

6  
А-62

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
ГЛАВНИИПРОЕКТ

---

ГРУЗИНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЭНЕРГЕТИКИ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ  
(ГРУЗНИИЭГС)

На правах рукописи

В. К. ДИДИДЗЕ

ЛЕГКИЕ СИЛИКАТНЫЕ БЕТОНЫ НА ОСНОВЕ  
ВУЛКАНИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

(Специальность № 05.484 строительные материалы,  
детали и изделия)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ТБИЛИСИ—1971

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР  
ГЛАВНИИПРОЕКТ

---

ГРУЗИНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЭНЕРГЕТИКИ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ  
(ГРУЗНИИЭГС)

На правах рукописи

В. К. ДИДИДЗЕ

ЛЕГКИЕ СИЛИКАТНЫЕ БЕТОНЫ НА ОСНОВЕ  
ВУЛКАНИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

(Специальность № 05.484 строительные материалы,  
детали и изделия)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ТБИЛИСИ—1971



666

А62

Диссертационная работа выполнена в лаборатории автоклавных изделий Тбилисского Государственного научно-исследовательского института строительных материалов Министерства промстройматериалов СССР.

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент Л. С. Болквадзе.

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники Грузинской ССР, доктор технических наук, профессор П. П. Цулукидзе, кандидат технических наук, доцент Ю. С. Буров.

Ведущая организация: Министерство промышленности строительных материалов Грузинской ССР.

Ученый совет Грузинского научно-исследовательского института энергетики и гидротехнических сооружений направляет Вам для ознакомления автореферат диссертационной работы инженера В. К. Дидидзе, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв по автореферату в двух экземплярах заверенный печатью институт просит направить по адресу: 380015, г. Тбилиси, 15, ул. Ленина, 70, ГрузНИИЭГС.

Публичная защита состоится на заседании Ученого Совета ГрузНИИЭГС, «15» октября 1971 г.

Дата рассылки автореферата «13» сентября 1971 г.

Ученый секретарь совета  
канд. тех. наук

Б. Н. Бастатский

Директивами XXIV съезда КПСС предусмотрено увеличение объема производства продукции промышленности строительных материалов в 1,4 раза, а также организация широкого выпуска материалов и изделий повышенной заводской готовности. В плане развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 годы большое внимание уделяется дальнейшему развитию производства индустриальных строительных изделий и конструкций из легких бетонов. В связи с этим немалый интерес представляют легкие силикатобетонные изделия автоклавного твердения, полученные на различных видах пористого сырья.

Легкие силикатные бетоны входят в общую группу материалов автоклавного твердения, они являются разновидностью обычных легких цементных бетонов и в ряде случаев, как это показали наши эксперименты, в сравнении с цементными легкими бетонами отличаются более высокими технико-экономическими показателями.

В результате ряда научно-исследовательских работ в последнее десятилетие, проведенных Н. А. Поповым, А. В. Волженским, М. С. Щварцзаидом, Л. С. Болквадзе, Т. М. Вачнадзе, И. А. Ивановым, А. И. Кротовым, Н. М. Ломидзе, М. Х. Марышевым, Т. Т. Троцко, И. Л. Черным, М. М. Израелитом и др., доказана принципиальная возможность получения легких силикатных бетонов из некоторых видов пористых материалов. Имеется даже небольшой заводской опыт производства легких силикатобетонных изделий (Минский комбинат крупноблочных строительных конструкций). Однако их производству все еще не уделяется достаточное внимание и эти изделия пока не нашли массового применения в строительстве.

Такое положение объясняется главным образом тем, что проводимые до настоящего времени научно-исследовательские работы в этой области в основном касались легких силикатных бетонов, получаемых путем применения дорогостоящих искусственных пористых заполнителей: керамзита, аглоперита, вспученного перлита и др. А производство легких

силикатных бетонов из таких высококачественных и дешевых пористых горных пород, какими являются вулканические шлаки, до настоящего времени остается не исследованным. Анализ литературных данных и результаты проведенных нами предварительных исследований химико-минералогических составов и физико-механических свойств этих шлаков свидетельствуют о том, что они успешно могут быть использованы в производстве легких силикатных бетонов автоклавного твердения. Последующее изучение позволило выявить, что способом автоклавного твердения из этих сырьевых материалов может быть получен легкий бетон на местном и дешевом известково-кремнистом вяжущем. При этом вместо дорогостоящего и фондируемого вяжущего-клинкерного цемента используется местное дешевое известково-кремнистое вяжущее.

Это обстоятельство подчеркивает актуальность цели диссертационной работы: разработки технологии и изучения свойств легких силикатных бетонов на основе вулканических шлаков.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов и приложений, изложена на 163 страницах машинописного текста, включает 47 рисунков и 27 таблиц. Перечень использованной литературы включает 157 наименований.

В первой главе дан обзор развития производства силикатных материалов автоклавного твердения и легких бетонов на пористых заполнителях, а также анализ литературных данных по изготовлению легких силикатных бетонов на пористых заполнителях. Сформулированы задачи исследования по технологии и свойствам легкого силикатного бетона на основе вулканических шлаков.

Во второй главе кратко охарактеризованы вулканические шлаки, применяемые в качестве основного кремнистого сырья, описаны условия их образования, распространенность и основные свойства.

Вулканические шлаки образовались в результате дифференциации магмы в действующих очагах вулканов. В нашей стране такие шлаки встречаются в Закавказье, на Украине, Урале, Дальнем Востоке, Камчатке и др. Месторождениями вулканических шлаков наиболее богаты Грузинская ССР и Армянская ССР. Разведанные запасы вулканических шлаков месторождений Сульда, Делифи, Модеги, Оками и др. Ахалкалакского района Грузинской ССР со-

ставляют около 32 млн. м<sup>3</sup>. Вулканические рыхлые породы встречаются и в других районах Грузии — в Цхинвали, Дманиси и др.

