

УДК 691.327:691.175.746.222

Оптимизированная расчетная модель состава и свойств полистиролбетона, изготовляемого по инновационной спецтехнологии

Виктор Алексеевич РАХМАНОВ, член-корреспондент РААСН, профессор, e-mail: institute@unicon-zsk.ru
 АО «Технологический институт ВНИИЖелезобетон», 111141 Москва, ул. Плеханова, 7

Аннотация. Приведена расчетная модель «состав–плотность–прочность» полистиролбетона, который рассматривается как двухкомпонентный материал, состоящий из заполнителя – зерен вспененного гранулированного полистирола и поризованной цементной матрицы. Даны математические зависимости для определения прочности и плотности полистиролбетона, расчета удельного содержания цемента, а также для вычисления коэффициента гидратации цемента и расчетного коэффициента теплопроводности. Разработанная расчетная модель на основе инновационной спецтехнологии заводского производства изделий из полистиролбетона позволяет стабильно получать материал с заданными свойствами, требуемой прочностью, при минимальной плотности. При этом снижаются плотность полистиролбетона, расход цемента и теплопроводность по сравнению с обычной технологией.

Ключевые слова: полистиролбетон, расчетная модель состава, прочность, плотность, вспененный гранулированный полистирол, коэффициент гидратации цемента, спецтехнология.

OPTIMIZED COMPUTATIONAL MODEL OF COMPOSITION AND PROPERTIES OF POLYSTYRENE CONCRETE PRODUCED BY INNOVATIVE SPECIAL TECHNOLOGY

Victor A. RAKHMANOV, e-mail: institute@unicon-zsk.ru
 Technological Institute «VNIIZhelezobeton», ul. Plehanova, 7, Moscow 111141, Russian Federation

Abstract. A computational model «composition-density-strength» of polystyrene concrete which is considered as a two-component material consisting of a filler, grains of expanded granulated polystyrene, and a porous cement matrix is presented. Mathematical dependences for determining the strength and density of polystyrene concrete, calculation of a specific content of cement as well as for calculating the coefficient of cement hydration and the calculation coefficient of thermal conductivity are given. The computational model developed on the basis of the innovative special technology of fabrication of polystyrene concrete products makes it possible to produce a material with prescribed properties, required strength at minimal density. At this, polystyrene concrete density, cement consumption, and heat conductivity are reduced comparing with the common technology.

Key words: polystyrene concrete, computational model of composition, strength, density, expanded granulated polystyrene, ratio of cement hydration, special technology.

При разработке нормативной документации на производство и применение полистиролбетона (ПСБ) на основе результатов лабораторных исследований, проведенных в институте «ВНИИЖелезобетон», был предложен расчетный метод определения состава ПСБ с требуемой прочностью и минимальной плотностью [1–4].

Полистиролбетон рассматривался как двухкомпонентный материал, состоящий из зерен заполнителя – вспененного гранулированного полистирола (ПВГ) и поризованной цементной матрицы (ЦМ), заполняющей межзерновое пространство.

Для расчета прочности ПСБ при сжатии были предложены формулы:

$$R_{\text{ПСБ}} = 0,3R_{\text{Ц}}(\text{Ц/В} - 0,5) \left(1 - \frac{V_{\text{Ц.М}}}{100}\right)^2 (1 - \varphi)^n; \quad (1)$$

$$R_{\text{ПСБ}} = 0,24R_{\text{Ц}} \left(\frac{0,001\rho_{\text{ПСБ}} - \varphi\rho_{\text{ПВГ}}}{1 - \varphi}\right)^2 (1 - \varphi)^n, \quad (2)$$

где $R_{\text{ПСБ}}$ – прочность ПСБ при сжатии, МПа; $\rho_{\text{ПВГ}}$ – средняя плотность гранул пенополистирола, г/см³; $\rho_{\text{ПСБ}}$ – плотность полистиролбетона, кг/м³; φ – объемная концентрация зерен ПВГ в ПСБ, доли от 1; $R_{\text{Ц}}$ – активность цемента, МПа; $V_{\text{Ц.М}}$ – объем вовлеченного воздуха в цементной матрице, %; n – комплексный показатель, характеризующий совокупность свойств ПВГ.

