

УДК: 666.972:620.193:519.24

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ВЫСОКОКРЕМНЕЗЁМИСТОГО ЩЕЛОЧНОГО СТЕКЛА В ПРОИЗВОДСТВЕ КРЕМНЕБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Сланевский С. И. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Исследовано влияние основных рецептурно-технологических факторов на регламентируемые свойства кремнебетона. Определены оптимальные условия утилизации пылевидных фракций высококремнезёмистого стекла.

Производство плитных кремнебетонных изделий, освоенное ранее на Кураховском ЗЖБК для сооружения газоотводящих стволов и газоходов высотных дымовых труб теплоэнергетических объектов, основано на использовании состава кремнебетона, рекомендованного Одесским инженерно-строительным институтом в 1979 году. Этот состав кремнебетона, в котором в качестве цементирующего вещества использовалось высококремнезёмистое щелочное стекло (в дальнейшем – стекло), подобран опытным путём без тщательного изучения многовариантных взаимозависимостей "состав-технология-свойство" с множеством недостаточно строго аргументированных ограничений. В частности, в рекомендуемой рецептуре кремнебетона согласно ТУ 34-48-17611-79 [1] ограничено содержание пылевидных фракций в стекле размером менее 0,315 мм в количестве не более 8 %. Неиспользуемые отходы от дробления и классификации стекла, содержание которых составляет около 30 %, влекут за собой значительное удорожание кремнебетона, так как стекло является наиболее дорогостоящим и дефицитным компонентом. Наилучшим решением вопроса утилизации отходов стекла могло бы быть полное использование их в составе вяжущей смеси для кремнебетона. Исходя из этого, была поставлена задача: определить оптимальные рецептурно-технологические условия утилизации пылевидных фракций стекла.

В качестве критерия оптимизации рецептурно-технологических условий приготовления кремнебетона принят минимальный расход стекла, обеспечивающий заданные свойства материала.

Изменяемыми рецептурно-технологическими факторами были приняты факторы, которые в значительной мере определяют регламентируемые физико-механические свойства кремнебетона, а

именно: расход стекла, процентное содержание в нём пылевидных фракций и степень дисперсности молотого кварцевого песка, выполняющего роль затравки.

Расход стекла изменялся в интервале от 180 до 300 кг/м³. Интервал варьирования обусловлен тем, что при расходе стекла ниже 180 кг/м³ наблюдается значительный спад прочности кремнебетона и повышение его водопоглощения. Увеличение же расхода стекла выше 300 кг/м³ также нецелесообразно, так как существенного улучшения технических свойств кремнебетона при этом не наблюдается.

Содержание пылевидных фракций варьировали в эксперименте в интервале от 0 до 30 %, что продиктовано производственными условиями дробления и классификации стекла.

Изменение тонкости помола затравки от 2 до 5 тыс. см²/г назначили, исходя из технологических соображений. При применении затравки с удельной поверхностью менее 2 тыс. см²/г кремнебетонные смеси становятся нетехнологичными, отличаются низкой водоудерживающей способностью, а затвердевшие бетоны при этом обладают повышенным водопоглощением и низкой прочностью. Получение удельной поверхности затравки выше 5 тыс. см²/г в производственных условиях сопряжено с дополнительными энергетическими и амортизационными затратами и целесообразно только при соответствующем обосновании.

Для построения математических моделей, отражающих влияние указанных факторов на свойства кремнебетона, был реализован трёхфакторный план типа В-3 с тремя нулевыми точками в центре плана. Факторы и их уровни варьирования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Факторы и их уровни варьирования

Факторы	Единица измерения	Уровни варьирования		
		-1	0	+1
x_1 – расход стекла (С)	кг/м ³	180	240	300
x_2 – содержание в стекле фракций менее 0,315 мм (отсев стекла – ОС)	%	0	15	30
x_3 – степень дисперсности затравки ($S_{уд}$)	тыс. см ² /г	2	3,5	5

Учитывая производственные условия формирования изделий, при всех встречающихся в эксперименте комбинациях уровней варьирования факторов жёсткость кремнебетонной смеси выдерживали постоянной и равной 30 ± 5 с по ГОСТ 1081-75.

