

УДК: 666.97.035:69.022:691.327.-412

КАРБОНИЗАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КЕРАМЗИТОБЕТОННЫХ СТЕНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Михайленко Г.В., Гара А.А. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Разработана технология керамзитобетонных стеновых изделий с применением карбонизационного твердения, позволяющая максимально интенсифицировать процесс карбонизации путем снижения общего водосодержания системы, применения бетонных смесей оптимальной структуры и рецептуры, обработки изделий в среде углекислого газа по оптимальным режимам.

При разработке ресурсосберегающих технологий бетонных изделий, а также создании предпосылок комплексной автоматизации, особое значение приобретают вопросы ускорения упрочнения бетона.

Повышение начальной прочности бетона связано с форсированием процесса твердения цемента в сверхранний период. Как показали работы, выполненные у нас в стране и за рубежом, максимальные скорости твердения цементного камня обеспечиваются при твердении в среде углекислого газа. При этом предложен ряд технологических приемов, позволяющих получать карбонизованные изделия, по своим физико-механическим свойствам удовлетворяющие предъявляемым к ним требованиям.

Анализ опыта применения искусственной карбонизации в технологии цементных бетонов позволил выдвинуть рабочую гипотезу:

- в силу того, что в основе карбонизационного твердения лежит реакция связывания гидроокиси кальция углекислым газом в практически нерастворимый карбонат кальция, которая протекает с выделением одного моля воды, в процессе твердения меняется влажностное состояние материала. Это блокирует дальнейшее продвижение реакции и замедляет процесс карбонизации. В связи с этим необходимо разработать технологические приемы, снижающие водосодержание бетонной смеси на стадии ее приготовления, что может быть достигнуто введением в состав бетонной смеси пластифицирующих добавок в оптимальных дозировках. С другой стороны применение легких пористых заполнителей должно обеспечить отвод водной фазы из цементного теста в результате процессов самовакуумирования. Кроме этого для эффективного непрерывного протекания реакции карбонизации необходимо создать оптимально развитую структуру уплотненной бетонной смеси. Такая структура обеспечивает

объемную диффузию углекислого газа в изделие и связанное с этим объемное изменение новообразований с одной стороны, и коагуляцию пор структуры новообразованиями, ввиду локального увеличения объема твердой фазы в результате реакции карбонизации с другой стороны.

Эти мероприятия, а также оптимизация рецептуры вяжущего и режимов обработки должны обеспечить эффективность процесса карбонизации изделий, позволяющей при резком сокращении производственного цикла получать материал с заданными физико-механическими и теплотехническими свойствами.

В условиях карбонизационной технологии структуру керамзито-бетона целесообразно рассматривать во взаимосвязи трех основных факторов: агрегатной структуры, зависящей от свойств и упорядоченности расположения пористого заполнителя в структуре бетона; концентрации вяжущего, зависящей от свойств цемента и участием молотой известняковой породы в новообразованиях вяжущего; расхода воды затворения, зависящего от водопотребности пористого заполнителя и вяжущего, от требуемой удобоукладываемости бетонной смеси, определяемой особенностями технологии.

При оптимизации агрегатной структуры были использованы основные положения методики, разработанной в ЦНИИЭПжилища (г. Москва). Для подбора оптимальной гранулометрии заполнителя соотношение фракций рассчитывается по уравнению:

$$Y = \left(\frac{x}{D} \right)^n \quad (1)$$

Где: Y – проход через сито стандартного набора в объемно-насыпных долях единицы;

x – размер отверстия сита, мм;

D – предельная крупность смеси, мм;

n – показатель гранулометрии.

Учитывая специфику карбонизационного твердения, при котором кинетику диффузионного проникновения углекислого газа в объем материала будет определять структура и концентрация растворной части бетона, данная методика была усовершенствована. При этом за оптимальный гранулометрический состав смеси фракций мелкого заполнителя принимался состав, характеризующийся показателем гранулометрии n , отвечающий максимальным прочностным показателям контрольных образцов из раствора, приготовленного на основе данной смеси фракций песка

При твердении в нормально-влажностных условиях и после тепловлажностной обработки максимальной прочностью отличались образцы, изготовленные с использованием песка, гранулометрический состав

которого характеризуется показателем $n = 0,8$. Это согласуется с данными многих исследователей при выборе кривой просеивания керамзитовых обжиговых песков. В случае карбонизационного твердения максимальной прочностью характеризуются образцы, имеющие более пористую структуру, что отражается кривой просеивания песка с показателем гранулометрии $n = 1,1$. Полученные расчетно-экспериментальным путем результаты позволили назначить оптимальный пофракционный расход заполнителей по объему и массе в условиях карбонизационной технологии.

