

Вадим Викторович ОПЕКУНОВ,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры  
"Строительные материалы  
и конструкции"  
Гродненского государственного  
университета им. Я. Купалы

## ИЗДЕЛИЯ ИЗ ЦЕМЕНТНЫХ ПЕРЛИТОБЕТОНОВ

### PRODUCTS FROM PERLITE CONCRETE

Рассмотрены некоторые аспекты проблемы получения сборных изделий из пористого бетона в виде цементного перлитобетона. Отмечена возможность применения теплоизоляционных изделий из цементного перлитобетона в энергоэффективном строительстве.

Some aspects of the manufacturing process of precast concrete products from porous concrete in form of perlite concrete have been described. The possibility of using heat insulating products from perlite concrete in energy effective construction was discussed in the paper.

#### ВВЕДЕНИЕ

Энергоэффективное строительство возможно при массовом использовании изделий из пористых композиционных материалов (ПКМ), обеспечивающих сопротивление теплопередаче  $R_T$  ограждающих конструкций более  $3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . Такой уровень  $R_T$  требует применения в строительных конструкциях, например наружных стен, ПКМ в виде пористых бетонов.

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОРИСТЫХ БЕТОНАХ

Пористые бетоны — необжиговые (с температурой структурообразования  $T < 573 \text{ К}$ ), твердые ПКМ с зернистой или ячеистой макроструктурой и общей пористостью не менее 50 % [1, 2]. Классификация ПКМ по параметру средней плотности  $\rho$  и основная номенклатура изделий из ПКМ (в основном различных ячеистых бетонов, перлитобетонов) рассмотрены в работах [1–3]. Эксплуатация сборных и монолитных изделий из ПКМ возможна как на строительных объектах, так и в условиях тепловых установок (эксплуатационная влажность  $W_3 = 0$ ). Пористые бетоны с улучшенными физико-техническими свойствами при  $\rho < 600 \text{ кг}/\text{м}^3$  имеют необходимые уровни несущей способности и теплотехнической однородности, что позволяет при толщине однослойной стены до 600 мм обеспечить заданные значения  $R_T$  [4].

Наибольшее распространение в практике энергоэффективного строительства получили сборные изделия из газобетонов автоклавного твердения.

#### МОДЕЛИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ПРОЧНОСТИ

Наряду с ячеистыми бетонами все большее применение в странах СНГ находят стеновые и теплоизоляционные изделия из цементных перлитобетонов. Основы технологии получения цементных перлитобетонов с улучшенными физико-техническими свойствами изложены в [3]. Достоверно установлено, что при  $\rho < 500 \text{ кг}/\text{м}^3$  цементные перлитобетоны отличаются от газобетонов автоклавного твердения повышенными значениями одно-

родности средней плотности  $D_m$ , уменьшенной анизотропией теплопроводности  $A_i$  и прочности  $A_R$ .

В общем случае качественная модель теплопроводности  $\lambda$  пористых бетонов может быть представлена в виде

$$\lambda = f(\rho, P, W_3, T, C, D, A), \quad (1)$$

где  $P$  — параметр пористости структуры;  
 $W_3$  — эксплуатационная влажность;  
 $T$  — температура структурообразования;  
 $C$  — степень завершенности микро(нано)структурообразования;  
 $D$  — степень однородности структуры;  
 $A$  — степень изотропности структуры.

Исходя из данных теоретических и экспериментальных исследований, модель прочности для цементных перлитобетонов принимает вид

$$R = f(P_{(1,2)}, R_a, R_m, R_c, \rho), \quad (2)$$

где  $P_1$  — характеристика распределения пор в цементной матрице;  
 $P_2$  — характеристика распределения пор во вспученном перлитовом песке (ВПП);  
 $R_a$  — характеристика адгезионной прочности в системе "ВПП — цементный камень";  
 $R_m$  — характеристика когезионной прочности цементного камня;  
 $R_c$  — характеристика когезионной прочности ВПП.

В цементных перлитобетонах имеет место соотношение  $R_m > R_a \gg R_c$ . Поэтому возможно регулирование их сорбционной влажности  $W_c$  путем пассивации поверхности ВПП и уменьшения  $R_a$  до уровня  $R_a \cong R_c$  за счет гидрофобизации ВПП (рис. 1).

