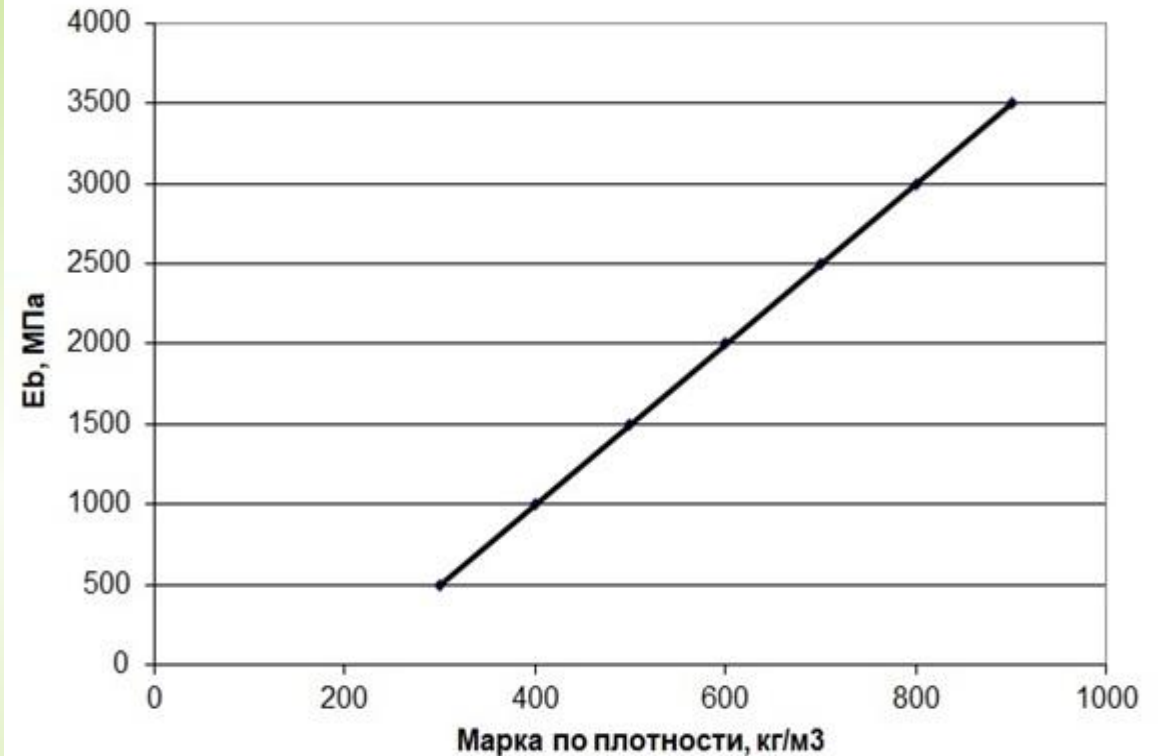
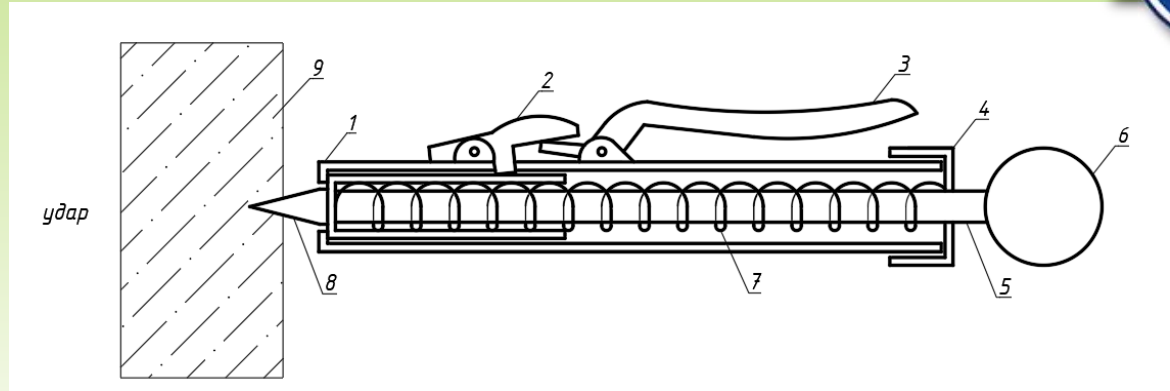


Диаграмма напряжений пенобетона при кратковременном нагружении:
1 – Пенобетон марки D300; 2 – марки D600;
3 – марки D900.

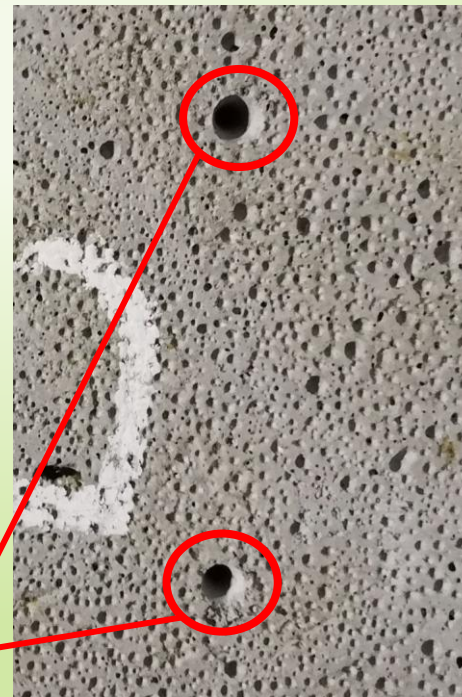
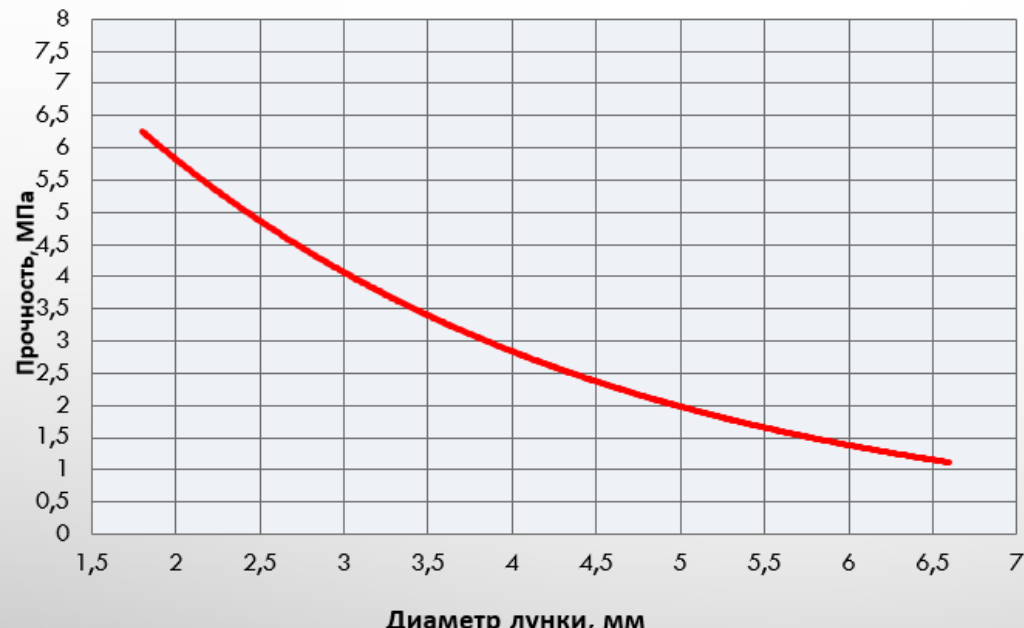


Начальный модуль упругости (Юнга) пенобетонов от средней плотности.

