

КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА БЕТОНА КЛАССА В30 В ПРОЦЕССЕ ТВЕРДЕНИЯ

¹О.Б. Бердиев, ²Б.Ф. Ботиров

¹Джизакский политехнический институт, г. Джизак, Республика Узбекистан

²Ташкентский архитектурно-строительный университет, Ташкент, Республика Узбекистан

В данной статье экспериментально исследованы изменение прочности при сжатии традиционного бетона класса В30 в зависимости от продолжительности твердения, а также процессы формирования минералогического состава цементного камня. Прочность бетонных образцов при сжатии определялась в возрасте 3, 7 и 28 суток, а минералогические изменения, протекающие в цементном камне, оценивались методом рентгеновской дифракции (XRD). По результатам испытаний установлено, что прочность бетона при сжатии составила 25,11 МПа в возрасте 3 суток, 28,07 МПа — в возрасте 7 суток и 40,02 МПа — в возрасте 28 суток. Указанные значения составили соответственно 62,7; 70,1 и 100 % от 28-суточной прочности. Результаты XRD-анализа показали, что с увеличением продолжительности твердения происходят существенные изменения минералогического состава цементного камня. В образце в возрасте 3 суток в области $2\theta \approx 29,4^\circ$ зарегистрирован дифракционный максимум высокой интенсивности, а также выявлены дифракционные максимумы, связанные с фазами C_3S , C_2S , C_4AF и C_3A . В возрасте 7 суток наблюдалось увеличение выраженности и интенсивности дифракционных максимумов, а также была зарегистрирована фаза портландита $Ca(OH)_2$. В 28-суточном образце отмечены формирование стабильной кристаллической структуры и уплотнение микроструктуры цементного камня. Полученные результаты свидетельствуют о тесной взаимосвязи между кинетикой набора прочности бетона, процессами гидратации цемента и изменением минералогического состава цементного камня во времени.

Ключевые слова: бетон, класс В30, прочность при сжатии, кинетика набора прочности, гидратация цемента, рентгенодифракционный анализ, XRD, минералогический состав, алит, белит, портландит.

КИНЕТИКАИ АФЗОИШИ МУСТАҲКАМИ ВА ҚОНУНИЯТҲОИ ТАШАККУЛҲОИ ТАРКИБИ МИНЕРАЛОГИИ БЕТОНИ СИНФИ В30 ДАР РАВАНДИ САХТШАВӢ

¹О.Б. Бердиев, ²Б.Ф. Ботиров

¹Донишқадаи политехникии Қиззах, ш. Қиззах, Ҷумҳурии Ўзбекистон

²Донишгоҳи меъморӣ ва сохтмони Тошканд, Тошканд, Ҷумҳурии Ўзбекистон

Дар мақолаи мазкур тағйирёбии мустаҳкамии фишории бетони анъанавии синфи В30 вобаста ба давомнокии сахтшавӣ, инчунин равандрои ташаккули таркиби минералогии санги сементӣ ба таври таҷрибавӣ таҳқиқ карда шудаанд. Мустаҳкамии фишории намунаҳои бетон дар синни 3, 7 ва 28 шабонарӯз муайян гардида, тағйироти минералогии дар санги сементӣ баамаломада бо усули дифраксияи рентгенӣ (XRD) арзёбӣ карда шуданд. Аз рӯи натиҷаҳои озмоиш муайян гардид, ки мустаҳкамии фишории бетон дар синни 3 шабонарӯз 25,11 МПа, дар синни 7 шабонарӯз 28,07 МПа ва дар синни 28 шабонарӯз 40,02 МПа-ро ташкил дод. Қиматҳои мазкур нисбат ба мустаҳкамии 28-шабонарӯза мутаносибан 62,7; 70,1 ва 100 %-ро ташкил намуданд. Натиҷаҳои таҳлили XRD нишон доданд, ки бо зиёд шудани давомнокии сахтшавӣ дар таркиби минералогии санги сементӣ тағйироти назаррас ба амал меоянд. Дар намунаи 3-шабонарӯза дар минтақаи $2\theta \approx 29,4^\circ$ максимуми дифраксионии дорои шиддатнокии баланд ба қайд гирифта шуда, инчунин максимумҳои дифраксионии марбут ба фазаҳои C_3S , C_2S , C_4AF ва C_3A муайян карда шуданд. Дар синни 7 шабонарӯз афзоиши возеҳият ва шиддатнокии максимумҳои дифраксионӣ мушоҳида гардида, инчунин фазаи портландит $Ca(OH)_2$ ба қайд гирифта шуд. Дар намунаи 28-шабонарӯза ташаккули сохтори устувори кристаллӣ ва зичшавии микросохтори санги сементӣ мушоҳида гардид. Натиҷаҳои бадастомада аз мавҷудияти робитаи зич байни кинетикаи афзоиши мустаҳкамии бетон, равандрои гидрататсияи семент ва тағйирёбии таркиби минералогии санги сементӣ бо мурури вақт шаҳодат медиҳанд.

Калидвожаҳо: Бетон, синфи В30, мустаҳкамӣ ҳангоми фишурдашавӣ, кинетикаи афзоиши мустаҳкамӣ, гидрататсияи семент, таҳлили рентгенодифраксионӣ, XRD, таркиби минералогӣ, алит, белит, портландит.