Особенно богата месторождениями вулканических шлаков Армянская ССР. Здесь насчитывается около 40 месторождений с общим запасом более 1 млрд. м<sup>3</sup>.

В Армянской ССР вулканические шлаки широко применяются в производстве легких бетонов, а в Грузинской ССР они применяются в ограниченном количестве. В наших исследованиях мы применяли вулканические шлаки Делифского и Сульдинского месторождений Грузинской ССР и Кармрашенского месторождения Армянской ССР.

По химическому составу вулканические шлаки этих месторождений мало отличаются друг от друга. Их основными составляющими являются кремнезем и глинозем в суммарном содержании около 77%. По химическому составу они относятся к кислым породам. В зависимости от содержания окиси железа цвет вулканических шлаков меняется от красного, красно-коричневого, коричневого до черного. Они характеризуются сильной пористой пемзовой структурой и представлены девитрифицированным вулканическим стеклом. Главным порообразующим минералом в вулканических шлаках является аморфное вулканическое стекло. В природе вулканические шлаки встречаются в рыхлом состоянии, что позволяет получить из них фракционированные заполнители при незначительной затрате энергии.

Вулканические шлаки в экспериментах применялись в виде песка фракции 0—1,2 мм, 1,2—5 мм и в виде щебня фракции 5—10 мм, 10—20 мм и 20—40 мм.

Плотность вулканических шлаков — 2,60—2,66 г/см<sup>3</sup>, объемная масса шлаковых песков в рыхлом состоянии для разных месторождений колеблется в пределах 612—915 кг/м<sup>3</sup>, объем пустот — 65—70%, модуль крупности — 2,1—2,6.

Насыпная объемная масса шлакового щебня меняется в пределах 440—580 кг/м<sup>3</sup>, межзерновая пустотность — 48—55%, водопоглощение по весу — 25—30%, пористость кусков щебня — 77—83%, прочность в металлическом цилиндре — 6,4—16 кг/см<sup>2</sup>, коэффициент размягчения — 0,65—0,78, стойкость против силикатного распада — 0,8—2,4, против железистого распада — 1,5—2,3.

Содержание аморфного вулканического стекла в шлаках предопределяет особенности их взаимодействия с известью

и специфику применения их в производстве легких силикатных бетонов.

В третьей главе приведены результаты исследований вулканических шлаков как компонента вяжущего. Подобраны оптимальные составы вяжущих, исследованы процессы твердения известково-шлаковых вяжущих. Дан краткий анализ существующей методики и рекомендации оценки качества известково-шлакового вяжущего для легких силикатных бетонов.

Исследованы вяжущие, получаемые совместным помолом извести и вулканических шлаков каждого месторождения. Вяжущие готовились с содержанием акт. СаО 15, 20, 25, 30 и 35%, тонкость помола — 4500—5000 см<sup>2</sup>/г.

Активность вяжущих была определена в соответствии с проектом «Инструктивных указаний по выбору вяжущих для бетонов автоклавного твердения» на образцах-призмах, полученных из растворных смесей пластичной консистенции составов 1:3 с вольским песком. Были изготовлены и испытаны аналогичные образцы из растворных смесей с вулканическими шлаковыми песками при том же соотношении компонентов (1:3). В данном случае с изменением содержания акт. СаО в вяжущих меняется ее содержание и в растворных смесях.

Параллельно была проведена вторая серия экспериментов. Из каждого вяжущего готовились и испытывались образцы-призмы из растворных смесей с различным соотношением вяжущего и песка вулканического шлака. В этом случае, независимо от изменения акт. СаО в вяжущем, содержание акт. СаО в растворных смесях оставалось постоянным. Были испытаны образцы из растворных смесей с содержанием акт. СаО 5, 7, 9, 11%. Изготовлены и испытаны 252 образца.

Эксперименты показали, что вяжущее из извести и вулканических шлаков характеризуется высокой активностью. Активность вяжущих, содержащих акт. СаО от 15 до 35%, определяемая согласно проекту «Инструктивных указаний по выбору вяжущих для бетонов автоклавного твердения», в растворах с вольским песком составляет 375—610 кг/см<sup>2</sup>. Активность вяжущих, определяемая по растворным смесям тех же составов, в которых вместо вольского песка применен песок вулканических шлаков, меньше и составляет 201—352 кг/см<sup>2</sup>.

Сравнительно низкие активности вяжущих при испытании в растворах с песком вулканических шлаков объясняются тем, что растворы с шлаковым песком характеризуются более высокой водопотребностью и более «рыхлой» структурой, чем растворы с вольским песком; кроме того, прочность зерен вольского песка гораздо выше прочности зерен шлакового песка, а также содержание SiO<sub>2</sub> в вольском песке составляет 95%, тогда как в вулканическом шлаке суммарное содержание SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не превышает 77%. Активность изучаемых известково-шлаковых вяжущих не зависит от месторождений шлаков. При прочих равных условиях вяжущее из вулканических шлаков месторождений Делифи, Сульда, Кармрашен, содержащих равное количество акт. СаО, характеризуется почти одинаковой активностью. На рис. 1 графически изображены результаты испытания вяжущего на вулканическом шлаке Делифского месторождения.

Графическое изображение показывает, что при испытании в растворах 1:3 как с вольским, так и с шлаковым песком активность вяжущих растет с повышением содержания акт. СаО в вяжущем и в растворной смеси.

Совершенно иная картина изменения активности вяжущих наблюдается при испытании их в растворах с постоянным содержанием акт. СаО. В таких случаях вяжущее с меньшим содержанием акт. СаО характеризуется более высокой активностью, чем вяжущее с повышенным содержанием акт. СаО.

