

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 691.32

В. В. БАБИЦКИЙ, кандидат технических наук; А. А. ДРОЗД, кандидат технических наук; Белорусский национальный технический университет, г. Минск

ДИФфуЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСОБО ПЛОТНОГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Выполнено исследование особо плотного цементного камня. По результатам испытания образцов определены его диффузионные характеристики. Получены аналитические выражения для определения эффективных коэффициентов диффузии углекислого газа и хлор-ионов для прогнозирования диффузионных характеристик особо плотного цементного камня.

Высокая щелочность поровой жидкости и отсутствие иницирующих коррозию стали агрессивных ионов в бетоне защитного слоя обеспечивают пассивное состояние стальной арматуры железобетонных конструкций. Однако с течением времени защитный слой бетона последовательно карбонизируется, а в приарматурной зоне накапливаются агрессивные хлор-ионы. Скорость этих процессов определяет время перехода стали в активное состояние (следовательно, долговечность железобетонных конструкций) и количественно зависит от эффективных коэффициентов диффузии углекислого газа (D_{CO_2}) и ионов хлора (D_{Cl}) в бетоне.

Диффузионные параметры бетона зависят от множества факторов и изменяются в достаточно широких пределах. Например, D_{CO_2} для бетонов различной плотности равен $2 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$ см²/с [1]. Эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов значительно меньше, поскольку диффузия осуществляется не в газовой, а в жидкой среде. Так, согласно [2] D_{Cl} в цементном камне составляет $0,9 \cdot 10^{-8} - 2,5 \cdot 10^{-8}$ см²/с (меньшие значения характерны для пуццоланового портландцемента), в цементно-песчаных растворах – $5,0 \cdot 10^{-8} - 1,9 \cdot 10^{-7}$ см²/с, а в виброуплотненном бетоне – $1,0 \cdot 10^{-8} - 1,6 \cdot 10^{-8}$ см²/с. В [3] отмечается, что в «рядовом» бетоне эффективный коэффициент диффузии хлор-ионов составляет $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-7}$ см²/с, а у лучших бетонов достигает $5 \cdot 10^{-8}$ см²/с. Приведенные значения показывают, что проницаемость обычных бетонов весьма высока, что и объясняет сравнительно низкую долговечность железобетонных конструкций: в соответствии с простыми расчетами при указанных диффузионных характеристиках пассивность стальной арматуры обеспечивается лишь в течение нескольких лет и толь-

ко при благоприятных условиях – десятилетий. Согласно представленным в [3] расчетам, бетон с $D_{Cl} = 1,0 \cdot 10^{-10} \dots 3,0 \cdot 10^{-9}$ см²/с может обеспечить коррозионную стойкость арматуры в течение 50 лет при воздействии насыщенного раствора хлористого натрия и толщине защитного слоя 10-50 мм соответственно.

Одно из направлений снижения проницаемости бетона – создание особо плотного цементного камня с минимально возможным водоцементным отношением. Технология «сухого» формования бетона позволяет изготавливать цементный камень в области водоцементных отношений 0,12 – 0,20. Свойства такого материала практически не изучены, что частично и восполняют результаты следующих экспериментов.

Образцы (цилиндры диаметром 42 мм) изготавливали по следующей методике. Измельченный до различной тонкости помола ($S_{уд}$) цемент засыпали в цилиндрическую пресс-форму, в некоторых сериях подвергали предварительному вакуумированию при различном давлении ($P_{вак}$) и далее вяжущее уплотняли прессованием под давлением $P_{прес}$ (таблица 1). Затем спрессованный порошок насыщали водой, после чего образцы извлекали из формы. Полученные цилиндры твердели 28 суток в нормальных условиях, затем боковые поверхности герметизировали воско-канифольной замазкой (1:1). Принцип количественного определения проницаемости цементного камня заключался в определении глубины карбонизации (или глубины проникания хлор-ионов критической концентрации) в образцах из цементного камня, выдержанного в конкретных агрессивных условиях в течение установленного времени, с последующим расчетом диффузионных характеристик (D_{CO_2} и D_{Cl}) по общеизвестным формулам.