ПРИБОР УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА



ТАРИРОВОЧНЫЙ ГРАФИК



ЛУНКА

- 1 - корпус
- 2 - шептало
- 3 - спусковой рычаг
- 4 - регулятор усилия пружины
- 5 - шток ударного элемента
- 6 - рукоятка
- 7 - пружина
- 8 - конический наконечник
- 9 - ячеистый бетон

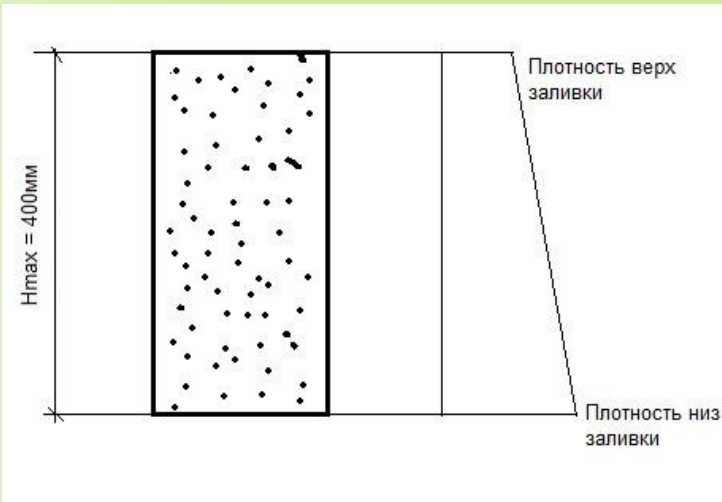
Факторы структурообразования (диаграмма Исикавы)



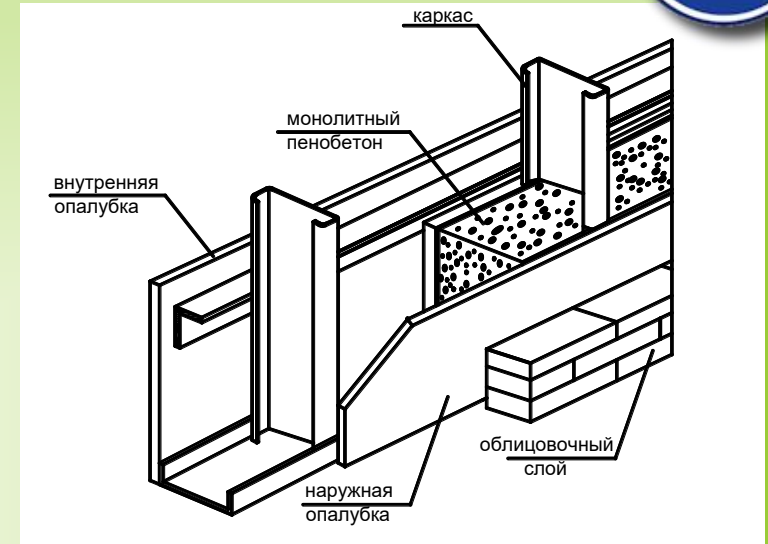
Интегральный критерий качества

$$K_{\text{кач}} = \frac{\sum K_i}{\sum K_{\text{max}}}$$

Лёгкий сталебетонный пространственный композит (ЛСБК=ЛСТК+ПБ)

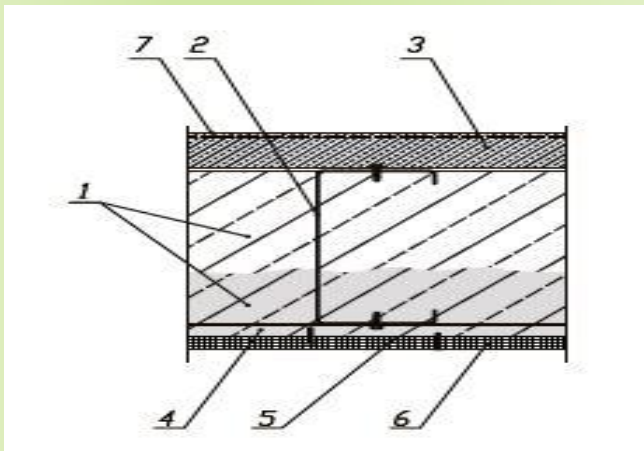


Решение здания из монолитного пенобетона с ЛСБК



Узел стены здания с ЛСБК

Вариатропность плотности по высоте слоя в месте укладки (гидростатическое уплотнение).

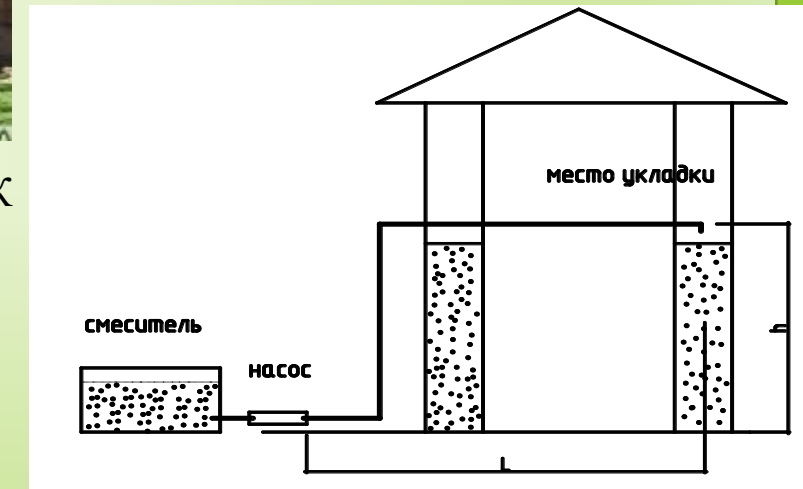


Решение перекрытий: 1 – пенобетон D400-500; 2 – балка перекрытия; 3 – пенобетон D700-800; 4,5 – профплита; 6 – потолок; 7 – плиты пола.