На основе анализа полученных результатов рекомендуется активность изучаемых известково-шлаковых вяжущих определять на образцах-призмах, изготовленных из растворных смесей, в которых вольский песок заменен песком основного сырьевого материала (вулканического шлака) и в которых постоянным является не соотношение известь:песок (1:3), а содержание акт. СаО в растворной смеси. При определении активности вяжущих по рекомендуемой нами методике нет надобности применения специального другого материала — вольского песка. Состав растворной смеси более приближается к составу применяемого бетона. Процесс твердения растворных смесей полностью отражает процесс твердения смеси основной продукции, так как в обоих случаях твердеют смеси из одних и тех же компонентов. И, что главное, испытываются образцы из растворных смесей с таким содержанием акт. СаО, в каком количестве она будет входить в бетон.

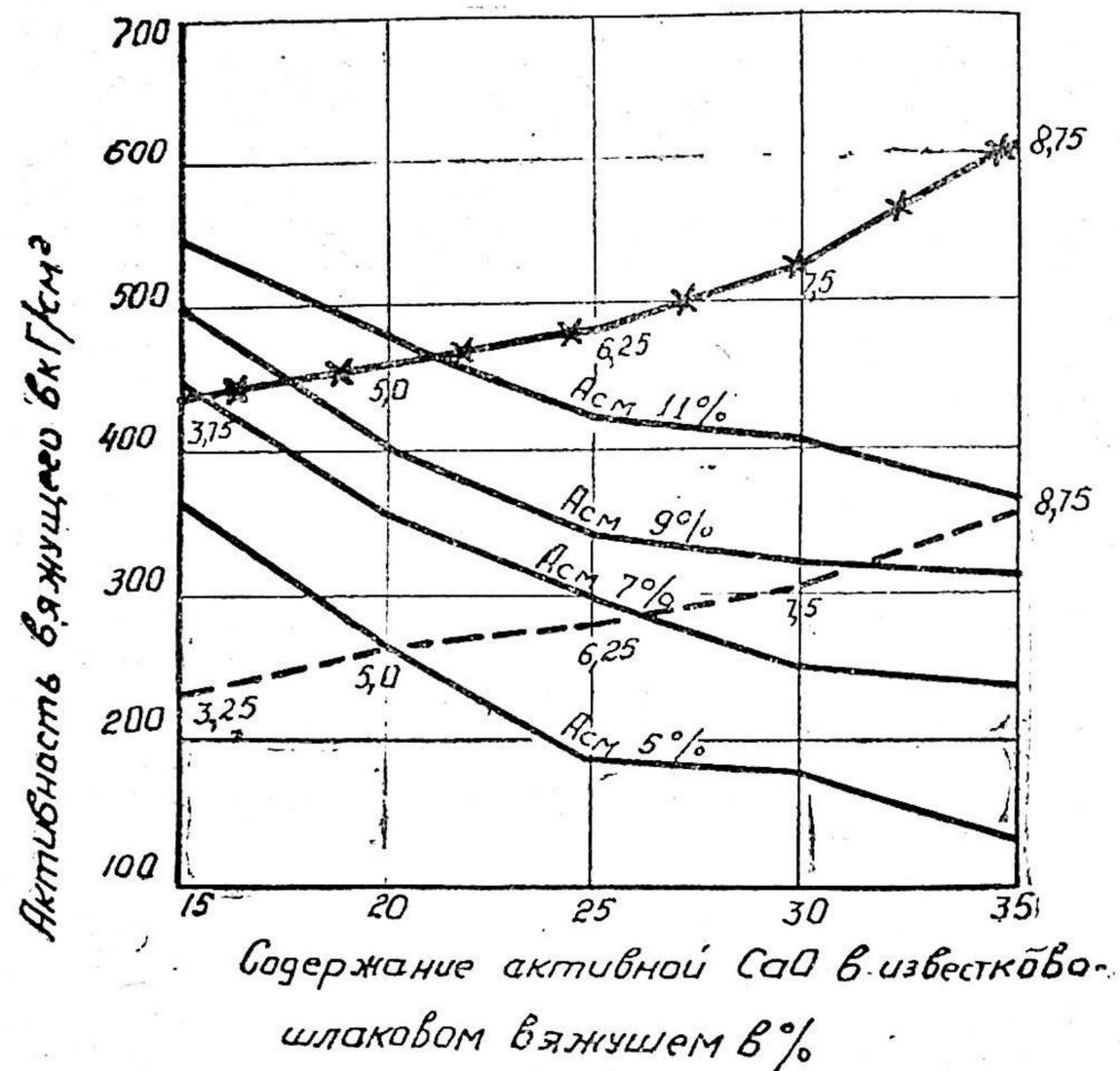


Рис. 1. Активность известково-шлакового вяжущего на вулканическом шлаке Делифского месторождения в зависимости от содержания акт. СаО в вяжущем и в растворе.

В результате анализа проделанных экспериментов, изложенных в данной и последующей главах, и учитывая фактор экономии в нашем случае оптимальным было принято вяжущее с содержанием акт. СаО — 20%.

Примечание: —х—х—х— активность вяжущего при испытании согласно проекту «Указаний по выбору вяжущих для бетонов автоклавного твердения»; — — — — — активность вяжущего при испытании в растворах 1 : 3 с шлаковым песком; — — — — — активность вяжущего при испытании в растворах с постоянным содержанием акт. СаО: 3,75; 5,0; 6,25; 7,5; 8,75 — содержание активной СаО в растворе смеси в %.