На стадии оптимизации рецептурно-технологических условий получения карбонизованного керамзитобетона решались следующие задачи: отработка экономичных составов бетона; исследование возможности интенсификации процесса карбонизации введением в состав вяжущего молотой известняковой породы (МИП) и снижением общего водосодержания бетонной смеси; отработка оптимальных режимов карбонизации изделий.

Предварительно проведена серия экспериментов по выявлению оптимальных условий проведения режимов карбонизации. Получение изделий с проектной распалубочной прочностью в течение 30...60 минут возможно при применении режимов с избыточным давлением углекислого газа. Карбонизация керамзитобетонных изделий по режиму без избыточного давления CO_2 обеспечивает получение изделий с распалубочной прочностью, составляющей 10...15% от 28-дневной, либо требует неоправданного удлинения режима карбонизации.

Согласно теории тепло- и массообмена значительное ускорение процесса карбонизации может быть достигнуто путем интенсивной подачи газообразного реагента в зону реакции. С этой точки зрения предварительное вакуумирование свежесформованного бетона позволяет создать пористую капиллярную систему, находящуюся под разряжением. Последующие перепады давления в начальный период твердения, обусловленные снятием вакуума и созданием избыточного давления при подаче углекислого газа, вызывают в капиллярной структуре бетона релаксацию напряжений, что приводит к эффективному самопоглощению CO_2 и интенсификации твердения.

А.М.Сорочкиным и А.Ф.Щуровым отмечалось, что процесс «карбонатного» растворения исходных минералов цемента ускоряется пропорционально давлению углекислого газа [1]. При этом применение

режимов с избыточным давлением CO_2 позволяет управлять процессами структурообразования цементных композиций. Вместе с тем карбонизация изделий при высоких давлениях приводит к созданию в системе высоких пересыщений и локальному увеличению объема твердой фазы. Это влечет за собой возникновение значительных внутренних напряжений и развитие деструктивных процессов в структуре бетона. Применение в этих условиях ступенчатого подъема давления CO_2 до требуемой величины позволяет исключить деструктивные процессы, происходящие при одноступенчатой карбонизации. Экспериментально установлено, что применение ступенчатого подъема давления CO_2 позволяет повысить распалубочную прочность керамзитобетона на 10...30% [2].

С целью оптимизации рецептурно-технологических параметров получения карбонизованного керамзитобетона был получен ряд математических моделей распалубочной, 28-дневной и 180-дневной прочности бетона в зависимости от изменяемых факторов: расхода вяжущего ($400 \pm 100 \text{ кг/м}^3$); содержания добавки ЛСТМ ($0,2 \pm 0,2\%$ от расхода вяжущего); содержания МИП ($15 \pm 15\%$ от расхода вяжущего); давления CO_2 ($0,9 \pm 0,3 \text{ МПа}$); длительности режима обработки ($45 \pm 15 \text{ мин}$).

Как показал анализ полученных моделей, при оптимальном сочетании факторов возможна эффективная замена 20...30% расхода цемента молотой известняковой породой без изменения уровня показателей физико-механических свойств материала. Основным компонентом кристаллической структуры при карбонизационном твердении является кальцит. Это подтверждается результатами рентгеноструктурного и дифференциально-термического анализов проб цементного камня. В связи с этим, очевидно, характерна преимущественная кристаллизация новообразований на поверхности зерен карбонатов, в результате чего последние обрастают сросшимися между собой хорошо развитыми кристаллами новой фазы. Электронно-микроскопический анализ подтвердил, что благодаря близости кристаллографических решеток наблюдается прочный эпитаксический характер срастания между карбонатной породой, выступающей в роли подложки, и кальцитом вторичной генерации, что ведет к упрочнению структуры.

Эксперимент выявил эффективность введения в состав бетонной смеси добавки ЛСТМ в количестве до 0,4% от расхода вяжущего. Применение ЛСТМ наиболее эффективно при одновременном введении в состав вяжущего МИП. В этом случае прочность керамзитобетона возрастает на 25...40% после карбонизации и на 25...45 % в возрасте 28 суток.

