

Пенобетон заданной средней плотности для утепления чердачных перекрытий

*К.т.н., старший преподаватель А.Н. Иванов;
адъюнкт М.А. Трембицкий*,*

Военный инженерно-технический институт (филиал)

ФГБОУ ВПО «Военная академия тыла и транспорта им. генерала армии Хрулева А.В.»

Ключевые слова: методика; средняя плотность; пенобетон; смесь; утеплитель; цемент; водоцементное отношение

По оценке ведущих учёных, запасов основных источников энергии (нефти, газа, угля) в мире осталось примерно на 50 лет [1]. Половина потребляемой энергии приходится на поддержание нормативного температурно-влажностного режима в помещениях жилых домов и сооружений [1]. В основном расход энергии обуславливается потерей тепла через ограждающие конструкции зданий – стены, окна, чердачные и цокольные перекрытия [2].

Одним из важных направлений исследований, направленных на снижение теплопотерь в зданиях, является выбор теплоизоляции для чердачных перекрытий, которые, в результате снижения термического сопротивления утеплителя, становятся источниками передачи тепла в зимний период из отапливаемых помещений зданий в нежилые помещения чердака. В результате снег, лежащий на кровле, тает, вода стекает вниз и замерзает, превращается в сосульки. Таким образом, создаются условия, угрожающие здоровью и жизни людей [3].



На рис. 1 представлена картина, характерная для большинства кровель Санкт-Петербурга в зимний период.

Рисунок 1. Кровля малоэтажного здания в Санкт-Петербурге

Таблица 1. Оценка существующих утеплителей, применяемых в чердачных перекрытиях

№ п.п.	Наименование утеплителя	Плотность, кг/м ³	Расчётный коэффициент теплопроводности, Вт/м°C	Стоимость 1 м ³ теплоизоляции на IV квартал 2010 г., руб.	Удельная стоимость изготовления, Вт руб./м°C	Долговечность, лет
1	Плиты минераловатные	200	0,08	8838,82	707,10	20
2	Пенополистирол	35	0,031	14329,01	444,20	15-20
3	Гравий керамзитовый	250	0,12	2037,90	244,55	50
4	Полистиролбетон	150	0,06	2300,00	138,00	25
5	Газобетон	300	0,13	2980,82	387,50	50
6	Монолитный пенобетон	160	0,078	1301,46	101,51	50
7	Сборный пенобетон	160	0,078	2568,59	200,35	50
8	Пеностекло	200	0,09	15767,03	1419,03	70

В России для теплоизоляции чердачных перекрытий чаще всего применяют минераловатные и полимерные утеплители, засыпки, а также ячеистые бетоны. На основании сравнений эффективности существующих утеплителей применяемых в чердачных перекрытиях было выявлено, что основными критериями эффективности утеплителя являются стоимость, коэффициент теплопроводности, удельная стоимость (позволяет рассмотреть стоимость и коэффициент теплопроводности совместно) и долговечность. Стоимость рассчитывалась с учётом изготовления, доставки утеплителя и работ по теплоизоляции чердачного перекрытия. Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что теплоизоляция из монолитного пенобетона естественного твердения, изготовленного промышленным способом, превосходит существующие утеплители по всем рассмотренным критериям.

В результате проведённых исследований была разработана пенобетонная смесь для получения пенобетона средней плотностью $100...190 \text{ кг/м}^3$ [4]. Физико-механические характеристики полученного пенобетона представлены на рис. 2-4.

На рис. 2 представлена зависимость расхода цемента от средней плотности пенобетона. По графику видно, что с уменьшением средней плотности пенобетона уменьшается расход цемента. Это объясняется тем, что 84 % массы пенобетона составляют частицы цемента. Для получения 1 м^3 пенобетона средней плотностью 100 кг/м^3 требуется 84 кг портландцемента, а для пенобетона средней плотностью 190 кг/м^3 – 158 кг.

На рис. 3 представлена зависимость величины водоцементного отношения от средней плотности пенобетона. Из рис. 3 следует, что с уменьшением средней плотности пенобетона возрастает водоцементное отношение. Это объясняется тем, что количество воды, используемое для приготовления пены, одинаково при получении пенобетона средней плотностью $100...190 \text{ кг/м}^3$, а расход портландцемента разный.

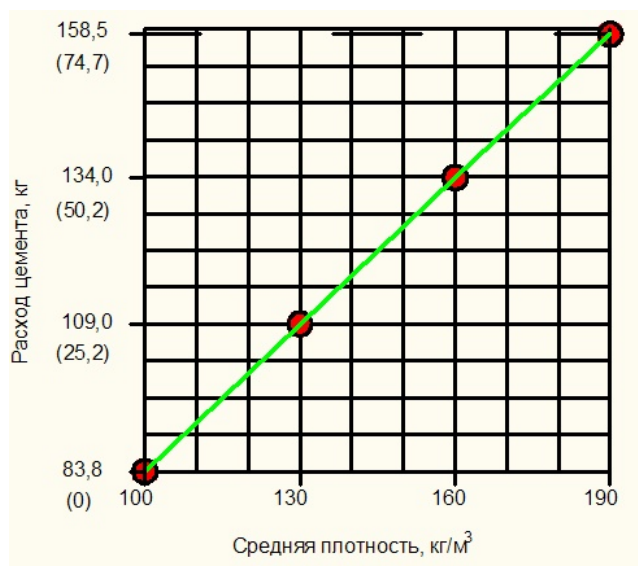


Рисунок 2. Зависимость расхода цемента от средней плотности пенобетона

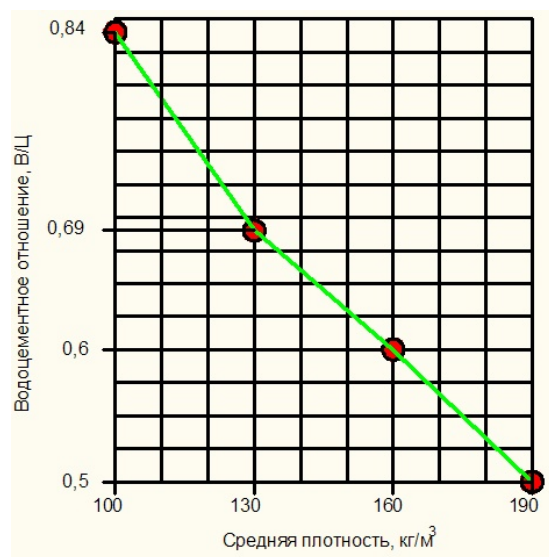


Рисунок 3. Зависимость величины водоцементного отношения от средней плотности пенобетона

На рис. 4 представлены две зависимости прочности пенобетона от его средней плотности, полученные для пенобетона, изготовленного на портландцементе М500Д0 и М400Д20 Сланцевского цементного завода. Известно, что на прочность пенобетона влияет водоцементное отношение, расход портландцемента, тонкость его помола, минералогический состав, а также предел прочности при сжатии [5, 6, 7]. С увеличением водоцементного отношения возрастает пористость цементного камня, образующего межпоровые перегородки. Это приводит к снижению средней плотности и прочности пенобетона.

С увеличением расхода портландцемента возрастает средняя плотность пенобетона, уменьшается объём воздушной фазы и, следовательно, повышается прочность. Объём воздушной фазы в пенобетоне определяется разностью объёмов пенобетона и цементного камня.

Из графиков на рис. 4 следует, что при использовании портландцементов М400Д20 и М500Д0 получается пенобетон с одинаковой средней плотностью, но разными значениями прочности.

Иванов А.Н., Трембицкий М.А. Пенобетон заданной средней плотности для утепления чердачных перекрытий

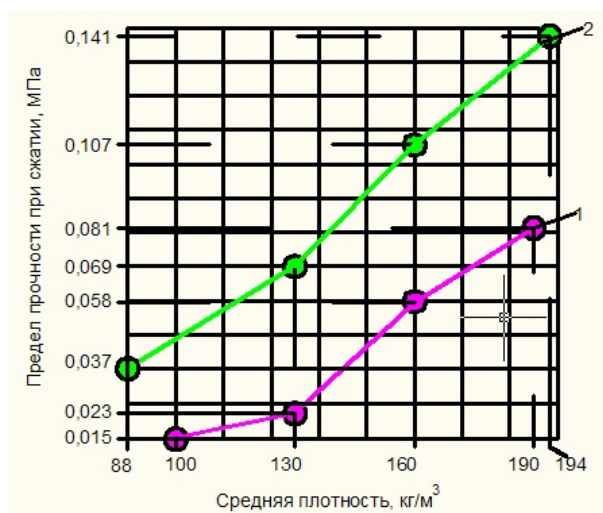


Рисунок 4. Зависимость прочности пенобетона от средней плотности:
1 – портландцемент 400Д20;
2 – портландцемент 500Д0

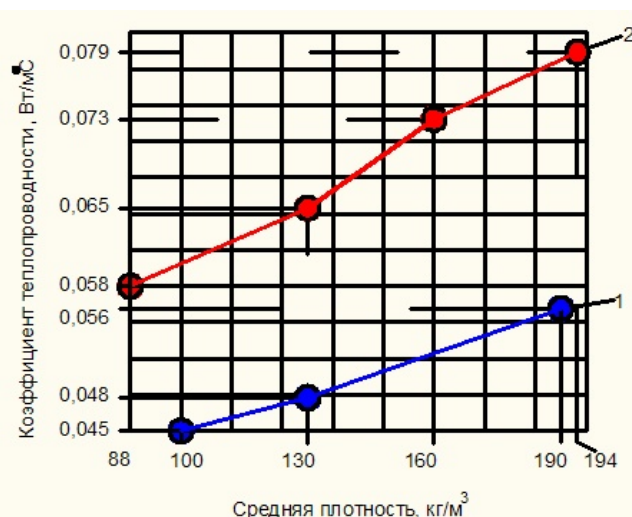


Рисунок 5. Зависимость коэффициента теплопроводности от средней плотности и однородности структуры пенобетона:
1 – однородная структура; 2 – неоднородная структура

Рассмотрим портландцемент марки 400Д20. Данный портландцемент изготавливается из портландцементного клинкера с добавлением доменного гранулированного шлака в количестве 20% от массы клинкера. Известно, что доменный шлак – это активная минеральная добавка, замедляющая схватывание и твердение цемента [5, 7]. Тонкость помола портландцемента характеризуется удельной поверхностью. Для портландцемента 400Д20 она находится в пределах 270–300 м²/кг [7]. Предел прочности измерений при сжатии половинок образцов-балочек через 28 сут. твердения составляет 44,2–46,0 МПа [8].

Рассмотрим портландцемент марки 500Д0. Данный портландцемент изготавливается из высокомарочного портландцементного клинкера с добавлением гипса. Удельная поверхность портландцемента 500Д0 находится в пределах 300 – 330 м²/кг [9]. Предел прочности измерений при сжатии половинок образцов-балочек через 28 сут. твердения составляет 50,5–52,0 МПа [8].

Сравнивая показатели качества двух рассмотренных марок портландцемента, можно сделать вывод, что полученный пенобетон средней плотностью 100...190 кг/м³ на портландцементе 500Д0 будет превосходить по прочности пенобетон, полученный на портландцементе 400Д20.

Результаты исследований и анализ технической литературы [10–14] показали, что зависимость коэффициента теплопроводности от плотности и однородности структуры пенобетона имеет линейный характер. На рис. 5 представлены графики зависимости коэффициента теплопроводности от плотности и однородности структуры пенобетона. Из графиков рис. 5 следует, что с уменьшением средней плотности пенобетона уменьшается и коэффициент теплопроводности. Это явление связано с увеличением объема воздушной фазы в пенобетоне и уменьшением доли твердой фазы. Коэффициент теплопроводности воздуха в состоянии покоя составляет 0,02 Вт/м·°С, а цементного камня – 0,58 Вт/м·°С (СНиП 23-101-2004). Из графиков рис. 5 следует, что пенобетон одинаковой средней плотности, но разной структуры пористости отличается коэффициентом теплопроводности. Пенобетон плотностью 130 кг/м³ неоднородной структуры (поры разного диаметра от 10 мм до 1 мм) имеет коэффициент теплопроводности 0,065 Вт/м·°С, а пенобетон однородной структуры (поры одинакового диаметра 1,4 мм) – 0,048 Вт/м·°С, это на 26,2 % меньше предыдущего значения.

В результате проведенного теплотехнического расчёта было установлено, что при постоянной величине приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции R_0 , м²·°С/Вт, понижение коэффициента теплопроводности утеплителя на 2,56% или 0,002 Вт/м·°С приводит к уменьшению толщины утеплителя на 5 мм. Следовательно, снижение коэффициента теплопроводности на 26,2% позволяет уменьшить толщину утеплителя на 51 мм.

Таким образом, задаваясь определённой средней плотностью пенобетона, можно с высокой достоверностью прогнозировать получение пенобетона с необходимыми физико-механическими свойствами.

Иванов А.Н., Трембицкий М.А. Пенобетон заданной средней плотности для утепления чердачных перекрытий

Для достижения поставленной цели была разработана расчётно-экспериментальная методика изготовления пенобетона естественного твердения заданной средней плотности. Пенобетон получается в результате твердения пенобетонной смеси, изготовленной с помощью промышленной установки [15], состоящей из закрытого смесителя объёмом замеса V_3 от 0,2 м³ до 1 м³, пеногенератора без движущихся элементов, компрессора, героторного насоса [16]. Разработанная методика представлена в виде блок-схемы на рис. 6 и состоит из восьми этапов.

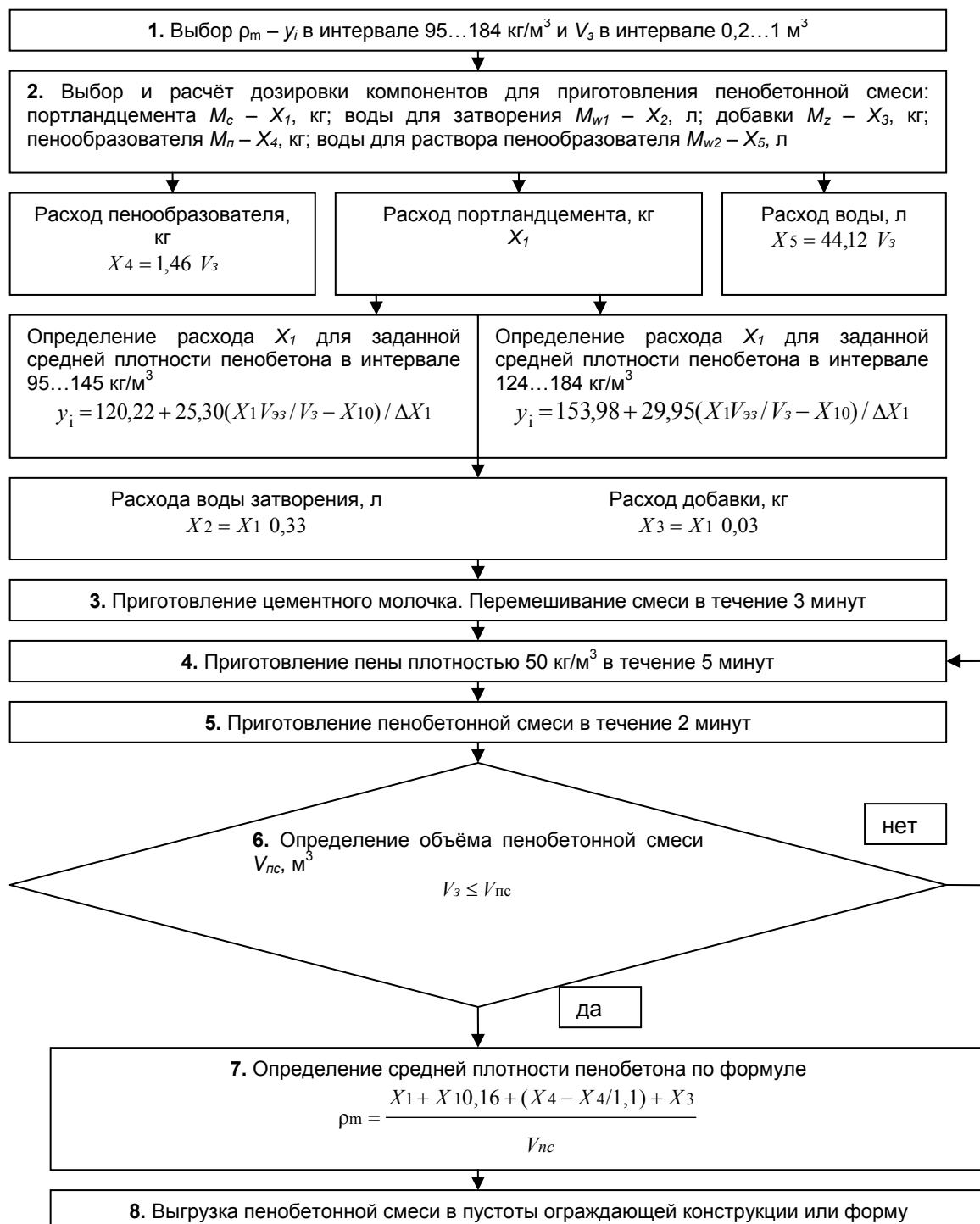


Рисунок 6. Блок-схема алгоритма методики изготовления пенобетона заданной средней плотности

На первом этапе производится выбор необходимой средней плотности пенобетона в интервале 95...184 кг/м³ и объёма замеса пенобетонной смеси.

На втором этапе производится подбор компонентов и расчёт их дозировки для приготовления пенобетонной смеси. Дозирование цемента и химической добавки осуществляется с помощью весов, а дозирование воды – мерным цилиндром. Расчёт количества цемента M_c , кг, производится согласно математическим моделям, полученным в результате статистической обработки известных справочных данных [17, 18]:

- для заданной средней плотности пенобетона в интервале 95...145 кг/м³

$$y_i = 120,22 + 25,30(X_1 V_{зз} / V_3 - X_{10}) / \Delta X_1 ; \quad (1)$$

- для заданной средней плотности пенобетона в интервале 124...184 кг/м³

$$y_i = 153,98 + 29,95(X_1 V_{зз} / V_3 - X_{10}) / \Delta X_1 , \quad (2)$$

где y_i – средняя плотность пенобетона, кг/м³;

X_1 – расход портландцемента, кг;

$V_{зз}$ – объём экспериментального замеса, м³;

V_3 – объём замеса, принимаемый от 0,2 м³ до 1 м³;

X_{10} – основной уровень переменного фактора, кг;

ΔX_1 – интервал варьирования переменного фактора, кг.

Объём воды M_{w1} , л, необходимой для затворения цемента, определяется по водоцементному отношению $M_{w1}/M_c=0,33$. Дозировка химической добавки M_z , кг, принимается в количестве 3% от массы портландцемента. Дозировки концентрата пенообразователя $M_n - X_4$, кг, и воды для раствора пенообразователя $M_{w2} - X_5$, л, определяются по формулам:

$$X_4 = 1,46 V_3 , \quad (3)$$

$$X_5 = 44,12 V_3 . \quad (4)$$

На третьем этапе приготавливают цементное молочко. В смеситель добавляют воду, химическую добавку, портландцемент. Портландцемент загружают в смеситель в последнюю очередь, после полного растворения в воде химической добавки (время перемешивания около 1 минуты). После добавки цемента смесь перемешивают ещё 2 минуты.

На четвёртом этапе производится приготовление пены плотностью 50 кг/м³. В пеногенератор заливают через приёмную воронку концентрат пенообразователя, а затем воду. С помощью компрессора в пеногенератор закачивают воздух в течение 5 минут до момента получения пены плотностью 50 кг/м³.

На пятом этапе приготавливают пенобетонную смесь (рис. 7). Полученная пена под давлением, которое создаёт компрессор, подаётся в работающий смеситель. Продолжительность перемешивания в смесителе цементного молочка и пены составляет 2 минуты.



Рисунок 7. Приготовление пенобетонной смеси

На шестом этапе определяется объём пенобетонной смеси $V_{пс}$, м³. При этом должно соблюдаться условие:

$$V_3 \leq V_{пс} . \quad (5)$$

Если условие (5) не выполняется, приготавливается дополнительная порция пены и добавляется в смеситель в количестве 6-8% (от объёма замеса V_3). После чего повторяются пятый и шестой этапы.

На седьмом этапе определяется средняя плотность пенобетона ρ_m , кг/м³, по формуле:

$$\rho_m = \frac{X_1 + X_{10,16} + (X_4 - X_{4/1,1}) + X_3}{V_{пс}} . \quad (6)$$

Иванов А.Н., Трембицкий М.А. Пенобетон заданной средней плотности для утепления чердачных перекрытий

На восьмом этапе пенобетонную смесь подают с помощью героторного насоса в ограждающую конструкцию или форму. Температура окружающего воздуха должна находиться в пределах 18...30 °С. Высота каждого слоя пенобетонной смеси не должна превышать 150 мм. Каждый последующий слой пенобетонной смеси укладывают на предыдущий через сутки. Поверхность пенобетонной смеси после выравнивания накрывают полиэтиленовой плёнкой и выдерживают семь суток. В первые сутки твердения пенобетона не допускают воздействий на него вибрации, толчков.

