

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.12737/article_5ac24a2d16f840.64744639

Рахимбаев Ш. М., д-р техн. наук, проф.,
Черникова И.С., бакалавр

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СООТНОШЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ В РАЗЛИЧНЫЕ СРОКИ ТВЕРДЕНИЯ

chernikova_is@edu.bstu.ru

Рассмотрено влияние различных технологических факторов на соотношение предела прочности цементного камня и бетона в разные сроки твердения. Установлено, что изменение содержания важнейших клинкерных минералов в цементе, гипса, величины удельной поверхности, водоцементного отношения в определенных пределах мало влияет на кинетические константы твердения цементных систем. Уменьшение сечений образцов стандартной формы с 4×4 до 2×2 см² на 20–25 % уменьшает отношение марочной прочности к 7 суточной. Установлены пределы рационального содержания таких клинкерных минералов как, C_3S и C_2A , при которых обеспечиваются такие значения физико-механических свойств цементного камня. На основе установленных в данной работе закономерностей предложены поправки к коэффициентам пересчета 3-х и 7 суточной прочности на марочную.

Ключевые слова: предел прочности, кинетика твердения, марка по прочности.

Введение. Марочная прочность цементного камня в возрасте 28 суток является важнейшим параметром, который используется при проектировании состава бетонной смеси на предприятиях стройиндустрии Российской Федерации и других стран [1]. Большое значение имеет также кинетика твердения цементов и бетонов, в том числе отношение марочной прочности к трех и семи суточной.

Несмотря на это, в большинстве стран этому показателю не уделяется должное внимание. Обычно при расчете расхода цемента при производстве бетонных смесей в основу берется марка (класс по прочности) цемента, задекларированная заводом-изготовителем, хотя последний определяет ее через 28 суток после выпуска, руководствуясь при маркировке очередной партии цемента результатами испытаний предыдущих партий. При этом не учитывается, что некоторые партии цемента могут серьезно отличаться по своим вяжущим свойствам от предыдущих. В связи с этим в ряде публикаций исследовалась взаимосвязь между марочной прочностью цементов и их активностью в ранние сроки [11], что позволяет на основе последних прогнозировать марку (класс прочности) цементов. Однако в опубликованных работах не уделено должное внимание ряду важных технологиче-

ских факторов, влияющих на кинетику твердения цементов.

Основная часть. Соотношение предела прочности цементного камня стандартного состава, испытанных по ГОСТ 310.4-81 в различные сроки твердения, и марочной прочности являются предметом исследований многих отечественных и зарубежных специалистов [2–11]. На основе этих работ установлены различные способы оценки марки либо класса прочности цементного камня по результатам краткосрочных испытаний. Однако предложенные методы в большинстве случаев относятся к составам с фиксированными показателями вяжущего, удельной поверхности, содержания гипса и других технологических параметров, что ограничивает их применение. В данной работе предлагается восполнить этот пробел.

Широкое общение по этому вопросу было сделано А.В. Волженским [4], который предполагает следующий ряд величин, характеризующих кинетику твердения цементного камня в различные сроки (таблица 1). Недостаток этих данных заключается в том, что они носят слишком обобщенный характер и в них не учитывается влияние минерального состава клинкера, площади удельной поверхности цемента, формы и размера образцов цементного камня и так далее.

Таблица 1

Коэффициенты, характеризующие прочность портландцемента в различные сроки твердения по сравнению с марочной прочностью

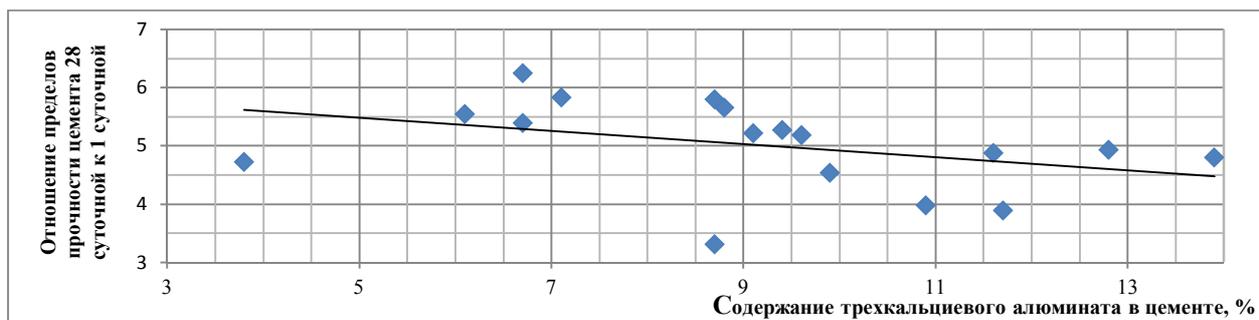
$\sigma_{28}/\sigma_{\tau}$	σ_{28}/σ_3	σ_{28}/σ_7	σ_{28}/σ_{90}	σ_{28}/σ_{180}
К	2,86	1,54	0,8	0,56

Из приведенных на рис. 1а экспериментальных данных [17], следует, что отношение марочной прочности цементного камня к 1-суточной при увеличении содержания в клинкере трехкальцевого алюмината от 4 до 7–8 % возрастает от 4,7 до 6. При дальнейшем росте содержания C_3A до 14 % $K_1 = \sigma_{28}/\sigma_1$ снижается до 4–5.