Исследование процессов твердения известково-шлакового вяжущего и мелкозернистого легкого силикатного бетона с использованием химического, петрографического и рентгеноструктурного методов анализа показало высокую реакционную способность изучаемого сырья. Из кристаллических новообразований в образцах как мелкозернистого бетона, так и известково-шлакового вяжущего, преимущественно присутствуют гидрогранаты и высокоосновные гидросиликаты. В образцах известково-шлакового вяжущего содержится непрореагировавшая гидроокись кальция, однако ее количество с повышением избыточного давления в автоклаве от 2 до 8 кг/см² и изотермической выдержки с 0 до 14 ч уменьшается с 11,2 до 0,8%.

Непрореагировавшая гидроокись кальция наблюдается и в образцах мелкозернистого легкого силикатного бетона, запаренных при низких избыточных давлениях. Например, при избыточном давлении в автоклаве 2 кг/см² с изотермической выдержкой до 6 ч количество непрореагировавшей гидроокиси кальция составляет 0,2—1,2%. При избыточном давлении в автоклаве 8 кг/см² ее вообще нет, что в основном объясняется тем, что в образцах мелкозернистого бетона начальное содержание акт. СаО значительно меньше (5%), чем в образцах известково-шлакового вяжущего (20%).

Исследование физико-механических свойств и физико-химических процессов твердения показало, что известково-шлаковое вяжущее имеет наибольшую активность при избыточном давлении 8 кг/см². Однако это вяжущее характеризуется достаточной активностью и при низких избыточных давлениях, и при сокращенных режимах автоклавирования.

Это преимущество известково-шлакового вяжущего в сравнении с известково-песчаным вяжущим нами использовано при изготовлении легких силикатных бетонов на основе вулканических шлаков.

В четвертой главе даны результаты изучения основных технологических факторов, влияющих на прочность и объемную массу легких силикатных бетонов на основе вулканических шлаков.

При изучении данного вопроса мы придерживались рабочей гипотезы, предполагающей, что легкие силикатные бетоны на основе вулканических шлаков являются аналогом легких цементных бетонов на пористых заполнителях и на них могут быть распространены те основные закономерности, которые вообще определяют свойства легких бетонов.

На основании этого в сферу наших исследований были включены специфические для легких силикатных бетонов основные производственные факторы, до некоторой степени отличающиеся от производственных факторов легких цементных бетонов. Исследованию подвергались фактор зернового состава «заполнителя», фактор качества и количества вяжущего и фактор твердения — режимы автоклавной обработки.

Были исследованы легкие силикатные бетоны из вулканических шлаков Делифского, Сульдинского и Кармрашенского месторождений. Применялось известково-шлаковое вяжущее с расчетным содержанием акт. СаО в количестве 15, 20, 25 и 30%. На каждом виде вяжущего и вулканического шлака готовились силикатобетонные смеси с расчетным содержанием акт. СаО в количестве 3, 5, 7, 9 и 11%.

На каждом виде вулканического шлака было исследовано 6 зерновых составов. Соотношение между мелким заполнителем (М) и суммой мелкого и крупного (К) заполнителя

$\frac{М}{М+К}$  назначалось 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0. При

этом исследовалась широкая гамма бетонов — от мелкозернистых до крупнозернистых и беспесчаных (крупнопористых) бетонов. Из каждого состава изготавливались образцы кубы с тремя расходами воды. Эксперименты проводились на кубах размером 10×10×10 см при максимальной крупности заполнителя 20 мм и на кубах — 15×15×15 см при максимальной крупности заполнителя 40 мм. Всего было изучено 1080 составов. Образцы запаривались по режиму 2+8+2 ч при избыточном давлении пара 8 кг/см<sup>2</sup>.

Было установлено, что мелкозернистый легкий силикатный бетон характеризуется более высокой прочностью, чем крупнозернистый и крупнопористый легкий силикатный бетон. Введение в силикатобетонную смесь крупного заполнителя снижает прочность и объемную массу бетона. Наименьшей прочностью и объемной массой характеризуются крупнопористые бетоны.

С увеличением расхода вяжущего увеличиваются объемная масса и прочность бетона. Более выгодным является вяжущее с содержанием акт. СаО в количестве 20%. Зависимость расхода вяжущего от содержания акт. СаО в вяжущем,

в силикатобетонной смеси и от объемной массы затвердевшего бетона, можно выразить формулой:

$$Ц_{\text{внш}} = 0,85 \gamma_0 \frac{Ас}{Ав},$$

где  $Ц_{\text{внш}}$  — расход известково-шлакового вяжущего в кг/м<sup>3</sup>;

$Ас$  — содержание активной СаО с силикатобетонной смеси в %;

$Ав$  — содержание активной СаО в известково-шлаковом вяжущем в %;

$\gamma_0$  — объемная масса бетона в высушенном до постоянного веса состоянии в кг/м<sup>3</sup>.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что из вулканических шлаков можно получить широкую гамму конструктивно-теплоизоляционных и конструктивных легких силикатных бетонов с пределом прочности при сжатии от 50 до 500 кг/см<sup>2</sup> при объемной массе 950—1750 кг/м<sup>3</sup>.

Специальные эксперименты, проведенные с целью исследования режимов автоклавного твердения, показали, что легкие бетоны из известкового вяжущего и вулканических шлаков, обработанные в автоклаве при атмосферном давлении (пропарка) с изотермической выдержкой 4—12 ч, имеют прочность порядка 150—200 кг/см<sup>2</sup>. Однако, такой бетон оказался неморозостойким. Обработка бетона паром повышенного избыточного давления (запарка) позволяет получить бетон различной прочности, характеризующийся высокой морозостойкостью. При избыточном давлении пара — 2 кг/см<sup>2</sup> и режиме автоклавной обработки 2+6+2 ч получается легкий силикатный бетон с пределом прочности при сжатии 150—200 кг/см<sup>2</sup> с объемной массой 1300—1400 кг/м<sup>3</sup>, характеризующийся высокой морозостойкостью. Аналогичный бетон получается при обработке его в автоклаве паром при избыточном давлении до 8 кг/см<sup>2</sup> по режиму 2+0+2 (без выдержки).

