

Способ прогнозирования прочностных характеристик бетона с помощью звуковых волн

А. С. Манаков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

smasherchemist@gmail.com

Аннотация. Рассматривается возможность применения закономерностей изменения характеристик акустических волн, при прохождении через свежеприготовленную бетонную смесь, для прогнозирования показателя прочности искусственного камня, полученного из данной смеси. Приводятся результаты эксперимента по установлению связи между скоростью ультразвука в смеси и прочностью контрольного образца, определенной разрушающим методом. Производится испытание образцов из различного исходного материала при различающихся периодах твердения.

Ключевые слова: предел прочности цемента; активность цемента; определение прочности; экспресс-метод

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в строительной сфере используется несколько видов цемента, отличающиеся по своему химическому составу и физическим свойствам, однако в основе всех минеральных вяжущих веществ данной группы лежат оксиды (диоксид кремния, оксид алюминия, оксид железа (III), оксид магния и т. д.), в процессе обработки, испытывающие преобразование в более химически сложные клинкерные минералы. Цементный клинкер представляет собой смесь нескольких минералов, также называемыми фазами: алит (трехкальциевый силикат), белит (двухкальциевый силикат), трехкальциевый алюминат (алюминатная фаза) и четырехкальциевый алюмоферрит (алюмоферритная фаза), каждая из которых реагирует с водой с разной скоростью и имеет различный вклад во временное изменение прочностной характеристики изготавливаемой из цемента смеси – активные минералы, реагирующие с водой в течение 28 суток и перспективные минералы, обуславливающие добор прочности изделиями после срока в 28 суток. Для портландцемента характерно преобладание силикатной фазы, для глиноземистых цементов – алюминатной [1].

Определение прочностной характеристики вяжущих веществ необходимо проводить по нескольким причинам: во-первых, ввиду организации контроля качества отпускаемой продукции на заводах-производителях, при котором предъявляемые характеристики могут представлять собой результат оценки предыдущей партии, а, соответственно, иметь расхождение с характеристиками фактически используемой партии материала; во-вторых, на практике хранение цемента может происходить в различных от оптимальных условиях (на открытом воздухе), что обуславливает ускоренную потерю цементом своих

качеств. Использование цемента с неизвестными показателями основных характеристик приводит к снижению качества изготавливаемых бетонных смесей, либо к его перерасходу при корректировке состава бетонной смеси. Данную прочностную характеристику называют активностью цемента – прочность образцов из песчано-цементного раствора заданного состава при испытании на сжатие до их разрушения в заданных условиях окружающей среды. Альтернативами испытанию на сжатие с целью определения механической прочности вяжущего вещества также могут быть испытания на растяжение, скалывание и изгиб [2]–[4].

Принципиально подходы к исследованию свойств минеральных вяжущих веществ можно разделить на физические, полагающиеся на изучение физических параметров цемента или изготовленных на его основе контрольных образцов; и химические, полагающиеся на исследование твердения цементной смеси по количественному соотношению реагентов данной химической реакции, либо на исследование минерального состава цементирующего вещества.

Химический метод определения активности портландцемента заключается в определении реагирующего количества силикатов, поскольку для данного вида цемента эта фаза определяет прочность получаемых изделий. Количественной оценкой содержания силикатных фаз принята концентрация гидролизной извести (гидроксида кальция), определяемая по истечении 5 часов с момента соединения цемента с водой в установленной водоцементном соотношении при постоянной температуре окружающей среды 20 °С, поскольку в процессе гидратации из всех минералов, входящих в состав портландцемента, гидроксид кальция образуется только из реакции с силикатом кальция. Проведение испытания заключается в следующем: готовится суспензия с добавлением полуводного гипса (двуводного сульфата кальция), затем испытуемый цемент гидратируется на протяжении 5 часов, после чего суспензия фильтруется и полученный фильтрат смешивается с соляной кислотой до изменения окраски индикатора. Активность цемента определяется по эмпирической формуле, связывающей объем потребовавшейся кислоты с прочностной характеристикой. Данная методика обладает относительно высокой точностью определения активности – расхождения в показателях между ускоренным и разрушающим методом по ГОСТ 310.4-81

составляют 4-6%, однако для достижения такой точности необходимо строго соблюдать режим перемешивания (взбалтывания) суспензии раз в 15 минут, что осложняет процесс проведения испытания. Для цементов, основанных на соединениях алюминия, можно применить аналогичный метод определения алюминатности суспензии, однако в данном случае необходимо обеспечить селективность гидратации алюминатной фазы с блокировкой гидратации силикатов – для этого в суспензию вводится раствор сахарозы, которая катализирует первую реакцию и ингибирует вторую [5].