STRENGTH DEVELOPMENT KINETICS AND PATTERNS OF MINERALOGICAL COMPOSITION FORMATION IN B30 CONCRETE DURING HARDENING

¹O.B. Berdiyev, ²B.F. Botirov

¹Jizzakh Polytechnic Institute, Jizzakh, Republic of Uzbekistan

²Tashkent University of Architecture and Civil Engineering, Tashkent, Republic of Uzbekistan

This article experimentally investigates the changes in the compressive strength of conventional B30 concrete depending on the curing age, as well as the processes involved in the formation of the mineralogical composition of the cement stone. The compressive strength of the concrete specimens was determined at 3, 7, and 28 days, while the mineralogical changes occurring in the cement stone were evaluated using X-ray diffraction (XRD) analysis. The test results showed that the compressive strength of concrete was 25.11 MPa at 3 days, 28.07 MPa at 7 days, and 40.02 MPa at 28 days. These values corresponded to 62.7%,

70.1%, and 100%, respectively, of the 28-day compressive strength. The XRD analysis showed that significant changes occurred in the mineralogical composition of the cement stone with increasing curing age. In the 3-day specimen, a high-intensity diffraction peak was recorded at $2\theta \approx 29.4^\circ$, along with diffraction peaks associated with the C_3S , C_2S , C_4AF , and C_3A phases. At 7 days, an increase in the prominence and intensity of the diffraction peaks was observed, and the portlandite $Ca(OH)_2$ phase was also detected. In the 28-day specimen, the formation of a stable crystalline structure and densification of the cement stone microstructure were observed. The obtained results indicate a close relationship between the kinetics of concrete strength development, cement hydration processes, and changes in the mineralogical composition of the cement stone over time.

Keywords: concrete, B30 class, compressive strength, strength development kinetics, cement hydration, X-ray diffraction analysis, XRD, mineralogical composition, alite, belite, portlandite.

Введение (Introduction)

Бетон является одним из наиболее широко применяемых композиционных материалов в современном строительстве. Его прочность и эксплуатационная надежность определяются минералогическим составом цемента, водоцементным отношением, технологией приготовления и уплотнения бетонной смеси, а также условиями твердения [6, 7]. Среди указанных факторов важную роль в формировании структуры бетона и повышении его прочности во времени играет процесс гидратации цемента [7, 12].

После взаимодействия цемента с водой начинается процесс гидратации клинкерных минералов. В результате данного процесса образуются продукты гидратации, формирующие структуру цементного камня, в том числе фаза $C-S-H$ и портландит $Ca(OH)_2$ [10]. Процессы гидратации, протекающие на начальных стадиях твердения, обеспечивают формирование ранней прочности бетона, тогда как дальнейшее развитие гидратации сопровождается совершенствованием структуры цементного камня и последующим повышением прочности бетона [7, 8].

Оценка только конечной 28-суточной прочности бетона не позволяет в полной мере охарактеризовать процессы структурообразования, протекающие в материале. В связи с этим важное значение имеет оценка кинетики набора прочности бетона путем сопоставления его прочностных показателей на различных сроках твердения [7].

При исследовании процессов гидратации материалов на цементной основе рентгенодифракционный анализ (XRD) является одним из эффективных инструментальных методов [8–10]. Метод XRD позволяет идентифицировать кристаллические фазы в составе цементного камня и проследить их изменения в зависимости от продолжительности твердения [8, 9]. В современных исследованиях комплексный анализ результатов XRD и механических испытаний широко применяется для оценки механизмов структурообразования материалов на цементной основе [11–14].

Исходя из вышеизложенного целью исследования являются экспериментальная оценка кинетики набора прочности при сжатии традиционного бетона класса В30 в возрасте 3, 7 и 28 суток, а также сравнительный анализ полученных механических показателей с результатами рентгенодифракционного анализа цементного камня.

Материалы и методы (Materials and methods)

Экспериментальные исследования проводились на образцах традиционного тяжелого бетона класса В30. Приготовление бетонной смеси и контроль её технологических свойств осуществлялись в соответствии с требованиями ГОСТ 10181–2014 и ГОСТ 7473–2010 [3, 4].

Для определения прочности при сжатии были изготовлены контрольные образцы кубической формы размером 100×100×100 мм. Подготовка образцов к испытаниям осуществлялась в соответствии с требованиями ГОСТ 10180–2012 [1].

Образцы хранились в лабораторных условиях при температуре $(20 \pm 5)^\circ C$ и относительной влажности воздуха не менее 55 %. Перед проведением испытаний образцы подвергались визуальному осмотру, в ходе которого проверялось наличие трещин, пор, повреждений граней, расслоений и других дефектов.

Средняя плотность бетонных образцов определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.1 [5].

Прочность бетонных образцов при сжатии определялась на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4 в соответствии с требованиями [1]. Образец устанавливали по центру плит пресса, после чего нагрузку непрерывно увеличивали со скоростью $(0,6 \pm 0,2)$ МПа/с. Максимальное значение нагрузки, зафиксированное в момент разрушения образца, принималось за разрушающую нагрузку.

Основная расчетная формула прочности бетона при сжатии имеет следующий вид:

$$R = \frac{F}{A} \quad (1)$$

где: R-прочность бетона при сжатии, МПа; F- максимальная разрушающая нагрузка, А-площадь поперечного сечения образца, воспринимающая нагрузку, мм² [1].

Для каждого срока твердения испытания проводились на трёх образцах. Обработка полученных результатов и статистическая оценка прочности бетона выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 10180–2012 и ГОСТ 18105–2018 [1, 2]. Обработка результатов испытаний также осуществлялась в соответствии с положениями ГОСТ 10180–2012.

Результаты (Results)

С целью оценки формирования прочности бетона во времени в процессе твердения образцы традиционного бетона класса В30 подвергались испытаниям на сжатие в возрасте 3, 7 и 28 суток. Для каждого срока твердения определялись средняя плотность образцов, величина разрушающей нагрузки и прочность бетона при сжатии.

Согласно результатам экспериментальных исследований, средняя прочность бетона при сжатии в возрасте 3 суток составила 25,11 МПа, в возрасте 7 суток — 28,07 МПа, а в возрасте 28 суток — 40,02 МПа. По отношению к 28-суточной прочности данные показатели составили соответственно 62,7; 70,1 и 100 %.

Полученные результаты показали закономерное увеличение прочности бетона с увеличением продолжительности твердения. Данная закономерность связана с формированием продуктов гидратации и развитием структуры цементного камня в процессе гидратации цемента, что также отмечается в других исследованиях [7, 11, 12].

