

# РЕЗЕРВЫ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Виктор Алексеевич РАХМАНОВ**, член-корреспондент РААСН, профессор,  
e-mail: institute@unicon-zsk.ru

АО "ВНИИжелезобетон", 111141, г. Москва, ул. Плеханова, 7

***Аннотация.** Изложена математическая модель определения теплопроводности и прочности полистиролбетона. Проведено сравнение нормируемых характеристик теплопроводности легких и ячеистых бетонов, показавшее существенные преимущества полистиролбетона. Обобщены резервы улучшения теплотехнических и прочностных свойств полистиролбетона и эффективности его использования в энергосберегающем строительстве.*

***Ключевые слова:** полистиролбетон, теплопроводность, плотность, прочность, спецтехнология, экономическая эффективность.*

---

## RESERVES OF THERMAL AND STRENGTH PROPERTIES OF POLYSTYRENE CONCRETE AND ITS EFFICIENCY

**Viktor A. RAKHMANOV**, e-mail: institute@unicon-zsk.ru

JSC «VNIIZhelezobeton», 111114, Moscow, Plekhanova street, 7

***Abstract.** Mathematical model for determining of thermal conductivity and strength of polystyrene concrete is presented in this article. A comparison of standard characteristics of thermal conductivity of polystyrene concrete, light weight and cellular concretes that has showed significant advantages of polystyrene concrete is made. The article summarizes the reserves for improvement thermal and strength properties of polystyrene concrete and the efficiency of its use in the energy saving constructions.*

***Key words:** polystyrene concrete, thermal conductivity, density, strength, special technology, economic efficiency.*

В настоящее время с использованием полистиролбетона (ПСБ) системы «Юникон» в стране за последние 10 лет построено более 12 млн.кв.метров энергоэффективного жилья и соцкультбыта с положительным опытом его применения в строительстве в течение 15 лет. Все это время здания с ограждающими конструкциями из ПСБ показывают высокую долговечность фасадов, морозостойкость и комфортность проживания. Учитывая чрезвычайную актуальность использования полистиролбетона для энергоэффективного строительства, рассмотрим резервы дальнейшей оптимизации его требуемой прочности и теплотехнических свойств.

Нормируемая теплопроводность полистиролбетона в сухом состоянии в сравнении с легкими и ячеистыми бетонами представлена в таблице 1. Из нее видно, что нормируемые характеристики  $\lambda_0$  у ПСБ намного эффективнее, чем у аналогов.

ВНИИжелезобетон, начиная с середины 90-х годов, проводил лабораторные исследования теплопроводности ПСБ с целью создания расчетных моделей и их стандартизации (в сухом состоянии –  $\lambda_0$ , для условий эксплуатации А и Б –  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$ ) [1-5].

На раннем этапе работ были предложены формулы для расчета  $\lambda_0$  для обычного ПСБ на портландцементе и модифицированного с использованием шлакопортландцемента – МПСБ:

$$\lambda_{0(\text{ПСБ})} = 0,025 + 0,0002 \rho_{\text{ПСБ}} \quad \text{и} \quad (1)$$

$$\lambda_{0(\text{МПСБ})} = 0,025 + 0,00016 \rho_{\text{МПСБ}}, \quad (2)$$

где: 0,025 Вт/(м°С) – теплопроводность сухого воздуха;

$\rho_{\text{ПСБ}}$  и  $\rho_{\text{МПСБ}}$  – соответственно плотности ПСБ и МПСБ в сухом состоянии (кг/м<sup>3</sup>).

Впоследствии практика применения формул (1) и (2) для условий заводской технологии производства ПСБ изделий на АО«ЮНИКОН-ЗСК» и нового ГОСТ на полистиролбетон, показала необходимость их корректировки, при том, что коэффициенты 0,0002 и 0,00016 должны приниматься в зависимости от величин  $\rho_{\text{ПСБ}}$  и  $\rho_{\text{МПСБ}}$ .