Формула (1) описывает прочность ПСБ как функцию активности цемента и множителей, учитывающих прочность и поризацию цементного камня, а также влияние концентрации φ и качества n ПВГ. Наличие параметров $V_{\text{Ц.М}}$, φ и n , ранее не встречавшихся в работах по теории прочности бетона, – приоритетная особенность выведенных формул.

Формула (2) связывает прочность ПСБ с его плотностью, активностью цемента и характеристиками качества и содержания ПВГ. Из нее может быть получено удобное для практики выражение для расчета прочности ПСБ с требуемой плотностью:

$$R_{\text{ПСБ}} = 1000 \left[\varphi R_{\text{ПВГ}} + (1 - \varphi) \sqrt{\frac{R_{\text{ПСБ}}}{0,24 R_{\text{Ц}} (1 - \varphi)^n}} \right] \quad (3)$$

Удельный расход цемента Ц, кг/м³, в полистиролбетонной смеси при одинаковой размерности $R_{\text{ПВГ}}$ и $R_{\text{ПСБ}}$, кг/м³, было рекомендовано определять по формуле

$$\text{Ц} = \frac{R_{\text{ПСБ}} - \varphi R_{\text{ПВГ}}}{1,15}, \quad (4)$$

где коэффициент 1,15 отражает усредненный коэффициент гидратации цемента, равный 0,15.

В последние годы на заводе АО «ЮНИКОН-ЗСК» было модернизировано оборудование для производства ПСБ-изделий и внедрена спецтехнология [4], предусматривающая:

- применение ПВГ улучшенного качества из монофракционных гранул, получаемых двух- или трехкратным вспениванием бисера одной мелкой фракции со средним размером зерен 0,45–1,3 мм, с насыпной плотностью $\rho_{\text{ПВГ}}^{\text{н}} = 7,5...8,0$ кг/м³ и показателем качества $n = 1,62... 1,65$;
- использование портландцемента активностью не менее $R_{\text{ц}} = 45$ МПа;
- оптимизацию состава ПСБ с учетом технологических особенностей и применения специального оборудования для заводского изготовления ПСБ-изделий, в частности бетоносмесителей конструкции института «ВНИИжелезобетон», обеспечивающих высокую однородность перемешанной смеси;
- организацию автоматического контроля и коррекции заданного содержания компонентов смеси ($\pm 0,5$ % по массе) при ее дозировании и перемешивании, так как основные характеристики ПСБ (плотность, прочность, теплопроводность) очень чувствительны к колебаниям расхода компонентов сверх нормативных допусков. Выполнение этого требования гарантирует получение коэффициента вариации прочности ПСБ V_m не более 12 % (фактические значения V_m находились, как правило, в пределах 9–10 %);
- изготовление ПСБ-изделий по литевой технологии из смесей подвижностью П2-П4, характеризующихся способностью сохранять расчетную поризацию цементного камня даже после кратковременного (до 20 с) вибрирования для разравнивания смеси, поскольку использование более жестких смесей с их вибрированием приводит к заметному снижению содержания воздуха в поризованном материале и повышению его плотности и теплопроводности;
- создание улучшенных условий для ускоренного твердения ПСБ за счет введения при перемешивании смеси воды, подогретой до 55...65 °С, пригру-

жения твердеющих изделий до их распалубки и последующего укрытия полиэтиленовой пленкой, что предотвращает деструктивные процессы в ПСБ, создает оптимальные условия для гидратации цемента и обеспечивает получение повышенных прочностных характеристик материала.