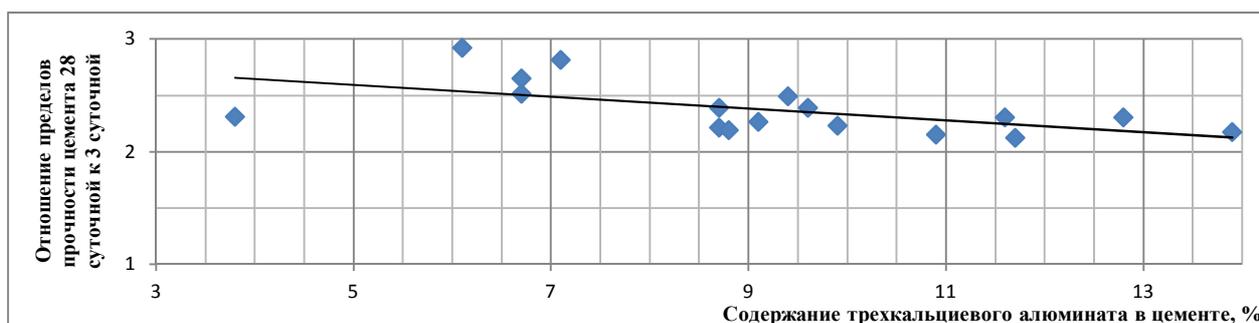
Необходимо отметить, что 1-суточная прочность цементного камня отличается от ма-

рочной более высокой величиной коэффициента вариации, поэтому функция $K_1(C_3A)$ отличается повышенным разбросом в сравнении с $K_3(C_3A)$ $K_7(C_3A)$.

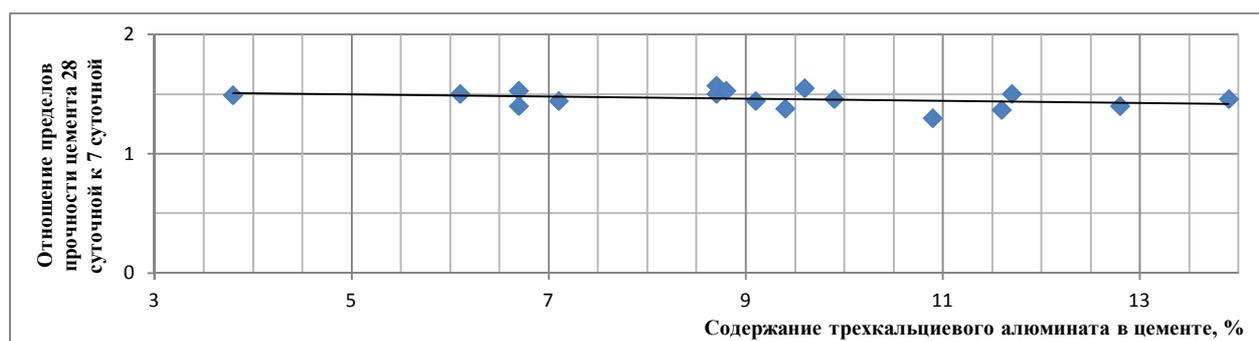
Из рис. 1в следует, что отношение марочной прочности камня к 7-суточной, по данным [17], мало зависит от содержания в клинкере C_3A и равно 1,5, как следует из [4].



а (По данным [17])



б (По данным [17])

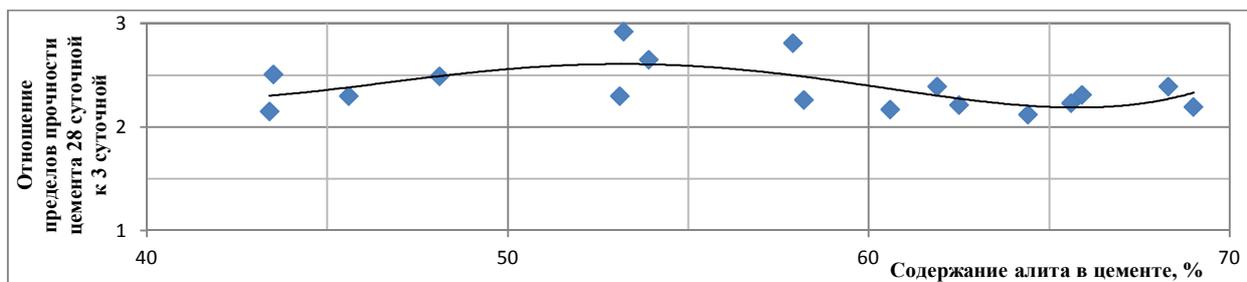


в (По данным [17])

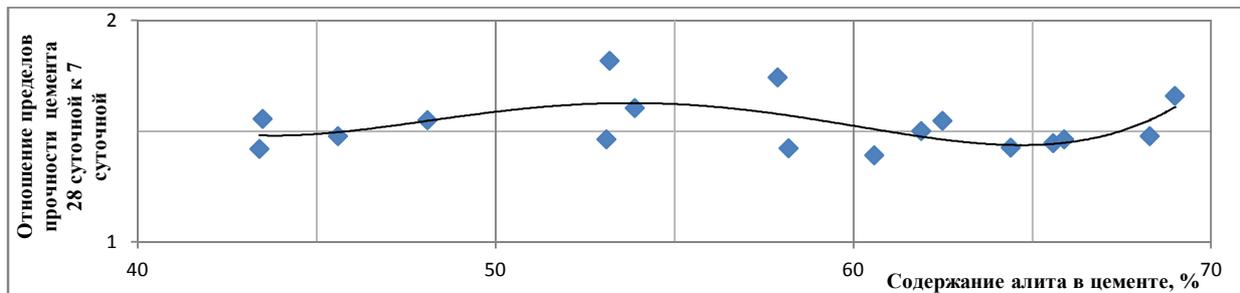
Рис. 1. Влияние содержания в клинкере C_3A на численное значение коэффициента $K = \sigma_{28}/\sigma_3$

Из показанных на рисунке 1б экспериментальных данных [17] следует, что увеличение содержания трехкальцевого алюмината в клинкере от 3,8 до 6 % сопровождается снижением $K_3 = \sigma_{28}/\sigma_3$ от 2,8 до 2,3. Дальнейший рост содержания C_3A в цементе до 8–14 % приводит к снижению этого коэффициента до 2,2. Таким образом, численное значение коэффициента $K_3 = 2,86$, в данном случае относится к цементу,

содержащему 5,5–6,5 % C_3A . Большинство выпускаемых в России цементов содержит 4–7% C_3A , поэтому указанное в [4] отношение K_3 является достаточно обоснованным. Для цементов, содержащих 9–14 % C_3A , $K_3 = 2,25–2,3$, что заметно ниже, чем указано в [4]. Цементы, содержащие 10–15 % C_3A , выпускаются лишь Стерлитамакским и Спасским заводами.