Среди физических методов определения активности цемента можно выделить прямые методы, такие как испытания на сжатие, изгиб, раскалывание и растяжение, результатом которых является значение разрушающей нагрузки; и косвенные методы, измеряющие побочную физическую характеристику, как, например, электропроводность или величину уменьшения объема испытуемого состава, на основании которой с применением градуировочной зависимости рассчитывается величина разрушающей нагрузки. Разрушающий механический метод является основным методом, применяемым согласно нормативно-технической документации Российской Федерации в сфере строительства и обладает наибольшей точностью среди всех методов испытаний, но в то же время обладает и наибольшим временем проведения испытаний – 28 суток, поскольку именно за это время изготовленные на основе цементных вяжущих изделия и конструкции набирают наибольшую часть механической прочности. ГОСТ 310.4 также допускает определение прочности разрушающим методом при пропаривании образцов по установленному режиму нагревания и – при данном методе промежуток времени между изготовлением образцом и их испытанием составляет 25 ± 2 часа.

Поскольку цементные вяжущие составы представляют собой смесь минералов, преимущественно состоящих из солей (силикатов, алюмоферритов и др.), становится возможным исследование электрических свойств раствора цемента с целью определения его прочностных характеристик при последующем твердении. На практике в качестве косвенной характеристики активности цемента используется электропроводность водного раствора цемента, поэтому данный метод определения прочности получил название «кондуктометрический». Суть данного метода заключается в пропускании электрического тока через цементный раствор с заданным водоцементным соотношением и измерении характеристик этого электрического тока. Приборы, реализующие данный метод испытаний, представляют собой измерительный сосуд с установленным в крышке электродом, соединенным с блоком управления. Для проведения испытания необходимо добавить в сосуд цемент с водой в установленных объемах и интенсивно перемешать их, после чего прибор производит измерения в автоматическом режиме. К достоинствам данного экспресс-метода относится наименьшая затрата времени на проведение измерений – оно проводится непосредственно на свежеприготовленном растворе, и

однократное испытание занимает несколько минут. Также стоит отметить возможность реализации малогабаритных портативных кондуктометров. Недостатком данного метода является его низкая точность, что ограничивает его применение – в основном он используется для качественного определения факта значительного уменьшения активности цемента. Дополнительным ограничением данного метода является отсутствие методологического обоснования, регулирующего применение и содержащего в себе требования и порядок проведения испытания соответствующими приборами [6].

В процессе гидратации отдельных видов цемента и связанного с этим окаменения бетонной или растворной смеси, происходит изменение объема этой смеси. Данную закономерность также можно использовать в основе косвенного метода определения активности цемента. Приборы для проведения измерений уменьшения объема испытуемой смеси называются контрактометрами (контрактометрами). Приборы, реализующие данный метод испытаний, представляют собой герметичную измерительную камеру, заполняемую водой, в которую также помещается испытуемое вещество, а также измерительную трубку, сообщающуюся с камерой, с помощью которой производится измерение текущего объема жидкости. В процессе твердения объем цементного теста уменьшается, и соответствующее изменение объема используется для расчета активности цемента. К достоинствам данного метода можно отнести сокращенный срок определения активности цемента относительно разрушающего метода – контрактометр позволяет получить результаты через 3 или 6 часов при условии длительного использования цемента одного поставщика, что позволяет использовать накопленные статистические данные при определении величин, а также данный метод обладает повышенной точностью определения величины данной характеристики относительно кондуктометрического метода. Для данного метода ускоренного испытания цемента введены в действие методологические рекомендации МИ 2488-98, МИ 2487-98 МИ 2486-98 для проведения испытания в строительных лабораториях [7].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Принимая во внимание достоинства и недостатки существующих приборов, применяемых для оценки качества цементного вяжущего вещества в контексте его прочностных характеристик, сформулируем основные характеристики, которыми должен обладать предлагаемый способ для того, чтобы его разработку можно было считать целесообразной:

- Время, требуемое для проведения измерительной части испытания, должно составлять не более 12 часов.
- Точность измерений косвенной характеристики должна обеспечивать расхождение между оценкой, рассчитанной на ее основе, и фактическим значением прочности не более одного класса по ГОСТ 31108-2016 (для цементов) или ГОСТ 26633-2015 (для бетонов).

Опциональным преимуществом способа может являться отсутствие необходимости в использовании сторонних реагентов и в совершении дополнительных время- или энергозатратных манипуляций.