$$V_2 = V_1 D_1 / D_2$$

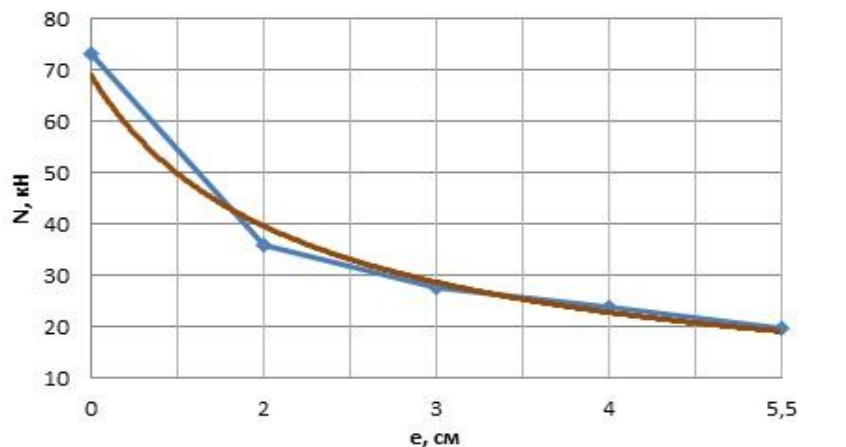
$$\Delta V = V_1 - V_2 = V_1 (1 - D_1 / D_2)$$

D_1, V_1 - плотность и объём пеносмеси в смесителе;
 D_2, V_2 – тоже в месте укладки.

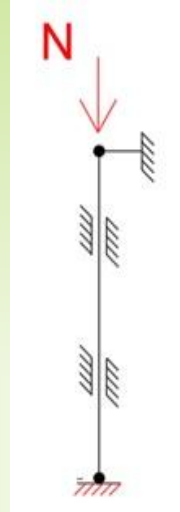


Укладка монолитного пенобетона в стеновое ограждение с подачей на высоту

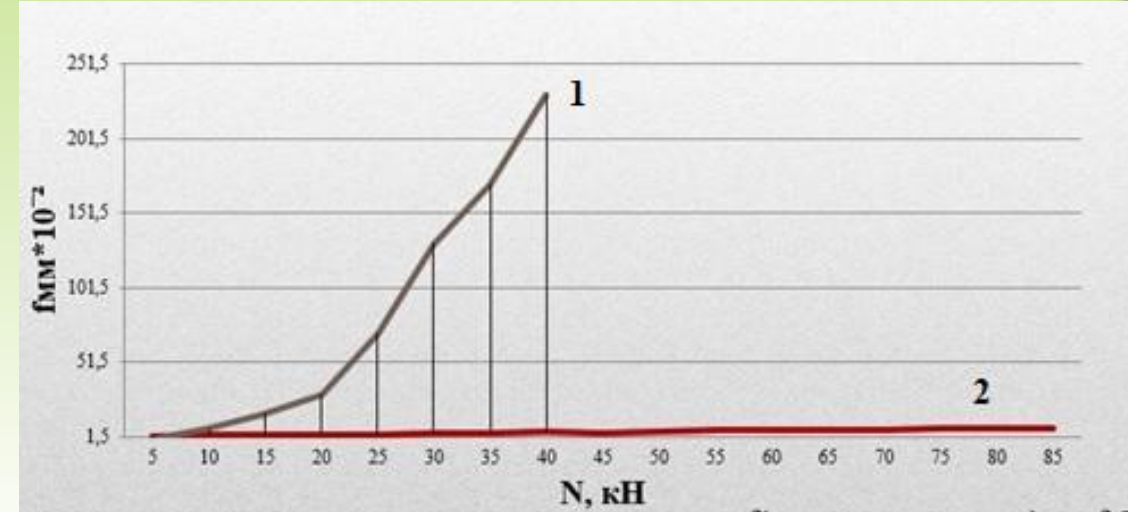
Сталебетонный пространственный композит (ЛСБК=ЛСТК+ПБ)



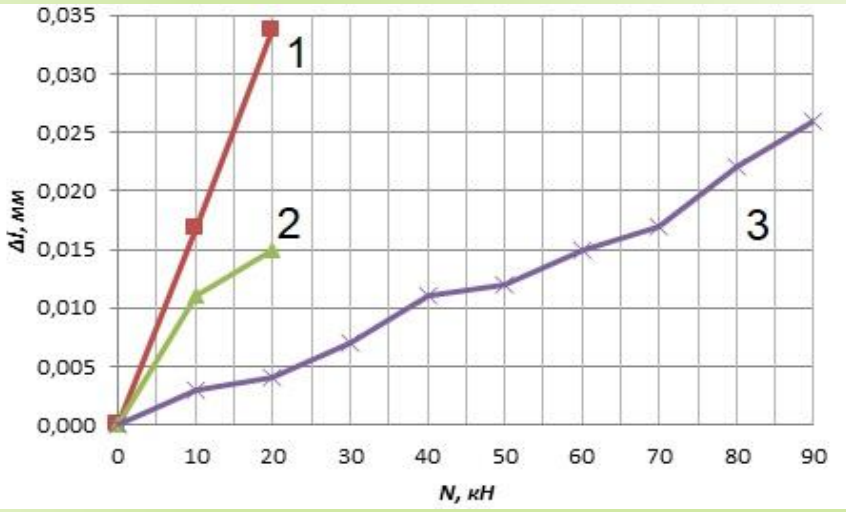
Несущая способность стойки ЛСБК в зависимости от эксцентриситета – e (см)



Расчетная схема стойки из ЛСБК



Результаты испытаний стойки на центральное сжатие, продольный выгиб: 1 – свободной стойки; 2 – в пенобетонной обойме (ЛСБК)



Продольные перемещения точек на крайнем волокне стоек: 1- теоретические; 2- свободной стойки; 3- стойки ЛСБК.

$$S = \frac{1}{2} \int_0^l [GI_t \theta'^2 + GI_p (\theta' - \beta)^2 + EI_z \eta'^2 + EI_y \zeta'^2 + EI_\omega \beta'^2 + K\theta^2 + N(\eta'^2 + \zeta'^2) + 2(M_\eta \eta' - M_\zeta \zeta')\theta] dx,$$

где η и ζ - перемещения точки, являющейся центром изгиба относительно осей y и z , соответственно; η' и ζ' - углы поворота относительно осей z и y , соответственно; N - нормальная сила, которая считается положительной в случае растяжения стержня; K, M_η, M_ζ - характеристики, зависящие от внутренних силовых факторов:

$$K = Nr_p^2 + M_y b_z + M_z b_y + Bb_\omega; \quad M_\eta = M_y - Nz_p; \quad M_\zeta = M_z - Ny_p,$$

Устойчивость металлических стоек в среде пенобетона (ЛСБК) по Рыбакову В.А., Сливкеру В.И. (2025)