Таблица 1 – Показатели прочности бетона класса В30 в зависимости от продолжительности твердения
Table 1 – Strength Characteristics of B30 Concrete Depending on Curing Age

Продолжительность твердения, сут	Средняя разрушающая нагрузка, кН	Прочность при сжатии, МПа	Относительно 28-суточной прочности, %
3	251,09	25,11	62,7
7	280,74	28,07	70,1
28	400,25	40,02	100

Результаты, представленные в таблице, показывают закономерное увеличение прочности бетона с увеличением продолжительности твердения. В частности, уже в возрасте 3 суток бетон достиг 62,7 % от своей 28-суточной прочности. К 7 суткам данный показатель увеличился до 70,1 %. В период от 7 до 28 суток наблюдался дальнейший рост прочности, и к возрасту 28 суток её значение достигло 40,02 МПа.

Если рассчитать относительное изменение прочности по отдельным периодам, то в интервале от 3 до 7 суток:

$$\Delta R_{3-7} = 28,07 - 25,11 = 2,96$$

что по отношению к прочности бетона в возрасте 3 суток составляет:

$$\frac{2,96}{25,11} \cdot 100\% = 11,79\%$$

В период от 7 до 28 суток:

$$\Delta R_{7-28} = 40,02 - 28,07 = 11,95$$

что по отношению к прочности бетона в возрасте 7 суток составляет:

$$\frac{11,95}{28,07} \cdot 100\% = 42,57\%$$

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показывают, что формирование прочности бетона класса В30 на различных этапах твердения протекает с неодинаковой интенсивностью.

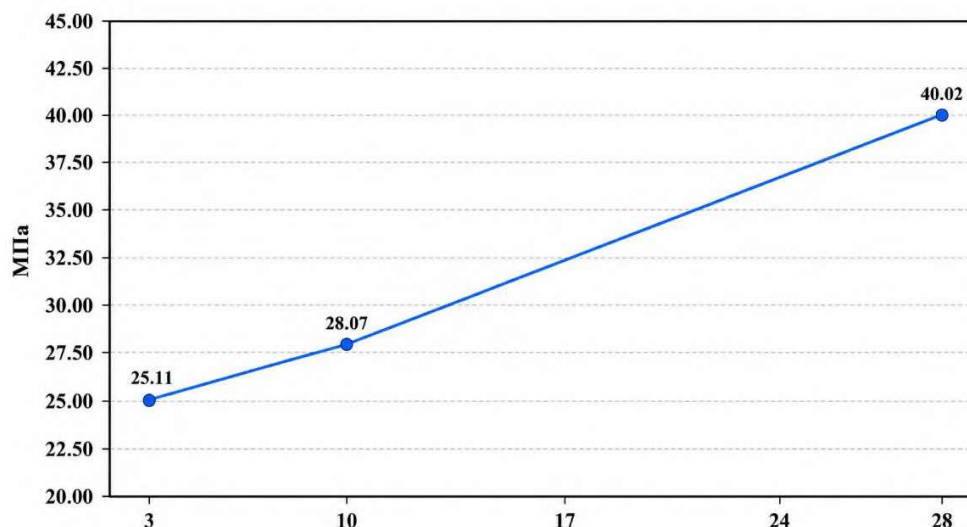


Рисунок 1 – Кинетика прочности бетона класса В30 при сжатии в зависимости от продолжительности твердения
Figure 1 – Compressive Strength Development Kinetics of B30 Concrete Depending on Curing Age

Для более детальной оценки кинетики набора прочности бетона целесообразно рассматривать не только абсолютные значения прочности, но и среднесуточную интенсивность её прироста в определённые интервалы времени.

Интенсивность набора прочности рассчитывалась по следующему выражению:

$$I_R = \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

где: I_R – средняя интенсивность прироста прочности, МПа/сут; R_1, R_2 – прочность бетона соответственно в начале и конце рассматриваемого временного интервала, МПа; t_1, t_2 – соответствующие сроки твердения бетона, сут.

Период 3–7 суток

$$I_{3-7} = \frac{28,07 - 25,11}{7 - 3} = 0,74 \text{ МПа/сутка}$$

Период 7–28 суток

$$I_{7-28} = \frac{40,02 - 28,07}{28 - 7} = 0,569 \text{ МПа/сутка}$$

Таблица 2 – Интенсивность набора прочности бетона класса В30

Table 2 – Strength Development Rate of B30 Concrete

Период твердения, сут	Начальная прочность, МПа	Конечная прочность, МПа	Прирост прочности, МПа	Средняя интенсивность прироста, МПа/сут
3–7	25,11	28,07	2,96	0,740
7–28	28,07	40,02	11,95	0,569

По результатам расчётов средняя интенсивность набора прочности в период 3–7 суток составила 0,740 МПа/сут, а в период 7–28 суток — 0,569 МПа/сут.

Следовательно, среднесуточная интенсивность прироста прочности снизилась на:

$$\frac{0,740 - 0,569}{0,740} \cdot 100\% = 23,1\%$$

Таким образом, в период 7–28 суток среднесуточная интенсивность набора прочности снизилась примерно на 23,1 % по сравнению с периодом 3–7 суток. Это может быть объяснено тем,

что процесс гидратации цемента протекает с неодинаковой скоростью во времени, а кинетика гидратации зависит от продолжительности твердения [7, 8, 12].