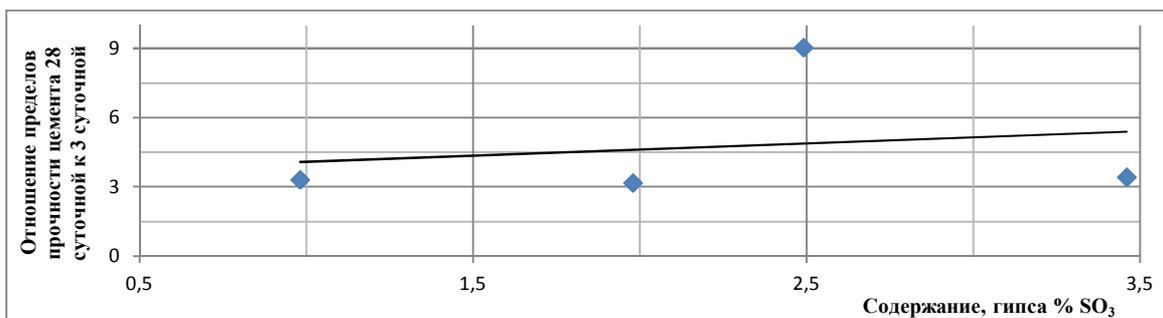


а

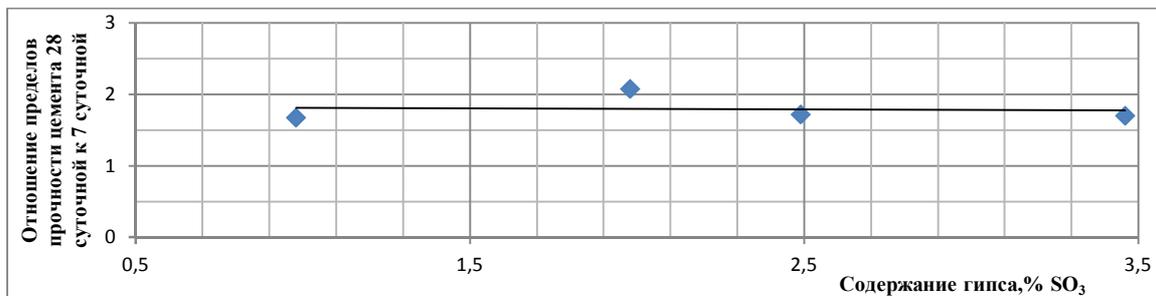


б

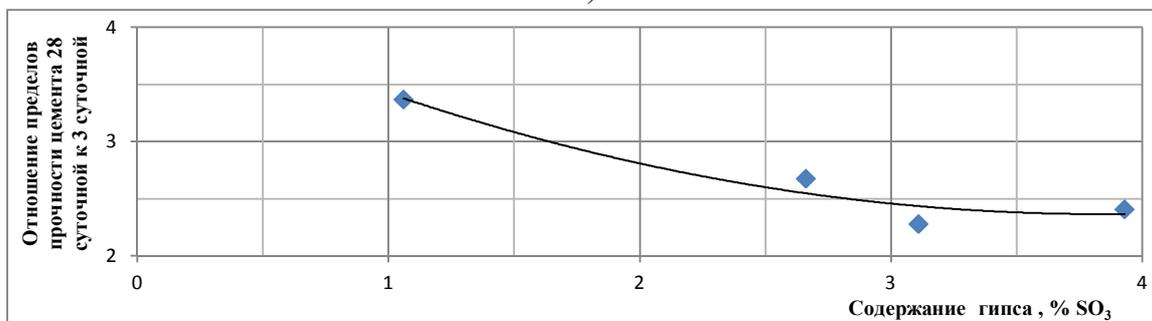
Рис. 2. Влияние содержания алита в цементе на отношение σ_{28}/σ_3 и σ_{28}/σ_7 камня стандартного состава



а

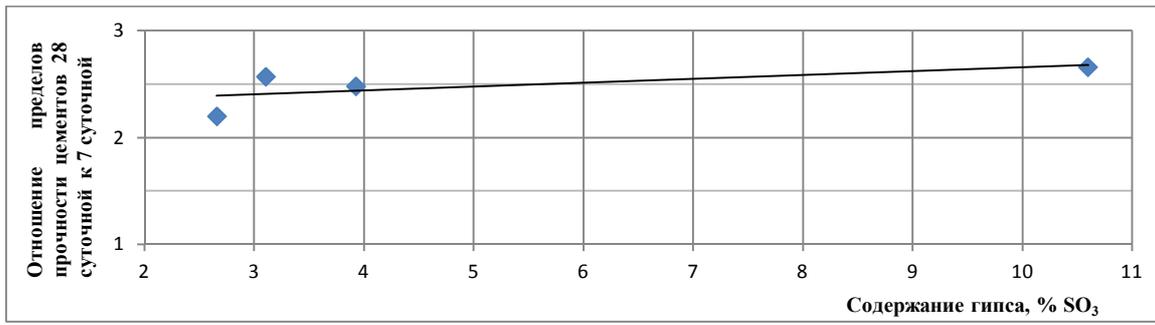


б)