В связи с этим в институте в последнее время были проведены лабораторные работы по уточнению и совершенствованию методов расчета  $\lambda_0$  [9,10]. Полистиролбетон рассматривался как композиционный материал, состоящий из двух основных компонентов, равномерно распределенных по объему: а) запол-

Таблица 1. Теплопроводность особо легких бетонов

| Характеристики   | Легкий бетон<br>(ГОСТ 25820-2014 [6]) |  | Ячеистый бетон                       |   |                                      |   | Полистиролбетон<br>(ГОСТ Р 51263-2012 [4]) |   |  |
|--|---------------------------------------|--|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|--|---|--|
|  | Тепло-<br>изоля-<br>ционный           | Конструкци-<br>онно-<br>теплоизоля-<br>ционный | Неавтоклавный<br>(ГОСТ 25485-89 [7]) |   | Автоклавный<br>(ГОСТ 31359-2007 [8]) |   | Тепло-<br>изоляци-<br>онный                | Теплоизоля-<br>ционно- кон-<br>струкции-онный | Конструк-<br>ционно-<br>теплоизоля-<br>ционный |
|  |                                       |  | Тепло-<br>изоляци-<br>онный          | Конструкци-<br>онно-тепло-<br>изоляцион-<br>ный | Тепло-<br>изоляци-<br>онный          | Конструкци-<br>онно-тепло-<br>изоляцион-<br>ный |  |   |  |
| Марка по средней<br>плотности                                    | D200-<br>D500                         | D500-<br>D700                                  | D300-<br>D400                        | D500-<br>D700                                   | D200-<br>D400                        | D450-<br>D700                                   | D150-<br>D225                              | D250-<br>D350                                 | D400-<br>D600                                  |
| Теплопроводность<br>в сухом состоянии,<br>$\lambda_0$ , Вт/(м°C) | 0,08-<br>0,14<br>Ср.<br>0,11          | 0,11-0,19<br>Ср. 0,15                          | 0,08-<br>0,12<br>Ср.<br>0,10         | 0,10-0,18<br>Ср. 0,14                           | 0,048-<br>0,096<br>Ср. 0,72          | 0,108-0,17<br>Ср. 0,139                         | 0,052-<br>0,068<br>Ср. 0,06                | 0,072-0,095<br>Ср. 0,084                      | 0,105-<br>0,145<br>Ср. 0,125                   |

нителя из сферических полистирольных вспененных гранул (ПВГ) с объемным содержанием –  $\varphi$  (в долях от 1), теплопроводностью –  $\lambda_{\text{ПВГ}}$  и б) поризованной цементной матрицы (дисперсной фазы) с объемным содержанием  $1-\varphi$ , теплопроводностью –  $\lambda_{\text{ЦМ}}$ .

Были рассмотрены различные аналитические зависимости для расчета теплопроводности полистиролбетона в сухом состоянии, в т.ч. линейная зависимость, имеющая вид:

$$\lambda_{\text{ПСБ}} = \varphi \lambda_{\text{ПВГ}} + (1 - \varphi) \lambda_{\text{ЦМ}}, \quad (3)$$

и предложенное ранее ВНИИжелезобетоном [2] выражение, вытекающее из принципов электротепловой аналогии согласно теории Максвелла-Эйкина:

$$\lambda_{\text{о(ПСБ)}} = \lambda_{\text{ЦМ}} \frac{\lambda_{\text{ПВГ}} + 2\lambda_{\text{ЦМ}} - 2\varphi(\lambda_{\text{ЦМ}} - \lambda_{\text{ПВГ}})}{\lambda_{\text{ПВГ}} + 2\lambda_{\text{ЦМ}} + \varphi(\lambda_{\text{ЦМ}} - \lambda_{\text{ПВГ}})}. \quad (4)$$

Значения теплопроводности полистиролбетона, подсчитанные по формулам (3) и (4), для указанных условий применения были заметно выше (до 20 %) данных лабораторных испытаний.