Равножесткость кремнебетонных смесей достигалась соответствующим расходом воды, который определяли по результатам ранее

проведенного эксперимента на растворной части. При этом исходили из предположения, что бетонные смеси, содержащие равноподвижные растворные части постоянного объёма, будут обеспечивать одинаковую жёсткостью бетонной смеси. Объём растворной части в бетонных смесях был принят равным 500 л/м^3 .

При постоянном объёме растворной части содержание кварцитового щебня фракции 5-20 мм в бетонных смесях также было постоянным и составляло 1325 кг/м^3 .

Поскольку влияние расхода затравки в эксперименте не рассматривалось, её расход был принят постоянным и равным 250 кг/м^3 .

При заданных содержаниях щебня (Щ), затравки (З), стекла (С) и воды (В) расход днепровского рядового кварцевого песка (П) определяли как расход материала, дополняющего объём бетона до 1000 л.

Матрица планирования эксперимента и расходы компонентов кремнебетонной смеси приведены в табл. 2.

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента и расходы компонентов кремнебетонной смеси

№ опы- тов	Факторы			Компоненты кремнебетонной смеси					
	С	ОС	$S_{уд}$	Стекло фракции 0,315- 1,25 мм	Стекло фракции менее 0,315 мм	Песок молотый (затравка)	Песок рядовой	Щебень	Вода
	x_1	x_2	x_3						
1	-	-	-	180	—	250	491	1325	142
2	+	-	-	300	—	250	364	1325	138
3	-	+	-	126	54	250	486	1325	144
4	+	+	-	210	90	250	358	1325	140
5	-	-	+	180	—	250	528	1325	128
6	+	-	+	300	—	250	393	1325	127
7	-	+	+	126	54	250	550	1325	120
8	+	+	+	210	90	250	414	1325	119
9	-	0	0	153	27	250	507	1325	138
10	+	0	0	255	45	250	369	1325	136
11	0	-	0	240	—	250	433	1325	138
12	0	+	0	168	72	250	430	1325	139
13	0	0	-	204	36	250	425	1325	141
14	0	0	+	204	36	250	462	1325	127
15	0	0	0	204	36	250	441	1325	135

Исследования проводили на образцах-кубах с размером ребра 10 см. Автоклавную обработку образцов проводили по режиму 3+21+4+4 ч, где: 3 ч – подъём температуры и давления; 21 ч – выдержка изделий при температуре 187°С и давлении 1,2 МПа; 4 ч – снижение давления до атмосферного; 4 ч – охлаждение в автоклаве при атмосферном давлении.

Полученные образцы подвергали испытаниям по стандартным методикам на прочность при сжатии ($R_{сж}$, МПа), водопоглощение (W , %) и водостойкость (K , %). Результаты эксперимента приведены в табл. 3.

Таблица 3. Матрица планирования и результаты эксперимента

№№ опытов	Факторы			Водопотребность, л/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Водопогло- щение, %	Водостойкость, %
	С	ОС	S _{уд}				
	x ₁	x ₂	x ₃				
1	–	–	–	142	54,7	3,5	48
2	+	–	–	138	99,3	1,6	71
3	–	+	–	144	65,9	2,9	55
4	+	+	–	140	90,3	2,1	60
5	–	–	+	128	75,3	3,1	56
6	+	–	+	127	107,0	1,5	86
7	–	+	+	120	79,8	2,6	54
8	+	+	+	119	131,9	1,3	79
9	–	0	0	138	73,5	2,7	48
10	+	0	0	136	105,5	1,6	82
11	0	–	0	138	83,8	2,4	61
12	0	+	0	139	101,5	2,3	60
13	0	0	–	141	89,8	2,6	58
14	0	0	+	127	109,7	2,0	70
15	0	0	0	135	102,2	2,1	76
16	0	0	0	136	96,4	1,8	65
17	0	0	0	137	99,3	2,1	70

По полученным результатам с использованием ЭВМ построены математические модели исследуемых свойств. Коэффициенты математических моделей и их статистические оценки приведены соответственно в табл. 4 и 5.

Все полученные модели являются адекватными. С учётом значимых коэффициентов модели имеют вид:

водопотребность кремнебетонной смеси, л/м³: $V=136,6-1,2x_1-16,1x_2-8,4x_3+0,8x_1x_3-2,5x_2x_3-3,9x_3^2$;

прочность кремнебетона, МПа: $R_{сж} = 98,2 + 18,5x_1 + 4,9x_2 + 10,4x_3 - 3,4x_2x_3 - 7,9x_1^2 - 4,8x_2^2$;

водопоглощение, %: $W = 2,11 - 0,67x_1 - 0,09x_2 - 0,22x_3 + 0,18x_1x_2$;

водостойкость, %: $K = 67 + 11,7x_1 + 5,3x_3$.