Введение ЛСТМ в повышенных дозировках обеспечивает получение технологичных бетонных смесей с низким водосодержанием. После уплотнения бетонной смеси дальнейшее обезвоживание цементного теста осуществляется как результат процессов самовакуумирования керамзитобетона, вследствие чего капилляры освобождаются от влаги и становятся газопроницаемыми. В процессе связывания CO_2 продуктами гидролиза минералов цемента происходит увеличение объема твердой фазы, сопровождающееся коагуляцией поровой структуры, что приводит к росту прочности бетона. При введении в состав

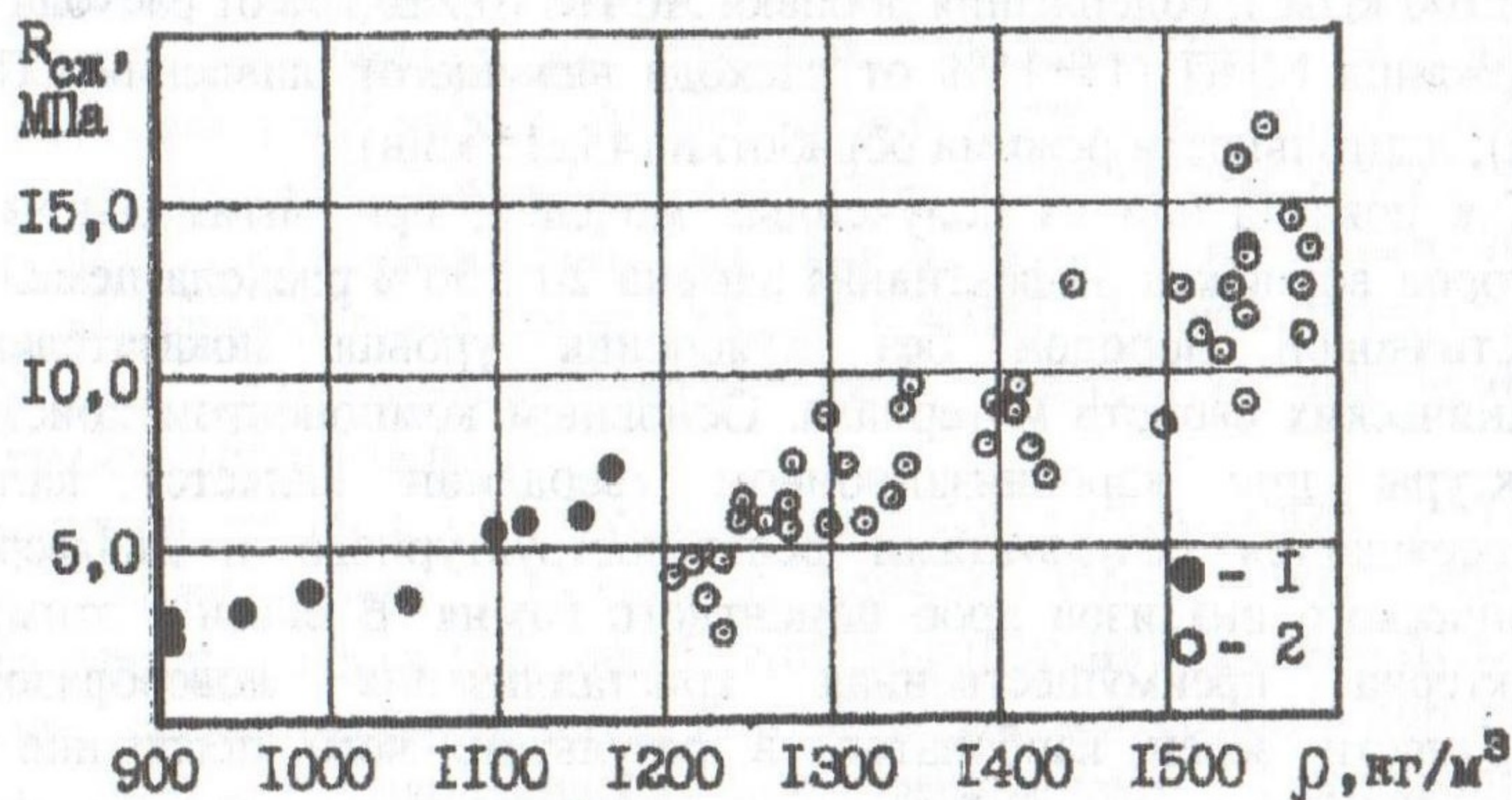


Рис. 1 Изолинии прочности керамзитобетона в возрасте одного часа после карбонизации (при содержании добавки ЛСТМ 0,4% от расхода вяжущего).