Устройство перекрытий из теплоизоляционного пенобетона

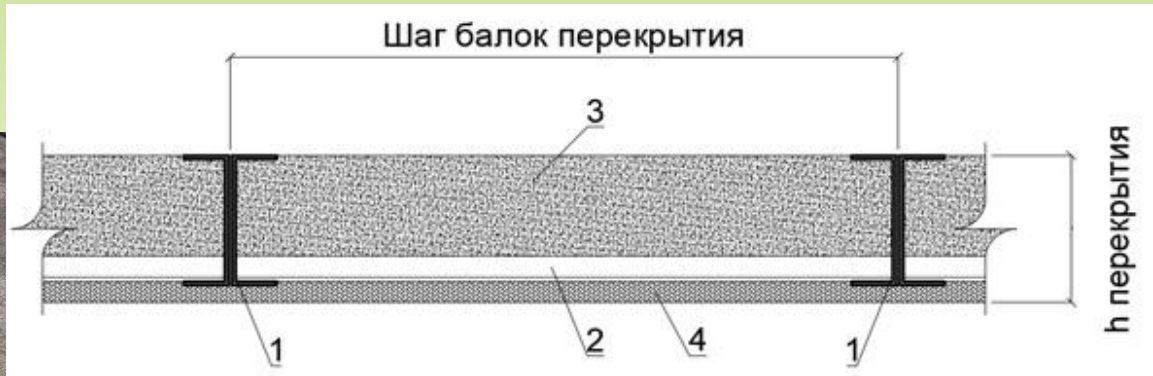
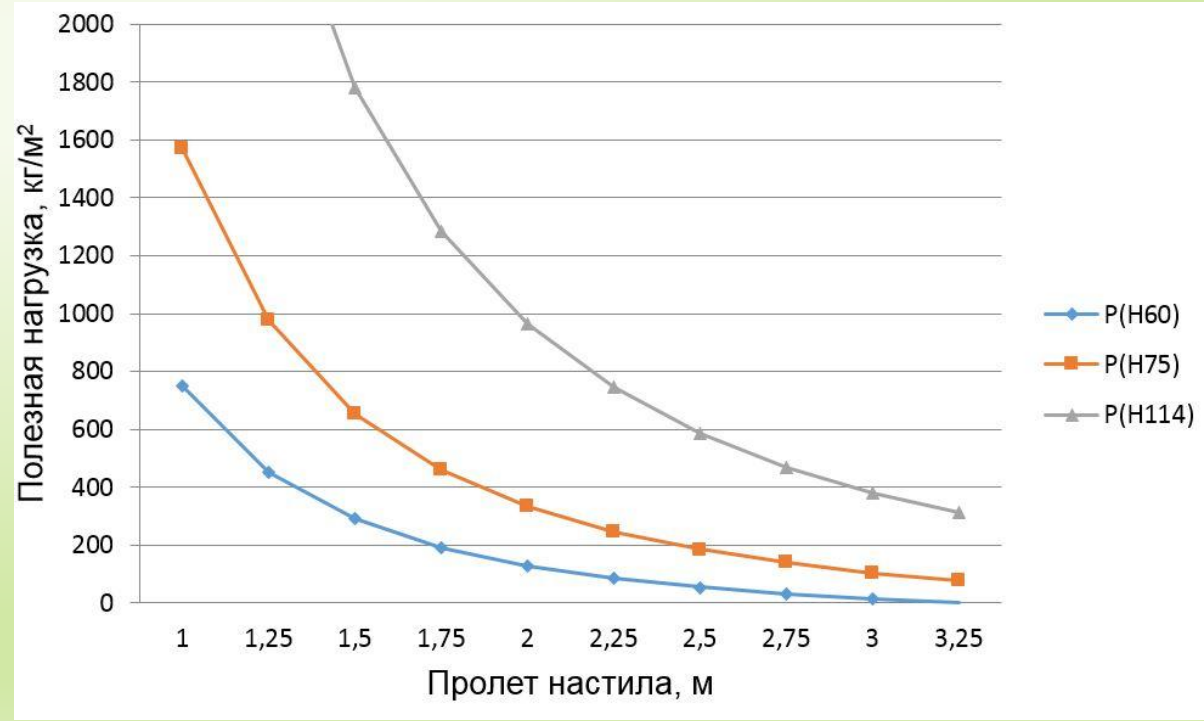
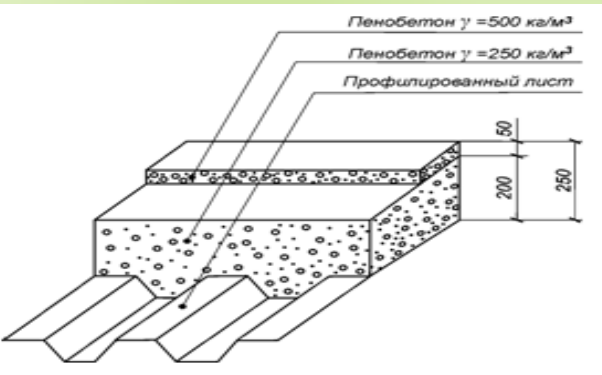


Схема перекрытия ЛСБК. 1 – металлическая балка; 2 – профилированный настил; 3 – монолитный пенобетон; 4 – потолочные плиты

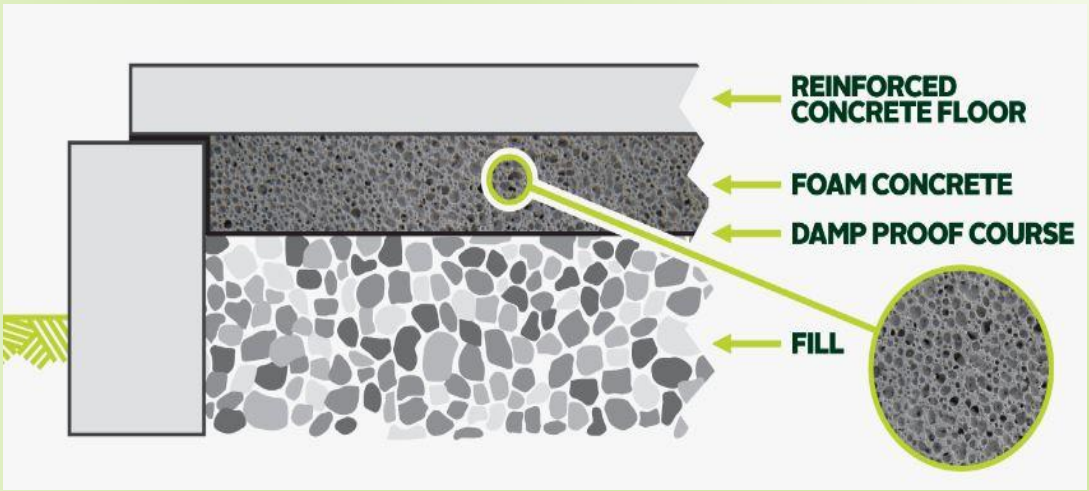


Несущая способность перекрытия из пенобетонного композита (ЛСБК). 49/54

Исследование перспективных направлений использования пенобетона в составе пространственного сталепенобетонного композита