С применением перлитобетона всегда связана проблема повышения сопротивления теплопередаче  $R$  и уменьшения эксплуатационной влажности  $W_3$ . Уровень  $W_3$  материалов (может быть уменьшен путем ги-

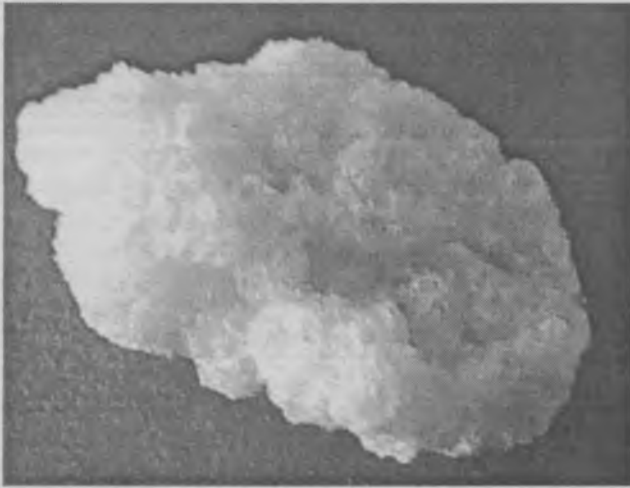


Рис. 1. Частица вспученного перлитового песка размером 0,8 мм из сырья Закарпатья

дрофобизации), например стен, определяет не только физико-механические, но и теплофизические свойства конструкций.

Сорбционная влажность  $W_c$  в общем случае, как и  $W_s$ , зависит от множества факторов, основными из которых являются: природа материала  $\chi$ , плотность  $\rho$ , характер поровой структуры  $P$ , поверхность сорбции  $\zeta$  и степень завершенности структурообразования  $C$ , т. е. можно записать

$$W_c = f(\chi, \rho, P, \zeta, C). \quad (3)$$

Оценить степень гидрофобности пористого бетона можно с помощью коэффициента гидрофобности  $\alpha$  по формуле

$$\alpha = (W_{c1} / W_{c2}) > 1, \quad (4)$$

где  $W_{c1}$ ,  $W_{c2}$  — соответственно сорбционная влажность (по СТБ 4.201 [5] — сорбционное увлажнение) бетона до и после гидрофобизации.

### ЦЕМЕНТНЫЕ ПЕРЛИТОБЕТОНЫ С УЛУЧШЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ

С целью повышения степени гидратации и уменьшения расхода вяжущего в цементных перлитобетонах следует производить активацию цементной суспензии в присутствии ПАВ-гидрофобизатора, наличие которого может привести к уменьшению  $R_m$  до допустимого уровня  $R_m \cong R_a$ . Разрушение теплоизоляционных цементных перлитобетонов происходит, как правило, по зерну ВПП, так как  $R_a \gg R_c$ .

Наличие ВПП (параметр  $\zeta$  существенно зависит от параметров перлитовой горной породы — сырья для производства ВПП) вносит существенный вклад в характер пористости цементных перлитобетонов и перлитобетонных изделий.

Сборные перлитобетонные изделия в виде плит и блоков производят в основном по прессовой технологии. Прессование сырьевых смесей перлитобетонных изделий возможно как в вертикальном направлении, так и в горизонтальном. Коэффициент однородности средней плотности  $D_p$  и степень изотропности  $A_n$  рассчитывали по методике [2].

Для технологических расчетов  $D_p$  использовали схемы формования (прессования), описанные в [3]. Установлено, что двустороннее прессование в горизонтальном на-

правлении не позволяет обеспечить необходимую однородность перлитобетонных изделий в вертикальном направлении (в этом случае  $D_p = (0,84-0,87)$ ). Наиболее эффективно двустороннее вертикальное сжатие при минимальных усилиях прессования, позволяющее получать перлитобетонные изделия с наилучшей однородностью средней плотности как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях. В этом случае  $D_p = (0,90-0,92)$ .

При изготовлении монолитных перлитобетонных изделий (формование в опалубке) сжатие смеси цементных перлитобетонов практически отсутствует (коэффициент сжатия формовочной смеси близок к 1,00; параметр  $D_p = (0,95-0,97)$ ), а имеет место переупаковка частиц ВПП в соответствии с известными закономерностями формирования макроструктур из плотных сфер с различными укладками.