В связи с этим было предложено использовать для полистиролбетона логарифмическую зависимость К.Лихтенеккера [9] в следующем виде:

$$\lg \lambda_{\text{о(ПСБ)}} = \varphi \lg \lambda_{\text{ПВГ}} + (1 - \varphi) \lg \lambda_{\text{ЦМ}}$$

или записать как произведение показательных функций:

$$\lambda_{\text{о(ПСБ)}} = \lambda_{\text{ПВГ}}^{\varphi} \lambda_{\text{ЦМ}}^{1-\varphi}. \quad (5)$$

Значения теплопроводности  $\lambda_{\text{о(ПСБ)}}$  в зависимости от  $\varphi$ , рассчитанных по формулам (3)-(5) при заданных величинах  $\lambda_{\text{ЦМ}}$  и  $\lambda_{\text{ПВГ}}$ , представлены на рисунке 1 и в таблице 2. Видно, что значения  $\lambda_{\text{о(ПСБ)}}$  ниже рассчитанных по формулам (3 и 4) и наиболее близко соответствуют опытным данным при расчете по формуле (5)..

На рисунке 1 также показан диапазон возможных значений  $\varphi=0\div 0,6$ , отражающий особенности композиционной структуры полистиролбетона, который в заводских или построечных условиях изготавливается исключительно из монофракционного ПВГ, получаемого вспениванием полистирольного би-сера одной фракции.

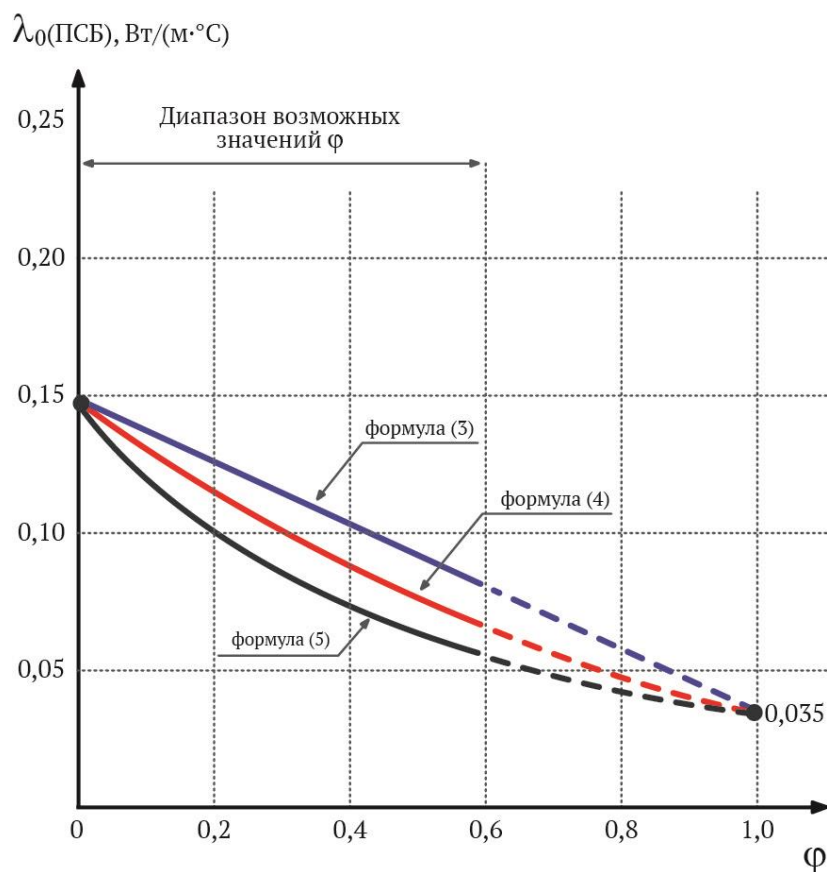


Рисунок 1. Теплопроводность полистиролбетона  $\lambda_{0(\text{ПСБ})}=f(\varphi)$ , рассчитанная по формулам (4)-(6) при  $\lambda_{\text{ЦМ}}=0,15$  Вт/(м°С) и  $\lambda_{\text{ПВГ}}=0,035$  Вт/(м°С)