Увеличение избыточного давления пара от 0 до 8 кг/см<sup>2</sup> и продолжительности изотермической выдержки от 0 до 12 ч повышает прочность мелкозернистого легкого силикатного бетона в пределах 30—70%, а бетонов с крупным заполнителем — в пределах 50—200% (в зависимости от составов).

Результаты этой серии экспериментов позволили рекомендовать для получения легких силикатных бетонов высоких прочностей (200—500 кг/см<sup>2</sup>) производить автоклавную

обработку при избыточном давлении пара  $8 \text{ кГ/см}^2$  с изотермической выдержкой 8—12 ч, для получения бетонов низких и средних прочностей ( $50—150 \text{ кГ/см}^2$ ) — при избыточном давлении пара  $2 \text{ кГ/см}^2$  с изотермической выдержкой 4—6 ч.

В пятой главе обобщены результаты изучения основных физико-механических свойств легкого силикатного бетона на основе вулканических шлаков. Исследованы прочностные и деформативные свойства при кратковременной нагрузке, а также деформации усадки и ползучести, теплопроводность, долговечность, вопросы сцепления арматуры с бетоном и ее коррозионной стойкости.

В связи с большим объемом работы и учитывая одинаковые условия происхождения, химический и минералогический состав, физико-механические свойства вулканических шлаков всех трех изучаемых месторождений и практически одинаковые показатели прочности и объемной массы бетонов, получаемых на их основе, все вышеотмеченные физико-механические свойства бетонов были исследованы на легких силикатных бетонах оптимальных составов, изготовленных из вулканических шлаков Делифского месторождения.

Полученные результаты можно распространить и на легкие силикатные бетоны аналогичной прочности, изготовленные из вулканических шлаков других месторождений.

Прочностные показатели изучались при сжатии, осевом растяжении и растяжении при изгибе. Прочность при сжатии определялась на кубах размером 10 и 15 см и на призмах  $10 \times 10 \times 30 \text{ см}$  и  $15 \times 15 \times 45 \text{ см}$ . Были испытаны мелкозернистые бетоны четырех прочностей 102, 241, 330,  $456 \text{ кГ/см}^2$ , крупнозернистые бетоны пяти прочностей 95, 120, 190, 226,  $316 \text{ кГ/см}^2$  и крупнопористые бетоны двух прочностей 76,  $102 \text{ кГ/см}^2$ , обработанные в автоклаве при избыточном давлении  $8 \text{ кГ/см}^2$  и изотермической выдержке 8 ч, а также мелкозернистые бетоны двух прочностей 180 и  $230 \text{ кГ/см}^2$  и крупнозернистые бетоны двух прочностей 108 и  $150 \text{ кГ/см}^2$ , обработанные в автоклаве при избыточном давлении  $2 \text{ кГ/см}^2$  и изотермической выдержке 6 ч.

Соотношение  $R_{15}/R_{10}$  для мелкозернистого бетона составляет 0,90—1,03; для крупнозернистого — 0,80—0,96; а для крупнопористого 0,75—0,78. Отношение  $R_{пр}/R$  меняется в пределах 0,89—1,10; в зависимости от зернового состава и прочности бетона.

Прочность при осевом растяжении  $R_p$  определялась на

восьмерках с длиной призматической части 45 см и сечением  $10 \times 10 \text{ см}$ . Результаты экспериментов показали, что прочность при осевом растяжении  $R_p$  для мелкозернистого бетона составляет 8— $21,4 \text{ кГ/см}^2$ , для крупнозернистого — 5,7— $15,1 \text{ кГ/см}^2$  и для крупнопористого — 5,6— $7,7 \text{ кГ/см}^2$  и близка к приведенной в СНиП П-В 1-62.

Предел прочности на растяжение при изгибе  $R_{пр}$  определялся на балках  $15 \times 15 \times 60 \text{ см}$  и для мелкозернистого бетона равен 11,3— $36,8 \text{ кГ/см}^2$ , для крупнозернистого — 7,7— $20,0 \text{ кГ/см}^2$  и для крупнопористого — 7,3— $10,5 \text{ кГ/см}^2$ .

Деформативные показатели легкого силикатного бетона при сжатии определялись на призмах  $10 \times 10 \times 30 \text{ см}$ . Деформации измерялись на базе 10 см индикаторами часового типа, установленными на боковых гранях призм. Образцы нагружались ступенями ( $0,1R$ ) от условного нуля ( $0,05R$ ) до половины предела прочности данного вида сопротивления ( $0,5R$ ) с замером деформаций на каждой ступени. Затем образец подвергался многократным нагрузениям и разгрузениям (от  $0,05R$  до  $0,5R$ ) до полного отжатия пластических деформаций, после чего снова нагружался по ступеням с замером деформаций до  $0,8R$ . Модуль упругости, определенный при  $\sigma = 0,2R_{пр}$ , для мелкозернистого бетона равен 55000— $160000 \text{ кГ/см}^2$ , для крупнозернистого — 50000— $152000 \text{ кГ/см}^2$  и для крупнопористого —  $46000—52000 \text{ кГ/см}^2$ . Полученные результаты начального модуля упругости для мелкозернистого бетона незначительно ниже по сравнению с данными СНиП П-В. 1-62. Введение в силикатную смесь крупного заполнителя сопровождается увеличением значения начального модуля упругости.

Величина предельной сжимаемости для мелкозернистого бетона составляет  $(16,1—20,6) \cdot 10^{-4}$ , для крупнозернистого —  $(11,2—29,2) \cdot 10^{-4}$  и для крупнопористого —  $(9,1—10,8) \cdot 10^{-4}$ .