Расчеты и эксперименты показывают, что для "склеивания" сфер в местах контакта (для частичного заполнения межзерновых пустот) в объеме  $1 \text{ м}^3$  требуется 70–100 кг вяжущего (например, бездобавочного цемента). При переходе к плотно упакованной структуре цементных перлитобетонов следует учитывать, что часть вяжущего (самые активные частицы цемента размерами менее 5–10 мкм) неизбежно будет заполнять внутренние пустоты (открытые каналы, крупные поры) частиц ВПП размером более 80–140 мкм. Отсюда следует, что распространенные схемы изготовления перлитобетонных изделий, предполагающие смешение компонентов "цемент + ВПП" с применением сухого или полусухого ВПП (ВПП содержит сорбированную из воздуха влагу), являются нерациональными.

Кроме того, вследствие увеличения массы, наблюдается повышенное количество разрушенных частиц ВПП при их полусухом перемешивании с цементом перед увлажнением. При такой технологии подготовки смесей "ВПП + цемент" происходит фактическое изменение исходного заданного фракционного состава зерен ВПП уже на стадии перемешивания компонентов в смесителе до подачи среды затворения (как правило — воды).

Изучен процесс изменения исходной дисперсности частиц ВПП в процессе его перемешивания и прессования, что отражено в таблицах 1–6.

Из данных таблицы 7 видно, что вследствие "самоизмельчения" происходит увеличение насыпной плотности ВПП с исходной насыпной плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$  — до 1,31 раза;  $100 \text{ кг/м}^3$  — до 1,23 раза;  $120 \text{ кг/м}^3$  — до 1,17 раза.

Последующее увлажнение сухой перлитобетонной смеси повышает массу частиц ВПП, содержащих зацементированные частицы цемента, что также приводит к их дальнейшему разрушению в процессе перемешивания.

Из полученных данных видно, что при рассмотренных условиях формования прессованных перлитобетонных изделий при минимальных усилиях прессования и коэффициенте сжатия смеси 1,5–2,0 (см. таблицы 5, 6) размер исходных частиц ВПП более 315 мкм является предпочтительным.

Более перспективной представляется литьевая технология производства перлитобетонных изделий или технология формования изделий при малых значениях коэффициента сжатия формовочной смеси. При этом получены качественные перлитобетонные изделия с плотностью  $\rho = (130-160) \text{ кг/м}^3$ . В этом случае контактная зона цементных перлитобетонов представлена несплошными участками типа "спаек" из продуктов гидратации клинкерных минералов.

Таблица 1. Дисперсный состав различных ВПП

Разновидность ВПП	Значение показателя при средних размерах частиц, мкм				
	Менее 140	140–315	315–630	630–1250	Более 2500
№ 1 (мелкий)	17	29	45	9	0
№ 2 (средней крупности)	8	38	26	28	0
№ 3 (крупный)	6	27	22	38	7

Таблица 2. Дисперсный состав ВПП № 1 после перемешивания в смесителе СО-46А

Длительность перемешивания ВПП № 1, с	Содержание частиц ВПП, мас. %, при средних размерах частиц, мкм				
	Менее 140	140–315	315–630	630–1250	Более 2500
30	25	29	40	6	0
60	31	33	32	4	0
90	52	23	21	4	0

Таблица 3. Дисперсный состав ВПП № 2 после перемешивания в смесителе СО-46А

Длительность перемешивания ВПП № 2, с	Содержание частиц ВПП, мас. %, при средних размерах частиц, мкм				
	Менее 140	140–315	315–630	630–1250	Более 2500
30	11	52	20	17	0
60	19	56	13	12	0
90	28	57	7	8	0

Таблица 4. Дисперсный состав ВПП № 3 после перемешивания в смесителе СО-46А

Длительность перемешивания ВПП № 3, с	Содержание частиц ВПП, мас. %, при средних размерах частиц, мкм				
	Менее 140	140–315	315–630	630–1250	Более 2500
30	8	52	18	22	0
60	11	63	14	12	0
90	15	75	7	3	0

Таблица 5. Дисперсный состав ВПП после вертикального прессования при коэффициенте сжатия 1,5

ВПП	Содержание частиц ВПП, мас. %, при средних размерах частиц, мкм				
	Менее 140	140–315	315–630	630–1250	Более 2500
№ 1	39	36	23	2	0
№ 2	18	47	16	19	0
№ 3	14	40	24	22	0

Таблица 6. Дисперсный состав ВПП после вертикального прессования при коэффициенте сжатия 2,0

ВПП	Содержание частиц ВПП, мас. %, при средних размерах частиц, мкм				
	Менее 140	140–315	315–630	630–1250	Более 2500
№ 1	42	47	11	0	0
№ 2	31	58	7	4	0
№ 3	29	40	17	14	0