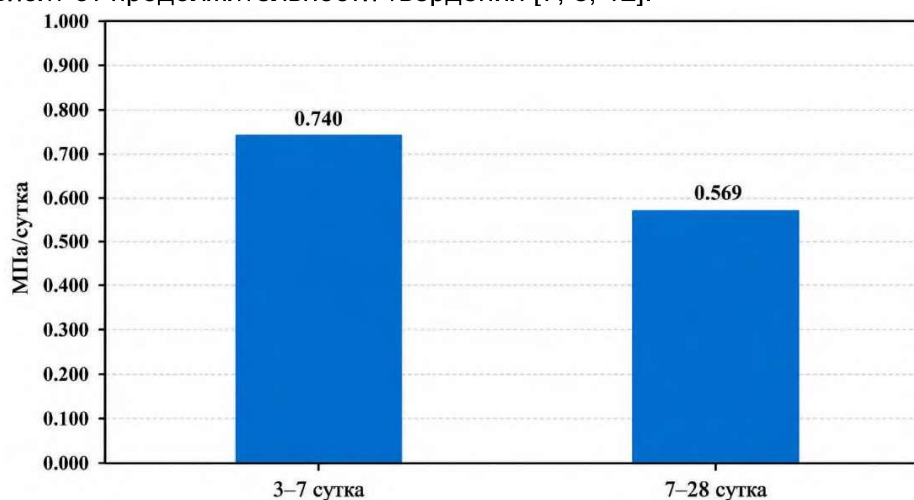


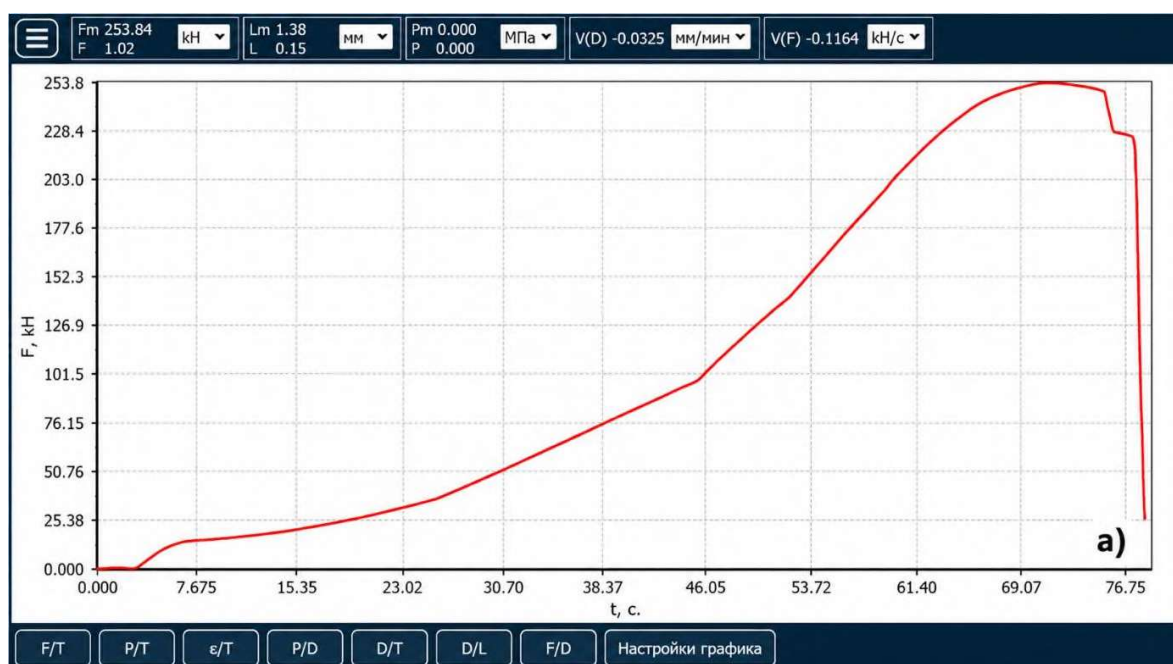
Рисунок 2 – Средняя интенсивность набора прочности бетона класса В30
Figure 2 – Average Strength Development Rate of B30 Concrete

С целью оценки процесса набора прочности бетона класса В30 во взаимосвязи с минералогическими изменениями, происходящими в цементном камне, были рассмотрены результаты рентгенодифракционного анализа образцов в возрасте 3, 7 и 28 суток.

В исходном материале на дифрактограмме образца бетона после 3 суток твердения наиболее интенсивный пик наблюдался в области $2\theta = 29,4^\circ$ и был связан с фазой алита (C_3S). Кроме того, пики в областях $2\theta = 32,2^\circ$; $33,0^\circ$; $41,2^\circ$; $50,2^\circ$ и $59,8^\circ$ были интерпретированы как свидетельствующие о наличии фаз белита (C_2S), ферроалюмината (C_4AF) и алюмината (C_3A).

В данный период прочность бетона при сжатии составила 25,11 МПа, что соответствует 62,7 % от его 28-суточной прочности.

Согласно результатам XRD-анализа, на 3-и сутки процесс гидратации цемента протекал активно, при этом формировалась минералогическая основа для последующего повышения прочности и плотности бетона [8–10].



