УДК 622.245.422

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ КАМНЯ ТАМПОНАЖНЫХ РАСТВОРОВ

PECULIARITIES OF USING ULTRASONIC DEVICES TO DETERMINE THE STRENGTH OF CEMENT SLURRIES

Белей Иван Ильич
кандидат технических наук,
главный специалист лаборатории тампонажных растворов,
ООО «Газпром проектирование», Тюменский филиал
beley@tngg.ru

Речапов Данир Ахатович
начальник лаборатории тампонажных растворов,
ООО «Газпром проектирование», Тюменский филиал
rechapovda@tngg.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности использования современных ультразвуковых приборов (анализаторов) в лабораторной практике для испытаний тампонажного камня. Приведены сравнительные результаты определения прочности камня разрушающим методом и ультразвуковыми приборами.

Ключевые слова: ультразвуковые приборы, расчетные формулы, прочность камня.

Beley Ivan Ilich
Candidate of Technical Sciences,
Chief Specialist
of Plugging Solutions Laboratory,
Gazprom Design LLC, Tyumen branch
beley@tngg.ru

Rechapov Danir Akhatovich
Head of Injection Mud Laboratory,
LLC Gazprom proektion, Tyumen branch
rechapovda@tngg.ru

Annotation. Features of modern ultrasonic devices (analyzers) used in laboratory practice for plugging stone tests are considered. The comparative results of stone strength determination by the destructive method and by ultrasonic devices are given.

Keywords: ultrasonic devices, calculation formulas, strength of stone.

Важными параметрами тампонажных систем, определяющих пригодность для цементирования обсадных колонн с учетом конкретных геолого-технических условий, является предел прочности камня при изгибеили сжатии через определенное время твердения тампонажного раствора в заданных термобарических условиях. В практике лабораторных испытаний данные показатели определяются как механическим способом (машина Михаэлиса, испытательная машина МИИ-100 и зарубежные аналоги, гидравлический пресс), так и ультразвуковым неразрушаюшим методом. В последние 20–25 лет метод ультразвукового контроля (УЗК) камня получил очень широкое распространение в связи появлением современных приборов, позволяющих осуществлять испытания камня в имитируемых (по температуре и давлению) забойных условиях.

Ультразвуковой метод основан на установленной зависимости (как правило полиноминальной) скорости распространения ультразвуковых колебаний в образце цементного камня от его прочности.

Следует отметить, что в отечественной практике испытаний тампонажного камня метод УЗК начал применяться в 80-е годы в лабораториях ВПО «Тюменгазпром» Министерства газовой промышленности (сейчас ПАО «Газпром») по инициативе Клюсова А.А. Использовались отечественные приборы типа «Бетон-8 УР», «Бетон-22» и др., выпускавшиесяв то время для испытаний строительных материалов. На основании специальных исследований различных рецептур тампонажных растворов, выполненных в ЗапСибНИГНИ и «ТюменНИИгипрогазе»,была предложена формула для определения прочности камня при изгибес помощью ультразвуковых приборов [1]:

$$\sigma_{изг} = 21c^2 - 58c + 46, \quad (1)$$

где c – скорость прохождения ультразвукового сигнала, мм/мкс.

В свою очередь скорость ультразвука определяется из соотношения:

$$c = l / t, \quad (2)$$

где l – длина образца цементного камня, мм; t – время прохождения ультразвукового сигнала через образец цементного камня, мкс.

Указанный метод УЗК прочности тампонажного камняне получил в то время широкого применения, в основном по причине отсутствия разрешительных нормативных документов, поскольку данные по прочности камня являются расчетными, а неполученными в результате прямых (разрушающих) испытаний. В связи с этим он использовалсянаряду с механическими для дополнительного контроля, а также в качестве основного при испытании образцов нестандартной формы (из растворов, отобранных из осреднительной емкости или на устье скважины).

Опыт использования ультразвукового метода показал, что предложенная зависимость достаточно хорошо согласуется с данными по испытанию прочности камня на изгиб механическим способом в случае тампонажных растворов нормальной плотности (1700–1900 кг/м^3), а также применявшихся в то время облегченных цементно-бентонитовых или цементно-вермикулитовых растворов. С началом внедрения облегченных тампонажных растворов плотностью 1400–1500 кг/м^3 с добавками зольных алюмосиликатных полых микросфер (АСПМС), возникли вопросы корректности получаемых по УЗК значений прочности цементного камня на изгиб: рассчитанные по формуле (1) значения существенно (на 40–70 %) превышали прочность камня, определенную механическим способом.