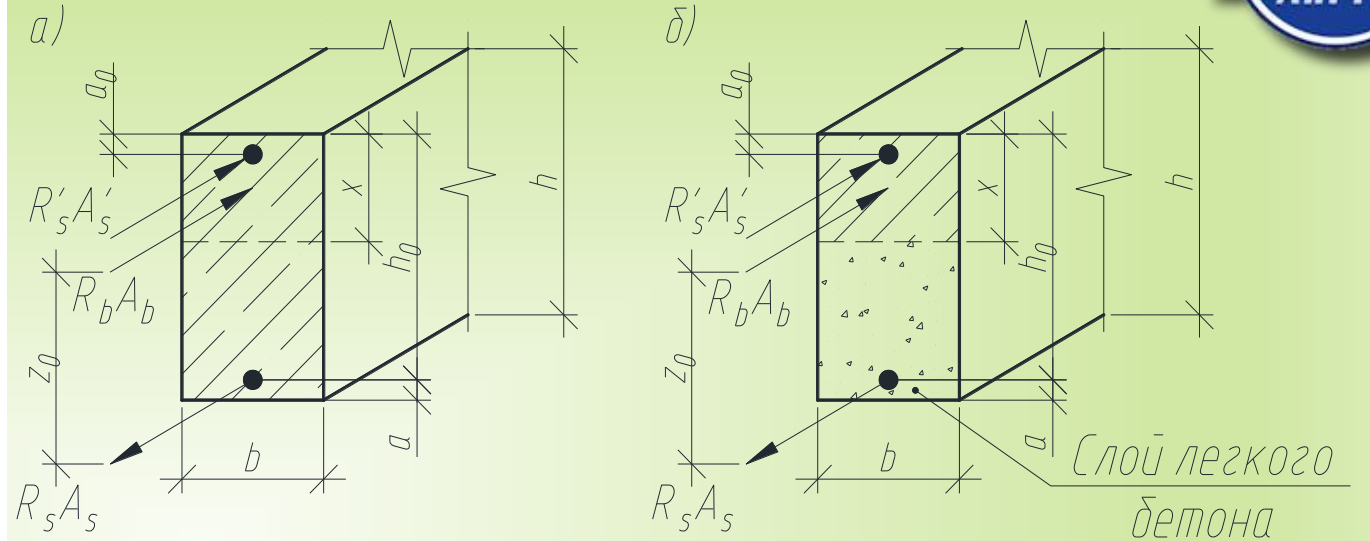
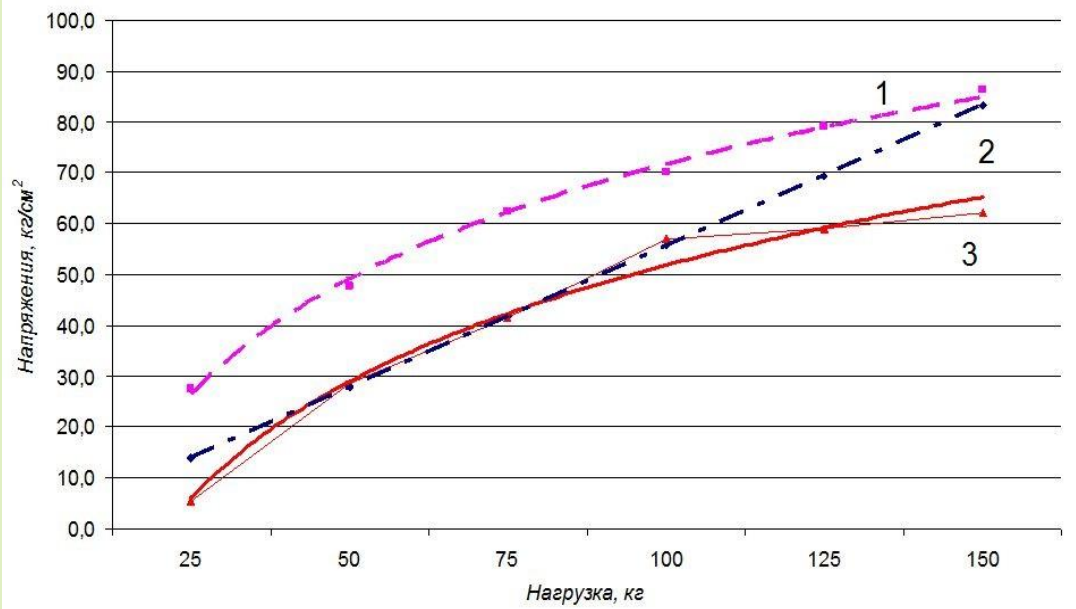


Состав и вид перекрытия из пенобетонного композита (ЛСБК).



Утепление перекрытия монолитным пенобетоном

Вариатропные конструкции, ступенчатая вариатропность

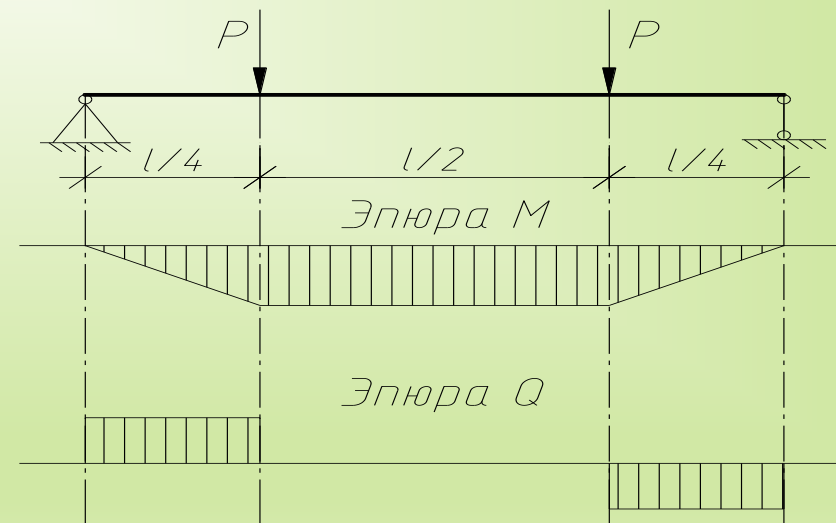


Сечение сплошной (а) и слойной (б) железобетонной балки

Нормальные напряжения в бетоне сжатого пояса балок:
 1 – сплошная железобетонная балка; 2 – теоретическое напряжение; 3 – вариатропная балка.