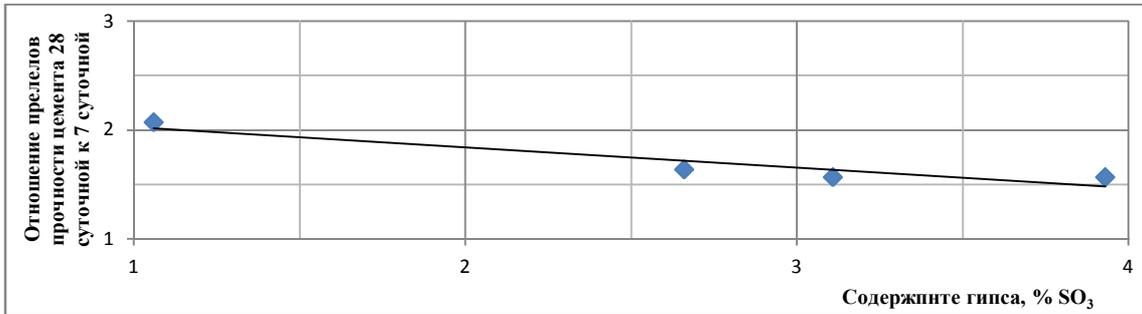


в)

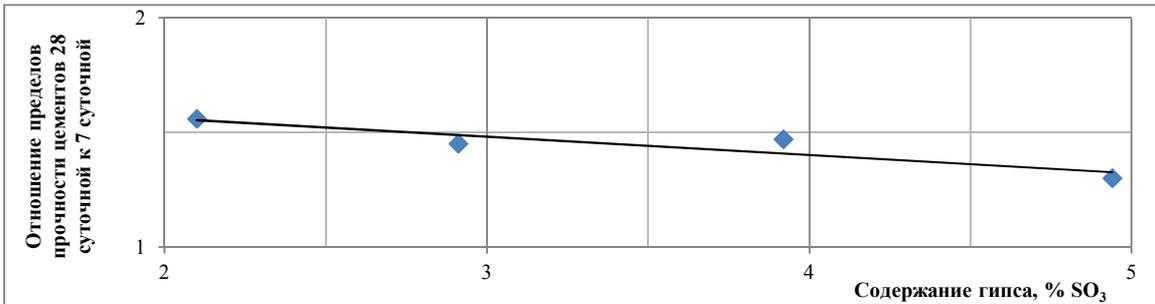
Рис. 3. (начало) Влияние гипса в пересчете на SO_3 на σ_{28}/σ_7 цемента с различным содержанием алита и C_3A



с)

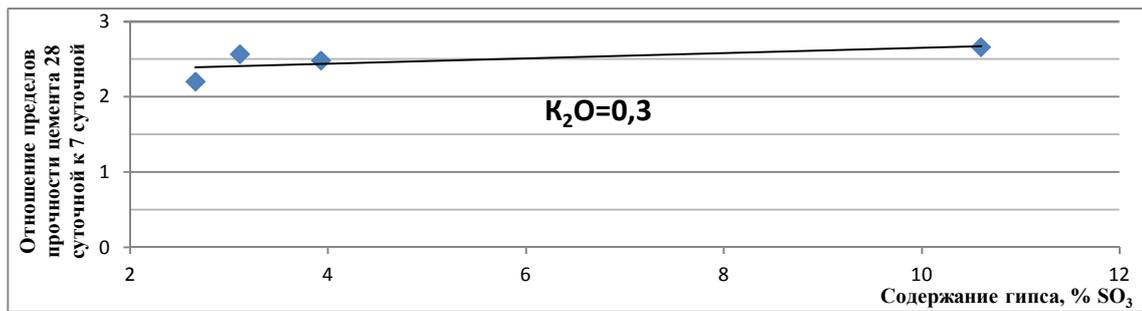


д)

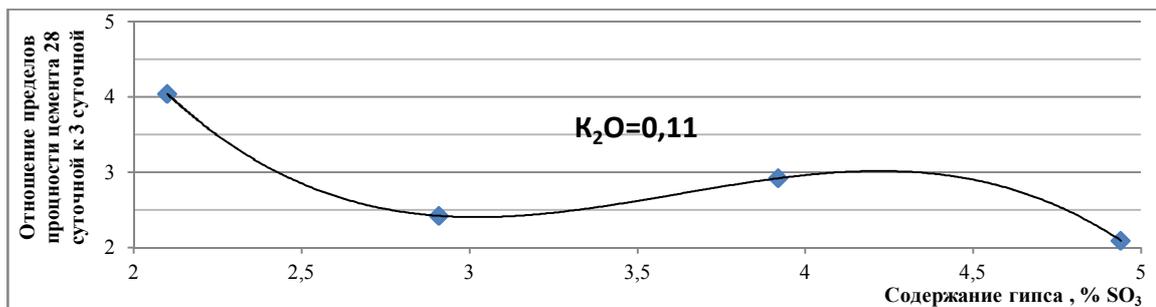


е)

Рис. 3. (окончание) Влияние гипса в пересчете на SO₃ на σ_{28}/σ_7 цементов с различным содержанием алита и C₃A