вяжущего МИП, скорость поглощения ЛСТМ минералами цемента резко понижается и увеличивается концентрация добавки в жидкой фазе цементного теста. Это обеспечивает эффект пластификации смеси и предотвращает чрезмерное замедление твердения системы.

Изменение давления CO_2 и времени карбонизации в исследуемом диапазоне оказывает существенное влияние на начальную прочность бетона.

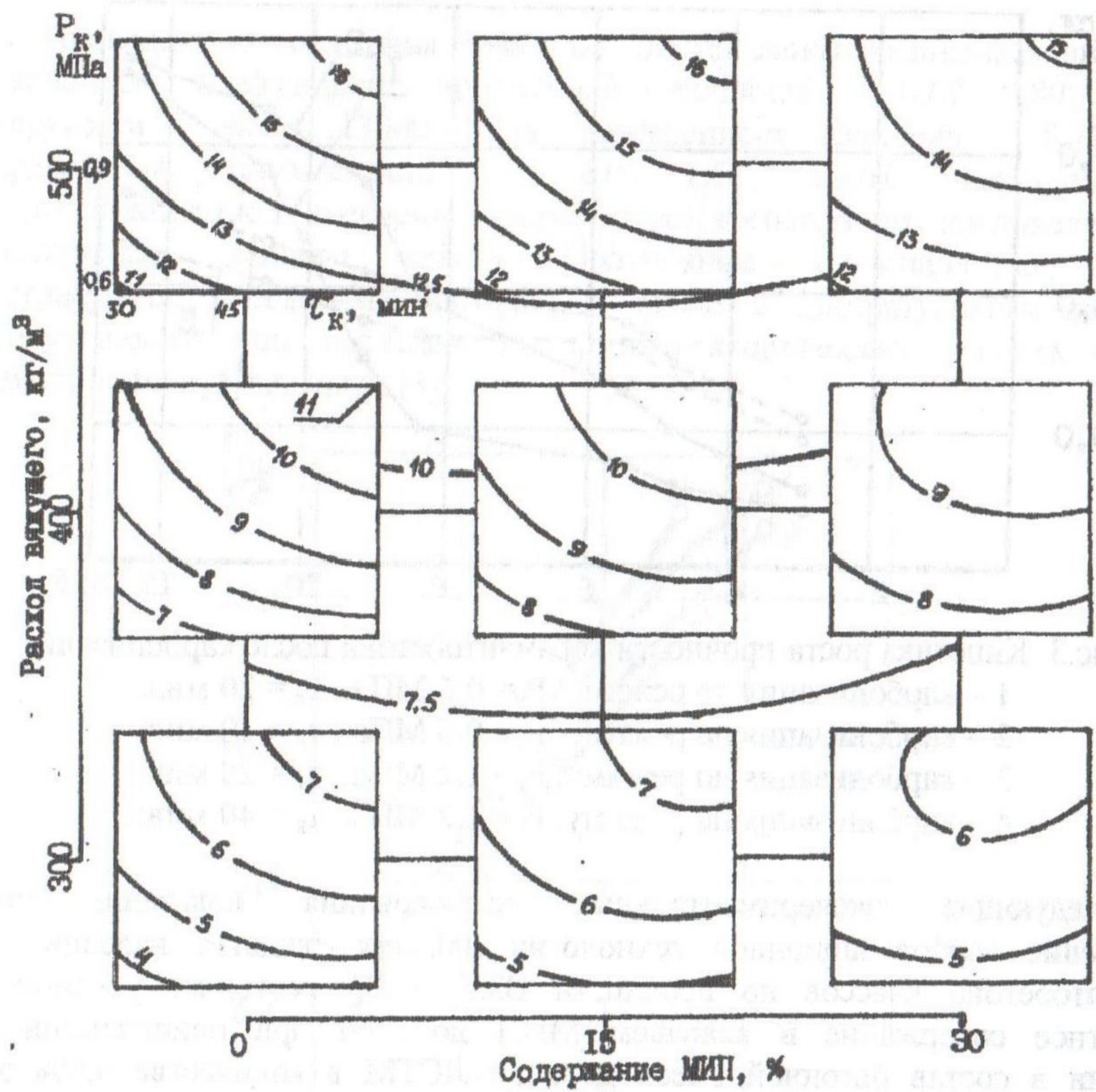


Рис.2 Зависимость между распалубочной прочностью и плотностью карбонизованного керамзитобетона

- 1 – бетон на керамзитовом гравии ($\rho_{нас.} = 450 \text{ кг/м}^3$);
- 1 – бетон на керамзитовом гравии ($\rho_{нас.} = 720 \text{ кг/м}^3$).