При отработке заводской спецтехнологии по данным испытаний образцов-цилиндров, выбуренных из изготовленных изделий, и результатам их обработки институтом была уточнена расчетная модель «состав–плотность–прочность» ПСБ. В частности, было обращено внимание на то, что на расчетный расход цемента и прочность полистиролбетона влияют фактические значения коэффициента гидратации цемента K_r , которые в диапазоне марок по средней плотности D150...D600 изменяются в интервале 0,24–0,09. Его усредненные значения в зависимости от плотности ПСБ могут быть рассчитаны по приближенной формуле

$$K_r = 0,24 - 0,007 \sqrt{R_{\text{ПСБ}} - 150}. \quad (5)$$

С учетом влияния K_r были предложены уточненные формулы при размерности $R_{\text{ПСБ}}$ и $R_{\text{ПВГ}}$, кг/м³:

- для определения удельного расхода цемента, кг/м³:

$$\text{Ц} = \frac{R_{\text{ПСБ}} - \varphi R_{\text{ПВГ}}}{1 + K_r}, \quad (6)$$

- для расчета прочности ПСБ, МПа, как функции активности и коэффициента гидратации цемента, цементно-водного отношения и параметров качества и количества ПВГ:

$$R_{\text{ПСБ}} = 0,3 R_{\text{ц}} (0,6 - \varphi)^2 (1 + K_r)^2 (\text{Ц}/V - 0,03) (1 - \varphi)^{n-2}. \quad (7)$$

Плотность ПСБ определяется из выражения

$$R_{\text{ПСБ}} = R_{\text{ПВГ}} \varphi + 1000 \sqrt{\frac{R_{\text{ПСБ}} (1 - \varphi)^{2-n}}{K_r R_{\text{ц}}}}, \quad (8)$$

где $K_t = 0,175$ и используется для расчета прочности ПСБ плотностью D150...D600, изготовленного по обычной технологии, и $K_t = 0,24$ – для ПСБ плотностью D150...D350, изготовленного по спецтехнологии.

На основе анализа данных испытаний образцов ПСБ, отобранных из изделий АО «ЮНИКОН-ЗСК», была проведена оптимизация составов ПСБ, обеспечивающих получение материала с требуемой прочностью при минимальной плотности.

В табл. 1 содержатся данные расчетов прочности ПСБ по формуле (7) при оптимизированных φ , $\text{Ц}/V$, K_r , Ц и V , выполненных по формулам (5) и (6), в сравнении с нормативными требованиями и фактическими результатами испытаний ПСБ-образцов, отобранных из изделий, изготовленных на заводе АО «ЮНИКОН-ЗСК» в соответствии с [5].

1. Сравнение расчетной, нормативной и фактической прочности полистиролбетона

| Плотность ПСБ, кг/м ³ (D) | Расчетные данные | | | Нормативные требования (ГОСТ Р 51263) | | Данные лабораторных испытаний |
|---|------------------------|---|--|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| | K_r , по формуле (5) | ρ , кг/м ³ , по формуле (6) | $R_{\text{ПСБ}}$, МПа, по формуле (7) | $R_{\text{ПСБ}}^{\text{ТР}}$, МПа | Марка или класс по прочности ПСБ | $R_{\text{ПСБ}}^{\text{Ф}}$, МПа |
| 150/160 (D150) | 0,24/0,22 | 115/125 | 0,20/0,26 | 0,16/0,20 | M2/M2,5 | 0,19/0,25 |
| 200/210 (D200) | 0,19/0,18 | 162/172 | 0,39/0,55 | 0,28/0,41 | M3,5/M5 | 0,38/0,45 |
| 250/270 (D250) | 0,17/0,16 | 208/223 | 0,67/0,99 | 0,59/0,88 | B0,5/B0,75 | 0,77/0,96 |
| 350/370 (D350) | 0,14/0,13 | 302/322 | 1,32/1,77 | 1,17/1,76 | B1/B1,5 | 1,6/1,81 |
| 450 (D450) | 0,12 | 397 | 1,88 | 1,76 | B1,5 | 2,12 |
| 600 (D600) | 0,09 | 546 | 3,04 | 2,93 | B2,5 | 3,21 |

Примечания: 1. В числителе указаны данные для обычной технологии, в знаменателе — для спецтехнологии.
2. При расчетах принимались: $n = 1,65$ и $R_{\text{ц}} = 45$ МПа.