Изучение усадки и ползучести легкого силикатного бетона производилось на образцах-призмах размером  $10 \times 10 \times 40 \text{ см}$ , для мелкозернистого бетона с призматической прочностью 107, 215, 330,  $450 \text{ кГ/см}^2$  и для крупнозернистого бетона с призматической прочностью 115, 200, 250,  $300 \text{ кГ/см}^2$ .

Деформации усадки определялись при помощи специального прибора, состоящего из станины, внизу которой укреплен керн, а в верхней части — индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Деформации ползучести определялись в специальных установках, создающих напряжение  $0,5 R_{пр}$ , на базе 240 мм.

По результатам измерений деформаций определялись относительные деформации усадки и ползучести, характеристики и меры ползучести.

Было установлено, что деформации усадки и ползучести носят затухающий характер и в основном проявляются в первые 3 месяца. После 540 суток деформации усадки у мелкозернистого бетона составляют 0,14—0,38 мм/м, у крупнозернистого — 0,09—0,22 мм/м; деформации ползучести соответственно лежат в пределах 0,36—0,39 мм/м и 0,37—0,46 мм/м. Характеристика ползучести мелкозернистого бетона составляет 1,24—1,61; крупнозернистого 1,34—1,52; мера ползучести соответственно равна — 11,8—17,5 и 10,3—26,5.

Полученные результаты обнаружили, что легкие силикатные бетоны на основе вулканических шлаков по сравнению с аналогичными цементными бетонами характеризуются малыми значениями деформации усадки и ползучести.

Водопоглощение легкого мелкозернистого силикатного бетона составляет 10,1—18,1% от объемной массы, у крупнозернистого — 11,0—22,1%, у крупнопористого — 23,2—25,1%. Коэффициент размягчения соответственно лежит в пределах 0,80—0,85; 0,74—0,86; 0,72—0,76.

Бетоны, обработанные в автоклаве при избыточном давлении 2 кг/см<sup>2</sup>, характеризуются показателями водопоглощения и коэффициента размягчения практически одинаковыми, с равнопрочными бетонами, обработанными в автоклаве при избыточном давлении 8 кг/см<sup>2</sup>.

Все изученные виды бетонов с прочностью до 300 кг/см<sup>2</sup>, запаренные как при избыточном давлении 8 кг/см<sup>2</sup>, так и при избыточном давлении 2 кг/см<sup>2</sup>, выдерживают 35 циклов испытания на морозостойкость, а бетоны с прочностью выше 300 кг/см<sup>2</sup> — 50 циклов.

Сорбционная влажность легких силикатных бетонов в зависимости от структуры, прочности и режимов автоклавной обработки меняется в пределах 5—8%.

Изучение изменения прочности бетона во времени в различных условиях показало, что все виды бетонов после 3 лет хранения при воздушно-сухом (+18 +26°C, W — 60—80%), естественном (под открытым небом) и влажном (в воде) режимах характеризуются прочностью, которая на 5—14% больше первоначальной.

После 100 циклов попеременного увлажнения и высушивания (1 цикл: 4 ч в воде, 6 ч в сушильном шкафу при +80—85°C и 14 ч в помещении) прочность легких силикатных бе-

тонов не уменьшается, а в бетонах, запаренных при избыточном давлении 2 кг/см<sup>2</sup>, наблюдается даже повышение ее до 15%.

Коэффициенты теплопроводности определялись на приборе, действие которого основано на стационарном режиме теплового потока. В результате было установлено, что коэффициент теплопроводности мелкозернистого бетона (в сухом состоянии) составляет 0,22—0,48 ккал/(м·ч·°C), крупнозернистого — 0,20—0,25 ккал/(м·ч·°C), крупнопористого — 0,20—0,21 ккал/(м·ч·°C), приращение коэффициента теплопроводности при увеличении влажности на 1% колеблется в пределах 0,004—0,01 ккал/(м·ч·°C). Бетоны одинаковой объемной массы, обработанные при избыточном давлении 8 и 2 кг/см<sup>2</sup>, имеют практически одинаковый коэффициент теплопроводности.

Величины сил сцепления гладкой арматуры с бетоном, определенные выдергиванием стальных стержней различных диаметров (6, 12, 18 мм) при различной глубине заделки (3, 6, 12, 18 мм), для мелкозернистых бетонов оказались равными 24,1—83,0 кг/см<sup>2</sup>, для крупнозернистых бетонов 12,5—42,5 кг/см<sup>2</sup>.  $T_{cu}/R$  соответственно составляло 0,105—0,202 и 0,062—0,139. Режим автоклавной обработки не оказывает существенного влияния на силу сцепления арматуры с бетоном.

Коррозийная стойкость арматуры в легких силикатных бетонах определялась для мелкозернистого бетона трех прочностей — 230, 303, 410 кг/см<sup>2</sup> и для крупнозернистого бетона двух прочностей 208, 305 кг/см<sup>2</sup>, обработанных в автоклаве по режиму 2,5+8+2 ч, при избыточном давлении 8 кг/см<sup>2</sup>.

Изготавливались образцы призмы размером 5×5×10 см. При формовании в центре бетона укладывались шлифованные стальные стержни длиной 80 мм и диаметром 8 мм (из ст-3), перед укладкой их промывали спиртом.

Испытание проводилось сразу после автоклавной обработки и спустя 3,6 и 12 месяцев хранения. Образцы хранились в совмещенных условиях (по СНиП — «нормальный» и «влажный») в помещении при относительной влажности воздуха 60—75%, в мокрой среде, при относительной влажности воздуха — 80—90%; в переменных условиях — 1 ч в воде, 23 ч на воздухе.

В результате было установлено, что коррозия арматуры в легком силикатном бетоне на основе вулканических шлаков начинается в процессе автоклавной обработки и в течение первых трех месяцев протекает интенсивно. В последующее время скорость коррозии уменьшается и приобретает затухающий характер. Коррозионные разрушения, возникающие в легком силикатном бетоне в условиях нормального и влажного режимов эксплуатации, не представляют опасности для сохранности конструкций.