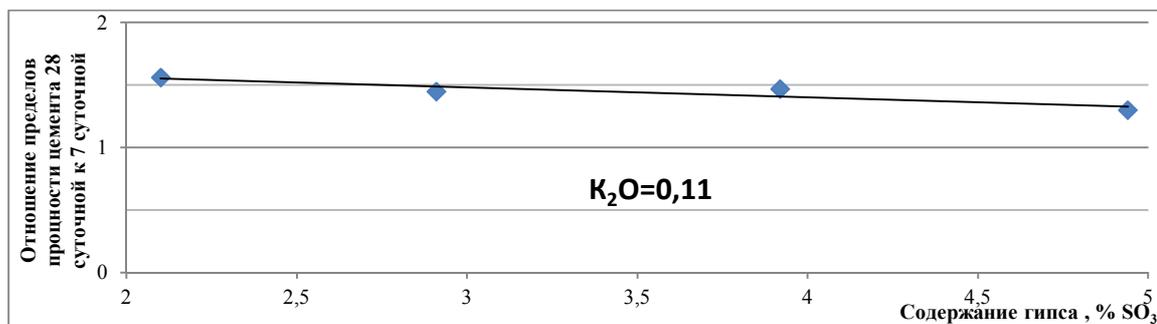


а



б

Рис. 4. (начало) Зависимость $K = \sigma_{28}/\sigma_3$ от содержания SO₃ в цементах с различным содержанием K₂O



в)

Рис. 4. (окончание) Зависимость $K = \sigma_{28}/\sigma_7$ от содержания SO_3 в цементах с различным содержанием K_2O

На рис. 2 показана взаимосвязь между содержанием в цементе алита и кинетическими константами твердения цементного камня. Из графиков следует, что $K_3 = \sigma_{28}/\sigma_3$ равно 2,87 при содержании алита 53–57 %. В цементах с низким (43–47 %) и повышенным содержанием алита в клинкере (60–70 %) эта величина снижается до 2,1–2,2.

Отношение $K_7 = \sigma_{28}/\sigma_7$ для большинства цементов близко к 1,5 (рис. 2б).

Анализ приведенных на рис. 3 экспериментальных данных [12, 13] приводит к выводу, что зависимость $K_7 = \sigma_{28}/\sigma_7$ как функция содержания гипса в пересчете на SO_3 зависит от соотношения алита (C_3S) и трехкальциевого алюмината (C_3A).

Из рис. 3а и 3б [12] следует, что содержание SO_3 в пределах 0,5–3,5% не влияет на численное значение K_3 и K_7 .

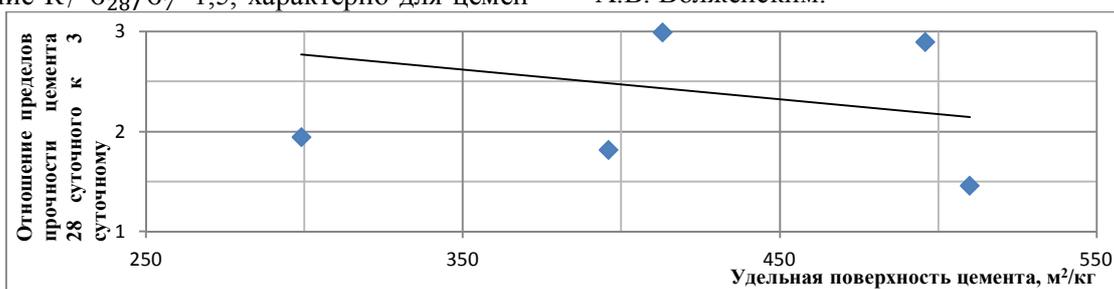
По данным [12] приведенным на рисунке 3в, $K_3 = 2,86$ наблюдается у цемента, содержащего около 2,5 % SO_3 . Из рис. 3г видно, что $K_3 = 2,7$ при содержании SO_3 равном 10,5 %. Численное значение $K_7 = \sigma_{28}/\sigma_7 = 1,5$, характерно для цементов,

содержащих 3,5–4 % SO_3 , а из рис. 3е видно, что $K_7 = 1,5$ наблюдается у цементов, содержащих не более 5 % SO_3 .

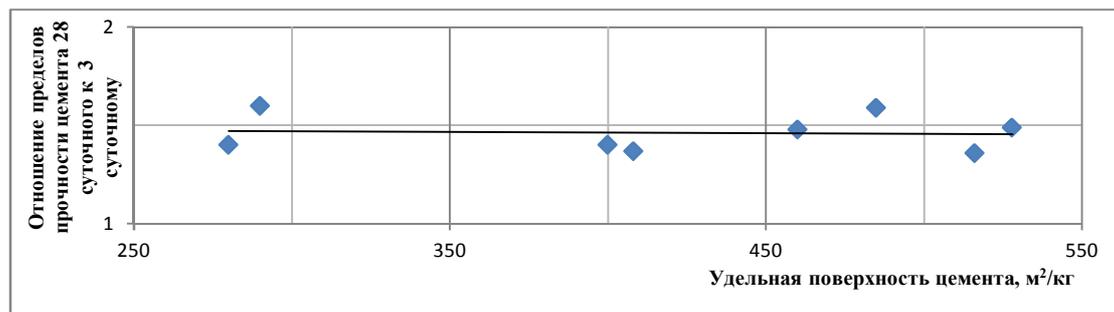
В цементах, которые отличаются повышенным содержанием C_3S и C_3A , влияние SO_3 на численное значение коэффициента K нивелируется и мало зависит от содержания SO_3 в пределах от 2 до 10 %. При этом численное значение K может достигать 2–2,5, если клинкер содержит 10–13 % C_3A (рис. 3б и в).

Анализ приведенных на рис. 4 графиков показывает, что содержание SO_3 в пределах 2,2–4 % слабо влияет на интенсивность набора прочности цементного камня во времени.