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что расчетные и фактические характеристики прочности ПСБ удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 51263–2012 «Полистиролбетон. Технические условия» по обычной и спецтехнологии. Это дает основание рекомендовать приведенную здесь расчетную модель «состав–плотность–прочность» ПСБ для использования при заводском контроле изделий с заданными характеристиками материала — требуемой прочностью и минимальной маркой по средней плотности.

На основе результатов исследований, проведенных в последние годы институтом [6, 7], предложено определять расчетную теплопроводность ПСБ для условий эксплуатации Б из выражения

$$\lambda_{\text{Б(ПСБ)}} = K_{\text{в}} \lambda_{\text{в}}^{\varphi_{\text{в}}} \lambda_{\text{о(ПСБ)}}^{1-\varphi_{\text{в}}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{в}}$ — коэффициент, учитывающий неравномерное распределение влаги, конденсирующейся в капиллярах и сферических порах цементной матрицы; $\lambda_{\text{в}} = 0,58$ Вт/(м·°С) — теплопроводность воды (конденсируемой влаги) при температуре 20 °С; $\lambda_{\text{о(ПСБ)}}$ — теплопроводность ПСБ в сухом состоянии, Вт/(м·°С); $\varphi_{\text{в}}$ и $1-\varphi_{\text{в}}$ — соответственно относительные объемы конденсируемой влаги и сухой части ПСБ, включающей ПВГ и ЦМ в долях от 1.

Относительный объем влаги, конденсируемой в полистиролбетоне для условий эксплуатации Б, предложено определять по формуле

$$\varphi_{\text{в(Б)}} = W_{\text{Б(ПСБ)}} (D - \rho_{\text{ПВГ}}) 10^{-5}, \quad (10)$$

где D — марка по средней плотности ПСБ, кг/м³.

Среднюю плотность зерен ПВГ для оценочных расчетов рекомендовано принимать $\rho_{\text{ПВГ}} = 14$ кг/м³. Значения коэффициента $K_{\text{в}}$ для условий эксплуатации Б предложено рассчитывать в зависимости от принятого относительного объемного содержания ПВГ в полистиролбетоне (φ) по формуле

$$K_{\text{в(Б)}} = 1,09 + 0,52(0,53 - \varphi). \quad (11)$$

Данные расчетов теплопроводности ПСБ для условий эксплуатации А и Б и лабораторных испытаний показывают их хорошую сходимость.

С использованием формул (5–7) и (9–11) была уточнена эффективность спецтехнологии (ПВГ с $n = 1,6$, $\rho_{\text{ПВГ}} = 14$ кг/м³ и $\varphi = 0,5$) в сравнении с обычной технологией (ПВГ с $n = 1,8$, $\rho_{\text{ПВГ}} = 20$ кг/м³ и $\varphi = 0,4$).

В табл. 2 для заданной (нормируемой) прочности ПСБ с коэффициентом вариации $V_m = 12$ % (заводское производство) приведены минимальные расчетные значения плотности ПСБ, расхода цемента и теплопроводности для условий эксплуатации Б при различных технологиях. Как видно из этих данных, выполненные расчеты подтверждают возможность получения при заводской спецтехнологии экономии сверх требований ГОСТ Р 51263: снижения плотности ПСБ на 19–22 %, расхода цемента на 14–25 % и теплопроводности на 18–26 % по сравнению с обычной технологией.