III. ОПИСАНИЕ СПОСОБА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Суть рассматриваемого способа определения прочности цементного вещества заключается в определении скорости звуковой волны, распространяемой через объем затворенной водой песчано-цементной смеси. За счет протекающей химической реакции гидратации составляющих компонентов цемента, цементно-песчаная суспензия переходит в твердое состояние, из-за чего изменяется скорость распространения звуковых волн в рассматриваемом теле. С другой стороны, при изменении качества вяжущего вещества скорость протекания химической реакции и реагирующая с водой масса вещества также изменяются, что сказывается на физических характеристиках получаемого искусственного камня.

На начальном этапе экспериментального исследования предлагается наблюдение за выбранной косвенной характеристикой в течение суток, что примерно соответствует средним срокам перехода бетонной смеси в камневидное состояние, которое перестает удовлетворять границам применения предлагаемого способа.

Проведение эксперимента основывалось на методе испытаний цемента, описываемом в ГОСТ 310.4, для сравнения полученных результатов с результатами испытания прямым разрушающим методом. В стандартную форму для изготовления образцов-балочек была загружена смесь с заданным стандартом соотношением масс полифракционного песка, цемента и воды, после чего производилось периодическое измерение скорости звука в полученных образцах. Для эксперимента были выбраны различающиеся по марке и условиям хранения портландцементы – портландцемент марки по прочности 42.5Н, подвергшийся неправильному способу хранения – после вскрытия упаковки цемент продолжительное время находился в условиях доступа к атмосферной влаге; портландцемент марки 32.5Н, подвергшийся аналогичному неправильному хранению, но время хранения составляло значительно меньше, чем у предыдущего образца; и портландцемент марки 42.5Н, отобранный из заводской упаковки, вскрытой непосредственно перед проведением эксперимента. Прозвучивание образцов производилось раздельными пьезоэлектрическими преобразователями с номинальной частотой 0.4 МГц для излучателя и 1.25 МГц для приемника, расположенными на противоположных стенках формы – выбор низкочастотных звуковых волн и прозвучивание теньевым методом объясняется интенсивным затуханием и рассеянием ультразвука в свежеприготовленной бетонной смеси. Для генерации и регистрации ультразвуковых волн использовался ультразвуковой дефектоскоп A1214 EXPERT.

В первой части эксперимента было проведено измерение скорости звука в контрольных объектах при твердении цементно-песчаной смеси в течение 8 и 16 часов. Графики полученных зависимостей приведены на рис. 1 и 2, цементы обозначены согласно номинальной марке по прочности и правильности условий хранения:

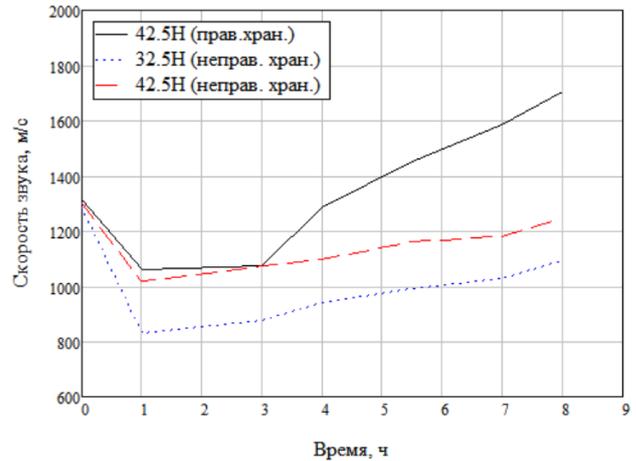


Рис. 1. Изменение скорости звука в образцах на протяжении 8 часов

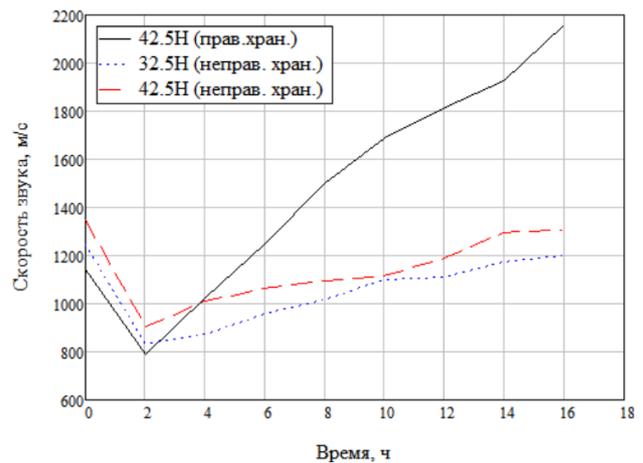


Рис. 2. Изменение скорости звука в образцах на протяжении 16 часов

Во второй части эксперимента было произведено испытание разрушающим методом изготовленных контрольных образцов с различным сроком твердения (1, 4 и 7 суток) с предварительным измерением скорости звука в этих образцах – это позволяет сравнить объективный показатель прочностной характеристики вяжущего вещества с косвенной характеристикой, на основании которой предлагается определение активности цемента. Нагружение образцов производилось при помощи гидравлического пресса MATEST CO40PN132. Результаты испытания приведены на рис. 3.