Глубину карбонизации цементного камня определяли по ускоренной методике [1]. Образцы вы-

держивали в камере над насыщенным раствором поваренной соли (относительная влажность воздуха около 75 %) до стабилизации массы. Затем их помещали на 28 суток в испытательную камеру с концентрацией углекислого газа 10 %. По окончании срока выдержки образцы раскалывали нормально к открытой поверхности, свежий скол смачивали дистиллированной водой, после чего посредством пульверизатора обрабатывали 0,1 %-ным раствором фенолфталеина в этиловом спирте. Толщину нейтрализованного (прокарбонизированного) слоя

цементного камня измеряли в нескольких точках и находили среднее значение (см. таблицу 1).

При изучении проницаемости цементного камня для хлор-ионов цилиндры предварительно насыщали дистиллированной водой, а затем в течение 180 суток выдерживали в емкости с насыщенным раствором хлористого калия. На свежий скол расколотого образца наносили 1 %-ный водный раствор азотнокислого серебра, после чего находили среднюю глубину проникания хлор-ионов критической концентрации (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Диффузионные характеристики цементного камня

Индекс	$P_{\text{прес}}$, МПа	$P_{\text{вак}}$, МПа	$S_{\text{уд}}$, м ² /кг	Глубина карбонизации, мм	D_{CO_2} , см ² /с	Глубина проникания хлор-ионов, мм	D_{Cl} , см ² /с
1-5	5	-	300	2,0	$2,19 \cdot 10^{-5}$	5,7	$1,40 \cdot 10^{-8}$
1-10	10	-	300	2,7	$3,96 \cdot 10^{-5}$	6,5	$1,80 \cdot 10^{-8}$
1-20	20	-	300	1,8	$1,87 \cdot 10^{-5}$	5,0	$1,40 \cdot 10^{-8}$
1-40	40	-	300	1,0	$6,08 \cdot 10^{-6}$	3,3	$9,00 \cdot 10^{-9}$
1-70	70	-	300	1,5	$1,40 \cdot 10^{-5}$	3,2	$9,00 \cdot 10^{-9}$
2-5	5	-	450	3,0	$4,55 \cdot 10^{-5}$	8,4	$2,40 \cdot 10^{-8}$
2-10	10	-	450	2,8	$4,27 \cdot 10^{-5}$	8,1	$2,50 \cdot 10^{-8}$
2-20	20	-	450	3,0	$4,90 \cdot 10^{-5}$	6,5	$1,80 \cdot 10^{-8}$
2-40	40	-	450	1,6	$1,47 \cdot 10^{-5}$	4,1	$1,10 \cdot 10^{-8}$
2-70	70	-	450	1,7	$1,65 \cdot 10^{-5}$	4,3	$1,30 \cdot 10^{-8}$
3-5	5	-	600	2,9	$4,30 \cdot 10^{-5}$	9,0	$2,70 \cdot 10^{-8}$
3-10	10	-	600	2,7	$4,01 \cdot 10^{-5}$	8,3	$2,50 \cdot 10^{-8}$
3-20	20	-	600	2,2	$2,77 \cdot 10^{-5}$	6,0	$1,58 \cdot 10^{-8}$
3-40	40	-	600	2,1	$2,52 \cdot 10^{-5}$	4,9	$1,25 \cdot 10^{-8}$
3-70	70	-	600	1,9	$2,24 \cdot 10^{-5}$	5,0	$1,50 \cdot 10^{-8}$
4-5	5	0,01	300	1,5	$1,26 \cdot 10^{-5}$	3,8	$5,99 \cdot 10^{-9}$
4-10	10	0,01	300	1,6	$1,43 \cdot 10^{-5}$	3,2	$5,05 \cdot 10^{-9}$
4-20	20	0,01	300	1,1	$6,90 \cdot 10^{-6}$	2,4	$3,70 \cdot 10^{-9}$
4-40	40	0,01	300	1,1	$7,09 \cdot 10^{-6}$	2,2	$3,50 \cdot 10^{-9}$
4-70	70	0,01	300	0,9	$4,69 \cdot 10^{-6}$	5,0	$2,10 \cdot 10^{-9}$
5-5	5	0,001	450	1,2	$8,08 \cdot 10^{-6}$	3,3	$4,50 \cdot 10^{-9}$
5-10	10	0,001	450	1,3	$9,35 \cdot 10^{-6}$	3,0	$4,00 \cdot 10^{-9}$
5-20	20	0,001	450	1,0	$5,87 \cdot 10^{-6}$	2,5	$3,50 \cdot 10^{-9}$
5-40	40	0,001	450	0,6	$2,51 \cdot 10^{-6}$	1,6	$1,90 \cdot 10^{-9}$
5-70	70	0,001	450	0,4	$8,01 \cdot 10^{-7}$	1,2	$1,60 \cdot 10^{-9}$
6-5	5	0,0001	600	1,3	$8,85 \cdot 10^{-6}$	3,7	$4,50 \cdot 10^{-9}$
6-10	10	0,0001	600	1,0	$5,57 \cdot 10^{-6}$	3,1	$3,70 \cdot 10^{-9}$
6-20	20	0,0001	600	1,0	$5,79 \cdot 10^{-6}$	2,6	$3,00 \cdot 10^{-9}$
6-40	40	0,0001	600	0,9	$5,18 \cdot 10^{-6}$	1,8	$2,00 \cdot 10^{-9}$
6-70	70	0,0001	600	0,4	$7,89 \cdot 10^{-7}$	1,5	$1,80 \cdot 10^{-9}$