В условиях мокрого и особенно переменного режимов эксплуатации коррозионная стойкость арматуры в бетоне заметно уменьшается. Поэтому в конструкциях из легких силикатных бетонов на основе вулканических шлаков, эксплуатируемых в переменных и мокрых условиях арматуру нужно защищать от коррозии.

В шестой главе описаны работы по изготовлению опытной партии легких силикатобетонных изделий из вулканических шлаков и приводятся расчеты экономической эффективности их применения.

Выпуск опытной партии был осуществлен на экспериментальной базе лаборатории автоклавных изделий ТбилНИИСМ. Были изготовлены крупноразмерные изделия  $2,0 \times 0,6 \times 0,24$  м и самосцепляющиеся фальцевые стеновые камни —  $0,5 \times 0,30 \times 0,24$  м. Крупноразмерные изделия изготовлялись из бетонов марки 100—400 путем запаривания при избыточном давлении  $8 \text{ кг/см}^2$  по режиму 3+8+3 ч. Самосцепляющиеся фальцевые камни были изготовлены из бетонов марки 50—75 и запаривались при избыточном давлении  $2 \text{ кг/см}^2$  по режиму 2+6+2 ч. Примерный расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона в зависимости от марки приводится в таблице 1.

Определение и исследование основных физико-механических свойств контрольных образцов, изготовленных из рабочих смесей блоков и камней, полностью подтвердили результаты лабораторных данных.

Изделия были использованы для расширения помещения лаборатории автоклавных изделий ТбилНИИСМ. Наблюдения, проводимые в течение 4-х лет, позволили обнаружить высокие эксплуатационные качества исследуемого материала. На изделиях не было обнаружено следов каких-либо повреждений.

Испытание контрольных образцов, хранимых рядом с изделиями, позволило установить, что прочность материалов во времени практически не изменяется.

Таблица 1

Марка	Объемная масса бетона на высушенного до постоянного веса $\text{кг/м}^3$	Содержание акт. СаО в силикатобетонной смеси в %	Расход материалов на $1 \text{ м}^3$ бетона в кг						
			Известково-шлаковое вяжущее		Вода	Заполнитель—вулканический шлак по фракциям в мм			
			всего	в т. ч. извести с содерж. акт. СаО 75 %		до 5	5—10	10—20	20—40
50	1000	4	200	50	190	—	160	240	420
75	1100	5	270	75	220	—	170	250	430
100	1200	5,5	280	90	240	160	220	460	—
150	1300	6	320	110	280	340	125	395	—
200	1400	7,5	450	130	300	360	115	375	—
250	1500	8,5	510	170	330	500	50	280	—
300	1600	9,5	650	190	350	640	15	165	—
400	1750	11,7	890	240	400	730	—	—	—

Экономическая эффективность применения легкого силикатного бетона на основе вулканических шлаков была определена путем сравнения стоимости  $1 \text{ м}^3$  бетона и изделий и  $1 \text{ м}^2$  стены из легких силикатных бетонов к стоимости  $1 \text{ м}^3$  бетона и изделий и  $1 \text{ м}^2$  стены из ячеистого и плотного силикатного бетона на итавазских песках и из легких цементных бетонов на вулканических шлаках в условиях применения в Тбилиси и Рустави (табл. 2).

Толщина стен, рассчитанная по СНиП 11-А. 7—62 «Строительная теплотехника. Нормы проектирования», из ячеистого и легких силикатных бетонов и легких цементных бетонов — 24 см, из плотного (тяжелого) силикатного бетона—32 см.

Как видно из данных таблицы 2, из всех рассмотренных видов бетона для применения в условиях Тбилиси и Рустави наиболее экономичными являются легкие силикатные бетоны автоклавного твердения из вулканических шлаков.

Таблица 2

№№ пп	Вид бетона	Марка	Объемная масса бетона в кг/м <sup>3</sup>	Стоимость в руб.		
				1 м <sup>3</sup> бетона	1 м <sup>3</sup> изделий	материала на 1 м <sup>3</sup> стены
I. Силикатные бетоны						
1	Ячеистый - на итавазском песке . . .	50	700	7-42	18-48	4-13
		75	800	7-76	19-03	4-56
2	Плотный—на итавазском песке . . .	100	1920	10-75	21-02	6-70
		150	1960	11-35	21-82	6-92
		200	2010	11-62	22-24	7-20
3	Легкий—на кармрашенском вулканическом шлаке . . . . .	50	960	4-68	13-62	3-26
		75	1080	5-19	14-13	3-40
		100	1170	5-43	14-37	3-45
		150	1280	5-74	14-68	3-52
		200	1390	5-98	14-92	3-59
4	Легкий—на ахалкалакском вулканическом шлаке . . . . .	50	1050	8-25	17-19	4-12
		75	1150	8-80	17-74	4-25
		100	1250	9-01	17-95	4-32
		150	1350	9-65	18-59	4-46
		200	1450	10-01	18-95	4-55
II. Цементные бетоны						
5	Легкий—на кармрашенском вулканическом шлаке . . . . .	50	1200	6-30	14-99	3-60
		75	1260	6-75	15-41	3-72
		100	1320	7-25	15-94	3-82
		150	1430	7-83	16-52	3-97
6	Легкий—на ахалкалакском вулканическом шлаке . . . . .	50	1250	9-63	18-32	4-40
		75	1300	10-51	19-20	4-62
		100	1360	10-92	19-61	4-72
		150	1430	11-63	20-32	4-88
		200	1550	12-61	21-30	5-12

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Получен новый вид легкого бетона — легкий силикатный бетон автоклавного твердения на вулканических шлаках, выгодно отличающийся от обычных легких цементных бетонов из тех же шлаков. Легкий силикатный бетон из вулканических шлаков готовится без клинкерного цемента на известково-кремнистом вяжущем. Если в легких цементных

бетонах расход вяжущего доходит до 400 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона, то в аналогичных легких силикатных бетонах расход известки не превышает 250 кг. Бетон может быть мелкозернистым, крупнозернистым и крупнопористым.