2. Минимальные расчетные значения физико-механических характеристик ПСБ для заданной прочности

| Требуемая прочность ПСБ | | Обычная технология ($n = 1,8$; $\rho_{пвг} = 20 \text{ кг/м}^3$; $\varphi = 0,4$) | | | Спецтехнология ($n = 1,6$; $\rho_{пвг} = 14 \text{ кг/м}^3$; $\varphi = 0,5$) | | |
|-------------------------|---|--|------------------------------|--|--|------------------------------|--|
| Класс, марка | $R_{псб}$, МПа (по ГОСТ Р 51263 при $V_m = 12\%$) | $\rho_{псб}$, кг/м ³ (D) | ρ_c , кг/м ³ | λ_B , Вт/(м·°С) для условий Б | $\rho_{псб}$, кг/м ³ (D) | ρ_c , кг/м ³ | λ_B , Вт/(м·°С) для условий Б |
| M3,5 | 0,28 | 187 (D175) | 149 | 0,067 | 151 (D150) | 128 | 0,053 |
| B0,35 | 0,41 | 225 (D225) | 184 | 0,075 | 181 (D175) | 148 | 0,056 |
| B0,5 | 0,59 | 268 (D250) | 224 | 0,08 | 217 (D225) | 179 | 0,066 |
| B0,75 | 0,88 | 342 (D300) | 275 | 0,096 | 263 (D250) | 220 | 0,073 |
| B1 | 1,17 | 374 (D350) | 322 | 0,112 | 290 (D300) | 243 | 0,083 |

Выводы

1. Разработанная расчетная модель на основе инновационной спецтехнологии заводского производства позволяет стабильно получать в промышленных условиях полистиролбетон с заданными свойствами: требуемой прочностью полистиролбетонных изделий при их минимальной плотности. При этом обеспечивается выполнение требований ГОСТ Р 52163 по плотности, теплопроводности и дополнительная экономия расхода цемента на производство изделий.

2. Наличие формул для определения прочности, плотности и теплопроводности ПСБ позволяет на

стадии проектирования намечаемых к строительству объектов и организации производственной базы стройиндустрии выполнить комплекс расчетов по оптимизации составов ПСБ, необходимых для установления толщины наружных ограждающих конструкций, определить предполагаемую стоимость ПСБ, изделий и конструкций на его основе — технико-экономическую эффективность намечаемого строительства.

Иными словами, появляется возможность без трудоемких работ и в короткие сроки получить надежную информацию для выбора управленческих решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рахманов В. А., Довжик В. Г., Амханицкий Г. Я. Улучшение свойств и оптимизация составов полистиролбетона // Сб. докл. II Всерос. (международ.) конф. по бетону и железобетону. М.: 2005. Т. IV. С. 135–147.
2. Рахманов В. А. Расчетный метод определения состава полистиролбетона с требуемой прочностью и минимальной плотностью // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 7. С. 45–47.
3. Рахманов В. А. Инновационная технология полистиролбетона с оптимальными свойствами // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI в. 2011. № 9. С. 37–41.
4. Патент на изобретение RU 2515664. Теплоизоляционно-конструкционный полистиролбетон / Рахма-

нов В. А., Мелихов В. И., Козловский А. И., Юнкевич А. В. Оpubл. 18.03.2014 г.

5. Заявка в Роспатент № 2016146529 от 28.11.2016 г. Способ заводского изготовления изделий из полистиролбетона повышенного качества по спецтехнологии / Рахманов В. А., Мелихов В. И., Казарин С. К., Юнкевич А. В., Митюгов Д. В., Сидоренко К. А.
6. Рахманов В. А., Мелихов В. И., Сафонов А. А. Расчетно-лабораторные методы определения теплопроводности композиционного материала — полистиролбетона и его компонентов // Бетон и железобетон. 2015. № 6. С. 2–5.
7. Рахманов В. А., Мелихов В. И., Сафонов А. А. Определение расчетных теплотехнических характеристик полистиролбетона // Бетон и железобетон. 2016. № 1. С. 5–6.