На рисунке 5 приведены экспериментальные данные [12]. Их анализ показывает, что при увеличении удельной поверхности цемента от 270 до 500 m^2/kg наблюдается снижение численного значения коэффициента K_7 от 1,2 до 1, от 1,5 до 1,3 и от 2 до 1,5. При средней удельной поверхности цемента 300–400 m^2/kg численное значение K находится в пределах от 1,3 до 1,6, что близко к величинам, приведенным А.В. Волженским.



а



б

Рис. 5. (начало) Влияние удельной поверхности цемента на численное значение $K = \sigma_{28}/\sigma_7$

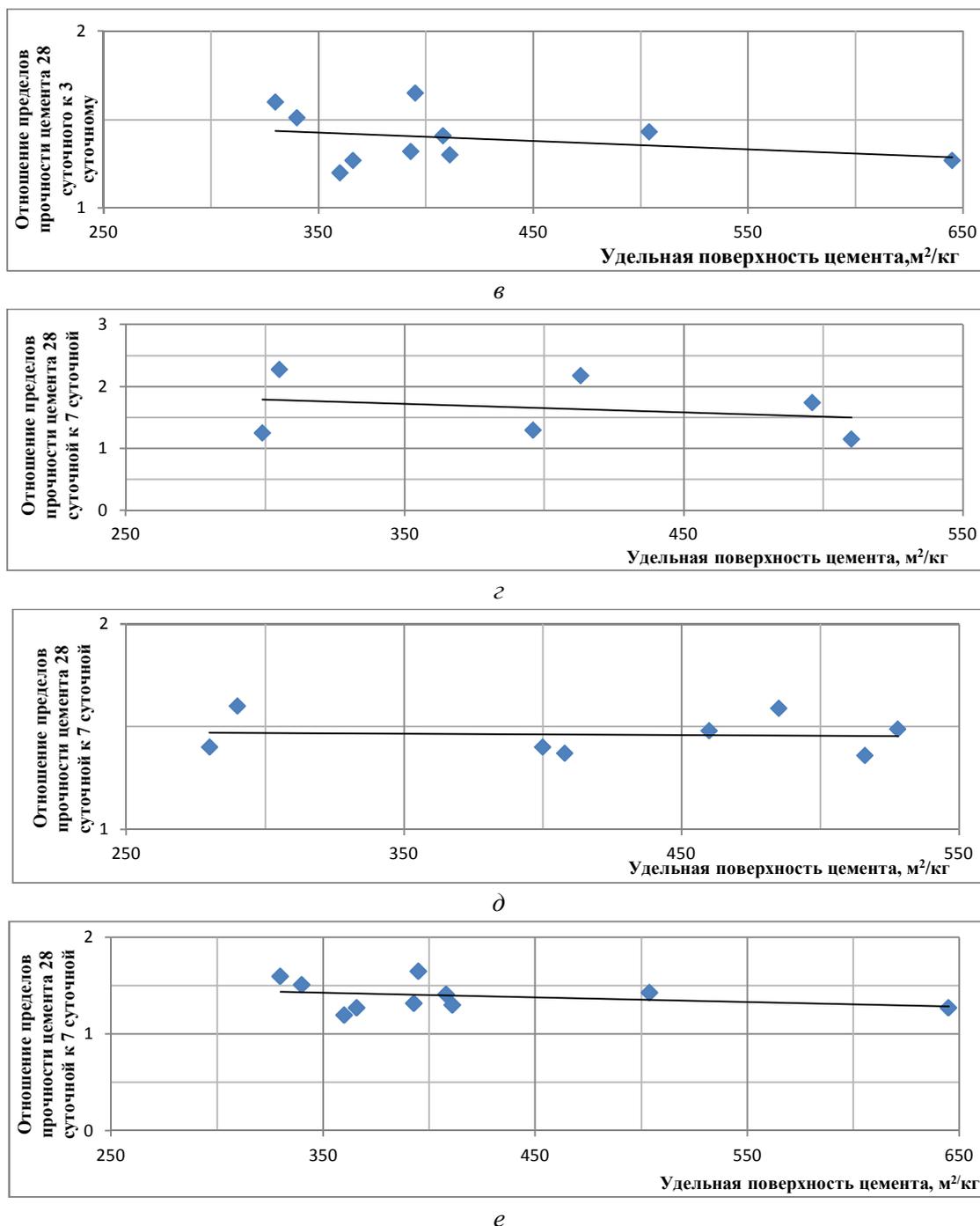


Рис. 5. (окончание) Влияние удельной поверхности цемента на численное значение $K = \sigma_{28}/\sigma_7$

Водоцементное отношение цементного камня с добавкой вольского или полифракционного песка строго регламентировано, поэтому рассмотрим влияние этого показателя на примере бетонной смеси с крупным заполнителем.

Анализ представленных на рисунке 6 экспериментальных данных приводит к выводу, что у бетонов коэффициент интенсивности твердения K_7 ниже, чем у цементно-песчаной смеси стандартного состава на 0,2–0,3 в пределах $В/Ц=0,2–0,5$. Рост $В/Ц$ сопровождается увеличением K_7 , который достигает величины 1,5 при $В/Ц \approx 0,65$.

Влияние водоцементного отношения на коэффициент интенсивности твердения приведено на рисунке 6. Анализ полученных данных показывает, что для бетонов с крупным заполнителем коэффициент K с ростом водоцементного отношения незначительно возрастает, находясь в сравнительно узких пределах 1,1–1,3 (рис. 6 б [14–16]); при этом водоцементное отношение влияет в меньшей степени на цементный камень стандартного состава без крупного заполнителя, (рисунок 6 в [8]) чем на бетон (рис. 6 а [9] и 3 б).

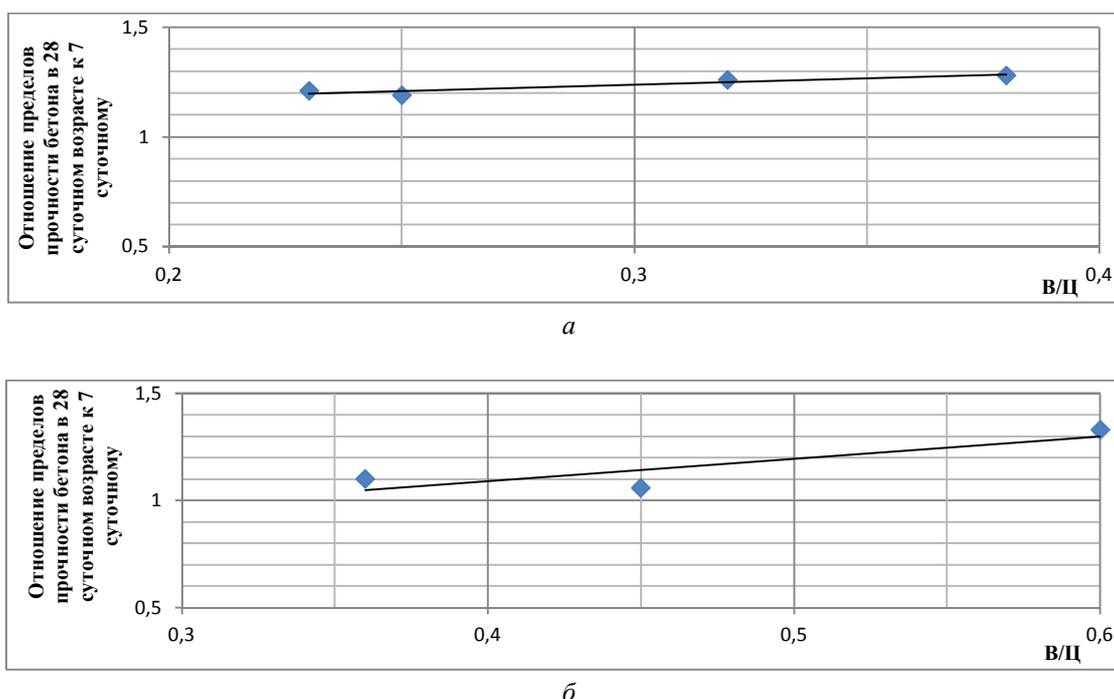


Рис. 6. Зависимость коэффициента K_7 цементного камня (а) бетонов с крупным заполнителем (б) от водоцементного отношения

Выводы.

– Отношение марочной прочности к 1 суточной плохо коррелируется ни со всеми рассмотренными показателями, определяющими состав цементной системы. С увеличением сроков твердения корреляция между содержанием алита, C_3A , гипса и водоцементного отношения усиливается.

– Установленные А. В. Волженским соотношения пределов прочности цементного камня в различные сроки твердения относятся к стандартным образцам состава 1:3, изготовленным согласно нормативно-технических требований В тяжелых бетонах с крупным заполнителем соотношение пределов прочности в различные сроки твердения на 0,2–0,3 ниже, чем у стандартных образцов.

– Содержание C_3A в пределах 4–6 % и алита – 50–60 % слабо влияет на численное значение K_3 и K_7 и находятся в пределах указанных Волженским. Приведенное Волженским значение $2,86 = \sigma_{28}/\sigma_3$ относится к цементам, содержащим 5–7 % C_3A , при более высоком содержании этого минерала K_3 снижается до 2,5–2,2. Содержание C_3A в пределах от 3,5 до 14 % незначительно влияет на численное значение K_7 . Указанная Волженским величина $K_3 = 2,86$ наблюдается при содержании алита в пределах 55–60 %. При меньшем содержании алита эта величина снижается до 2,2–2,3. Величина $K_7 = 1,5$ наблюдается в цементах с содержанием C_3S 45–55 %. При более высоком содержании алита эта величина возрастает до 1,7.

– Содержание в цементах гипса в пределах 1–5 % в пересчете на SO_3 незначительно влияет на σ_{28}/σ_7 у цементов с нормальным количеством трехкальциевого алюмината ($C_3A = 6–10$ %) и снижает ее на 0,2–0,3 у малоалюминатных цементов. σ_{28}/σ_7 равно 1,5–1,6 при содержании SO_3 , равном 2,5–4 %. Отношение σ_{28}/σ_3 при оптимальном содержании гипса равном 2,7–4 %, находится в пределах 2,7–2,8.

– Удельная поверхность цементов в пределах 250–600 m^2/kg слабо влияет на отношение σ_{28}/σ_7 .

– Повышение водоцементного отношения на 0,2 – 0,4 увеличивает коэффициент K на 0,2–0,3.

– Практическое использование изложенных закономерностей позволит повысить точность прогноза марки цемента по прочности (классу прочности) по результатам краткосрочных испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2003. 500 с.
2. Лукьянов И.А., Москвин В.М. Ускоренное определение марки бетона. М.: Изд-во Госстройиздат, 1956. 245 с.
3. Коган М.З. Сравнение свойств цементов по линиям прогнозирования // Бетон и железобетон. 1984. №2. С. 18–20.
4. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. М.: Изд-во Стройиздат, 1986. 464 с.

5. Калинин Б.А. Прогнозирование марочной прочности бетона по кинетике его твердения в разном возрасте // Бетон и железобетон. 1975. №3. С. 11–13.

6. Несветаев Г.В., Жильникова Т.Н. Прогнозирование марочной прочности бетона по кинетике твердения в разный период // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2003. №5. С. 344–347.

7. Бабушкин В.И., Шеин В.И. Прогнозирование свойств цементного камня и бетона // Цемент. 1980. №12. С. 15–18.

8. Бердов Г.И. Метод прогноза активности цемента и бетона // Бетон и железобетон. 1987. №12. С. 4–5.

9. Лагойда А.В. Прогнозирование прочности бетона при повышенных температурах // Бетон и железобетон. 1994. №4. С. 11–13.

10. Соловьева В.Я. Оценка и прогнозирование прочности материалов // Цемент. 1996. №3. С. 38–40.

11. Попович С. Соотношение различных показателей кинетики гидратации портландцемен-

та // Пятый Международный конгресс по химии цемента. М.: Изд-во Стройиздат, 1973. С. 283–285.

12. Ли Ф.М. Химия цемента и бетона / Пер. с англ. М.: Изд-во Стройиздат, 1964. 646 с.

13. Лесовик В.С., Погорелов С.А., Строкова В.В. Гипсовые вяжущие материалы и изделия. Белгород: Изд-во БГТУ, 2004. 224с.

14. Рахимбаев Ш.М., Оноприенко Н.Н., Попелова Е.А. Вяжущие вещества. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 86 с.

15. Рамачандран В.С. Наука о бетоне. М.: Изд-во Стройиздат, 1986. 545 с.

16. Химия цемента. Под ред. Х. Ф. Тейлора. М.: Изд-во Стройиздат, 1986. 450 с.

17. Егоров Г.В. Сопоставление прочностных показателей с изобарно-изотермическими потенциалами гидратации портландцементных клинкеров // Цемент. 1987. №8. С. 10–11.

Информация об авторах

Рахимбаев Шарк Матрасулович, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

E-mail: nich@rprog.belgorod.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Черникова Ирина Сергеевна, студент бакалавр, кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

E-mail: chernikova_is@edu.bstu.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в январе 2018 г.

© Рахимбаев Ш.М., Черникова И.С., 2018

S.M. Rakhimbaev, I.S. Chernikova

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE RATIO OF TENSILE STRENGTH OF CEMENT SYSTEMS AT VARIOUS SETTING TIMES

The influence of different technological factors on the ratio of the ultimate tensile strength of cement stone and concrete at various terms of hardening has been considered. It has been determined that the alteration of the content of the most important clinker minerals in cement, of gypsum content, of the specific surface area value or of the water-cement relation within certain limits has little effect on the kinetic constants of cement systems hardening. The reduction of the standard-shaped samples' sections from 4×4 to 2×2 cm² of size by 20–25 % reduces the ratio of the brand strength to the 7-days strength. The limits of the optimal content of clinker minerals, such as C₃S u C₃A, which provide these values of physical and mechanical properties of cement stone, have been determined. On the basis of the patterns determined in this paper, the amendments to calculation factors of the 3-days and 7-days strength to the brand strength have been proposed.

Keywords: ultimate strength, hardening kinetics, brand strength.

REFERENCES

1. Vazhenov Yu.M. Technology of concrete. Moscow: Publishing House of the ASV, 2003. 500 p.

2. Lukyanov IA, Moskvina VM Accelerated definition of the brand of concrete. Moscow: Publishing house Gosstroyizdat, 1956. 245 p.

3. Kogan M.Z. Comparison of the properties of cements along the forecasting lines // Concrete and reinforced concrete, 1984, no. 2, pp. 18–20.
4. Volzhensky A.V. Mineral knitting substances. Moscow: Izd-vo Stroyizdat, 1986, 464 p.
5. Kalinkin B.A. Prediction of the brand strength of concrete in the kinetics of its hardening at different ages // Concrete and reinforced concrete, 1975, no. 3, pp. 11–13.
6. Nesvetaev G.V., Zhilnikova T.N. Prognozirovanie vintage strength of concrete on the kinetics of hardening in different periods // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2003, no. 5, pp. 344–347.
7. Babushkin V.I., Shein V.I. Prediction of the properties of cement stone and concrete // Cement. 1980, no. 12, pp. 15–18.
8. Berdov G.I. Method of forecasting the activity of cement and concrete // Concrete and reinforced concrete, 1987, no. 12, pp. 4–5.
9. Lagoida A.V. Forecasting the strength of concrete at elevated temperatures // Concrete and reinforced concrete, 1994, no. 4, pp. 11–13.
10. Soloveva V.Ya. Evaluation and prediction of strength of materials // Cement, 1996, no. 3, pp. 38–40.
11. Popovich S. The ratio of various indicators of the kinetics of portland cement hydration // The Fifth International Congress on Cement Chemistry. Moscow: Publishing house Srtoiizdat, 1973, pp. 283–285.
12. Lee F.M. Chemistry of cement and concrete / Trans. with English. Moscow: Izd-vo Stroyizdat, 1964. 646 p.
13. Lesovik V.S., Pogorelov S.A., Strokova V.V. Gypsum binders and products. Belgorod: BSTU Publishing House, 2004. 224 p.
14. Rakhimbayev Sh.M., Onoprienko N.N., Pospelova E.A. Astringents. Belgorod: BSTU Publishing House, 2015. 86 p.
15. Ramachandran V.S. The science of concrete. Moscow: Izd-vo Stroyizdat, 1986. 545 p.
16. Chemistry of cement. Ed. H. F. Taylor. Moscow: Izd-vo Stroyizdat, 1986. 450 p.
17. Egorov G.V. Comparison of strength indicators with isobaric-isothermal potentials of portland cement clinker hydration // Cement, 1987, no. 8. pp. 10–11.

Information about the authors

Shark M. Rakhimbaev, PhD, Professor.

E-mail: nich@rprog.belgorod.ru

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chernikova I. Sergeevna, Bachelor student.

E-mail: chernikova_is@edu.bstu.ru

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov.

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in January 2018