Изменение давления CO_2 от 0,6 до 1,2 МПа приводит к увеличению прочности бетона через 1 час после карбонизации на 25...60%. Увеличение длительности обработки от 30 до 60 минут сопровождается ростом прочности бетона на 5...20%. С увеличением возраста бетона эффект влияния режимов карбонизации на прочность бетона нивелируется.

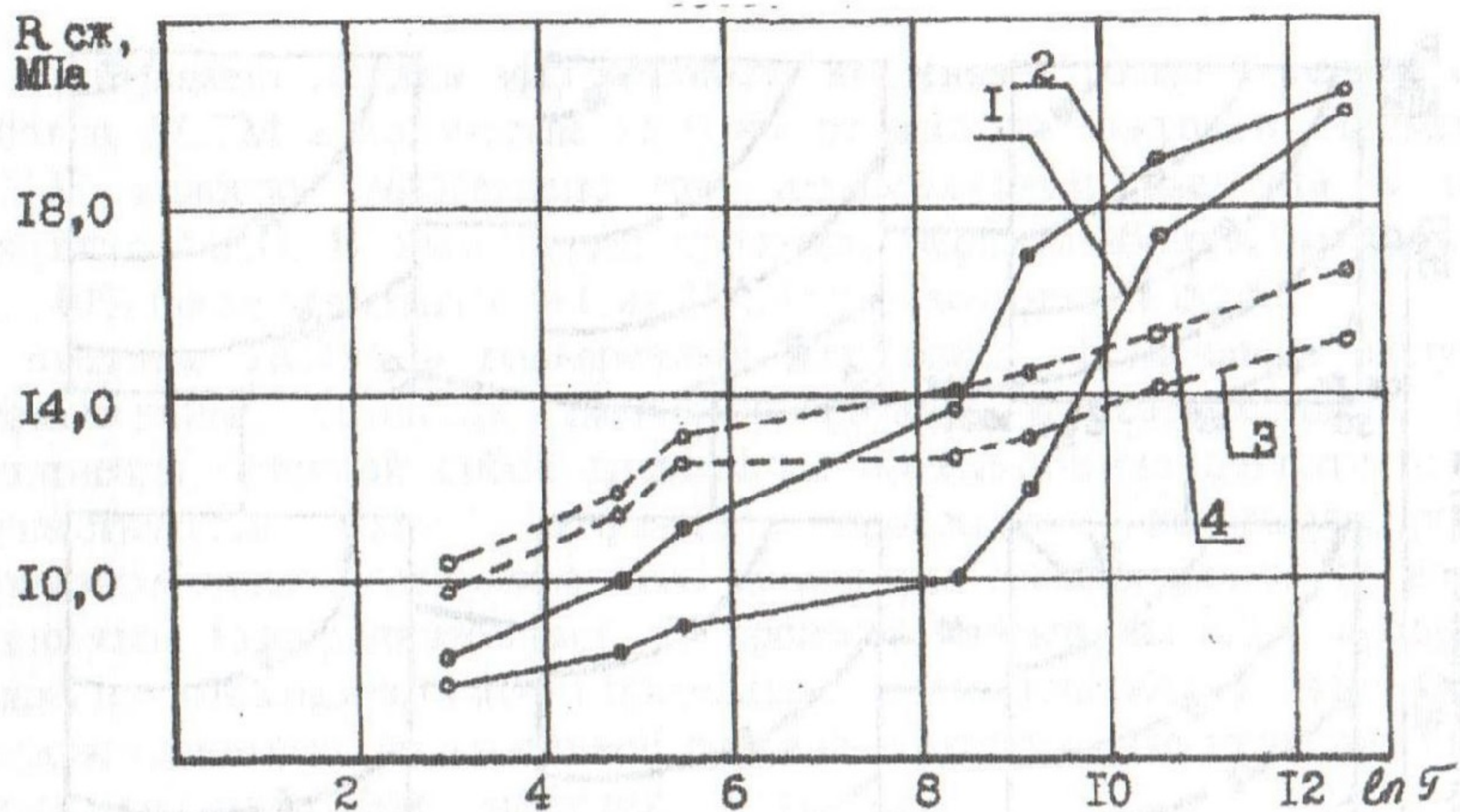


Рис.3 Кинетика роста прочности керамзитобетона после карбонизации

- 1 – карбонизация по режиму: $P_k = 0,6$ МПа, $\tau_k = 20$ мин;
- 2 – карбонизация по режиму: $P_k = 0,6$ МПа, $\tau_k = 40$ мин;
- 3 – карбонизация по режиму: $P_k = 1,2$ МПа, $\tau_k = 20$ мин;
- 4 – карбонизация по режиму: $P_k = 1,2$ МПа, $\tau_k = 40$ мин;