$$\sigma_b = \frac{Pl/4 - R_{sc} A'_s (h_0 - a')}{bx(h_0 - 0,5x)}$$

$$M_{ult} = R_b bx(h_0 - 0.5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$$

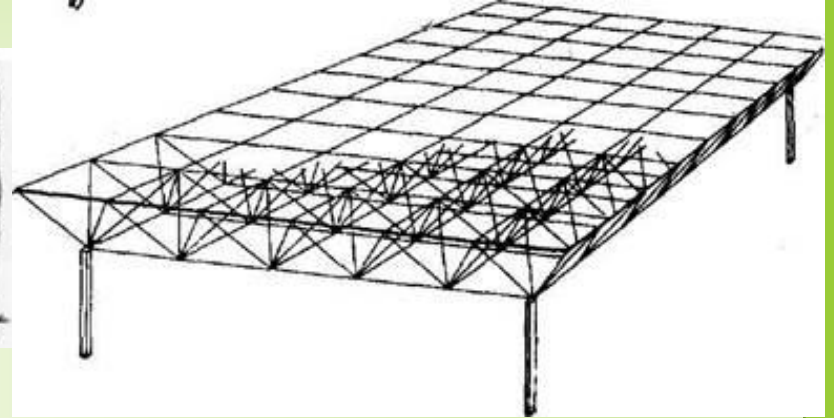
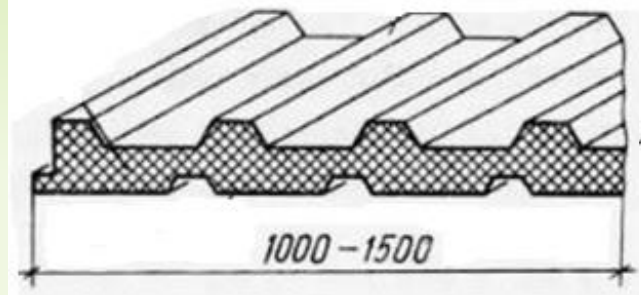


Расчетная схема испытуемой балки с эпюрами усилий

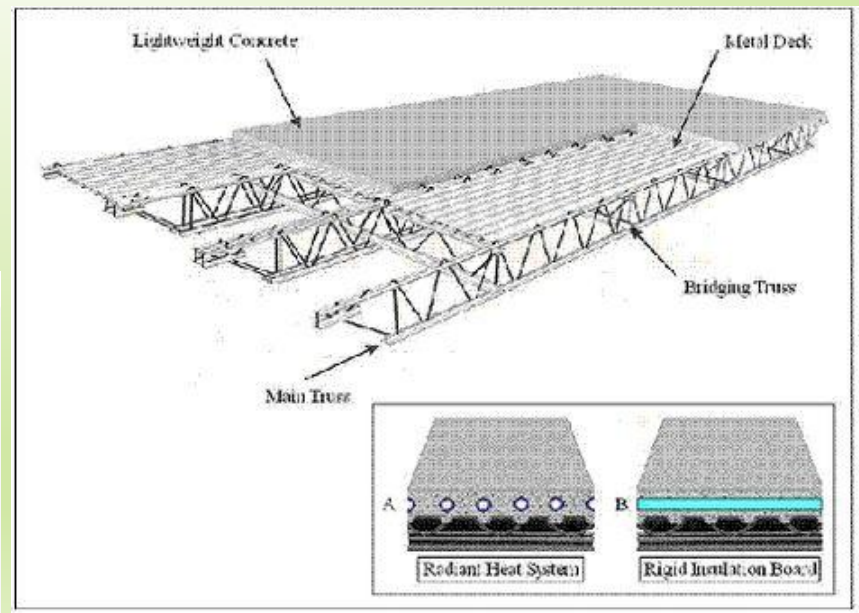
Сталепенобетонные структуры с жестким поясом



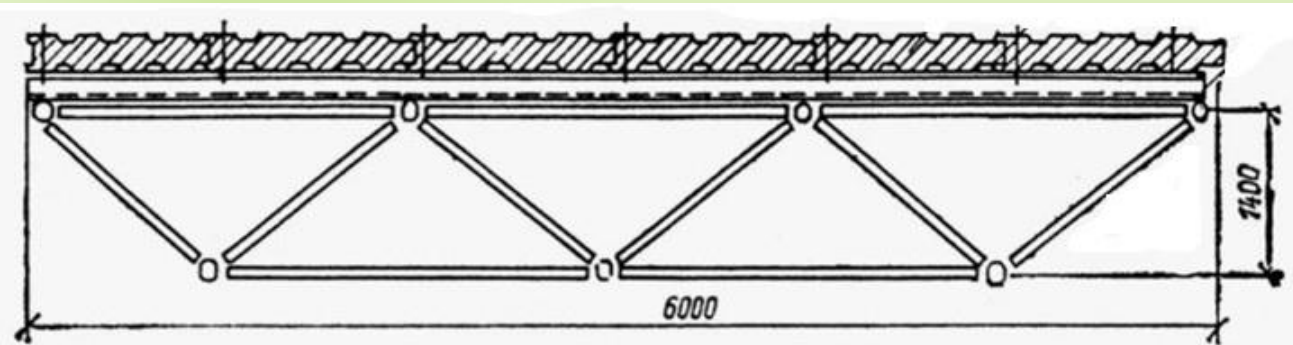
Стержневые структуры. Представляют собой систему пространственных перекрещивающихся ферм из металлических труб или прокатных профилей



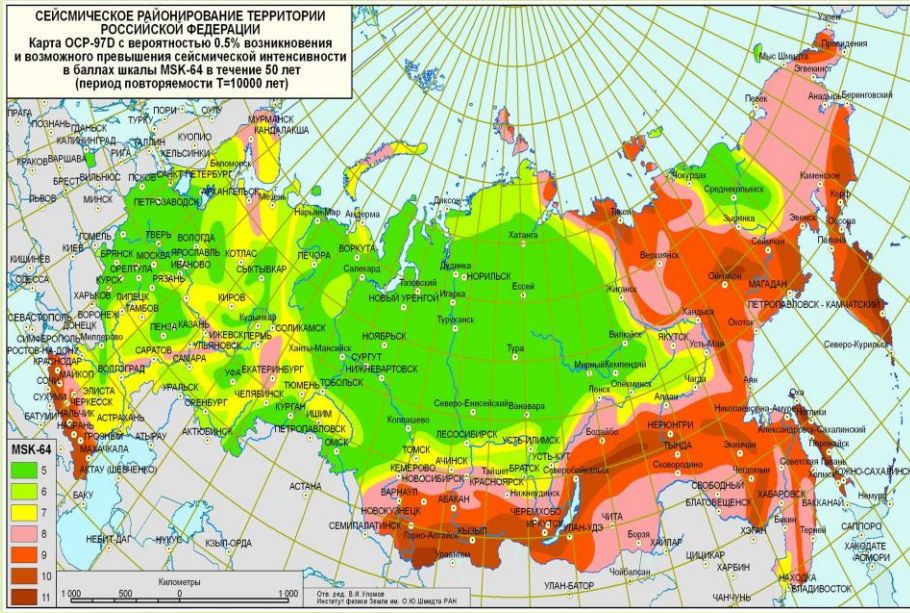
Стержневые структуры. Пенобетон заполняет внутренний объем жесткой плиты, являясь теплоизолятором и вместе с тем средой, формирующей совместную работу металлических поясов