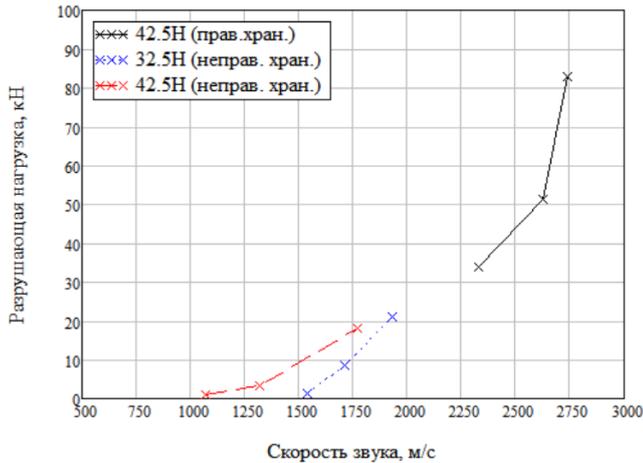


Рис. 3. Соотношение между силой, необходимой для разрушения образцов, и скорости звуковых волн в них

При сравнении приведенных на рис. 1 и 2 данных можно отметить сохраняющуюся закономерность в изменении скорости ультразвуковых волн в объеме цементно-песчаного раствора:

- Во время первого измерения после приготовления смеси скорость в образцах приблизительно одинакова и составляет значение, близкое к скорости звука в воде – при этом расхождения в величинах скоростей можно объяснить различной степенью осадки твердых нерастворенных частиц в суспензии.
- В течение последующих 2-3 часов происходит снижение скорости звука – данный временной промежуток приблизительно совпадает с временем начала и конца схватывания цементного раствора (определяемого по ГОСТ 310.3-76) и происходящие на этом этапе химические реакции гидратации приводят к качественным изменениям в структуре смеси.
- При дальнейшем твердении образцов наблюдается монотонное увеличение скорости звука в образцах, причем изменение данной величины тем быстрее, чем выше фактическая активность цемента, с учетом данных второй части эксперимента, сведенных в график на рис. 3.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный эксперимент свидетельствует о наличии взаимосвязи между двумя характеристиками контрольных образцов, изготовленных из песчано-цементной смеси – чем больше механическая прочность образца при сжатии, тем больше скорость звука в нем как в незатвердевшем, так и в затвердевшем состоянии – в результате чего скорость звука можно использовать как косвенную характеристику при определении прочностной характеристики – активности цементного вяжущего вещества. Для изготовления образцов использовались портландцементы трех различных марок по прочности, однако исходя из принципиально схожих химических реакций, протекающих в других видах минеральных цементов при изготовлении искусственного камня на их основе, можно предположить, что предлагаемый способ определения активности также применим и для этих веществ.

При проведении эксперимента было подтверждено теоретическое предположение о негативном влиянии мелкозернистой структуры песчано-цементного раствора в незатвердевшем состоянии на распространение ультразвуковых волн – они испытывают значительное рассеяние и затухание в данной среде, что приводит к уменьшению амплитуды регистрируемых сигналов, а применяемое с целью компенсации этого явления повышения уровня усиления сигнала дефектоскопом вызывает и повышение уровня регистрируемых шумов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Stark J., Мцсер В., Eckart A. New approaches to cement hydration. Part 1-2 // ZKG International, 54, 2001, pp. 52–60, 114–119.
- [2] Ерошкина Н.А. Минерально-щелочные вяжущие: [монография] / Н.А. Ерошкина, В.И. Калашников, М.О. Коровкин. Пенза: ПГУАС, 2012. 152 с.
- [3] Кузнецова Т.В. Физическая химия вяжущих веществ / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. М.: Высшая школа, 1989. 383 с.
- [4] Калашников В.И. Вяжущие вещества: учеб. пособие / В.И. Калашников, М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина. Пенза: ПГУАС, 2015. 96 с.
- [5] Лашенко В.А. Ускоренные методы определения активности и алюминатности цемента / В.А. Лашенко, Н.В. Лашенко // Бетон и железобетон. 1980. № 11. с. 27–28.
- [6] Прибор для определения активности цемента ИАЦ-04М. URL: <https://pribori24.ru/prod/pribor-dlya-opredeleniya-aktivnosti- cementa- iac-04m/> (дата обращения: 09.01.2024)
- [7] Филатов Е.Ф. Экспресс-методы прогнозирования активности цемента в заводской лаборатории // Строительные материалы, № 3, 2017, с. 46-48.