Таблица 7. Влияние длительности механического сухого перемешивания на насыпную плотность ВПП

Насыпная плотность ВПП, кг/м <sup>3</sup>	Длительность сухого перемешивания, с			
	60	120	180	240
80	89	93	99	105
100	105	109	114	123
120	120	127	130	134

Общее количество неорганического клея (цементной вяжущей системы) должно быть таким, чтобы обеспечить качественное омоноличивание мест контакта частиц ВПП. При этом неизбежно, что часть вяжущего будет вовлекаться в пустоты частиц ВПП. Отсюда следует, что целесообразно использовать прием, который способствовал бы коагуляции открытых

пор зерен ВПП на этапе их подготовки перед смешением с вяжущей системой. Для этого достаточно применить поверхностную обработку ВПП гидрофобными жидкостями (например, эмульсией жидкости 136-157-М). Гидрофобизация зерен ВПП без термического закрепления гидрофобизатора обеспечит необходимый уровень  $R_a$ .

Эксперименты показали, что для получения цементных перлитобетонов с улучшенными физико-техническими свойствами при уменьшенном расходе вяжущего необходимо применять способы повышения активности цемента  $R_m$ , то есть известные методы его физико-химической активации в составе вяжущей системы [3, 4]. Один из вариантов производства перлитобетонных изделий с улучшенными физико-техническими свойствами и основы прогрессивной раздельной технологии описаны в [3].

При раздельной технологии общая масса воды ( $V$ ) в формовочной смеси для изготовления перлитобетонных изделий определяется из выражения

$$V = V_{\text{вс}} + V_{\text{дс}}, \quad (5)$$

где  $V_{\text{вс}}$  — масса воды в цементной вяжущей системе;  
 $V_{\text{дс}}$  — масса воды в дисперсной системе на основе ВПП.

При этом масса воды в цементной вяжущей системе  $V_{\text{вс}}$  определяется по формуле

$$V_{\text{вс}} = V_{\text{кр}} + V_{\text{своб}}, \quad (6)$$

где  $V_{\text{кр}}$  — масса воды, предназначенной для образования кристаллогидратов при гидратации фаз, входящих в состав цемента (клинкера и гидравлических добавок) массой  $M_1$  (для приближенных расчетов можно принять  $V_{\text{кр}} \approx 0,2M_1$ );  
 $V_{\text{своб}}$  — масса свободной воды.

Заводская практика производства прессованных перлитобетонных изделий показала, что следует придерживаться условия

$$V \leq \mu \cdot M_2 \cdot W, \quad (7)$$

где  $M_2$  — масса исходного сухого ВПП;  
 $W$  — водопоглощение ВПП;  
 $\mu \leq 1$  — эмпирический коэффициент, характеризующий способ формования (прессовый или литьевой), уровень  $W_c$ , состав цементных перлитобетонов (например, при прессовой технологии производства негидрофобизированных перлитобетонных изделий  $\mu = 1$ ).

Таблица 8

Цементный перлитобетон и способ производства изделий	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup> , бетона				
	теплоизоляционного			теплоэффективного	конструкционного
	Менее 300	300–400	400–500	500–800	Более 800
Негидрофобизированный; И; ПР; МО; М	ТП, ТВ, З	ТП, ТВ, З	ТП, ТВ	БСМВ	БСМН, БСМВ, П
Гидрофобизированный; И; ПР; МО; М	ТФ, ТК, З	ТФ, ТК, З	БСМН, БСМВ, ТФ, ТК	БСМН, БСМВ	БСМН, БСМВ, П

*Обозначения:*  
БСМН — блоки стеновые мелкие для наружных стен;  
БСМВ — блоки стеновые мелкие для внутренних стен;  
П — плиты для перегородок мелкогабаритные;  
З — звуковая изоляция;  
ТП — тепловая изоляция промышленного оборудования при температуре эксплуатации до 700 °С;  
ТФ — наружная тепловая изоляция фасадов;  
ТВ — внутренняя тепловая изоляция стен;  
ТК — тепловая изоляция внутри каменной кладки;  
МО — изделия, получаемые с применением мобильного оборудования;  
И — изделия, получаемые формованием в индивидуальных формах (кассетах);  
ПР — изделия, получаемые прессованием;  
М — возможность применения бетона в монолитном строительстве.