Для проведения расчетов  $\lambda_{0(\text{ПСБ})}$  по формулам (3)-(5) было предложено принимать значения коэффициентов теплопроводности компонентов в сухом состоянии:  $\lambda_{\text{ПВГ}}=0,035$  Вт/(м°С) – на основе результатов приведенных ниже лабораторных данных для ПВГ со средней плотностью зерен  $\rho_{\text{ПВГ}}=14$  кг/м<sup>3</sup> и  $\lambda_{\text{ЦМ}}$  – расчетом (в зависимости от плотности поризованной цементной матрицы) по формуле

$$\lambda_{\text{ЦМ}} \approx \lambda_{\text{ЯБ}} = 0,08 + 0,00028(\rho_{\text{ЯБ}} - 300), \quad (6)$$

где  $\lambda_{\text{ЯБ}}$  и  $\rho_{\text{ЯБ}}=\rho_{\text{ЦМ}}$  – соответственно теплопроводность и плотность неавтоклавного ячеистого бетона на цементном вяжущем, в частности, поробетона, структура которого практически идентична цементной матрице полистиролбетона, в связи с чем их теплопроводность принималась одинаковой (для сопоставимых плотностей).

Для расчетов плотности поризованной цементной матрицы в полистиролбетоне использовалась формула

$$\rho_{\text{ЦМ}} = \frac{\rho_{\text{ПСБ}} - \varphi \rho_{\text{ПВГ}}}{1 - \varphi}. \quad (7)$$

Результаты расчетов и лабораторных испытаний теплопроводности полистиролбетона в сухом состоянии, выполненных по ГОСТ 7076-99 [11], приведены в таблице 2.

Таблица 2. Данные по теплопроводности полистиролбетона в сухом состоянии

| Марка по средней плотности | $\varphi$ | 1- $\varphi$ | Расчетные данные по формулам           |                                  | Значения $\lambda_{\alpha(\text{ПСБ})}$ , Вт/(м°С) |       |       |                               |
|----------------------------|-----------|--------------|--|----------------------------------|--|-------|-------|-------------------------------|
|                            |           |              | (7)                                    | (6)                              | Расчитанные по формулам                            |       |       | Данные лабораторных испытаний |
|                            |           |              | $\rho_{\text{ЦМ}}$ , кг/м <sup>3</sup> | $\lambda_{\text{ЦМ}}$ , Вт/(м°С) | (3)  | (4)   | (5)   |                               |
| D150                       | 0,53      | 0,47         | 303                                    | 0,081                            | 0,057  | 0,054 | 0,052 | 0,051                         |
| D200                       | 0,50      | 0,50         | 386                                    | 0,104                            | 0,070  | 0,065 | 0,063 | 0,062                         |
| D250                       | 0,46      | 0,54         | 451                                    | 0,122                            | 0,082  | 0,076 | 0,069 | 0,070                         |
| D350                       | 0,40      | 0,60         | 573                                    | 0,156                            | 0,108  | 0,099 | 0,086 | 0,085                         |
| D500                       | 0,34      | 0,66         | 750                                    | 0,206                            | 0,148  | 0,135 | 0,113 | 0,115                         |

Анализ данных, приведенных в таблице 2, показывает, что расчеты по формуле (5) дают хорошую сходимость с данными лабораторных испытаний полистиролбетона.

При уточнении значений расчетных характеристик полистиролбетона: сорбционной влажности и теплопроводности для условий эксплуатации А и Б (соответственно  $W_{\text{А(ПСБ)}}$ ,  $\lambda_{\text{А(ПСБ)}}$ ,  $W_{\text{Б(ПСБ)}}$ ,  $\lambda_{\text{Б(ПСБ)}}$ ) и разработки расчетной модели для их определения предложено [10] вычислять расчетные значения сорбционной влажности полистиролбетона для заданных марок по его средней плотности ( $D$ , кг/м<sup>3</sup>), используя следующие линейные зависимости:

$$W_{\text{А(ПСБ)}} = 2,6 + 0,004(D - 150), \quad (8)$$

$$W_{\text{Б(ПСБ)}} = 3,6 + 0,0107(D - 150). \quad (9)$$

При определении расчетных характеристик теплопроводности полистиролбетона  $\lambda_{\text{р}}$  ( $\lambda_{\text{А(ПСБ)}}$  и  $\lambda_{\text{Б(ПСБ)}}$ ) должно учитываться влияние конденсируемой сорбционной влаги, основное количество которой неравномерно распределяется в капиллярах и сферических порах цементной матрицы. В то же время количество сорбционной влаги, конденсирующейся в порах ПВГ, крайне незначительно, т.к. для идентичного по структуре экструдированного пенополистирола по данным СП 50.13330.2012 [13]  $W_{\text{А}} = 1\%$  и  $W_{\text{Б}} = 2\%$  по массе, что для общего веса полистиролбетона крайне мало, и поэтому в практических расчетах может не учитываться.

В связи с этим по аналогии с показательной зависимостью (5) значения расчетной теплопроводности для условий А и Б было предложено определять из выражения

$$\lambda_{\rho(\text{ПСБ})} = K_{\text{в}} \lambda_{\text{в}}^{\varphi_{\text{в}}} \lambda_{\text{o}(\text{ПСБ})}^{1-\varphi_{\text{в}}}, \quad (10)$$

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;

$\varphi_{\text{в}}$  и  $1-\varphi_{\text{в}}$  – соответственно относительные объемы конденсируемой влаги и сухой части полистиролбетона, включающей зерна ПВГ и цементную матрицу (в долях от 1).

Относительный объем влаги, конденсируемой в полистиролбетоне для условий эксплуатации А и Б, определяется (с учетом результатов расчетов (8) и (9) по формулам:

$$\varphi_{\text{в}(\text{А})} = W_{\text{А}(\text{ПСБ})} (D - \varphi \rho_{\text{ПВГ}}) 10^{-5} \quad \text{и} \quad (11)$$

$$\varphi_{\text{в}(\text{Б})} = W_{\text{Б}(\text{ПСБ})} (D - \varphi \rho_{\text{ПВГ}}) 10^{-5}, \quad (12)$$

где  $\rho_{\text{ПВГ}}$  – средняя плотность зерен ПВГ, кг/м<sup>3</sup> (для расчетов принималось  $\rho_{\text{ПВГ}}=14$  кг/м<sup>3</sup>).

Значения коэффициента  $K_{\text{в}}$  рассчитывались в зависимости от относительного объемного содержания ПВГ в полистиролбетоне –  $\varphi$  по формулам:

$$\text{- для условий эксплуатации А} \quad K_{\text{в}(\text{А})} = 1,05 + 0,38(0,53 - \varphi); \quad (13)$$

$$\text{- для условий эксплуатации Б} \quad K_{\text{в}(\text{Б})} = 1,09 + 0,52(0,53 - \varphi). \quad (14)$$

С использованием рассчитанных по (5), (11)-(14) значений  $\lambda_{\text{o}(\text{ПСБ})}$ ,  $\varphi_{\text{в}(\text{А})}$ ,  $\varphi_{\text{в}(\text{Б})}$ ,  $K_{\text{в}(\text{А})}$ ,  $K_{\text{в}(\text{Б})}$  и величины  $\lambda_{\text{в}}$  по формуле (10) были вычислены расчетные теплопроводности полистиролбетона  $\lambda_{\text{А}(\text{ПСБ})}$  и  $\lambda_{\text{Б}(\text{ПСБ})}$  и проведено их сравнение с результатами лабораторных испытаний образцов ПСБ по методике ГОСТ 7076-99 [11]. Результаты этих расчетов и лабораторных испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3. Данные расчетов и лабораторных испытаний теплопроводности ПСБ для условий эксплуатации А и Б

