

УДК 531.781.2:622.023.25

## СКВАЖИННЫЙ ПРЕЦИЗИОННЫЙ ДИЛАТОМЕТР С ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ВДОЛЬ СТВОЛА СКВАЖИНЫ

**С. В. Сердюков, Н. В. Дегтярева, А. В. Патутин, Л. А. Рыбалкин**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032yandex.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Приведены технические решения дилатометра, измеряющего поперечную деформацию скважины при ее нагружении внутренним давлением через герметичную оболочку. Прибор оборудован встроенной роботизированной системой транспортирования по стволу скважины без использования секционных колонн. По показателям назначения и функциональным возможностям дилатометр оптимизирован для проведения исследований в протяженных скважинах направленного бурения в шахтных условиях.

*Скважинный дилатометр, горные породы, прессиометрические исследования, деформационные свойства, система транспортирования по стволу скважины*

Одним из быстро развивающихся направлений повышения эффективности подземной разработки твердых полезных ископаемых является использование протяженных скважин направленного бурения для выполнения технологических операций и диагностики состояния массива горных пород.

Проведение наблюдений на большом удалении от устья необсаженных горизонтальных и восстающих скважин является технически сложной и затратной задачей. Снижение стоимости работ возможно за счет комплексирования исследований и применения интегрированных систем транспортирования приборов вдоль ствола скважины без использования секционных колонн.

Для решения этих вопросов в Институте горного дела СО РАН разработан ряд роботизированных устройств, самостоятельно передвигающихся в необсаженных скважинах любой ориентации. В настоящей статье представлен один из них — скважинный дилатометр (СД), измеряющий деформации контура скважины при воздействии на ее стенки давлением жидкости через эластичную оболочку. Прибор предназначен для работы в протяженных скважинах, в том числе в интервалах гидроразрыва горных пород, и может использоваться самостоятельно или в комплексе с оборудованием гидроразрыва.

Проведение прессиометрических испытаний в интервале гидроразрыва служит для измерений давления открытия (re-opening pressure) и направления развития трещин. При таком способе рабочая жидкость не проникает в трещину при ее повторном раскрытии, что снимает одну из основных проблем оценки напряженного состояния горных пород методом гидроразрыва [1].

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект RFMEF160414X0096).

Замена традиционного импрессионного пакера [2] деформационным прибором для определения направления развития трещин позволяет выполнять исследования в нескольких интервалах скважины за одну проходку ствола. Это существенно снижает трудоемкость и стоимость работ. Кроме того, измерения деформации контура скважины в интервале гидроразрыва обеспечивают повышение достоверности оценок напряженного состояния проницаемых горных пород, например по методике, предложенной в [3], и расширяют возможности деформационных испытаний пород *in-situ* [4].

Рассмотрим конструкцию разработанного прибора. В нем реализованы следующие технические решения:

— объединение в одном устройстве транспортной системы, модуля радиального нагружения стенок скважины со встроенными чувствительными элементами (сенсорами) деформации, блока электроники с энкодерами для измерения удлинения сенсоров, датчиком крена и контроллером прибора;

— применение в приборе двух пакеров, один из которых — прессиометрический — оснащен сенсорами деформации и служит для радиального нагружения скважины, а другой — транспортный — вместе с гидравлическим цилиндром обеспечивает передвижение прибора вдоль скважинного ствола.

В дилатометре используются пакеры с резиновыми оболочками, армированными кордом, которые расширяются под действием внутреннего давления, при этом один из концов оболочек смещается вдоль оси прибора. Слабым местом такой конструкции является сопряжение пакерной оболочки с муфтой подвижного конца пакера и, как следствие, ограничение максимального рабочего давления. Для расширения диапазона нагружений скважины и защиты пакерных оболочек от разрушения разработано следующее решение. В процессе измерений рабочий флюид (жидкость или газ) подается одновременно в прессиометрический и транспортный пакеры, герметизируя межпакерный интервал (МПИ). Подвижные концы пакерных оболочек размещены в МПИ. При повышении давления в пакерах до критического значения  $P_{кр}$  рабочий флюид через предохранительный клапан поступает в МПИ, ограничивая тем самым перепад давления на подвижных концах пакерных оболочек и снижая опасность их разрушения.

Конструкция прибора, соответствующая указанным техническим решениям, схематично показана на рис. 1.