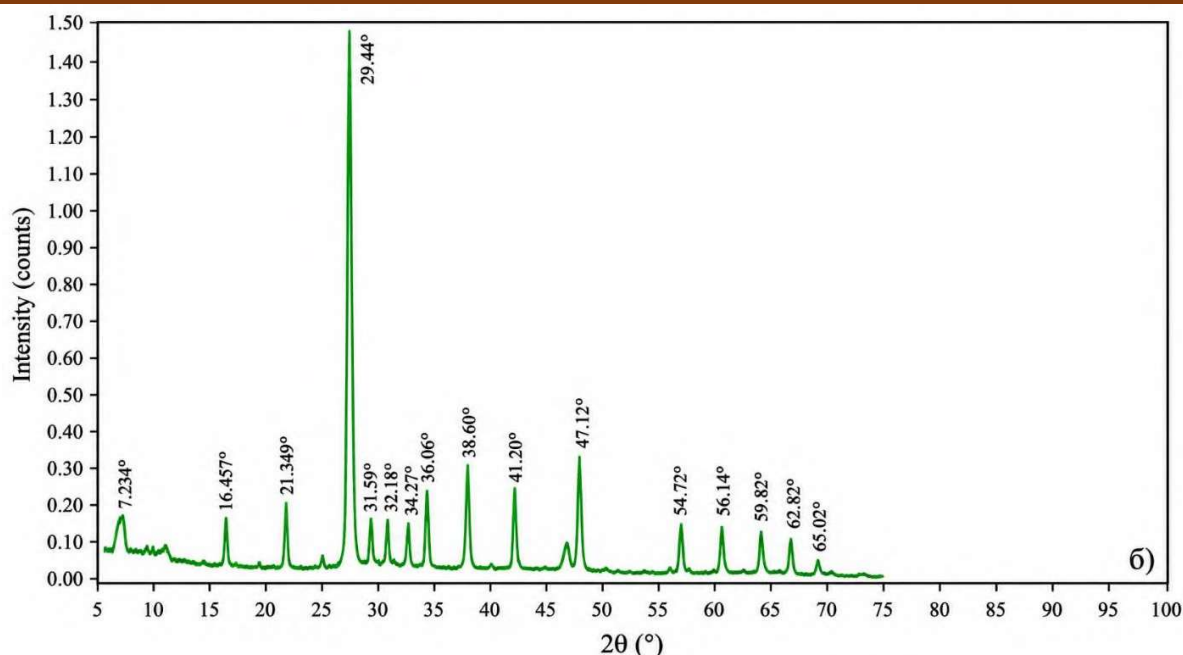


Рисунок 3 – Образец бетона класса В30 в возрасте 3 суток. а) прочность при сжатии в возрасте 3 суток; б) рентгенодифракционная картина (XRD) в возрасте 3 суток.

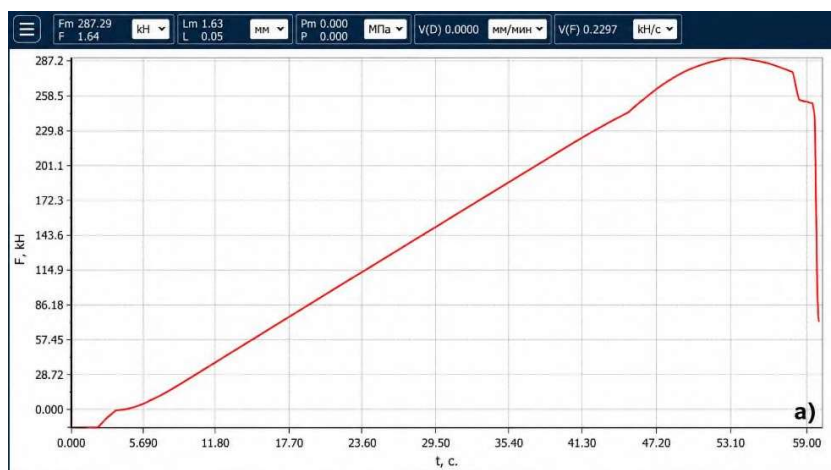
Figure 3 – B30 Concrete Specimen at 3 Days: (a) Compressive Strength at 3 Days; (b) X-ray Diffraction (XRD) Pattern at 3 Days

Результаты XRD-анализа образца бетона после 7 суток твердения показали дальнейшие изменения минералогического состава цементного камня. На дифрактограмме сохранился пик высокой интенсивности в области $2\theta \approx 29,4^\circ$. Кроме того, в областях $2\theta \approx 32-33^\circ$, 41° , 50° , 59° и 62° были зарегистрированы дифракционные пики, связанные с фазами белита (C_2S), ферроалюмината (C_4AF), алюмината (C_3A), а также портландита $Ca(OH)_2$.

В исходном материале увеличение выраженности и интенсивности дифракционных пиков по сравнению с образцом в возрасте 3 суток объясняется дальнейшим развитием процесса гидратации, увеличением количества кристаллических фаз и уплотнением микроструктуры бетона.

В этот период прочность бетона при сжатии достигла 28,07 МПа, что составляет 70,1 % от значения прочности в возрасте 28 суток.

Таким образом, увеличение прочности бетона в период от 3 до 7 суток с 25,11 МПа до 28,07 МПа происходило одновременно с минералогическими изменениями и процессами структурообразования, зафиксированными результатами XRD-анализа [8–10].



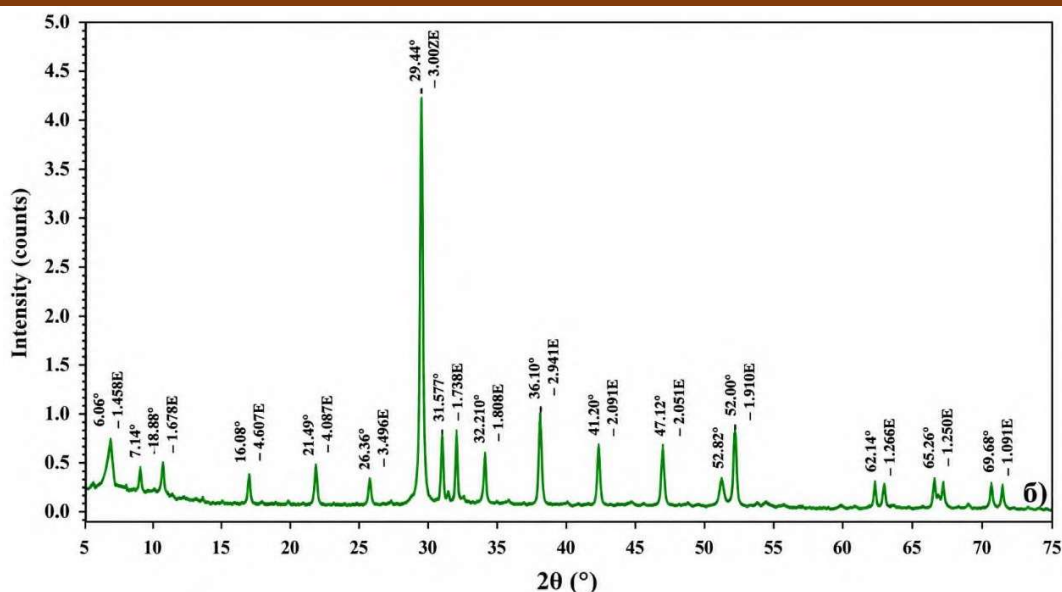


Рисунок 4 – Образец бетона класса B30 в возрасте 7 суток. а) прочность при сжатии в возрасте 7 суток; б) рентгенодифракционная картина (XRD) в возрасте 7 суток.