| Марка по средней плотности | φ <sub>пвг</sub> | λ <sub>о(ПСБ)</sub> , Вт/(м°С) | φ <sub>в(А)</sub> | φ <sub>в(Б)</sub> | К <sub>в(А)</sub> | К <sub>в(Б)</sub> | Теплопроводность полистиролбетона, Вт/(м°С) |           |                               |           |
|----------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---|-----------|-------------------------------|-----------|
|                            |                  |                                |                   |                   |                   |                   | Расчетные данные (формула 10)               |           | Данные лабораторных испытаний |           |
|                            |                  |                                |                   |                   |                   |                   | табл. 2                                     | фор. (11) | фор. (12)                     | фор. (13) |
| D150                       | 0,53             | 0,051                          | 0,010             | 0,017             | 1,03              | 1,05              | 0,054                                       | 0,056     | 0,053                         | 0,055     |
| D200                       | 0,505            | 0,062                          | 0,014             | 0,024             | 1,034             | 1,061             | 0,067                                       | 0,070     | 0,066                         | 0,069     |
| D250                       | 0,46             | 0,070                          | 0,019             | 0,031             | 1,037             | 1,072             | 0,076                                       | 0,080     | 0,075                         | 0,080     |
| D350                       | 0,40             | 0,085                          | 0,028             | 0,046             | 1,044             | 1,094             | 0,095                                       | 0,100     | 0,094                         | 0,101     |
| D500                       | 0,34             | 0,115                          | 0,045             | 0,069             | 1,054             | 1,128             | 0,133                                       | 0,144     | 0,130                         | 0,145     |
| D600                       | 0,30             | 0,135                          | 0,056             | 0,086             | 1,063             | 1,15              | 0,160                                       | 0,176     | 0,158                         | 0,175     |

Как видно из приведенных результатов, расчеты по формуле (10) дают хорошую сходимость с данными лабораторных испытаний образцов полистиролбетона, в связи с чем эту формулу целесообразно использовать для оценки расчетной теплопроводности ПСБ в нормируемых эксплуатационных условиях А и Б.

Приведенные в таблицах 2 и 3 данные по теплопроводности полистиролбетона использованы в межгосударственном стандарте на этот материал [12].

Как показано выше, теплопроводность ПСБ связана с его плотностью, от которой в свою очередь зависит одна из важнейших характеристик материала – его прочность.

ВНИИжелезобетоном разработана расчетная модель «состав-плотность-прочность» ПСБ, позволяющая получить материал требуемой прочности с минимальной плотностью и соответственно теплопроводностью. Согласно этой модели прочность и плотность полистиролбетона определяются из выражений:

$$\rho_{\text{ПСБ}} = \rho_{\text{пвг}} \varphi + 1000 \sqrt{\frac{R_{\text{ПСБ}} (1 - \varphi)^{2-n}}{K_T R_{\text{ц}}}}, \quad (15)$$

$$R_{\text{ПСБ}} = 0,3 R_{\text{ц}} (0,6 - \varphi)^2 (1 + K_T)^2 (\text{Ц/В} - 0,03) (1 - \varphi)^{n-2}, \quad (16)$$

$$R_{\text{ПСБ}} = 0,175 R_{\text{ц}} (\rho_{\text{ПСБ}} - \varphi \rho_{\text{пвг}})^2 (1 - \varphi)^{n-2} \cdot 10^{-6}, \quad (17)$$



где:  $R_{\text{ПСБ}}$  – прочность ПСБ при сжатии, МПа;

$\rho_{\text{ПСБ}}$  – плотность ПСБ в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{ПВГ}}$  – средняя плотность гранул ПВГ, кг/м<sup>3</sup>;

$\varphi$  – объемная концентрация ПВГ(в долях от 1);

$R_{\text{ц}}$  – активность цемента, МПа;

$n$  – комплексный показатель качества ПВГ;

$K_{\text{г}}$  – коэффициент гидратации цемента;

$\text{Ц/В}$  – цементно-водное отношение;

$K_{\text{т}}$  – коэффициент, учитывающий вид технологии:

$K_{\text{т}}=0,175$  используется для расчета прочности ПСБ плотностью D150-D600, изготавливаемого по обычной технологии;

$K_{\text{т}}=0,24$  – для расчета прочности ПСБ плотностью D150-D350, изготавливаемого по спецтехнологии.