Последующие экспериментальные исследования показали, что применение карбонизационной технологии для производства изделий из керамзитобетона классов по прочности В3,5 – В5 позволяет увеличить процентное содержание в вяжущем МИП до 60% при одновременном введении в состав бетонной смеси добавки ЛСТМ в количестве 0,6% от массы вяжущего и довести фактический расход цемента до 140 кг/м^3 при условии обеспечения требуемой распалубочной и 28-дневной прочности.

Анализ кинетики изменения прочности керамзитобетона в возрасте 20 минут, 2 часа, 4 часа, 3 суток, 7 суток, 28 суток и 200 суток после карбонизации, показал, что рост прочности протекает неоднозначно в зависимости от применяемых режимов карбонизации. При этом максимальная распалубочная прочность керамзитобетона обеспечивается при применении режимов карбонизации, характеризующихся максимальной величиной давления. При величине давления CO_2 1,2 МПа и времени карбонизации 20...40 минут распалубочная прочность бетона составляет 70...75% от 28-дневной. Для обеспечения максимальных прочностных показателей бетона в период эксплуатации (в возрасте 7 суток и более) предпочтение следует отдавать режимам карбонизации с величиной давления на основной ступени – 0,6 МПа. Распалубочная прочность в этом случае составляет 50...60% от 28-дневной для бетонов классов В3,5 – В7,5 и 35...45% для бетонов классов В10 – В15.

Проведенные испытания показали, что по своим физико-механическим свойствам: коэффициент призмной прочности – 0,67...0,80; модуль упругости – 6000...13000 МПа; коэффициент Пуассона – 0,18...0,25; предельная сжимаемость – 1,03...1,54 мм/м, керамзитобетон карбонизационного твердения соответствует требованиям, предъявляемым к материалам данного класса. Полученные характеристики хорошо согласуются с данными авторов, а также с литературными данными, полученными при исследовании физико-механических свойств бетонов традиционного твердения [3].