2. Легкий силикатный бетон из вулканических шлаков при объемной массе 1000 — 1750 кг/м<sup>3</sup> имеет прочность 50—500 кг/см<sup>2</sup>. Это более чем в 2 раза выше прочности легких цементных бетонов из тех же шлаков. Полученный бетон характеризуется высокими физико-техническими показателями: уменьшение прочности во времени не наблюдается, водопоглощение бетона—10—23%, коэффициент размягчения—0,72—0,85, характеризуется высокой морозостойкостью — свыше 35 циклов; соотношение  $R_{пр}/R$  составляет 0,89—1,10,  $R_{15}/R_{10}$  — 0,75—1,03, модуль упругости — 46000—160000 кг/см<sup>2</sup>, деформации усадки — 0,09—0,38 мм/м, деформации ползучести — 0,37—0,46 мм/м, теплопроводность — 0,20—0,46 ккал/(м·ч·°C). Кроме того, он характеризуется достаточно высокой сцепляемостью со стальной арматурой.

3. В производстве легкого силикатного бетона автоклавного твердения из вулканических шлаков применяется новый вид силикатного вяжущего, получаемого путем совместного помола известки и вулканического шлакового песка. На образцах-призмах из растворных смесей с различным соотношением вяжущего и рядового песка вулканических шлаков изучены свойства этого вяжущего и дана методика оценки его качества, которая принципиально отличается от методики оценки активности автоклавных вяжущих на образцах из растворных смесей стандартного состава (1:3).

4. Экспериментально подтверждены высокая растворимость и активность алюмосиликатных стекол вулканических шлаков по сравнению с кремнеземом кварцевого песка. Установлено, что исследуемое вяжущее и легкий силикатный бетон из вулканических шлаков при автоклавной обработке твердеют интенсивно и приобретают высокую прочность быстрее и при более низком избыточном давлении пара, чем другие автоклавные материалы. Доказана возможность получения легких силикатных бетонов сравнительно низких и средних марок (50—150) при сокращенном режиме автоклавирования (2—4—2, 2—6—2) и при сравнительно низком избыточном давлении пара (2 кг/см<sup>2</sup>).

5. Выпуск опытной партии крупноразмерных изделий из легких силикатных бетонов на вулканических шлаках подтвердил технологичность этого материала и возможность ис-

пользования для его изготовления оборудования, применяемого ныне в промышленности строительных материалов для изделий из легких цементных бетонов.

6. Предварительными расчетами установлена высокая технико-экономическая эффективность легких силикатобетонных изделий из вулканических шлаков. Стоимость таких изделий в условиях применения в Тбилиси, Рустави на 1,37—3,29 руб меньше, чем стоимость аналогичных изделий из ячеистых и тяжелых силикатобетонных и обычных легких цементобетонных изделий.

7. В диссертации в виде приложения даны разработанные на основе полученных данных «Временные указания по изготовлению легких силикатных бетонов и изделий на основе вулканических шлаков».

8. Результаты исследований внедряются на Авчальском заводе силикатных стеновых материалов Министерства промышленности строительных материалов Грузинской ССР и на Горийском КПП треста № 9 Министерства строительства Грузинской ССР.

#### Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

1. Л. С. Болквадзе, В. К. Дидидзе. Легкие силикатные бетоны на основе вулканических шлаков. «Строительные материалы», № 9, 1964.
2. Л. С. Болквадзе, В. К. Дидидзе. Легкие силикатные бетоны на ахалкалакских туфолавах. Тезисы к докладам научно-технической конференции «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Тбилиси, 1965.
3. Л. С. Болквадзе, В. К. Дидидзе. Влияние режимов автоклавной обработки на прочность легких силикатных бетонов. Техническая информация, серия «Промышл. автоклавн. материалов из местных вяжущих», вып. 8, М., 1968.
4. В. К. Дидидзе. Известково-кремнистые вяжущие для легких силикатных бетонов на некоторых видах пористого сырья. Сб. трудов ТбилНИИСМ, вып. III, Тбилиси, 1968.
5. В. К. Дидидзе, К. А. Схиртладзе, Е. Е. Хахуташвили. Свойства легких силикатных бетонов на основе вулканических шлаков Ахалкалакского месторождения. Сб. трудов ТбилНИИСМ, вып. IV, Тбилиси, 1969.
6. С. Н. Папуашвили, Л. С. Болквадзе, Л. К. Тедеишвили, Н. Л. Агладзе, В. К. Дидидзе, Д. Д. Се-

сиашвили, Н. Н. Папуашвили. Физико-химическое исследование процессов автоклавного твердения вяжущего из вулканического шлака Ахалкалакского месторождения. Сб. трудов ТбилНИИСМ, вып. IV, Тбилиси, 1969.

7. В. К. Дидидзе, А. Г. Джапаридзе, Е. Е. Хахуташвили. Экспериментальное изучение усадки и ползучести легких силикатных бетонов на естественных пористых заполнителях. Краткое содержание докладов объединенной сессии научно-исследовательских институтов Закавказских республик по строительству, Ереван, 1969.

Результаты проведенных исследований и обобщенных в диссертации, доложены автором на научно-технической конференции «Технология строительных материалов, изделий и конструкций» (г. Тбилиси, 1965) и на объединенной сессии научно-исследовательских институтов Закавказских республик по строительству (г. Ереван, 1969).