Это связано с тем, что алюмосиликатные полые микросферы являются специфичной облегчающей добавкой, которая при хорошей звукопроводящей способности стекловидной поверхности сферических частичек, одновременно может быть звукопоглощающим материалом ввиду пустотелости этих же частичек. Очевидно, в данном случае превалирует первый фактор, поскольку скорость распространения ультразвуковых колебаний в образцах с АСПМС в 1,5 раза и более превышает скорость в образцах ЦБР и ЦВР с сопоставимой прочностью, определенной механическим способом. К тому же, невысокое водо-смесевое отношение для суспензий с АСПМС (в/с ≤ 0,7) способствуют формированию более однородной (менее пористой) структуры цементного камня, в котором частички микросфер имеют большее сродство к продуктам гидратации, нежели глинопорошок или вермикулит.

С целью повышения точности определения σизг. ультразвуковым методом при $\sigma_{изг.}$ испытаниях облегченного камня с добавками зольных алюмосиликатных микросфер в атмосферных условиях предлагается следующая корреляционная зависимость:

$$\sigma_{изг} = 15{,}9с^2 – 51с + 51{,}13. \quad (3)$$

Данная формула получена по результатам стандартных испытаний 130 образцов камня с АСПМС на изгиб механическим способом и сопоставлении σизг с величиной скорости звука в этих же образцах, определенной с помощью прибора «Бетон-8УР».

Сравнение результатов измерения σизг. механическим способом и рассчитанных после определения скорости звука в этих же образцах по формулам (1) и (3) показало, что в случае использования предлагаемой формулы погрешность в определении прочности на изгиб не превышает 15 % и является допустимой для испытаний такого характера.

С появлением более совершенных ультразвуковых приборов и возможности выполнения испытаний и с имитацией забойных температур и давлений, метод УЗК становится, во многих случаях, уже как бы даже незаменимым и обязательным. В результате полученные данные по прочности камня при сжатии, являющиеся по сути косвенными, многими воспринимаются как достоверные и соответствующие реальным значениям, полученным при прямых испытаниях.

На самом деле об этом можно говорить лишь при условии тесной корреляционной связи расчетных значений прочности камня по УЗК и полученных при испытании разрушающим методом для конкретного состава тампонажной системы. Применяемые в современных приборах УЗК формулы расчета прочности камня при сжатии от «транзитного времени» (обратная величина скорости прохождения ультразвука) являются обобщенными и условно разделены на три категории: тип А (камень облегченных систем), тип В (камень систем нормальной плотности) и тип С (камень утяжеленных систем).

Следует понимать, что тампонажные системы в указанныхкатегориях могут существенно отличаться по составу и объему твердой фазы, объему водной фазы и наличию других компонентов, определяющих в каждом случае различное сопротивление для ультразвука как в состоянии раствора, так и после твердения в камень. Поэтому при сопоставимой прочности камня разрушающим методом, расчетные значения прочности, полученные по транзитному времени (скорости прохождения ультразвукового сигнала) будут отличаться.

Учитывая технический характер испытаний, указанными отличиями в целом можно и пренебречь, что в большинстве случаев и принято при использовании приборов УЗК.

Данный метод очень удобен в случае необходимости выполнения длительных, трудоемких лабораторных исследований, поскольку позволяет выполнять многократные испытания одного и того же образца и изучать изменение прочности камня во времени при хранении в различных термобарических условиях. Несмотря на косвенность, он обеспечивает получение более качественных и сопоставимых результатов испытаний по сравнению со стандартным методом «прямого» определения предела прочности камня при сжатии и позволяет детально рассматривать весь процесс формирования камня.

На рисунке 1 приведены сравнительные данные изменения во времени предела прочности при сжатии камнятампонажного портландцемента ПЦТ 1-100 (ОАО «Сухоложскцемент») и ЦТТС-1, полученные на ультразвуковом анализаторе 5265 при твердении в условиях повышенной температуры 120 ºС и давлении 40–50 МПа. Цемент ПЦТ 1-100, который рекомендован для температур до100 ºС, в данном случае использовался как изначально нетермостойкий материал, с целью оценить возможности анализатора по фиксированию факта нетермостойкости.