По полученным моделям построены графики, отражающие характер и степень влияния исследуемых переменных на водопотребность кремнебетонной смеси, на прочность, водостойкость и водопоглощение кремнебетона, а также изолинии свойств.

Таблица 4. Коэффициенты математических моделей

Обозначения коэффициентов	Водопотребность, л/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Водопоглощение, %	Водостойкость, %
B_0	136,6	98,2	2,11	67
B_1	- 1,2	18,5	-0,67	11,7
B_2	- 1,1	4,9	-0,09	-1,4
B_3	- 8,4	10,4	-0,22	5,3
B_{12}	0	0	0,18	-2,9
B_{13}	0,8	1,9	0,03	3,4
B_{23}	- 2,5	3,4	-0,08	-0,6
B_{11}	- 0,9	-7,9	-0,04	0,5
B_{22}	0,6	-4,8	0,16	-4
B_{33}	- 3,9	2,3	0,11	-0,5

Таблица 5. Статистические оценки математических моделей

Обозначения статистических оценок	Водопотребность, л/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Водопоглощение, %	Водостойкость, %
ΔB_0	0,85	2,5	0,15	4,7
ΔB_i	0,63	1,9	0,11	3,5
ΔB_{ij}	0,71	2,1	0,12	3,9
ΔB_{ii}	1,22	3,6	0,21	6,7
$F_{ад}$	3,8	5,6	1,5	1,3