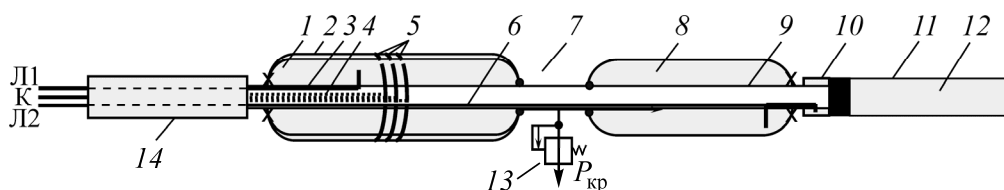


Рис. 1. Схема скважинного прибора для измерений деформационных характеристик горных пород: 1 — прессиометрический пакер; 2 — эластичный слой; 3 — пневмогидравлический канал “А”; 4 — механическая передача удлинения сенсора к измерительным преобразователям; 5 — сенсоры деформации контура скважины в трех направлениях поперек оси скважины; 6 — пневмогидравлический канал “Б”; 7 — межпакерный интервал; 8 — транспортный пакер; 9 — шток цилиндра; 10 — поршень цилиндра; 11 — цилиндр; 12 — газовая пружина; 13 — клапан предохранительный; 14 — блок датчиков; X — закрепленный конец пакерной оболочки; • — подвижный конец пакерной оболочки, герметично скользящий по штоку цилиндра; Л1, Л2 — пневмогидравлические линии соединения скважинного прибора с оборудованием в горной выработке; К — кабель электрический для передачи данных от прибора к регистратору в горной выработке

Технически наиболее сложный узел прибора — система измерений поперечных размеров скважины в трех направлениях под углом  $120^\circ$  друг к другу. Параметрами, характеризующими качество этой системы, являются:

- расстояние между поперечными сечениями прибора, в плоскости которых выполняются деформационные испытания или, иначе говоря, расстояние между измерительными осями вдоль скважины. Идеально, если все измерения проводятся в одном поперечном сечении, чего достичь сложно из-за ограниченного диаметра прибора;
- погрешность измерений поперечных размеров скважины;
- диапазон давления радиально-симметричного нагружения скважины;
- диапазон измерения деформаций и связанный с ним диапазон диаметров скважин, в которых могут проводиться исследования.

Разработанное техническое решение деформометра показано схематически на рис. 2.

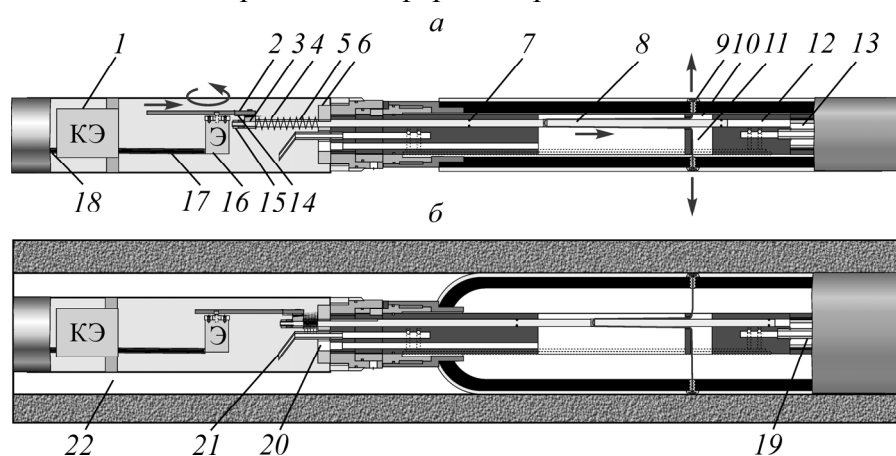


Рис. 2. Схема деформометра: *а* — транспортное состояние; *б* — состояние при измерениях; 1 — контроллер энкодера; 2 — рейка привода энкодера; 3 — крепление рейки к штоку; 4 — пружина; 5 — паз штока; 6 — фиксатор угла поворота штоков; 7 — канал ближний; 8 — шток; 9 — контактная втулка, закрепленная в пакерной оболочке; 10 — центратор струны малый; 11 — центратор струны; 12 — канал дальний; 13 — компенсационный объем; 14 — пружина прижима рейки к валу энкодера; 15 — фиксатор крепления рейки к штоку; 16 — энкодер; 17 — электрический шлейф от энкодера к контроллеру; 18 — шина интерфейса RS-485; 19, 21 — гидравлический канал транспортного модуля; 20 — гидравлический канал; 22 — скважина

Каждый сенсор деформации содержит струну, концы которой закреплены в контактных втулках 9, установленных в диаметрально противоположных точках пакерной оболочки. Струна продета через центраторы 10 и 11 корпуса прибора, затем пропущена вдоль штока 8 и через отверстие в нем, которое смещено на расстояние 60–80 мм от оси измерений, проходящей через контактные втулки и центраторы.