Варьируемые параметры для полистиролбетона плотностью 150-600 кг/м<sup>3</sup> в этих формулах: объемная концентрация  $\varphi= 0,3\div 0,55$ ; плотность гранул  $\rho_{\text{ПВГ}} = 12\div 25$  кг/м<sup>3</sup>, что соответствует насыпной плотности  $\rho_{\text{ПВГ}}^{\text{н}} = 7\div 15$  кг/м<sup>3</sup>;  $\text{Ц/В} = 1,5\div 2,5$ ;  $n = 1,5\div 2,0$ ;  $K_{\text{г}} = 0,09\div 0,24$ .

Проведенные исследования и накопленный опыт внедрения полистиролбетона позволили выявить следующие резервы теплотехнических и прочностных свойств полистиролбетона, соответственно требованиям нового ГОСТ Р 51263-2012 [4] :

1. За счет повышения однородности материала по прочности.

При оценке и нормировании прочности бетона по ГОСТ 18105-2010 [14] его требуемая прочность ( $R_{\text{тр}}$ ) назначается в зависимости от величины партионного коэффициента прочности материала ( $V_{\text{м}}$ ). Для ПСБ изделий, изготавливаемых в заводских условиях, с переходом со старого ГОСТ Р 51263-99 [3] ( $V_{\text{м}} = 18\%$ ) на новый российский стандарт ГОСТ Р 51263-2012 [4] ( $V_{\text{м}} = 12\%$ )  $R_{\text{тр}}$  уменьшено на 28%. При этом плотность ПСБ для заданной прочности уменьшается на 6-15%, а его коэффициент теплопроводности может быть снижен на 10-15%. Дальнейшее повышение однородности прочности ПСБ по ГОСТ 18105-2010 [14] в условиях заводского производства дает возможность дополнительного снижения требуемой прочности  $R_{\text{тр}}$  на 8,3 % в пределах практически достижимой однородности полистиролбетона по прочности  $V_{\text{м}}=6\%$  .

2. За счет использования оптимальных параметров полистиролбетона по спецтехнологии: показателя качества пенополистирольного заполнителя «п» в размере 1,6-1,75 и объемной концентрации ПВГ – «ф» в размере 0,4-0,55, определяемых по ГОСТ Р 51263-2012 [4].

При использовании спецтехнологии получена дополнительная экономия сверх требований вышеуказанного стандарта – снижение плотности ПСБ на 19-25 %, расхода цемента на 14-25 % и теплопроводности на 18-26 %.

3. За счет более достоверных методов определения прочности ПСБ по контрольным образцам.

Полученные ВНИИжелезобетоном с учетом требований ГОСТ 10160-2012 [15] значения коэффициентов, отражающих масштабный фактор и влияние влажности на результаты испытаний ПСБ контрольных образцов, позволяют снизить на 5-8 % требуемую прочность ПСБ, что отражено в первом межгосударственном стандарте на полистиролбетон [12].

4. За счет технологических факторов модификации свойств полистиролбетона.

В частности, применение поризованной матрицы на цементношлаковом вяжущем или шлакопортландцементе (ШПЦ) марки 400 и выше снижает теплопроводность полистиролбетона на 13-20 %. На основании работ ВНИИжелезобетона Госстроем РФ было рекомендовано производство модифицированного полистиролбетона по технологии института [16].

Расчетные теплотехнические характеристики полистиролбетона на шлакопортландцементе, предложенные ВНИИжелезобетоном, включены в СП 50.13330.2012 [13].

5. За счет снижения стоимости материалов при их оценке в расчете не на 1 куб.метр, а на 1 кв.метр наружных ограждающих конструкций из полистиролбетона строительной системы «Юникон-2».