Как видно на рисунке 1 для тампонажного раствора на основе ПЦТ 1-100 характерно достаточно быстрое (в течение первых 20 ч) формирование камня максимальной прочности. При имитируемых забойных условиях достигнутая максимальная прочность камня ПЦТ 1-100 сохраняется лишь некоторое время, а затем наблюдается постепенное ее снижение. Это согласуется с ранее полученными различными авторами результатами оценки термостойкости портландцементов, указывающих на наличие процессов термодеструкции камня уже в первые 7 сут автоклавной выдержки образцов при 120 ºС [2, 3, 4]. Характер изменения $R_{сж}$ во времени несомненно свидетельствует об изменении структуры камня и появлении дефектов, приводящих к увеличению времени прохождения ультразвукового сигнала через образец, выдерживаемый в неизменяемых термобарических условиях.

Для ЦТТС наблюдается несколько иной характер изменения $R_{сж}$ при твердении в аналогичных термобарический условиях, что объясняется быстрым связыванием кремнеземистыми компонентами ЦТТС образующегося гидроксида кальция в низкоосновные гидросиликаты кальция. Основной процесс набора прочности камня ЦТТС завершается в основном через 58–60 ч, но в дальнейшем еще сохраняется тенденция к увеличению $R_{сж}$, в то время как для ПЦТ 1-100 наблюдается ее снижение.

Как показывает опыт применения ультразвуковых анализаторов, имеются определенные типы тампонажных систем, для которых применение стандартных алгоритмов расчетов прочности камня можетприводить к получению результатов с большой погрешностью.

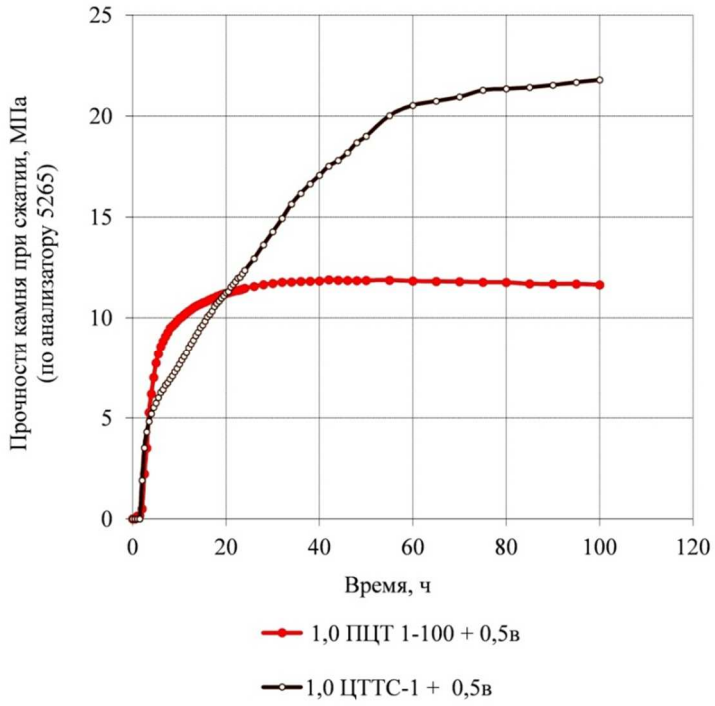

Рисунок 1 – Изменение прочности камня тампонажных растворов на основе ПЦТ 1-100 и ЦТТС-1 при длительном твердении в условиях повышенных температур (температура 120 °С, давление 50 МПа)

В частности, это относится к: облегченным тампонажным растворам с добавкой различных типов микросфер; утяжеленным тампонажным растворам с добавками повышенной плотности; термостойким тампонажным растворам с добавками кварца.

В качества примера в таблице 1 приведены результаты испытаний камня тампонажных растворов на основе термостойкого цемента ЦТТС с различными замедляющими добавками.

Из таблицы 1 видно, что минимальную прочность при сжатии как по анализатору, так и по прессу (при испытании стандартных образцов-кубиков) имеет тампонажный камень из раствора с добавкой 0,1 % НТФК. Для этого состава наблюдается также максимальная разница (более чем в 2 раза) между значениями прочности камня по УЗА и по прессу, в то время как для остальных составов различия менее значительны.