Торцевые поверхности штока 8 расположены в каналах 7, 12, изолированных от давления рабочей жидкости. Натяжение струны задается пружиной 4 и не превышает 40 Н.

Указанная конструкция деформометра обеспечивает малую чувствительность к центровке прибора в скважине и высокую линейность измерений.

В корпус блока электроники выходит один из торцов штока (на рис. 2 левый торец). К нему присоединена рейка 2, прижатая к валу энкодера 16 пружиной 14. Все элементы зафиксированы в плоскости измерительной оси, в том числе контактные втулки пакерной оболочки, центраторы, шток, рейка, ось вращения вала энкодера.

На рис. 2 стрелками показаны направления движения элементов одного из трех сенсоров при выполнении измерений.

Прибор работает следующим образом. При подаче рабочей жидкости под давлением пакерная оболочка расширяется, вместе с ней перемещаются контактные втулки 9, которые вытягивают струну из корпуса прибора через центраторы 10, 11. Уменьшение длины участка струны между центраторами приводит к смещению штока 8, а вместе с ним и рейки 2. Ее перемещение вызывает вращение вала энкодера, измеряющего абсолютное значение угла поворота с высокой точностью — 32768 отсчетов на один оборот. Выходные данные энкодера по шине синхронного последовательного интерфейса (SSI) поступают на вход контроллера.

Датчик крена выполнен на основе аналогичного энкодера с пониженной чувствительностью (около 0.022°). Контролеры всех датчиков объединены между собой в единый контроллер прибора, соединенный кабелем интерфейса RS-485 с бортовым регистратором в искровзрывобезопасном кожухе, установленном на устье скважины.

В таблице приведены основные технические характеристики разработанного прибора СД в сравнении со скважинным дилатометром компании SOLEXPPTS AG (Швейцария) [5], показанным на рис. 3.

Основные технические характеристики скважинных дилатометров СД и SOLEXPPTS

Параметр	Прибор СД	Дилатометр компании SOLEXPPTS AG
Диапазон нагружения стенок скважины, МПа	0.5 – 15	0.5 – 18
Количество измерительных осей	3	3
Угол между измерительными осями, град	120	120
Расстояние между измерительными осями, мм	8	75
Диапазон измерений деформации, мм	0 – 50	0 – 20
Погрешность измерений деформации, мкм	0.1	0.5
Дополнительные измерения	Измерение крена прибора в скважине	Нет
Перемещение в скважине	Встроенная система транспортирования вдоль ствола скважины	Спуск в скважину на колонне насосно-компрессорных труб
Ориентация скважины	Любая, преимущественно горизонтальная или восстающая	Нисходящая вертикальная или субвертикальная (отклонение не более 15° от вертикали)
Применение в шахтных условиях	В скважинах направленного бурения протяженностью до 1000 м, пробуренных из горных выработок	Нет
Применение для инженерных изысканий с дневной поверхности	До глубины 400 м	До глубины 1400 м
Диаметр скважин $D$ , мм	76 – 105	Зависит от диаметра прибора: 93, 98, 118, 142, 148
Диаметр прибора, мм	60	93 для скважин $D = 96$ мм 98 для скважин $D = 101$ мм 118 для скважин $D = 122$ мм 142 для скважин $D = 146$ мм 148 для скважин $D = 152$ мм
Длина прибора, мм	3000	1000

Отметим, что дилатометр SOLEXPERTS имеет более высокие показатели по сравнению с другим известным дилатометром DMP-95 (чувствительность 1 мкм, диапазон измерений деформации 0–25 мм, диаметр прибора 95 мм) [6] компании ROCTEST TELEMAT (Канада) — ведущего мирового производителя геотехнического оборудования.