При подобном подходе необходимо учитывать меньшие на 6-16 % значения расчетного коэффициента теплопроводности ПСБ минимальной плотности, изготовленного по спецтехнологии. В результате толщина наружных стен по полистиролбетонной блочной кладке при сопоставимом приведенном сопротивлении теплопередаче может быть снижена на 20-40 %, что уменьшает в расчете на 1 кв.м наружной стены расходы материалов, цеховые, общезаводские, эксплуатационные, трудовые затраты при производстве изделий и затра-

ты на их доставку и монтаж на стройке. Для монолитного ПСБ также уменьшается расход материалов, электроэнергии на приготовление и пневмоподачу смеси. В итоге стоимость 1 кв.м наружной конструкции может быть снижена на 25-35 % в зависимости от объемов, технологии и организации производства и применения ПСБ на стройке.

6. За счет пониженных в 1,5-2 раза значений требуемого приведенного сопротивления теплопередачи наружных стен из полистиролбетона ( $R_{\circ}^{TP}$ ), допускаемых СП 50.13330.2012 [13]. При этом условии толщина полистиролбетонной части наружных стен плотностью D250-D300 может быть снижена до 25 см, что дает проектным и строительным организациям дополнительную возможность существенного повышения экономической эффективности применения ПСБ.

7. Столь большие суммарные дополнительные резервы приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен для минимальной толщины блочной кладки 25 см позволяют повысить плотность ПСБ до 350 кг/м<sup>3</sup>, переводя блоки из теплоизоляционно-конструкционных в конструкционно-теплоизоляционные, расширив область их применения от ненесущих до самонесущих и несущих наружных стен зданий с этажностью, определяемой расчетом.

В целом, для совершенствования существующих расчетов необходимо нормирование этих резервов по требуемой плотности и теплопроводности полистиролбетонной кладки наружных стен энергоэффективных зданий. Во всех случаях это требует дополнительного специального обоснования, согласованного с разработчиком стандарта на полистиролбетон – институтом «ВНИИжелезобетон».

### **Выводы**

Полистиролбетон системы «Юникон-2», изготавливаемый по спецтехнологии, имеет значительные резервы теплотехнических и прочностных свойств, позволяющих существенно повысить экономическую эффективность его применения и расширить область использования в строительстве, укрепив его лидирующие позиции среди других строительных материалов в России.

*Библиографические ссылки*

1. Рахманов В.А., Довжик В.Г. Свойства и расчетные характеристики полистиролбетонного конструкционно-теплоизоляционного материала для наружных самонесущих стен. 2-й Международный симпозиум по конструкционным легким бетонам. Норвегия, 2000, с.681-690.
2. Рахманов В.А., Довжик В.Г., Амханицкий Г.Я. Улучшение свойств и оптимизация составов полистиролбетонов. Труды II Всероссийской (Международной) конференции, 2005, том. IV, 135-147 с.
3. ГОСТ Р 51263-99. Полистиролбетон. Технические условия.
4. ГОСТ Р 51263-2012. Полистиролбетон. Технические условия.
5. Рахманов В.А., Мелихов В.И., Козловский А.И., Юнкевич А.В. «Теплоизоляционно-конструкционный полистиролбетон». Патент на изобретение RU № 2515664 от 18.03.2014г.
6. ГОСТ 25820-2014. Бетоны легкие. Технические условия.
7. ГОСТ 25485-89. Бетоны ячеистые. Технические условия.
8. ГОСТ 31359-2007. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия.
9. 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, 2-5 с.
10. Рахманов В.А., Мелихов В.И., Сафонов А.А. Определение расчетных теплотехнических характеристик полистиролбетона. «Бетон и железобетон», 2016, № 1, 5-6 с.
11. ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом потоке.
12. Межгосударственный стандарт ГОСТ 33929-2016. Полистиролбетон. Технические условия.
13. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий.
14. ГОСТ 18105-2012. Бетон. Правила контроля и оценки прочности.
15. ГОСТ 10160-2012. Бетон. Методы определения прочности по контрольным образцам.
16. Заключение по теплотехническим характеристикам модифицированного полистиролбетона (письмо Госстроя РФ от 14.08.2000 г. № ЛБ-3512/9).