Различия в значениях прочности камня при сжатии, полученные после испытания образцов-кубиков на прессе и по анализатору, обусловлены, прежде всего, несоответствием предусмотренных в программе УЗА коэффициентов в расчетной формуле (установленных по умолчанию для стандартных типов цементов нормальной плотности), свойствам формируемой кристаллизационной структуры камня данного типа термостойкого вяжущего материала. Аналогичные несоответствия были получены нами и в случае испытаний камня утяжеленных тампонажных растворов [5], для которых програм-

мой УЗА предусматривается отдельная стандартная формула расчета прочности утяжеленного камня. Очевидно, что при большом разнообразии тампонажных систем нельзя говорить об универсальности предложенных стандартных вариантов расчетов и требуется корректировка коэффициентов в расчетных формулах для конкретных типов испытываемых систем.

Тем не менее, как видно из таблицы 1 при испытаниях не было зафиксировано завышенных расчетных значений прочности камня при использовании косвенного ультразвукового метода, по сравнению со стандартным методом определения прочности при сжатии на прессе с использованием образцов-кубиков.

Таблица 1 – Прочностные свойства тампонажного камня из тампонажного раствора с добавками реагентов-замедлителей схватывания после твердения при температуре 120 °С и давлении 60 МПа

Тип реагента	Добавка реагента, % (от массы цемента)	Прочности камня при сжатии через 24 ч, МПа		
		по ультразвуковому анализатору	по прессу	
			образцы после твердения в анализаторе	стандартные образцы-кубики
–	–	17,0	18,2	22,5
НТФК	0,1	6,8	9,0	13,7
ФХЛС	0,6	22,1	22,8	26,9
Окзил	0,6	19,8	20,4	20,6
БК	0,8	18,2	18,3	20,6
СВК	0,5	17,1	24,0	20,9

Помимо указанных испытаний дополнительно определялась т.н. «фактическая» прочность по прессу камня, извлеченного из анализатора, которая сопоставлялась с расчетными значениями прочности при сжатииэтого же образца по анализатору и значениями прочности при испытании образцов-кубиков на прессе для данного состава. Полученные результаты имеют в большей степени информативный характер, поскольку такое испытание не предусмотрено никакими процедурами и нормативными документами, а по форме образец из анализатора не является стандартным кубиком. Соответственно, такие значения не могут приводиться в качестве действительного результата определения прочности камня при сжатии, полученного разрушающим методом.

Тем не менее, во всех случаях для образцов камня, извлеченных из анализатора и испытанных затем на прессе, значения прочности выше, нежели расчетные значения прочности по анализатору. Это подтверждает, с одной стороны, наличие определенного «запаса» прочности при определении прочности камня косвенным ультразвуковым методом с использованием стандартного алгоритма, а с другой – необходимость корректировки расчетной формулы для получения более близких расчетных значений прочности и возможности более обоснованного выбора оптимального состава.

Таким образом, применение ультразвуковых анализаторов, с учетом особенностей получения значений прочности камня, является в отдельных случаях незаменимым и позволяет значительно сократить время на лабораторное тестирование составов. Вместе с тем, требуется обязательная проверка получаемых результатов с данными, получаемыми при испытаниях разрушающим методом.

Литература:

1. Инструкция по определению прочности образцов цементного камня с помощью ультразвукового прибора «Бетон-8УР». РД 9510-10-82. – Тюмень, 1982.

2. Данюшевский В.С. Проектирование оптимальных составов тампонажных растворов. – М. : Недра, 1987. – 280 с.

3. Булатов А.И., Данюшевский В.С. Тампонажные материалы. – М. : Недра, 1987. – 280 с.

4. Булатов А.И. Управление физико-механическими свойствами тампонажных систем. – М. : Недра, 1976. – 246 с.

5. Результаты исследований утяжеленных тампонажных растворов при повышенных температурах / И.И. Белей [и др.] // Бурение и нефть. – 2007. – № 7–8. – С. 44–46.

References:

1. Instructions for determining the strength of cement stone samples using the «Concrete-8UR» ultrasonic device. RD 9510-10-82. – Tyumen, 1982.

2. Danyushevsky V.S. Designing Optimal Compositions of Grouting Solutions. – M. : Nedra, 1987. – 280 p.

3. Bulatov A.I., Danushevsky V.S. Pumping Materials. – M. : Nedra, 1987. – 280 p.

4. Bulatov A.I. Management of physical and mechanical properties of plugging systems. – M. : Nedra, 1976. – 246 p.

5. Results of research of weighted plugging mortars at increased temperatures / I.I. Beley [et al.] // Drilling and Oil. – 2007. – № 7–8. – P. 44–46.