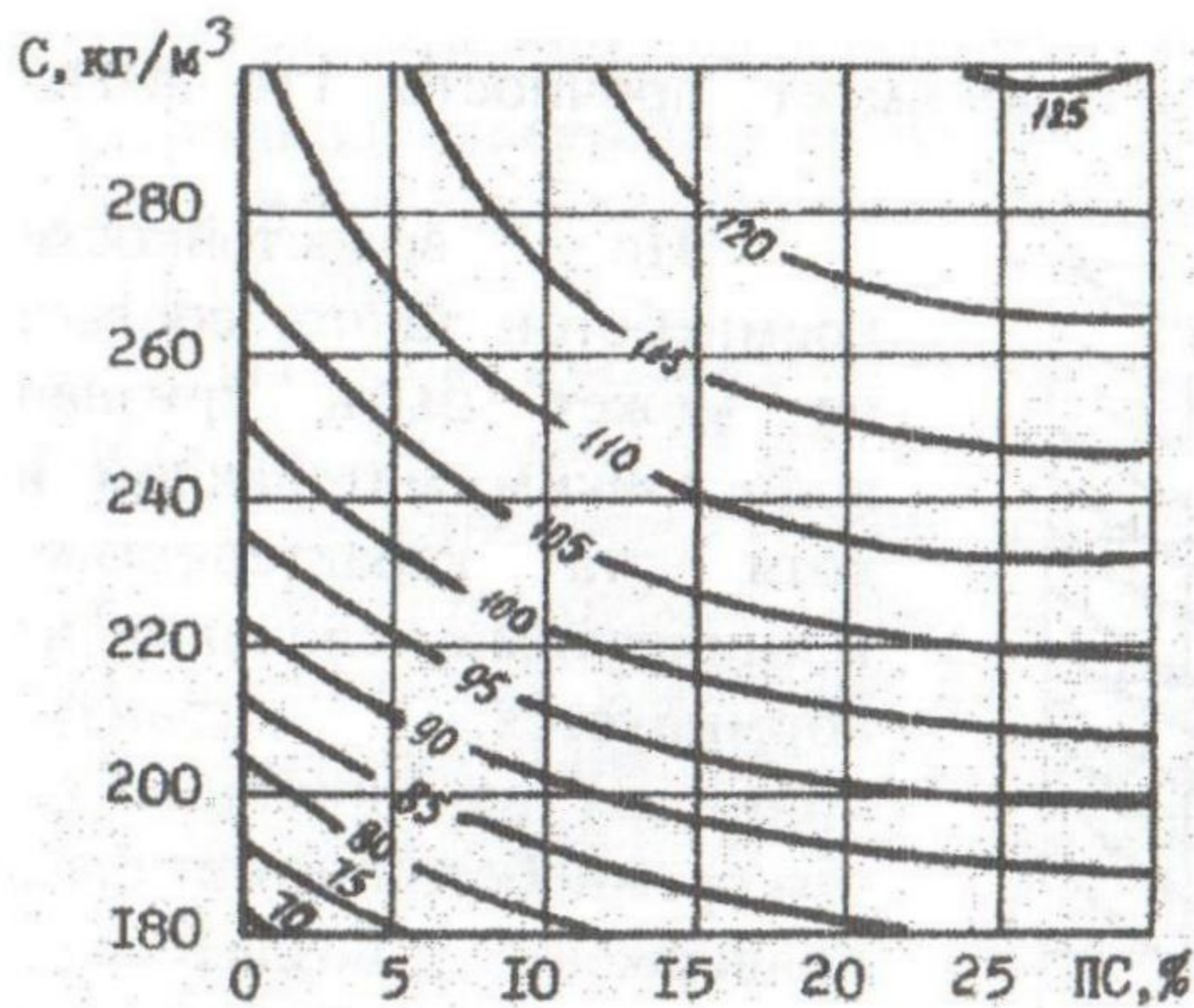


Рис. 1. Изолинии прочности кремнебетона при степени дисперсности затравки $5000 \text{ см}^2/\text{г}$

чем энергия связей между атомом кислорода и атомами кальция, алюминия, железа и пр., характерными для цементных бетонов. При полиминеральном составе прочность бетона определяется минералом, энергия связей между атомами которого меньше других.