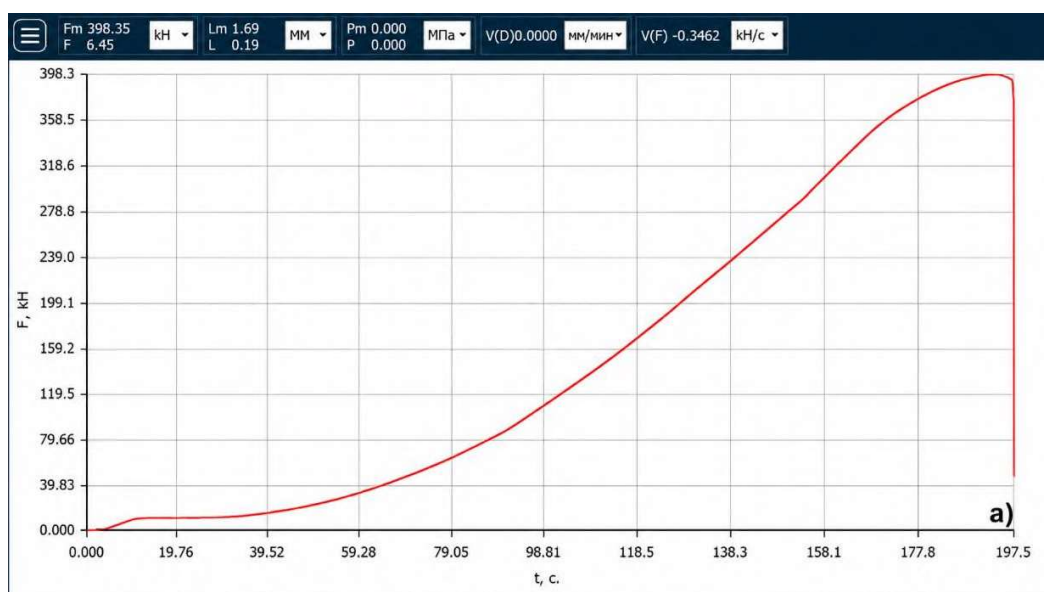
Figure 4 – B30 Concrete Specimen at 7 Days: (a) Compressive Strength at 7 Days; (b) X-ray Diffraction (XRD) Pattern at 7 Days

В возрасте 28 суток прочность бетона при сжатии достигла 40,02 МПа. В рамках данного исследования это значение было принято за 100 % контрольной прочности бетона в возрасте 28 суток.

При XRD-анализе образца в возрасте 28 суток был зарегистрирован пик высокой интенсивности в области $2\theta \approx 29,4^\circ$. В исходном материале также отмечено, что в областях $2\theta \approx 32-34^\circ$, $47-50^\circ$, 62° и 66° были выявлены дифракционные пики, связанные с фазами белита (C_2S), портландита $Ca(OH)_2$, ферроалюмината (C_4AF) и алюмината (C_3A) [8–10].

В образце в возрасте 28 суток высокая интенсивность и выраженность дифракционных пиков объясняются практически завершившимся процессом гидратации, устойчивым формированием кристаллических фаз и уплотнением микроструктуры бетона.

По сравнению с образцами в возрасте 3 и 7 суток, к 28 суткам отмечено существенное уплотнение микроструктуры цементного камня и формирование стабильных кристаллических фаз.



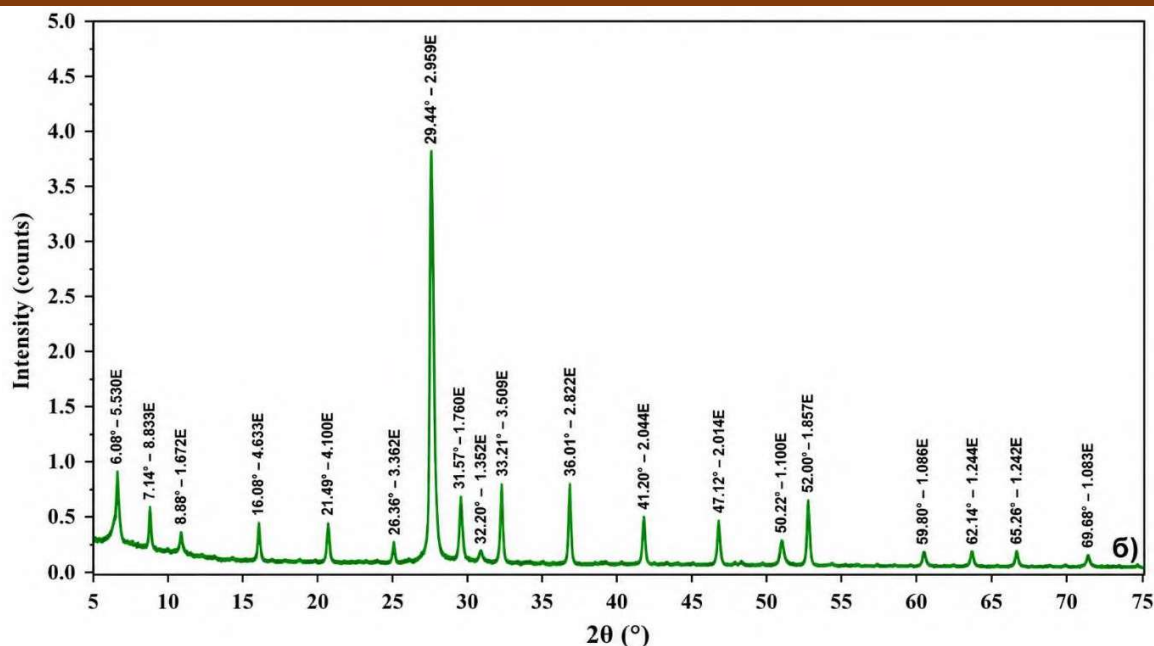


Рисунок 5 – Образец бетона класса В30 в возрасте 28 суток. а) прочность при сжатии в возрасте 28 суток; б) рентгенодифракционная картина (XRD) в возрасте 28 суток.