При изготовлении перлитобетонных изделий по раздельной технологии в результате использования модифицированного ВПП при смешении с активированной цементной вяжущей системой вовлечения наиболее активной части цементной суспензии во внутренние пустоты частиц ВПП не произойдет (параметр  $W$  уменьшен), что в итоге уменьшит расход вяжущего и существенно улучшит основные деформативные свойства перлитобетона. Присутствие избыточного количества воды в формовочной смеси позволяет рекомендовать для отверждения цементных перлитобетонов сушку.

Рекомендуемая для производства номенклатура перлитобетонных изделий из цементных перлитобетонов с улучшенными физико-техническими свойствами представлена в таблице 8, а сравнительные физико-технические свойства теплоизоляционных бетонов — в таблице 9.

В таблице 10 представлены данные экспертных оценок влияния основных факторов на прочность цементного негидрофобизированного перлитобетона, изготовленного по прогрессивной раздельной технологии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие в структуре цементных перлитобетонов жесткого пространственного каркаса из частиц ВПП способствует (например, по сравнению с газобетоном автоклавного твердения) уменьшению анизотропии прочности, усадки при высыхании, а гидрофобизация поверхностей ВПП уменьшает эксплуатационную влажность перлитобетонных изделий (см. таблицу 9).

Практика применения изделий из ячеистых бетонов и перлитобетонных изделий с  $\rho < 500$  кг/м<sup>3</sup> показывает, что, наряду с устройством однослойных наружных стен толщиной до 600 мм, приемлемый вариант для малоэтажного бескаркасного энергоэффективного строительства — устройство несущих двухслойных стен с сопротивлением теплопередаче  $R_T \geq 3,2$  м<sup>2</sup> К/Вт без воздушной прослойки с использованием изделий из теплоэффективных ( $\rho = (500–600)$  кг/м<sup>3</sup>) и теплоизоляционных ( $\rho < 400$  кг/м<sup>3</sup>) пористых бетонов с различными принципами структурообразования.

Таблица 9. Физико-технические свойства теплоизоляционных бетонов

Показатель	Бетон			
	Газобетон автоклавного твердения	Цементный перлитобетон гидрофобизированный	Цементный газобетон неавтоклавного твердения	Цементный пенобетон неавтоклавного твердения
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	305	306	307	305
Коэффициент вариации	0,08	0,05	0,08	0,09
Плотность материала бетона, кг/м <sup>3</sup>	3000	2390	2870	2870
Прочность на сжатие, МПа	0,79	0,85	0,77	0,70
Коэффициент вариации	0,17	0,14	0,17	0,18
Сорбционная влажность при относительной влажности среды 97 %, мас. %	14,4	2,7	14,6	14,0
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,086	0,075	0,087	0,083
Усадка, мм/м	0,62	0,43	1,84	1,86
Параметр $D_p$	0,86	0,92	0,86	0,88
Параметр $A_p$	0,89	0,96	0,89	0,90
Пористость:				
общая	90	87	89	89
открытая	43	22	43	41
закрытая	47	65	46	48

Таблица 10

Факторы	Значение рангов-баллов для факторов, влияющих на параметр $R$ различных видов бетона		
	Теплоизоляционный бетон с $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>		Теплоэффективный бетон с $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
	250–400	500–800	500–800
$R_c$	10	7	5
$R_a$	10	7	5
$R_m$	10	8	6
Характеристика распределения пор в матрице $P_1$	1	1	1
Характеристика распределения пор в заполнителе $P_2$	10	7	5
Физико-химическая активация вяжущей системы	10	10	6
Технологическая культура производства, профессионализм персонала	10	8	6

*Примечание* — Максимальное значение рангов-баллов — 10, минимальное значение — 1.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Опекунов, В. В. Пористые бетоны и области их применения / В. В. Опекунов [и др.] // Вестник БНТУ. — 2005. — Вып. 1. — С. 10–17.
- Опекунов, В. В. Прочность, однородность и анизотропия свойств пористых бетонов / В. В. Опекунов // Строительные материалы. — 2006. — № 11. — С. 17–21.
- Опекунов, В. В. Цементные перлитобетоны и их применение / В. В. Опекунов. — Киев: Академперіодика, 2004. — 45 с.
- Вяжущие системы в производстве ячеистых бетонов: материалы Второго междунар. симпозиума "Проблемы современного бетона и железобетона. Технология бетона", Минск, 21–23 октября 2009 г. / В. В. Опекунов; редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]. — Минск, 2009. — Ч. 2. — С. 329–342.
- Материалы и изделия теплоизоляционные. Номенклатура показателей: СТБ 4.201-94.

Статья поступила в редакцию 22.11.2010.