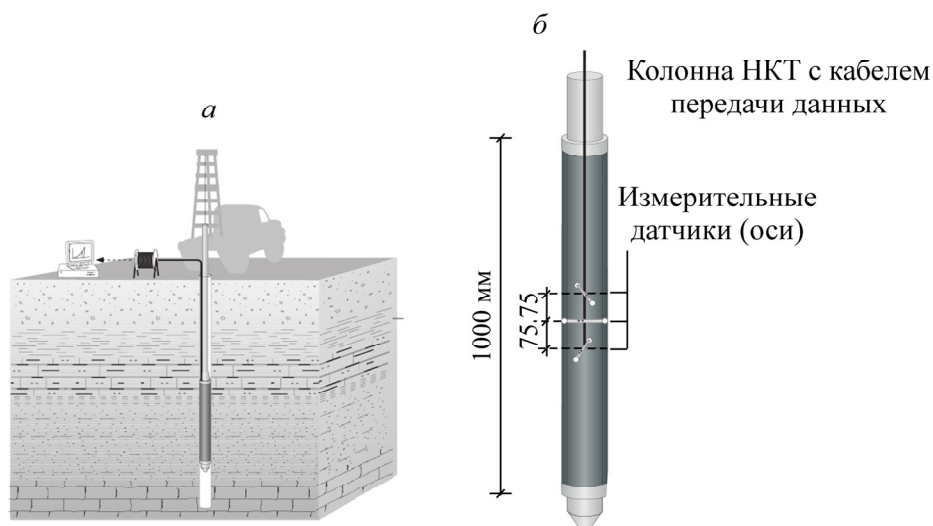


Рис. 3. Дилатометр компании SOLEXPERTS AG: *а* — способ применения; *б* — схема прибора

В таблице серым цветом выделены лучшие значения параметров сравниваемых приборов. Разработанный дилатометр СД превосходит известные аналоги по расстоянию между измерительными осями, диапазону и погрешности измерений поперечных размеров скважин. Геометрические характеристики СД лучше по диаметру прибора и возможностям его работы в широком диапазоне диаметров скважин, хуже — по длине прибора.

Относительно большая длина прибора СД связана со встроенной роботизированной системой транспортирования вдоль ствола скважины, а также с наличием дополнительного датчика для измерения крена прибора в пунктах наблюдений, т. е. с расширением функциональных возможностей по сравнению с аналогичным прибором компании SOLEXPERTS AG (Швейцария).

Наиболее очевидно преимущество предлагаемой разработки при сравнении областей применения приборов. Дилатометр СД адаптирован к шахтным условиям и может работать в протяженных горизонтальных, восстающих и даже пробуренных вверх вертикальных скважинах (рис. 4).

Конструкция дилатометра СД помимо деформационных измерений позволяет также проводить локальный гидроразрыв слабых горных пород давлением до 10 МПа в плоскости оси скважины, например в угольных пластах, а также применять прибор для измерений давления запирания ранее созданных трещин гидроразрыва.

Энергообеспечение пневмогидравлической системы прибора СД осуществляется либо от баллона со сжатым азотом, либо от шахтного воздуховода. Регистратор данных оснащен встроенным аккумуляторным питанием.

Для выполнения скважинных прессиометрических исследований не требуются буровые станки и/или досылочные устройства, штанговые или буровые колонны. Транспортирование прибора осуществляется за счет использования пакеров в качестве якорных устройств и изме-

нения межпакерного расстояния с помощью гидравлического цилиндра. Прибор перемещается в необсаженной скважине самостоятельно со скоростью до 50 м/ч и тянет за собой несколько соединительных линий, в том числе шланги высокого давления, многожильный электрический кабель. Время проведения измерений в одном пункте наблюдений составляет не более 5 мин. Деформационные испытания в скважине протяженностью 400 м с интервалом 5–10 м (40–80 пунктов наблюдений) занимают две рабочие смены. Подготовительные работы не требуются.