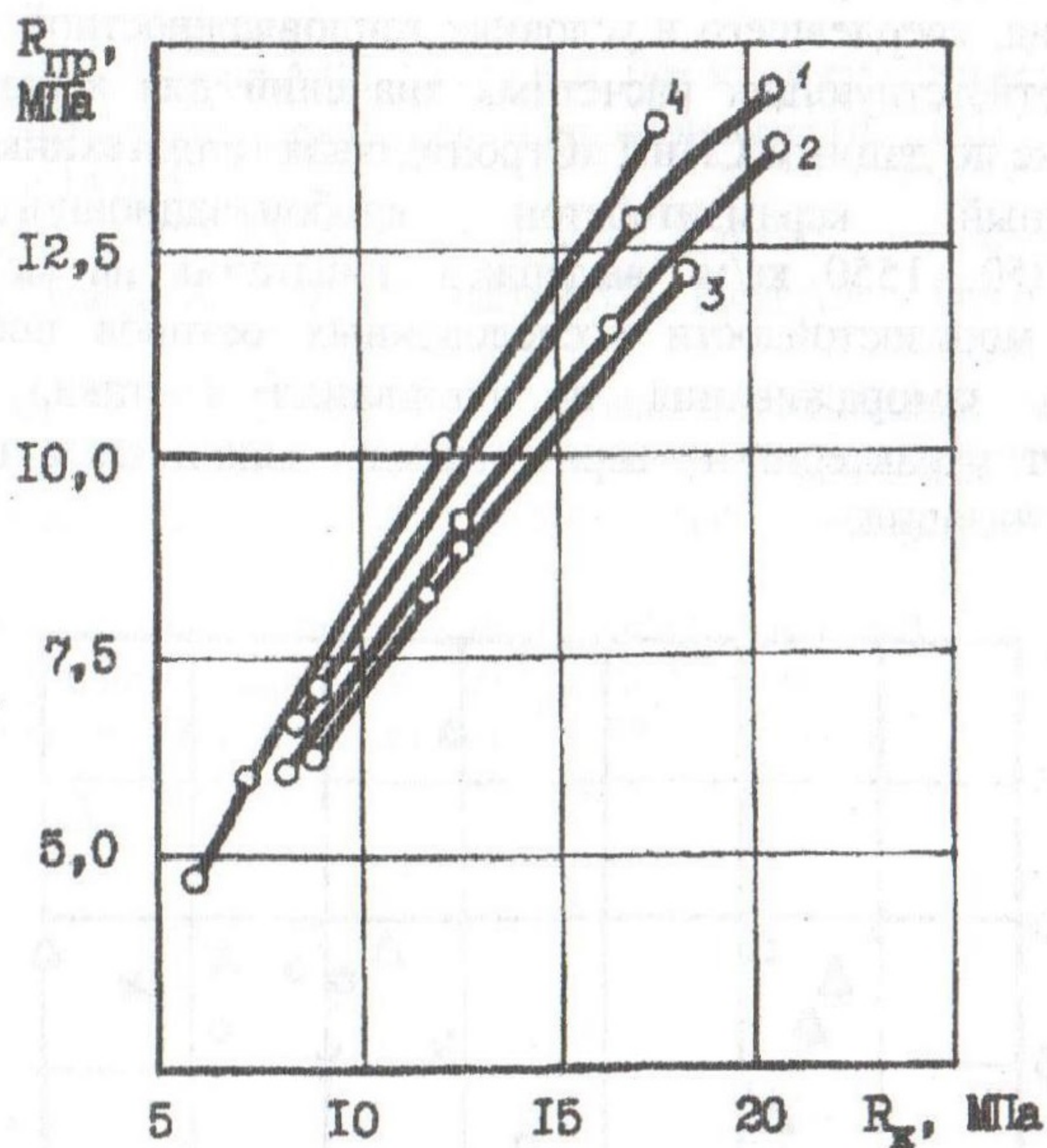


Рис. 4 Зависимости призмной прочности керамзитобетона от его кубиковой прочности

- 1 – карбонизация при $R_k = 0,6$ МПа;
- 2 – карбонизация при $R_k = 1,2$ МПа;
- 3 – тепловлажностная обработка;
- 4 – твердение в нормально-влажностных условиях.

Использование пористых песков в конструктивно-теплоизоляционных бетонах приводит к выпуску изделий с остаточной влажностью выше допустимой. В условиях карбонизационной технологии, в результате химического взаимодействия углекислого газа с продуктами гидролиза и гидратации минералов вяжущего, выделяется свободная вода, а сам процесс

сопровождается экзотермическим эффектом. В результате этого остаточная влажность керамзитобетона после распалубки составляет 9,4...13,5% для бетонов плотностью 920...1000 кг/м³ и 10,6...13,1% для бетонов плотностью 1200...1550 кг/м³. применение пластифицирующей добавки в повышенных дозировках позволяет снизить величину остаточной влажности на 0,5...3,5% в зависимости от состава бетона.

Анализ полученных экспериментальных значений коэффициента теплопроводности показал, что при условии равнозначности плотности керамзитобетона, у карбонизованного бетона он ниже на 5...10%, чем у керамзитобетона, твердевшего в условиях тепловлажностной обработки и до 30% ниже соответствующих расчетных значений для керамзитобетона на кварцевом песке по данным СНиП «Строительная теплотехника» [4].

Исследованный керамзитобетон карбонизационного твердения плотностью 1350...1550 кг/м³ выдержал испытания на морозо-стойкость. Коэффициент морозостойкости исследованных бетонов после 50 циклов попеременного замораживания и оттаивания составил 0,91...1,53 в зависимости от характеристик керамзитового заполнителя и примененных режимов карбонизации.