Advanced Construction Techniques using a High-Performance Lightweight Concrete



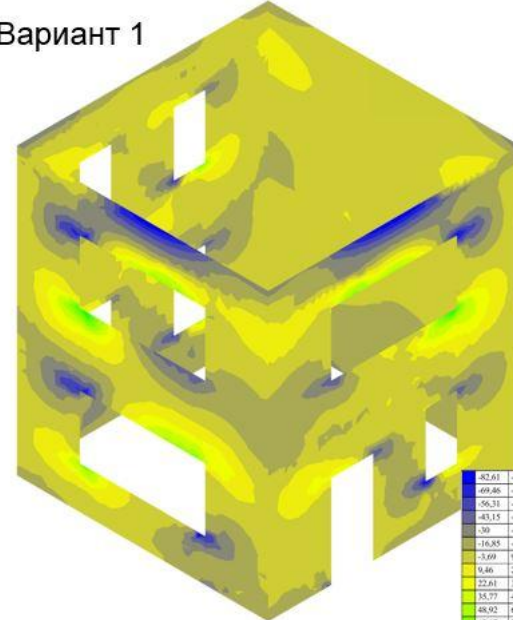
НЕСУЩИЙ ОСТОВ - СТАЛЕПЕНОБЕТОННЫЙ КОМПОЗИТ



Сейсмическое районирование России

Кирпичное здание Здание из газобетона Пенобетонный композит

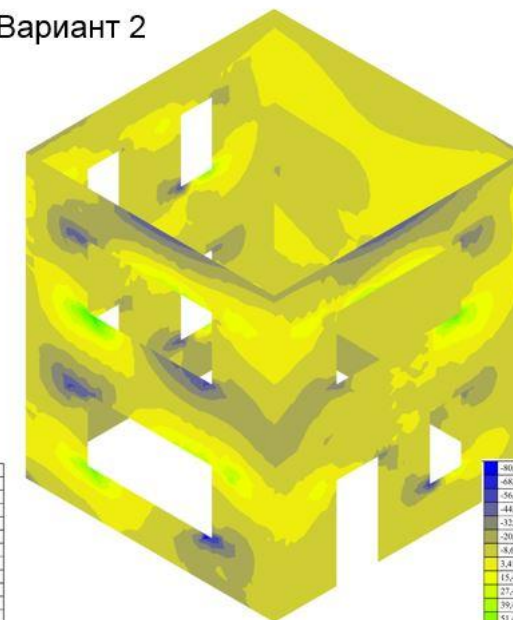
Вариант 1



-82,61	-49,46
-69,85	-56,31
-56,31	-43,15
-43,15	3,0
3,0	-16,85
-16,85	-3,69
-3,69	9,46
9,46	22,61
22,61	35,77
35,77	48,92
48,92	62,07
62,07	75,23
75,23	88,38
88,38	101,53
101,53	114,69
114,69	127,84

σ_y

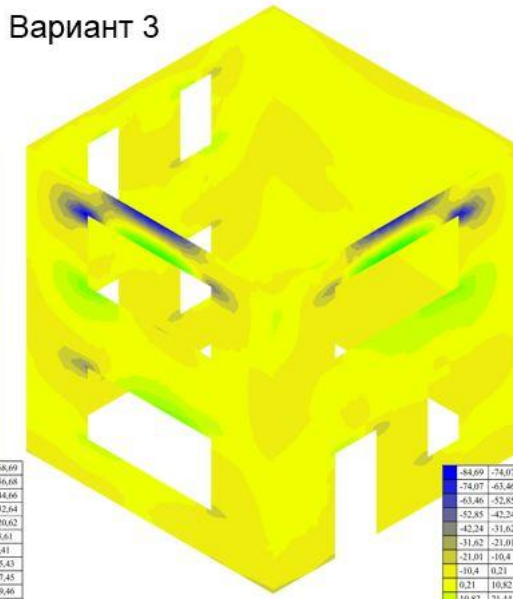
Вариант 2



-80,71	-48,69
-68,69	-56,68
-56,68	-44,66
-44,66	-32,64
-32,64	-20,62
-20,62	-8,61
-8,61	3,41
3,41	15,43
15,43	27,45
27,45	39,46
39,46	51,48
51,48	63,5
63,5	75,52
75,52	87,53
87,53	99,55
99,55	111,57

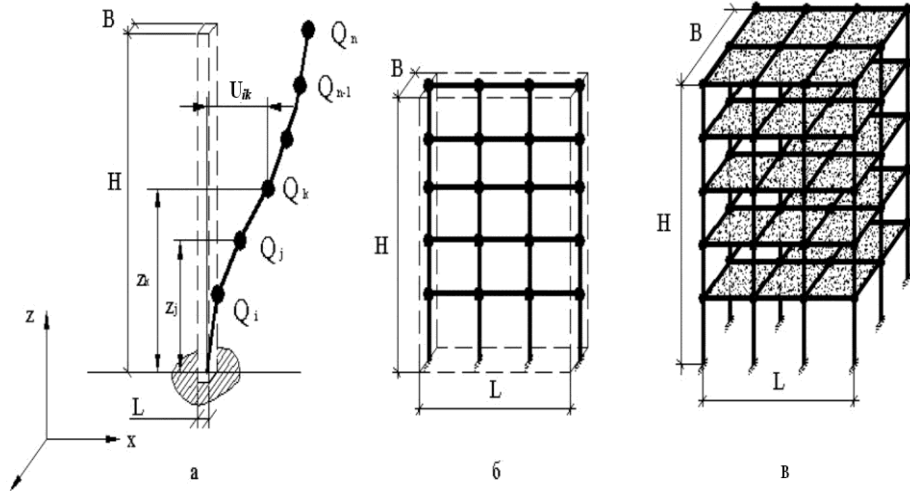
σ_y

Вариант 3



-84,69	-44,07
-74,07	-43,46
-63,46	-32,85
-52,85	-22,24
-42,24	-11,63
-31,63	-1,02
-21,02	9,59
-10,41	20,18
2,18	30,77
12,77	41,36
23,36	51,95
33,95	62,54
44,54	73,13
55,13	83,72
65,72	94,31
76,31	104,9
86,9	115,49