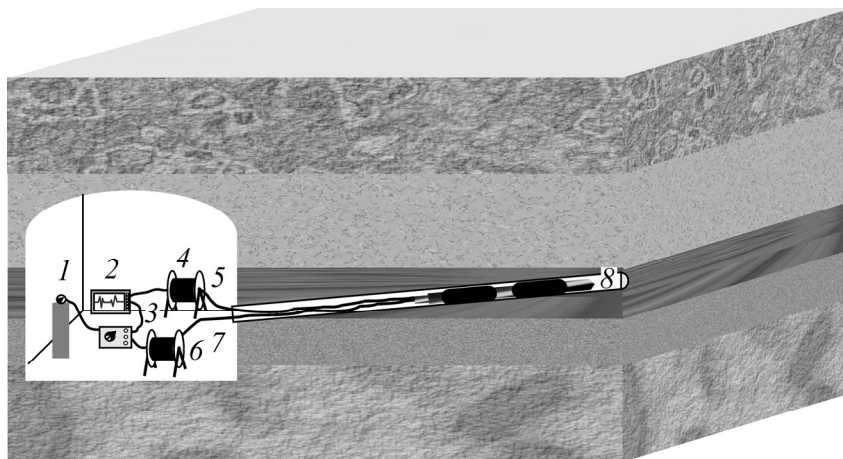


Рис. 4. Схема применения дилатометра СД в шахтных условиях: 1 — баллон со сжатым азотом; 2 — цифровой регистратор; 3 — бортовая станция с пультом управления, насосом и датчиком давления нагружения стенок скважины; 4 — катушка с кабелем; 5 — кабель электрический интерфейса RS-485; 6 — катушка со сдвоенным рукавом высокого давления; 7 — сдвоенный рукав высокого давления; 8 — скважинный прибор СД

Использование встроенной системы транспортирования повышает оперативность и снижает стоимость исследований, особенно на больших расстояниях от устья скважин.

Использование нескольких сплошных (несекционных) линий различного назначения, соединяющих скважинный прибор с бортовой аппаратурой, значительно повышает надежность работы прибора СД и его функциональность. Так, подача рабочей жидкости под давлением осуществляется гибким шлангом внутренним сечением 6–8 мм, замена которого секционной колонной в скважине протяженностью 400 м потребовала бы в шахтных условиях более 100 труб с соответствующим числом герметичных соединений (на давление 15 МПа) и весом на два порядка выше самого дилатометра.

## ВЫВОДЫ

Разработанный скважинный прецизионный дилатометр по показателям назначения и функциональным возможностям оптимизирован для проведения исследований в протяженных скважинах направленного бурения в шахтных условиях.

Использование в приборе встроенной системы транспортирования повышает оперативность и снижает стоимость исследований на больших расстояниях от устья скважин.

Конструкция прибора помимо деформационных измерений позволяет проводить локальный гидроразрыв слабых горных пород в плоскости оси скважины, а также применять прибор для повторного открытия ранее созданных трещин гидроразрыва нагнетаемой жидкостью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ito T., Kato H., Tanaka H.** Innovative concept of hydrofracturing for deep stress measurements, in “Rock Stress and Earthquakes” (Edited by Furen Xie), Proceedings of the Fifth International Symposium on In-situ Rock Stress (Beijing, China, 25-27 August 2010), London: CRC Press/Balkema, 2010.
2. **Impression Packers** [Электронный ресурс]. URL: <http://www.inflatable-packers.com/images/documents/ProductSheets2013/EngProdSheets2013/impression%20packers-jh050413-01%20engrev.00.pdf> (дата обращения 05.06.2015).
3. **Мартынюк П. А., Павлов В. А., Сердюков С. В.** Метод оценки напряженного состояния массива горных пород по деформационной характеристике прискважинной зоны, содержащей трещину гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2011. — № 3.
4. **Курленя М. В., Сердюков С. В., Патугин А. В.** Определение деформационных свойств горных пород по данным прессиометрических испытаний в интервале гидроразрыва скважины // ФТПРПИ. — 2015. — № 4.
5. **Dilatometer tests** [Электронный ресурс]. URL: [http://www.solexperts.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=188&Itemid=214&lang=en](http://www.solexperts.com/index.php?option=com_content&view=article&id=188&Itemid=214&lang=en) (дата обращения 05.06.2015).
6. **Borehole dilatometer Model DMP-95** [Электронный ресурс]. URL: [http://www.esands.com/pdf/Geotech/Roctest/ESS\\_ROC\\_DMP95\\_BoreholeDilatometer.pdf](http://www.esands.com/pdf/Geotech/Roctest/ESS_ROC_DMP95_BoreholeDilatometer.pdf) (дата обращения 05.06.2015).

*Поступила в редакцию 05/VI 2015*

Редактор М. Б. Успенская  
Компьютерная верстка Г. В. Морозова, О. Г. Ярославцева

---

Подписано в печать 14.08.2015. Бумага офсетная.  
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 23.7. Тираж 300 экз.  
Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации Российской Федерации  
Свидетельство регистрации № 011099.  
Цена свободная.

---

Издательство Сибирского отделения РАН  
Морской проспект, 2, 630090, г. Новосибирск.  
Оригинал-макет изготовлен издательским отделом ИГД СО РАН.  
Отпечатано на полиграфическом участке  
Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН.  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск.