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)
ФГВОУ 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 теплопровод-ности, Вт/м°С	Стоимость 1 м^3 тепло-изоляции на IV квартал 2010 г., руб.	Удельная стоимость изготовления, Вт руб./м°С	Долго-вечность, 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 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 кг/м^3, а расход портландцемента разный.

Рисунок 2. Зависимость расхода цемента от средней плотности пенобетона

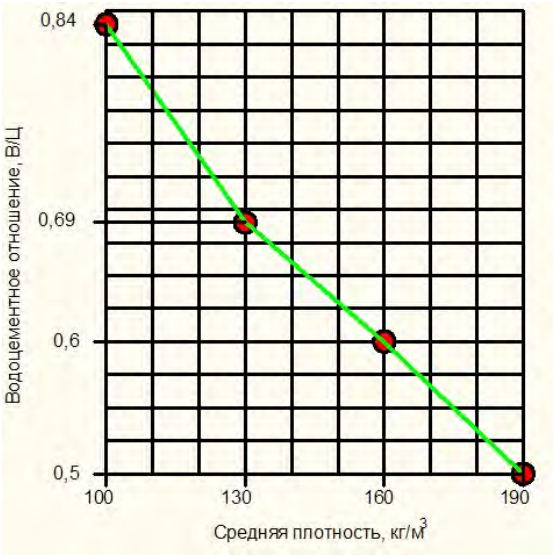

Рисунок 3. Зависимость величины водоцементного отношения от средней плотности пенобетона

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.

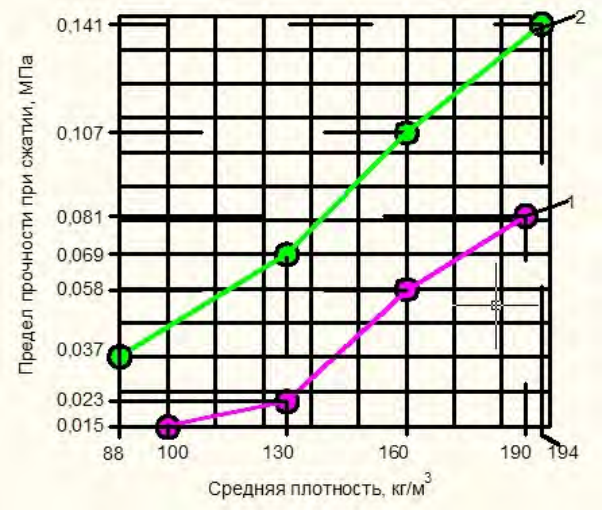

Рисунок 4. Зависимость прочности пенобетона от средней плотности: 1 – портландцемент 400Д20; 2 – портландцемент 500Д0

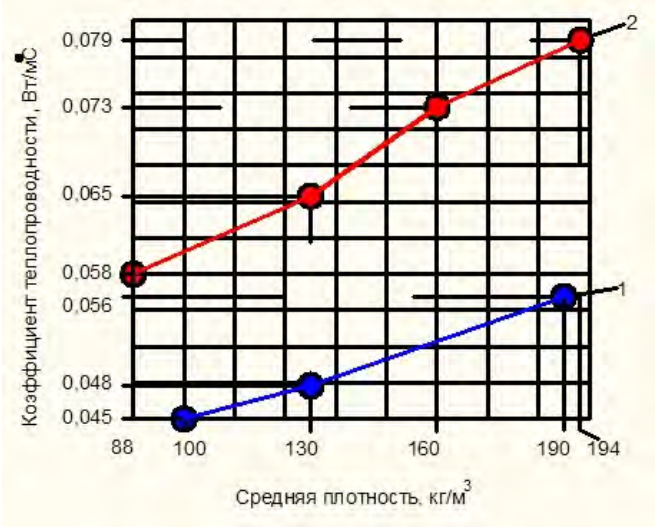

Рисунок 5. Зависимость коэффициента теплопроводности от средней плотности и однородности структуры пенобетона: 1 – однородная структура; 2 – неоднородная структура

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 м^2/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 м^2/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/м^3 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 объёма воздушной фазы в пенобетоне и уменьшением доли твёрдой 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/м^3 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 проведённого теплотехнического расчёта было установлено, что при постоянной величине приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции R_0, м^2°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.

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 $V_з$ от 0,2 м^3 до 1 м^3, пеногенератора без движущихся элементов, компрессора, героторного насоса [16]. Разработанная методика представлена в виде блок-схемы на рис. 6 и состоит из восьми этапов.

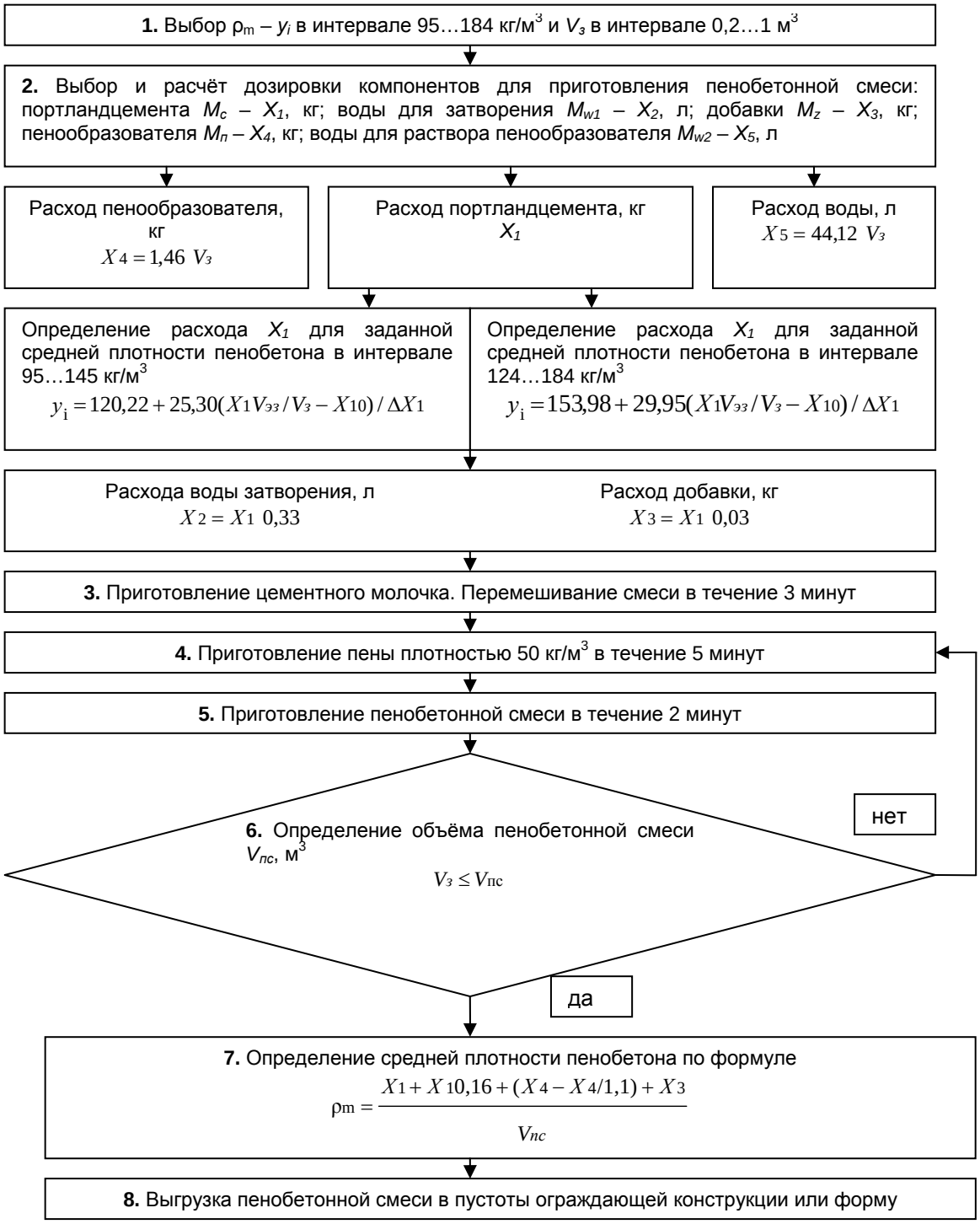

Рисунок 6. Блок-схема алгоритма методики изготовления пенобетона заданной средней плотности

На первом этапе производится выбор необходимой средней плотности пенобетона в интервале 95…184 кг/м^3 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/м^3

$$y_i = 120{,}22 + 25{,}30(X1V_{эз}/V_з - X10)/\Delta X1; \quad (1)$$

- для заданной средней плотности пенобетона в интервале 124…184 кг/м^3

$$y_i = 153{,}98 + 29{,}95(X1V_{эз}/V_з - X10)/\Delta X1, \quad (2)$$

где y_i – средняя плотность пенобетона, кг/м^3;
X_1 – расход портландцемента, кг;
$V_{эз}$ – объём экспериментального замеса, м^3;
$V_з$ – объём замеса, принимаемый от 0,2 м^3 до 1м^3;
X_{10} – основной уровень переменного фактора, кг;
ΔX_1 – интервал варьирования переменного фактора, кг.

Объем 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 $M_п – X_4$, кг, и воды для раствора пенообразователя $M_{w2} – X_5$, л, определяются по формулам:

$$X4 = 1{,}46V_з, \quad (3)$$

$$X5 = 44{,}12V_з. \quad (4)$$

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/м^3. 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/м^3.

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 $V_{пс}$, м^3. При этом должно соблюдаться условие:

$$V_з \le V_{пс}. \quad (5)$$

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

На седьмом этапе определяется средняя плотность пенобетона ρ_m, кг/м^3, по формуле:

$$\rho m = \frac{X1 + X10{,}16 + (X4 - X4/1{,}1) + X3}{Vnc}. \quad (6)$$

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. Легалов 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 С04 В38/10. 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 сырцовой 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., Шаевич 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