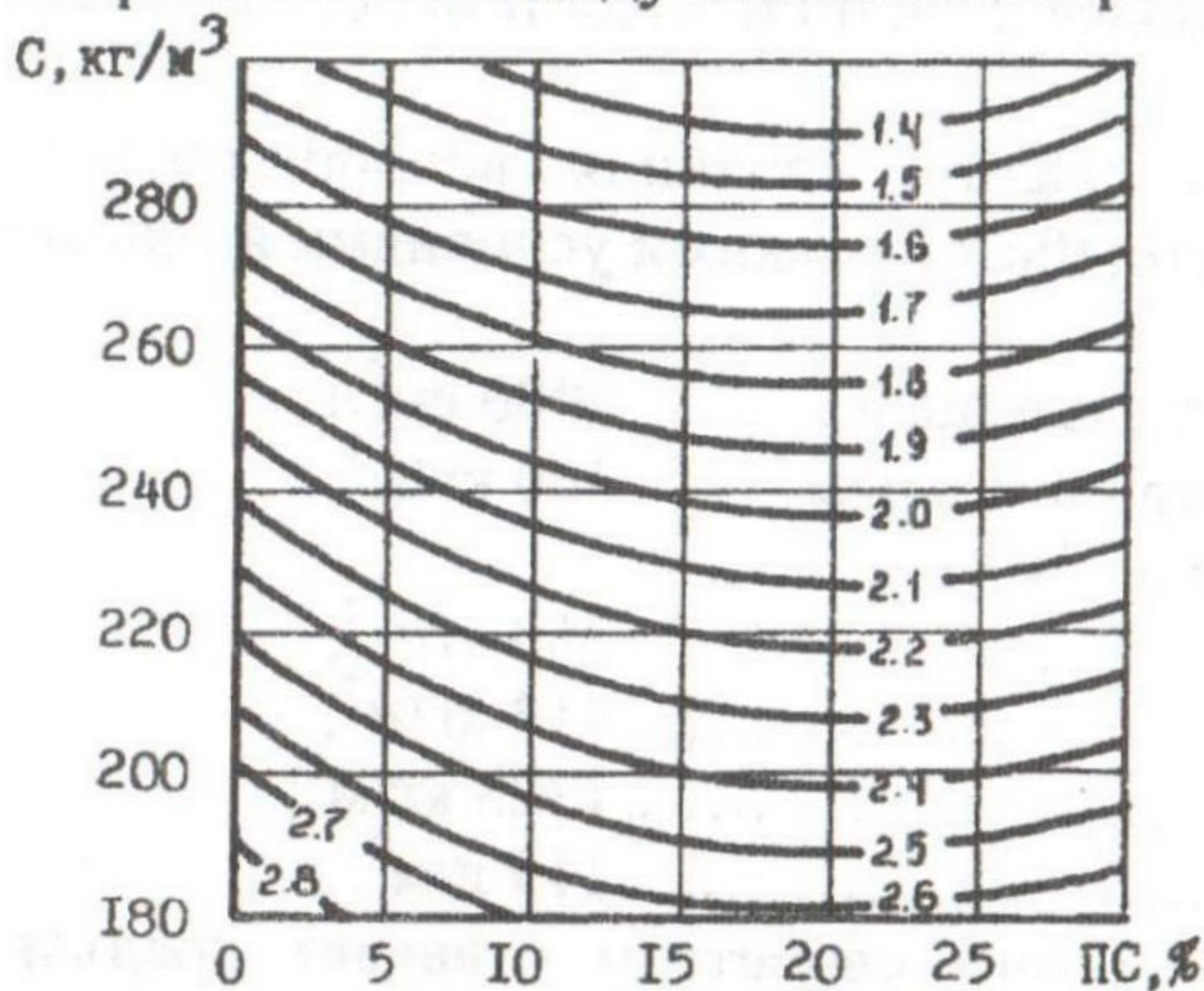


Рис. 2. Изолинии водопоглощения кремнебетона при степени дисперсности затравки $5000 \text{ см}^2/\text{г}$

приготовления кремнебетона могут быть признаны (рис. 2): степень дисперсности затравки $5000 \text{ см}^2/\text{г}$; расход стекла с содержанием в нём пылевидных фракций до 30 % $245 \text{ кг}/\text{м}^3$; расход затравки $250 \text{ кг}/\text{м}^3$; расход песка $473 \text{ кг}/\text{м}^3$; расход щебня $1325 \text{ кг}/\text{м}^3$; расход воды $121 \text{ л}/\text{м}^3$.

По своим прочностным показателям кремнебетон рядового состава при прочих равных условиях в 2-3 раза превышает обычные цементные бетоны (рис. 1), что обусловлено, с одной стороны, тем, что цементирующая связка кремнебетона мономинеральна по составу и представлена кремнезёмом, причём энергия связи атомов кремния и кислорода выше

Оптимальные рецептурно-технологические параметры приготовления кремнебетона определяли по изолиниям исследуемых свойств, построенным в осях "расход стекла - содержание пылевидных фракций" при различной степени дисперсности затравки.

Для обеспечения водопоглощения кремнебетона менее 2 % оптимальными условиями

кремнебетон приведенного состава имеет прочность 116 МПа, водостойкость 68 %.