Данные, приведенные в таблице 1, показывают, что диффузионные характеристики особо плотного цементного камня существенно превосходят параметры обычного бетона. В связи с этим попытаемся осуществить прогноз (по известным формулам) кинетики карбонизации и накопления хлор-ионов в бетоне применительно к различным эксплуатационным условиям. Для этого приведенные в таблице 1 характеристики цементного камня распространены (что, на наш взгляд, вполне корректно для прикидочных расчетов) на бетон с расходом цемента 360 кг/м³ (рисунки 1 и 2).

Анализ графиков показывает, что долговечность железобетонных конструкций может быть сотни лет при самых неблагоприятных эксплуатационных условиях. В соответствии с расчетами реали-

зация способа «сухого» формирования бетона – вполне реальный путь получения железобетона с неограниченной долговечностью.

Интерес представляют не только получение диффузионных характеристик цементного камня, но и возможность рассчитывать их еще на стадии проектирования состава бетона. Влияние основных факторов на D_{CO_2} и D_{Cl} графически можно интерпретировать следующим образом (рисунки 3 и 4).

Для количественной оценки проницаемости обычного бетона получены аналитические выражения, в соответствии с которыми эффективные коэффициенты диффузии можно рассчитывать, связывая их с основополагающими в бетоноведении структурными и технологическими параметрами: степенью гидратации цемента (α), капил-

лярной пористостью (Π_k), объемом цементного камня (V_k), соотношением плотностей цемента (ρ_n) и воды (ρ_b), влажностью (ω_o) и водоцементным отношением (В/Ц):

$$D_{CO_2} = \frac{0,114}{\left(\frac{1}{\Pi_k} + 3\Pi_k\right)^{2,3}} \left(\sqrt[3]{V_k}\right)^2, \quad (1)$$

$$D_{Cl} = \frac{6,5 \cdot 10^{-11} \omega_o^{2,5}}{1 + 3,3 \cdot \log \frac{1}{6,6 \cdot 10^{-10} \Pi_k \left[\sqrt[3]{\frac{\rho_n}{\rho_b}} (B/C) - 1,2\alpha \right]^2 - 8}} \quad (2)$$