σ_y



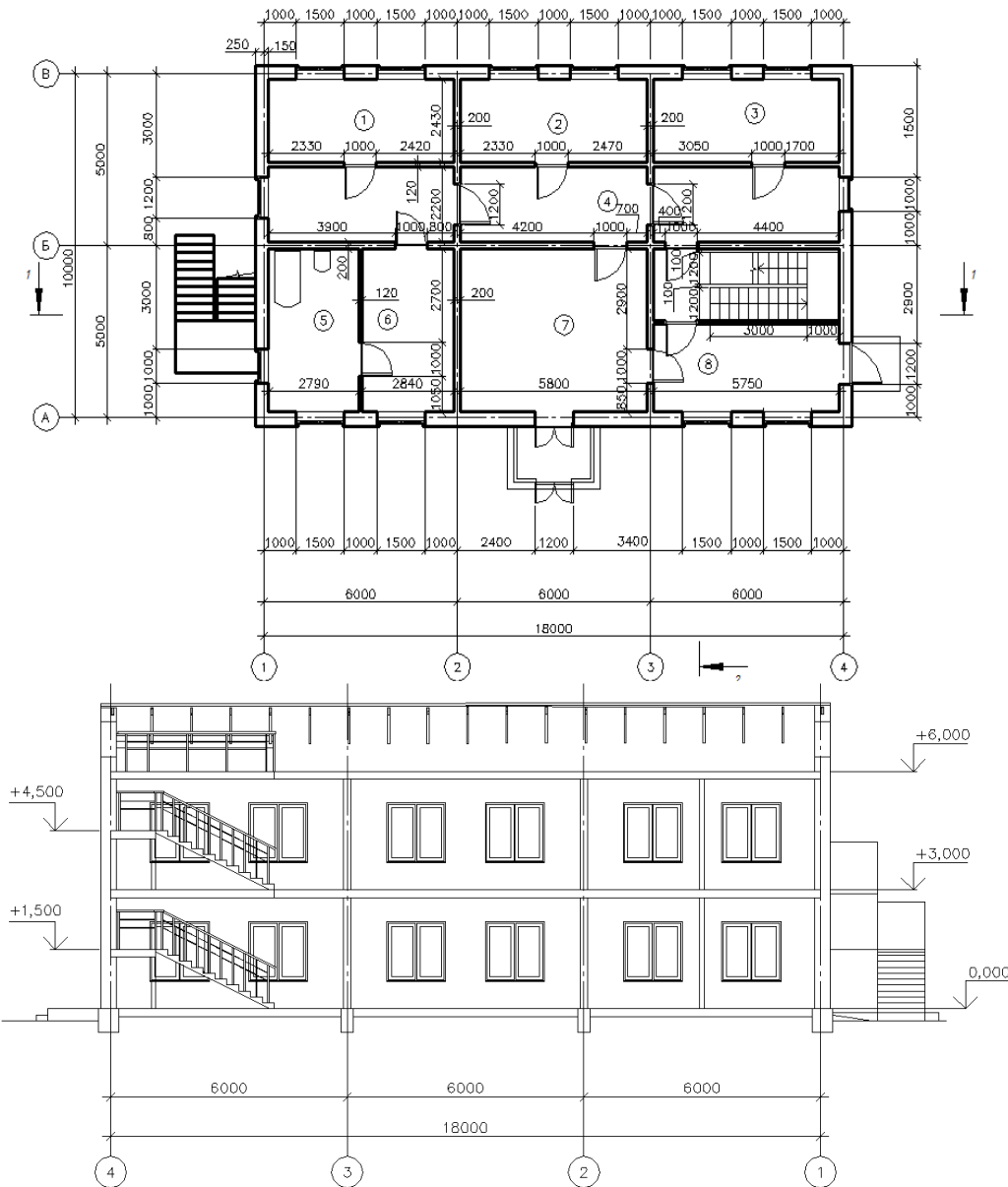
Изополю напряжений разных конструктивных схем зданий.

Здание из сталебетонного композита (ЛСБК) воспринимает сейсмическую нагрузку без существенных повреждений.

$$S_{oir} = Q_k \gamma_f \beta_i K_\varphi K_z n_{ik}$$

Горизонтальная сейсмическая нагрузка

Технико-экономическое обоснование возведения зданий из газобетона, кирпича и пенобетона



План этажа и разрез малоэтажного здания

Вариант 1 – здание с несущими стенами из газобетона.

Вариант 2 – здание кирпичное с утепленным фасадом –

Вариант 3 - Здание с техническим решением с несущим остовом – теплоизоляционным сталебетонным композитом

Преимущества строительной системы с применением сталебетонного композита:

1. Технологические: Ускорение строительных процессов достигается за счет снижения трудоёмкости отдельных операций и сокращения технологических переделов и сроков строительства в 1,5-2 раза.

2. Экономические: Удельная сметная стоимость варианта с пенобетоном на 5,9 тысяч рублей или на 17% ниже стоимости здания из газобетона и на 13,7 тысяч рублей или на 40% ниже, чем у кирпичного здания.

3. Конструкционные: Элементы каркаса находятся внутри пенобетонной стены, таким образом они защищены от коррозии и огня. Сжатые и сжато-изгибаемые лёгкие тонкостенные металлические элементы при этом приобретают повышенную устойчивость.

Выявлены оптимальные параметры и закономерности получения теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных пенобетонов. Предложена методика подбора состава пенобетона с помощью компьютерной программы на основе введения эмпирических данных по подвижности растворной смеси матрицы. Исследована структура и свойства пенобетона, произведенного по данной рецептуре.

Рассмотрен процесс и физико-химический механизм схватывания и твердения клинкерного вяжущего в присутствии ПАВ в матрице и межпоровых перегородках с точки зрения фрактально-перколяционной модели. Установлены зависимости прочности, средней плотности пенобетона от водотвердого отношения, расхода пенообразователя, которые необходимы для организации технологии и прогнозирования свойств пенобетона. Установлены зависимости прочности, средней плотности, усадки пенобетона в процессе твердения от состава и структуры пенобетона.

Предложена фрактальная модель пористой структуры пенобетона. Определены значения фрактальной характеристики как критерия оценки пористости - размерности Хаусдорфа-Безиковича. В соответствии с предложенной моделью произведена количественная оценка прочности пенобетонов соответствующих марок по плотности.

Показаны перспективные направления использования пенобетона. Предложена новое научное направление, заключающееся в совершенствовании и разработке новых энергосберегающих и экологически безопасных технологических процессов в строительстве, основанных на подтверждении совместной работы составных частей сталепенобетонного пространственного композита.

Произведен сравнительный количественный анализ эффективности строительной системы с применением сталепенобетонного пространственного композита. Показаны технологические и конструкционные преимущества а также вычислен экономический эффект строительства гражданских зданий с применением предложенной строительной системы.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