Figure 5 – B30 Concrete Specimen at 28 Days: (a) Compressive Strength at 28 Days; (b) X-ray Diffraction (XRD) Pattern at 28 Days

Совместный анализ полученных механических и рентгенодифракционных результатов показывает, что с увеличением продолжительности твердения бетона изменения прочностных показателей и рентгенодифракционной картины развивались параллельно.

Таблица 3 – Сравнительный анализ прочностных показателей и результатов XRD-анализа бетона класса В30
Table 3 – Comparative Analysis of Strength Characteristics and XRD Results of B30 Concrete

Срок твердения	Прочность, МПа	Относительно 28-суточной прочности, %	Основная характеристика XRD-анализа
3 суток	25,11	62,7 %	Пики, связанные с фазами C_3S , C_2S , C_4AF и C_3A ; активная стадия гидратации
7 суток	28,07	70,1 %	Зафиксирована также фаза $Ca(OH)_2$; повышение выраженности и интенсивности дифракционных пиков
28 суток	40,02	100 %	Формирование стабильной кристаллической структуры и уплотнение микроструктуры

Механические показатели, представленные в таблице, получены на основе экспериментальных результатов. Характеристики XRD, в свою очередь, основаны на результатах анализа образцов в возрасте 3, 7 и 28 суток, приведённых в исходном материале.

Обобщение полученных результатов показывает, что уже на 3-и сутки твердения бетон достиг значительной части своей 28-суточной прочности — 62,7 %. В последующие периоды абсолютная прочность продолжала возрастать и составила 28,07 МПа в возрасте 7 суток, достигнув 40,02 МПа к 28 суткам.

Вместе с тем результаты XRD-анализа также свидетельствуют об изменениях, происходящих в зависимости от продолжительности твердения. В возрасте 3 суток наблюдались дифракционные максимумы, связанные с исходными минералогическими фазами. К 7 суткам были также зарегистрированы пики, связанные с портландитом, при этом отмечалось повышение выраженности и интенсивности дифракционных пиков. В возрасте 28 суток, согласно исходному материалу, было отмечено формирование стабильной кристаллической структуры и уплотнённой микроструктуры цементного камня.

Для оценки однородности экспериментальных результатов использовался коэффициент вариации. Согласно исходным данным, значения разрушающей нагрузки для образцов в возрасте 28 суток составили 402,15; 398,35 и 400,25 кН, среднее значение — 400,25 кН, а стандартное отклонение — 1,90 кН.

Коэффициент вариации определялся по формуле:

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \quad (3)$$

где: V — коэффициент вариации, %; S — стандартное отклонение; $\bar{X}$ — среднее арифметическое значение.

Тогда:

$$V = \frac{1,90}{400,25} \cdot 100\% = 0,475\%$$

Таким образом, коэффициент вариации составляет 0,48 %.

Полученное низкое значение коэффициента вариации свидетельствует о высокой однородности результатов в исследуемой серии образцов и их незначительном разбросе. Статистический контроль и оценка прочности бетона осуществляются в соответствии с требованиями ГОСТ 18105–2018 [2].

Обсуждение (Discussions)

Полученные результаты показывают тесную взаимосвязь между кинетикой набора прочности бетона класса В30 и минералогическими изменениями цементного камня. В возрасте 3 суток прочность составила 25,11 МПа (62,7 %), в 7 суток — 28,07 МПа (70,1 %), а к 28 суткам достигла 40,02 МПа.

Средняя интенсивность набора прочности снизилась с 0,740 МПа/сут в период 3–7 суток до 0,569 МПа/сут в период 7–28 суток, то есть примерно на 23,1 %. Это свидетельствует о постепенном замедлении прироста прочности с увеличением возраста бетона.

Данные XRD подтверждают, что рост прочности сопровождается развитием процессов гидратации и изменением минералогического состава цементного камня. Появление портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$, изменение дифракционных максимумов и последующее формирование более стабильной и плотной структуры согласуются с увеличением прочности бетона. Таким образом, совместный анализ механических и XRD-данных позволяет более полно оценить закономерности твердения бетона класса В30 [7–12].

Заключение (Conclusions)

В результате проведённых экспериментальных исследований установлено, что прочность бетона класса В30 при сжатии в возрасте 3 суток составила 25,11 МПа, в возрасте 7 суток — 28,07 МПа, а в возрасте 28 суток — 40,02 МПа. При этом в возрасте 3 и 7 суток бетон достиг соответственно 62,7 и 70,1 % от своей 28-суточной прочности.

Установлено, что средняя интенсивность набора прочности в период 3–7 суток составила 0,740 МПа/сут, а в период 7–28 суток — 0,569 МПа/сут.

Результаты XRD-анализа показали, что с увеличением продолжительности твердения происходят изменения минералогического состояния цементного камня. В образце в возрасте 3 суток были зарегистрированы дифракционные рефлексы, связанные с клинкерными фазами, тогда как в образце в возрасте 7 суток дополнительно наблюдались пики, связанные с портландитом $\text{Ca}(\text{OH})_2$. К возрасту 28 суток, согласно исходному материалу, отмечены формирование стабильной кристаллической структуры и уплотнение микроструктуры цементного камня.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности комплексной оценки процесса формирования прочности бетона во времени с учётом процессов гидратации цемента и сопутствующих минералогических и структурных изменений [7–12].