Таким образом, рассмотренная методика позволяет получать пенобетон естественного твердения с требуемыми физико-механическими свойствами, что очень важно при проектировании толщины чердачной теплоизоляции. Дальнейшие исследования предусматривают изучение новых технологических процессов позволяющих повысить прочность и долговечность пенобетона без увеличения его средней плотности за счёт снижения водоцементного отношения и применения дисперсного армирования.

Литература

1. Леголов И. Н., Александров Е. Е., Лагутенко М. И. Энергоэффективный дом («passive house») – дом будущего // Популярное бетоноведение. 2008. № 3. С. 81-84.
2. Вылегжанин В. П., Пинскер В. А. Эффективность ячеистых бетонов в ограждающих конструкциях // Популярное бетоноведение (Приложение к журналу). 2008. С. 35-37.
3. Ватин Н. И., Володин В. В., Золотарёва Е. А., Петров К. В., Жмарин Е. Н. Реконструкция крыш Санкт-Петербурга на основе лёгких стальных тонкостенных конструкций и антиобледенительной системы // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 2 (12). С. 59-64.
4. Петраков Б. И. Заявка 2010151109 Российская Федерация, МПК C04 B38/10. Смесь для изготовления пенобетона; заявитель Военная академия тыла и транспорта имени генерала армии Хрулёва А. В; приоритет 13.12.2010.
5. Баталин Б. С., Пряхин И. П. Использование цемента в приготовлении пенобетона // Технологии бетонов. 2008. № 7. С. 64-65.
6. Кобидзе Т. Е., Коровяков В. Ф., Киселёв А. Ю., Листов С. В. Взаимосвязь структуры пены, технологии и свойств получаемого пенобетона // Строительные материалы. 2005. № 1 (601). С. 26-29.
7. Шахова Л. Д., Рахимбаев Ш. М., Черноситова Е. С., Самборский С. А. Роль цемента в технологии пенобетонов // Строительные материалы. 2005. № 1 (601). С. 42-44.
8. Пахтинов В. М. Сланцевский цементный завод «Цесла» // Популярное бетоноведение. 2009. № 3. С. 113-115.
9. Коковин О. А., Ромахин В. А., Будникова П. П. К вопросу о росте сырцово-прочности в пенобетонных массивах // Строительные материалы. 2006. № 1 (613). С. 41-43.
10. Шахова Л. Д., Черноситова Е. С., Гончаров Д. В. Сопоставление расчётных и экспериментальных значений теплопроводности пенобетонов // Строительные материалы. 2007. № 8 (632). С. 36-37.
11. Семченков А. С., Ухова Т. А., Сахаров Г. П. О корректировке равновесной влажности и теплопроводности ячеистого бетона // Строительные материалы. 2006. № 6 (618). С. 4-7.
12. London A. C. Effect of moisture concrete in thermal conductivity // Autocl. Aer. Concr. Moist. and Proper. Amsterdam. 1983. Pp. 131-141.
13. Лундышев И. А. Методика расчёта толщины слоя монолитного пенобетона, применяемого для теплоизоляции трубопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 8 (10). С. 47-51.
14. Hums D. Relation between humidity and heat conductivity in aerated concrete // Autocl. Aer. Concr. Moist. and Proper. Amsterdam. 1983. Pp. 110-120.
15. Балмасов Г. Ф., Мешков П. И. Пенообразователь Foam Cem для ячеистого бетона // Строительные материалы. 2006. № 6 (618). С. 20-21.
16. Шлегель И. Ф., Шавич Г. Я., Корчагин А. Б., Лукановский Е. А., Карабут Л. А., Беляев А. А., Пуликов В. А. Новый насос для пенобетона // Строительные материалы. 2005. № 1 (601). С. 24-25.
17. Руководство по подбору состава тяжёлого бетона. НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1979. 103 с.
18. Адлер Ю. П., Макарова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 278 с.