REFERENCES

1. Rakhmanov V. A., Dovzhik V. G., Amkhanitskiy G. Ya. Improvement of properties and optimizing the composition of polystyrene. *Sb. dokl. II Vseros. (mezhdunar.)*

nar.) *konf. po betonu i zhelezobetonu. Moscow, 2005, vol. IV, pp. 135–147. (In Russian).*

2. Rakhmanov V. A. The method of determining the composition of the polystyrene concrete with the required

- strength and minimum density. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2009, no. 7, pp. 45–47. (In Russian).
3. Rakhmanov V. A. Innovatsionnaya tekhnologiya polistirolobetona s optimal'nymi svoystvami. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI v.*, 2011, no. 9, pp. 37–41. (In Russian).
 4. Patent na izobrenenie RU 2515664. Teploizolyatsionno-konstruktsionnyy polistirolobeton [Thermal insulation-structural polystyrene]. Rakhmanov V. A., Melikhov V. I., Kozlovskiy A. I., Yunkevich A. V. Declared. 18.03.2014 g. (In Russian).
 5. Zayavka v Rospatent no. 2016146529 ot 28.11.2016 g. *Sposob zavodskogo izgotovleniya izdeliy iz polistirolobetona povyshennogo kachestva po spetstekhnologii* [Method factory made products of polystyrene of high quality spetstekhnologii]. Rakhmanov V. A., Melikhov V. I., Kazarin S. K., Yunkevich A. V., Mityugov D. V., Sidorenko K. A. (In Russian).
 6. Rakhmanov V. A., Melikhov V. I., Safonov A. A. Design-laboratory methods of determination of thermal conductivity of composite material of polystyrene concrete and its components. *Beton i zhelezobeton*, 2015, no. 6, pp. 2–5. (In Russian).
 7. Rakhmanov V. A., Melikhov V. I., Safonov A. A. Determination of design thermal performance of polystyrene. *Beton i zhelezobeton*, 2016, no. 1, pp. 5–6. (In Russian).

Для цитирования: Рахманов В. А. Оптимизированная расчетная модель состава и свойств полистиролбетона, изготавливаемого по инновационной спецтехнологии // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 2. С. 19–23.

For citation: Rakhmanov V. A. Optimized computational model of composition and properties of polystyrene concrete produced by innovative special technology. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2017, no. 2, pp. 19–23. (In Russian). ■



АО «ВНИИжелезобетон» предлагает:

- **Проектно-конструкторские работы** — по подготовке архитектурно-строительных, конструктивных и технологических решений производственных, жилых и общественных зданий и сооружений; пространственному расчету; экспертизе проектных решений; разработке проектов усиления строительных конструкций; разработке строительных технологических карт, регламентов и методик; контролю качества строительного-монтажных работ.
- **Разработка нормативно-технической документации** — разработка ТУ на строительную продукцию, оформление нормативно-технической документации для сертификации продукции, а также разработка стандартов организаций, сводов правил.
- **Сертификация строительных материалов, изделий и конструкций** — оказывает услуги по сертификации строительных материалов и конструкций.
- **Проведение испытаний строительных материалов** — испытательный центр «НИЦстром» оказывает услуги по испытанию строительных материалов.
- **Научно-техническое сопровождение строительства** — анализ результатов различных видов мониторинга и данных контроля качества строительства, разработка оптимальных технических и технологических решений проблем, возникающих в процессе строительства, а также не нашедших отражения в проектной документации.
- **Создание химических добавок-модификаторов** — услуги по созданию химических добавок для улучшения технологических характеристик бетонных и растворных смесей, физико-механических и эксплуатационных характеристик готовых бетонов, а также снижения трудозатрат, расхода цемента, экономии тепло- и электроэнергетики.
- **Подбор составов бетона и раствора** — подбор наиболее рационального соотношения между составляющими бетон материалами (цементом, водой, песком, гравием или щебнем) для обеспечения заданных характеристик: удобоукладываемости, прочности, водонепроницаемости, морозостойкости и др.