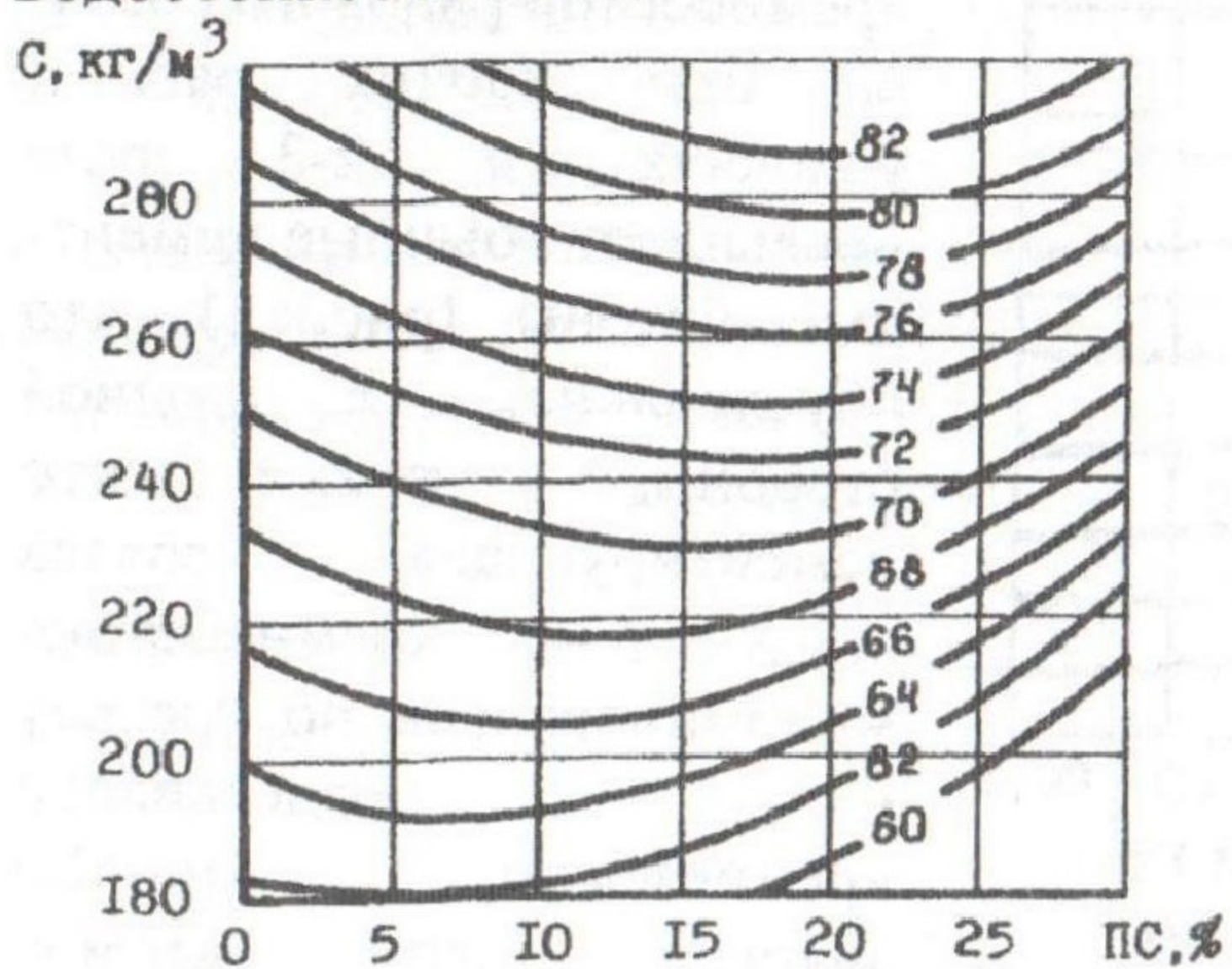


Рис. 3. Изолинии водостойкости кремнебетона при степени дисперсности затравки 5000 см²/г

кремнебетона, которые не только обеспечивали бы прочность не менее 50 МПа и водопоглощение не более 2 %, но и водостойкость не менее 80 %.

Исходя из совместного анализа изолиний водопоглощения, прочности и водостойкости кремнебетона такими условиями являются (рис. 3):

- степень дисперсности затравки 5000 см²/г;
- расход стекла с содержанием в нём пылевидных фракций до 30 % 300 кг/м³;
- расход затравки 250 кг/м³;
- расход песка 414 кг/м³;
- расход щебня 1325 кг/м³;
- расход воды 119 л/м³.

При этом кремнебетон по своим свойствам отвечает предъявляемым требованиям и характеризуется следующими показателями:

- прочность при сжатии 132 МПа;
- водостойкость 80 %;
- водопоглощение 1,4 %;

Данный состав кремнебетона внедрён в производство и получен значительный экономический эффект, в основном, за счёт утилизации пылевидных фракций стекла и снижения общего его расхода.

На предложенный состав кремнебетона получено авторское свидетельство об изобретении.

По водостойкости кремнебетон такого состава не может быть признан водостойким материалом и хотя эта характеристика техническими условиями не нормируется, однако принимая во внимание то, что кремнебетон может быть подвержен воздействию воды (например, на строительной площадке) было принято решение определить компромиссные рецептурно-технологические условия приготовления

При степени дисперсности затравки $5000 \text{ см}^2/\text{г}$ повышение содержания пылевидных фракций в стекле до 30 % не только не ухудшает строительно-технических свойств кремнебетона, но и значительно их улучшает.

Из рассматриваемых факторов наибольшее влияние на исследуемое свойство оказывает степень дисперсности молотого песка.

С повышением степени дисперсности затравки от 2 до 5 тыс. $\text{см}^2/\text{г}$ водопотребность кремнебетонной смеси не только не повышается, как следовало бы ожидать исходя из традиционных представлений, а наоборот, понижается на величину от 10 до $25 \text{ л}/\text{м}^3$, что влечёт за собой и значительное улучшение свойств кремнебетона.

Литература

1. ТУ 34-48-17611-79. Кремнебетон для наружных газоотводящих трактов ТЭС.
2. Кирилишин В.П. Кремнебетон. К.: Будівельник, 1975.-110с.