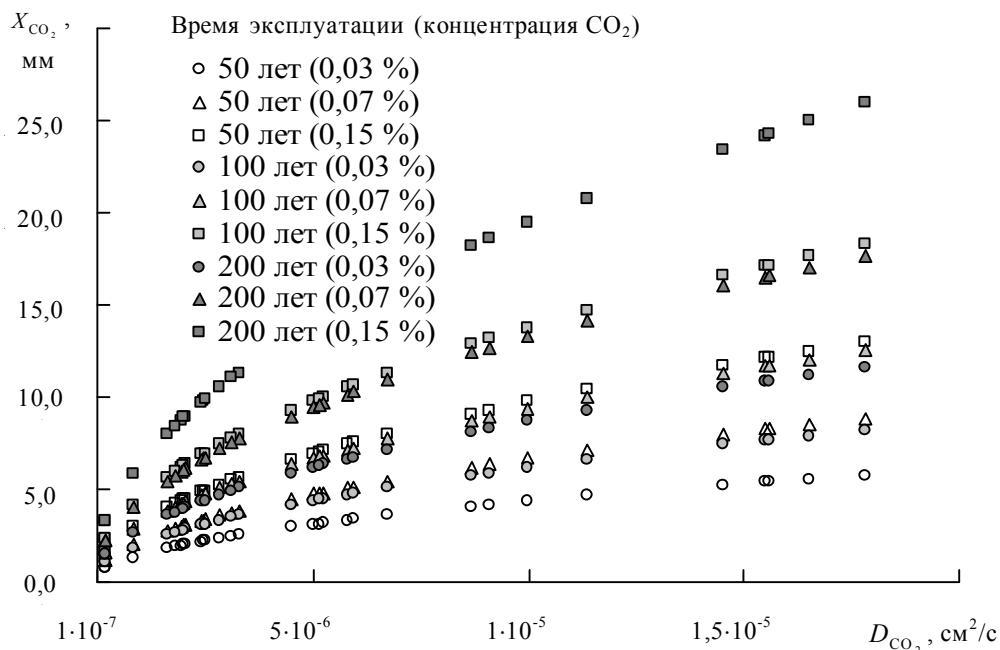


Рисунок 1 – Прогноз глубины карбонизации бетона (X_{CO_2}) в зависимости от эффективного коэффициента диффузии углекислого газа (D_{CO_2})

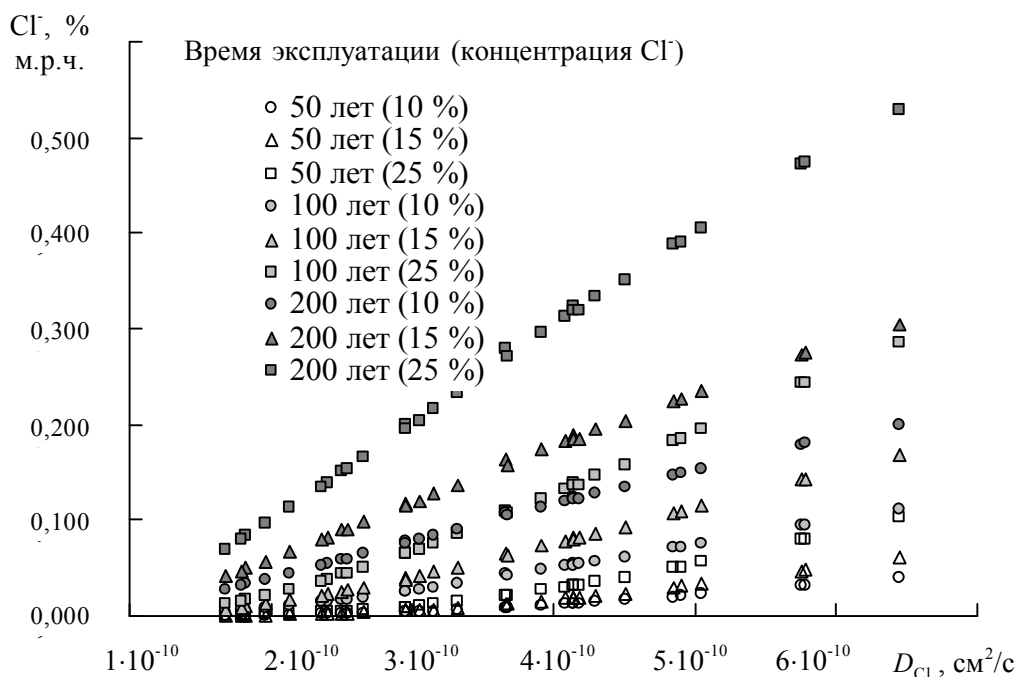


Рисунок 2 – Прогноз накопления ионов хлора (Cl⁻) при толщине защитного слоя бетона 25 мм в зависимости от эффективного коэффициента диффузии хлор-ионов (D_{Cl})