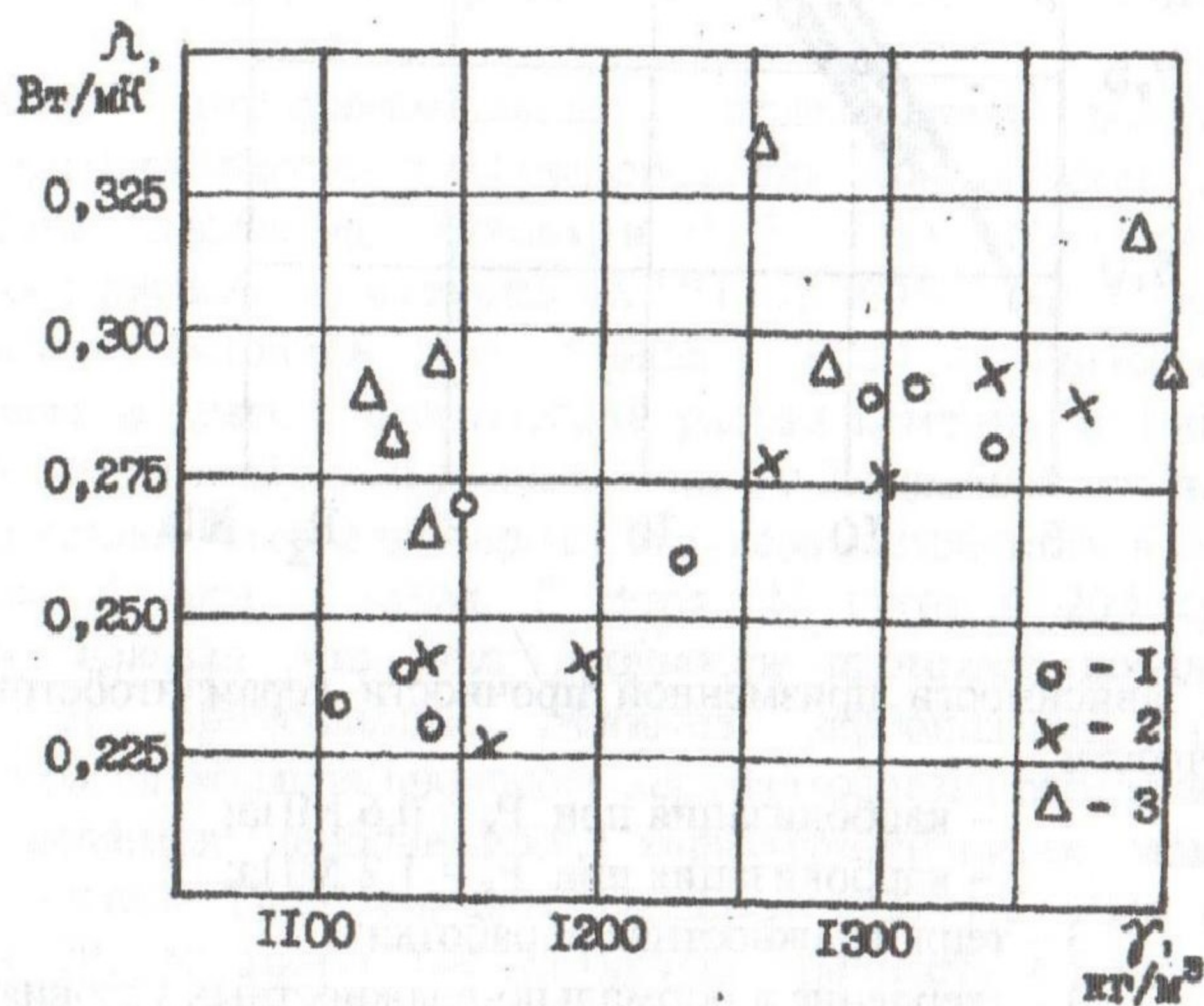


Рис. 5 Значения коэффициента теплопроводности керамзитобетона различной плотности

1 – карбонизация по режиму: $P_k = 0,2$ МПа, $\tau_k = 60$ мин;

2 – карбонизация по режиму: $P_k = 0,6$ МПа, $\tau_k = 60$ мин;

3 – тепловлажностная обработка по режиму: 2+3+6+2 часа.

В рамках опытно-производственной проверки результатов исследования была апробирована технология производства керамзитобетонных блоков с применением карбонизационного твердения. Объем партии составил 5 тысяч блоков. Предложенные к реализации технологические решения позволили снизить себестоимость керамзитобетона и расчетным путем подтвердить экономическую эффективность предложенной технологии.

Литература.

1. Сорочкин М.А., Щуров А.Ф., Урьев Н.Б. Воздействие углекислого газа на процесс гидратации цемента // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. – Самар, 2008. – №1. – с.149-151.
2. А.с. 1320202 СССР, МКИ С 04 В 40/02. Способ изготовления изделий // Михайленко Г.В., Соломатов В.И., Гара А.А. – Оpubл. в №24 – 6 с.
3. Михайленко Г.В., Гара А.А. Физико-механические характеристики керамзитобетона твердеющего в условиях карбонизации // Эффективные материалы и конструкции в строительстве. – Ашхабад, 1985. – с.93-94.
4. Михайленко Г.В., Гара А.А. Теплопроводность керамзитобетона твердеющего в условиях карбонизации // Эффективные технологии строительства. – Ашхабад, 1985. – с.144-147.