Рецензент: Шарифов А. — доктор технических наук, профессор. Заведующий отделом «Водородная энергетика» Института химии имени В.И. Никитина НАНП.

Литература

1. ГОСТ 18105–2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
2. ГОСТ 7473–2010. Смеси бетонные. Технические условия.
3. ГОСТ 10181–2014. Смеси бетонные. Методы испытаний.

4. ГОСТ 12730.1–2020. Бетоны. Методы определения плотности.
5. ГОСТ 26633–2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.
6. Bhat, R. A Comprehensive Analysis of Hydration Kinetics and Compressive Strength Development of Fly Ash–Portland Cement Binders / R. Bhat, T. Han, G. Sant, N. Neithalath, A. Kumar // *Journal of Building Engineering*. – 2024. – Vol. 88. – Art. 109191. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.109191.
7. Gonçalves, B. X-ray Diffraction Study of the Early Hydration of Portland Cements Containing Calcium Carbonate by In-situ and Ex-situ Approaches / B. Gonçalves, C. Exposito et al. // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 365. – Art. 129947. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129947.
8. Fanna, D.J. Long-term In Situ X-ray Diffraction Studies on Ordinary Portland Cement Hydration with Correlative X-ray Mapping / D.J. Fanna, Q. Huang, L. George, Z. Tao, K. Moran, R. Wuhler // *Microscopy and Microanalysis*. – 2023. – Vol. 29. – P. 165–167. – DOI: 10.1093/micmic/ozad067.074.
9. Dorn, T. Working Mechanism of Calcium Nitrate as an Accelerator for Portland Cement Hydration / T. Dorn, T. Hirsch, D. Stephan // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2023. – Vol. 106. – P. 752–766. – DOI: 10.1111/jace.18782.
10. Antonovič, V. A Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Cement-Based Materials / V. Antonovič et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – Art. 354.
11. Llorens, J. An Approach to Understanding the Hydration of Cement-Based Materials / J. Llorens et al. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – Art. 9388.
12. Kang, I. Optimal Limestone Content on Hydration Properties of Cementitious Materials / I. Kang et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17. – Art. 3255.
13. Malaiškienė, J. The Influence of Silica Fly Ash and Wood Bottom Ash on Cement Hydration and Concrete Properties / J. Malaiškienė et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17. – Art. 4031.
14. John, E. Calcium Silicate Hydrate—In-situ Development of the Silicate Structure / E. John et al. // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2021. – Vol. 104, No. 12.

Reference

1. GOST 18105–2018. Concrete. Rules for Control and Assessment of Strength.
2. GOST 7473–2010. Concrete Mixtures. Specifications.
3. GOST 10181–2014. Concrete Mixtures. Test Methods.
4. GOST 12730.1–2020. Concrete. Methods for Determination of Density.
5. GOST 26633–2015. Heavyweight and Fine-Grained Concrete. Specifications.
6. Bhat, R. A Comprehensive Analysis of Hydration Kinetics and Compressive Strength Development of Fly Ash–Portland Cement Binders / R. Bhat, T. Han, G. Sant, N. Neithalath, A. Kumar // *Journal of Building Engineering*. – 2024. – Vol. 88. – Art. 109191. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.109191.
7. Gonçalves, B. X-ray Diffraction Study of the Early Hydration of Portland Cements Containing Calcium Carbonate by In-situ and Ex-situ Approaches / B. Gonçalves, C. Exposito et al. // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 365. – Art. 129947. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129947.
8. Fanna, D.J. Long-term In Situ X-ray Diffraction Studies on Ordinary Portland Cement Hydration with Correlative X-ray Mapping / D.J. Fanna, Q. Huang, L. George, Z. Tao, K. Moran, R. Wuhler // *Microscopy and Microanalysis*. – 2023. – Vol. 29. – P. 165–167. – DOI: 10.1093/micmic/ozad067.074.
9. Dorn, T. Working Mechanism of Calcium Nitrate as an Accelerator for Portland Cement Hydration / T. Dorn, T. Hirsch, D. Stephan // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2023. – Vol. 106. – P. 752–766. – DOI: 10.1111/jace.18782.
10. Antonovič, V. A Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Cement-Based Materials / V. Antonovič et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – Art. 354.
11. Llorens, J. An Approach to Understanding the Hydration of Cement-Based Materials / J. Llorens et al. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – Art. 9388.
12. Kang, I. Optimal Limestone Content on Hydration Properties of Cementitious Materials / I. Kang et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17. – Art. 3255.
13. Malaiškienė, J. The Influence of Silica Fly Ash and Wood Bottom Ash on Cement Hydration and Concrete Properties / J. Malaiškienė et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17. – Art. 4031.
14. John, E. Calcium Silicate Hydrate—In-situ Development of the Silicate Structure / E. John et al. // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2021. – Vol. 104, No. 12.

Сведения об авторах:

Бердиев Облокул Бобокулович, канд. техн. наук, профессор, кафедра Строительные материалы и конструкции, Джизакский политехнический институт, г. Джизак, Узбекистан, ORCID: 0000-0003-4105-2176
E-mail: jizpimalaka@mail.ru

Ботиров Бектош Фарход угли, докторант(PhD), кафедра Строительство зданий и сооружений, Ташкентский архитектурно-строительный университет, г. Ташкент, Узбекистан, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2084-8418>. E-mail: korreys95@gmail.com

Information about the authors:

Berdiev Oblokul Bobokulovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Building Materials and Structures, Jizzakh Polytechnic Institute, Jizzakh, Uzbekistan, ORCID: 0000-0003-4105-2176, E-mail: jizpimalaka@mail.ru

Botirov Bektosh Farkhod ugli, PhD student, Department of Building and Structure Construction, Tashkent University of Architecture and Civil Engineering, Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: 0000-0002-2084-8418. E-mail: korreys95@gmail.com