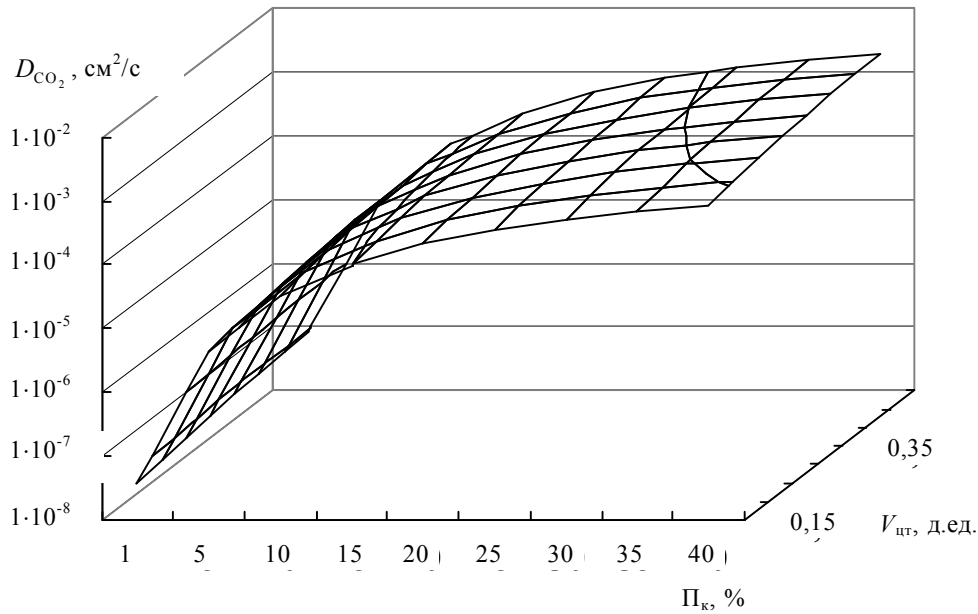


Рисунок 3 – Зависимость эффективного коэффициента диффузии углекислого газа (D_{CO_2}) от капиллярной пористости (Π_k) и объема цементного камня ($V_{цк}$)

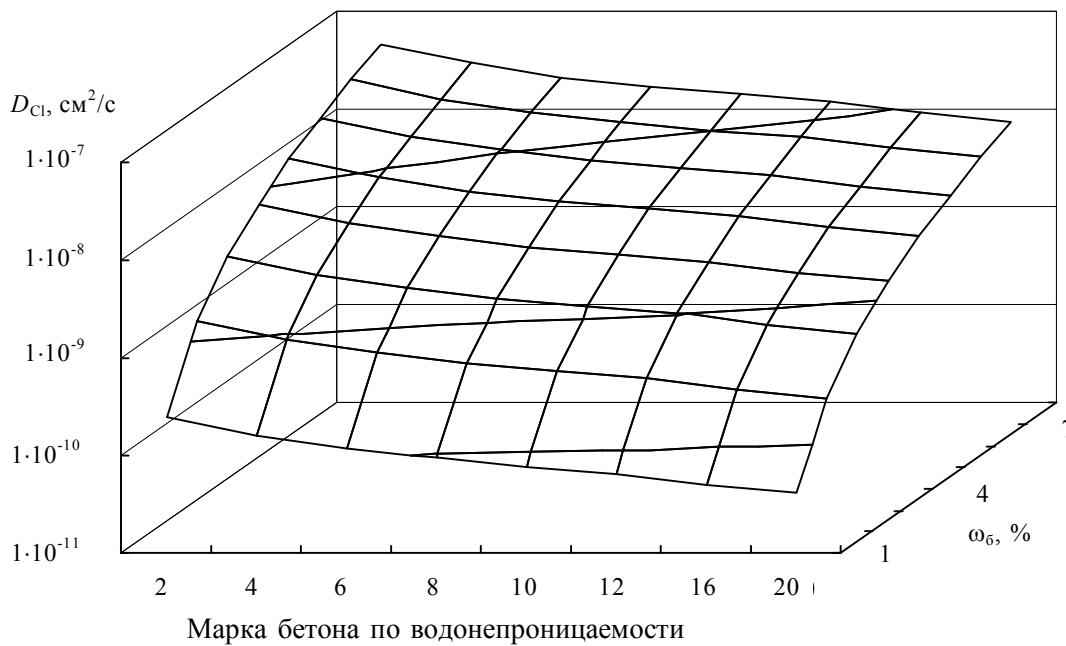


Рисунок 4 – Зависимость эффективного коэффициента диффузии хлор-ионов (D_{Cl}) от проницаемости и влажности (ω_b) бетона