*Максим Андреевич Трембицкий, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(911)263-69-38; эл. почта: tryamhello_86@mail.ru*

Foam concrete of certain average density for thermal insulation of attic floors

A.N. Ivanov;

M.A. Trembitskiy,

*Military engineering-technical institute, Saint-Petersburg, Russia
+7(911)263-69-38; e-mail: tryamhello_86@mail.ru*

Key words

methodology; average density; foam concrete; mixture; insulation; cement; water-cement ratio

Abstract

Energy efficiency of building depends on several factors, including the summary heat losses through the building envelope – walls, windows, attic and basement floors. The leakage of heat through the attic overlap is 10-20%, depending on the number of floors of building. An additional factor, confirming the relevance of the reduction of heat loss through the attic floor, is the problem of the icicles on the roofs.

Studies have shown that the most economical and durable insulation, applied to the attic ceilings, is a monolithic foam concrete with natural hardening.

For producing foam concrete with required physical and mechanical properties we have developed a calculation-experimental method. This method is based on the manufacturing sequence of eight operations.

The developed technique allows to receive foam concrete with natural hardening with a high accuracy with given density in the interval 100-190 kg/m³.

References

1. Legalov I. N., Aleksandrov Ye. E., Lagutenko M. I. *Populyarnoye betonovedeniye* [Popular concrete]. 2008. No. 3. Pp. 81-84. (rus)
2. Vylegzhanin V. P., Pinsker V. A. *Supplement to the magazine Popular concrete*. 2008. Pp. 35-37. (rus)
3. Vatin N. I., Volodin V. V., Zolotareva Ye. A., Petrov K. V., Zhmarin Ye. N. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 2(12). Pp. 59-64. (rus)
4. Petrakov B. I. The Application 2010151109 the Russian Federation, the IPC C04 B38/10. Blend for production of foam concrete; the applicant Military academy of rear and transport named after general of the army Hruleva A. V; priority 13.12.2010. (rus)
5. Batalin B. S., Pryakhin I. P. *Tekhnologii betonov* [Concrete technology]. 2008. No. 7. Pp. 64-65. (rus)
6. Kobidze T. E., Korovyakov V. F., Kiselev A. Yu., Listov S. V. *Stroitelnyye materialy* [Building materials]. 2005. No. 1 (601). Pp. 26-29. (rus)
7. Shakhova L. D., Rakhimbayev Sh. M., Chernositova Ye. S., Samborskiy S. A. *Stroitelnyye materialy* [Building materials]. 2005. No. 1 (601). Pp. 42-44. (rus)
8. Pakhtinov V. M. *Populyarnoye betonovedeniye* [Popular concrete]. 2009. No. 3. Pp. 113-115. (rus)
9. Kokovin O. A., Romakhin V. A., Budnikova P. P. *Stroitelnyye materialy* [Building materials]. 2006. No. 1 (613). Pp. 41-43. (rus)
10. Shakhova L. D., Chernositova Ye. S., Goncharov D. V. *Stroitelnyye materialy* [Building materials]. 2007. No. 8 (632). Pp. 36-37. (rus)
11. Semchenkov A. S., Ukhova T. A., Sakharov G. P. *Stroitelnyye materialy* [Building materials]. 2006. No. 6 (618). Pp. 4-7. (rus)
12. London A. C. Effect of moisture concrete in thermal conductivity. Autocl. Aer. Concr. Moist. and Proper. Amsterdam: 1983.
13. Lundyshev I. A. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 8(10). Pp. 47-51. (rus)
14. Hums D. Relation between humidity and heat conductivity in aerated concrete Autocl. Aer. Concr. Moist. and Proper. Amsterdam: 1983.

15. Balmasov G. F., Meshkov P. I. *Stroitelnyye materialy* [Building materials]. 2006. No. 6 (618). Pp. 20-21. (rus)
16. Shlegel I. F., Shayevich G. Ya., Korchagin A. B., Lukanovskiy Ye. A., Karabut L. A., Belyayev A. A., Pulikov V. A. *Stroitelnyye materialy* [Building materials]. 2005. No. 1 (601). Pp. 24-25. (rus)
17. Guide to the selection of structure of heavy concrete. Research INSTITUTE of concrete and reinforced concrete Gosstroy of the USSR. Moscow: Stroyizdat, 1979. 103 p. (rus)
18. Adler Yu. P., Makarova E. V., Granovsky YU. V *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Planning of an experiment in search of optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976. 278 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 19-24