Как оказалось, выражения (1) и (2) вполне приемлемы и для расчета диффузионных параметров особо плотного цементного камня. Однако при предварительном вакуумировании вяжущего фактические результаты значительно меньше, чем расчетные, причем степень влияния определяется глубиной вакуума. Давление вакуумирования удобно связать с числом слоев воздуха, десорбированного с поверхности вяжущего (n_d) [4], в результате чего выражения (1) и (2) преобразовываются соответственно в

$$D_{CO_2}^{бак} = \left(0,085 \left(1 - 0,5 \cdot \sqrt[3]{n_d} \right) \sqrt{\left(\frac{B/C}{K_{нр}} - 0,3 \right)^2} \right) D_{CO_2}, \quad (3)$$

$$D_{Cl}^{бак} = \left(1 - 0,6n_d^2 \right) \cdot D_{Cl}, \quad (4)$$

где $K_{нр}$ – коэффициент нормальной густоты цемента. Статистическая оценка выражений (3) и (4) показала, что коэффициент вариации отклонений расчетных значений диффузионных характеристик от фак-

тических для углекислого газа составил 13,1 %, а для хлор-ионов – 9,5 %, что, на наш взгляд, приемлемо при коррозионных исследованиях.

Таким образом, получен и исследован особо плотный цементный камень, а также разработана математическая модель прогнозирования его диффузионных характеристик.

Список литературы

1 Алексеев С. Н., Розенталь Н. К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.

Получено 20.11.2004

V. V. Babitsky, A. A. Drozd. Diffusion characteristics of extremely strong cement stone.

According to sample tests results there were determined the diffusion characteristics of extremely strong cement stone. We obtained analytical expressions for determination of effective diffusion factors of carbonic gas and chlorine-ions for forecasting of diffusion characteristics of extremely strong cement stone.

2 Иванов Ф. М., Розенталь Н. К. О защите стальной арматуры в бетоне морских гидротехнических сооружений // Труды науч.-исслед. ин-та бетона и железобетона / Госстрой СССР. 1975. Вып. 19. С. 4 – 10.

3 Розенталь Н. К., Чехний Г. В. Коррозионностойкие бетоны особо малой проницаемости // Бетон и железобетон. – 1998. – № 1. – С. 27 – 29.

4 Бабицкий В. В., Дрозд А. А., Ковалев Я. Н. Количественная оценка двухфазной системы «цемент–воздух» // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 2(16). – С. 51 – 55.

УДК 621.763

В. П. БОГДАНОВ, кандидат химических наук; А. А. ВАСИЛЬЕВ, научный сотрудник; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

О СВОЙСТВАХ И ОСОБЕННОСТЯХ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «ЛАХТА, РЕМОНТНЫЙ СОСТАВ»

Методами лабораторного анализа исследованы основные физико-механические характеристики материала «Лахта, ремонтный состав» с целью оценки возможности его использования для ремонта и восстановления бетонных и железобетонных конструкций.

Все более широкое применение при ремонте и реконструкции зданий и сооружений в нашей республике находят сухие композиционные материалы, выпускающиеся в России.

Для оценки возможности применения композиционного материала типа «Лахта, ремонтный состав» при ремонте и восстановлении бетонных и железобетонных конструкций было выполнено исследование его состава и физико-механических характеристик в лабораторных условиях.

Исследование состояло в определении влажности, насыпной плотности, содержания карбонатов, величины рН поровой влаги цемента, прочностных характеристик. О гидравлической активности компонентов судили по величине рН и экзотермии в процессе гидратации данного материала.

Гранулометрический анализ исследуемого материала проводился в соответствии с [1]. В сочетании с оптическими наблюдениями это позволило с достаточной степенью точности определить состав компонентов материала.

Определение влажности выполнено в соответствии с [2]. Водородный показатель поровой влаги рН определялся по методике [5]. Содержание карбонатов К определено объемно-газовым методом [4]. Основные физико-химические показатели исследуемого материала представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-химический показатель	Значение
Влажность, %	0,5
Насыпная плотность, кг/м ³	1457
рН	11,70
Содержание карбонатов, %	2,0

Процентное содержание компонентов материала «Лахта, ремонтный состав» приведено на рисунке 1. Он содержит портландцемент, различного диаметра гранитные частицы и песок, а также синтетические волокна длиной 3-6 мм и диаметром приблизительно 0,005 мм. По результатам гранулометрического анализа исследуемый материал можно отнести к композиционным материалам с гидравлическими свойствами твердения (фибробетону).

Насыпная плотность композита несколько выше насыпной плотности цемента из-за наличия песка и мелкого щебня, а гидравлическая активность ниже. Это подтверждается значениями рН поровой влаги и выделением тепла при гидратации постоянной массы композита при водоцементном отношении В/Ц=0,5.