

УДК 544.723.2:662.6:539.217:539.143.43

А.Н. Молчанов

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ

Институт физики горных процессов НАН Украины

В работе описан современный комплекс оборудования для исследования сорбционных свойств и пористой структуры ископаемых углей в широком диапазоне температур и давлений.

Исследование пористых тел, содержащих флюиды, в частности ископаемых углей, насыщенных метаном и водой, является одной из важнейших задач физики сорбционных процессов. В ряду различных методов, используемых для исследования пористой структуры сорбентов, количества и состояния сорбированных ими флюидов, а также кинетики сорбции в зависимости от различных факторов, одно из первых мест занимает метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР). В частности, для исследования состояния флюидов, сорбированных углями и горными породами, уже достаточно давно и эффективно используется метод ЯМР широких линий [1]. Наибольший объем исследований был выполнен с использованием непрерывных – стационарных – спектрометров ЯМР (автодинов). Как правило, используется дифференциальная методика записи спектров, в результате которой регистрируется производная линии поглощения. Типичный спектр ЯМР ^1H угольного образца, насыщенного метаном и водой, показан на рисунке 1. Широкому компоненту спектра шириной ΔH_2 формирует водород органики угольного вещества, узкую – шириной ΔH_1 – водород флюидов, насыщающих уголь. Методика записи и обработки подобных спектров описана в работе [2].

Преимущество автодинных спектрометров состоит в высокой чувствительности и разрешающей способности, ограничиваемой стабильностью генератора автодина и однородностью магнитного поля. Можно записывать линии от 0,005–0,01 Э (линии достаточно подвижных метана и воды, находящихся в угольном веществе) до 10 Э и более (органика угля, флюиды с низкой подвижностью, сорбированные сорбентами, лед, кристаллогидратные образования и др.).

Другой разновидностью спектрометров данного типа, широко используемых для исследования различных гетерогенных систем, являются импульсные спектрометры ЯМР, или спектрометры спин-эхо. Принцип их действия

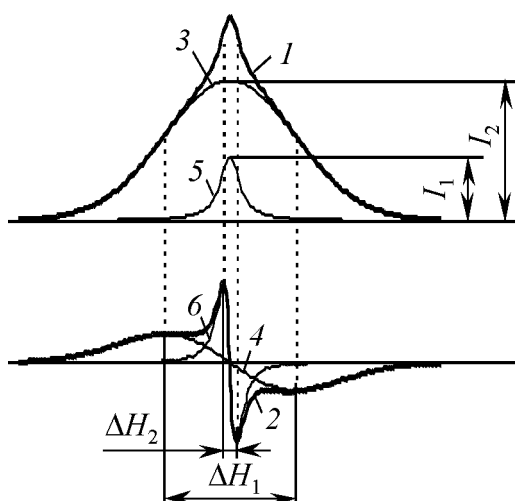


Рис. 1. Линия поглощения спектра ЯМР твердого тела (угля), содержащего флюид (а), и производная от линии поглощения (б): 1 – спектр поглощения; 2 – первая производная от спектра поглощения; 3 – широкая составляющая спектра поглощения; 4 – широкая составляющая первой производной спектра поглощения; 5 – узкая составляющая спектра поглощения; 6 – узкая составляющая первой производной спектра поглощения; I_1 и ΔH_1 – интенсивность и ширина узкой линии; I_2 и ΔH_2 – интенсивность и ширина широкой линии

описан в работе [3]. В отличие от стационарных радиоспектрометров ЯМР, импульсные измеряют релаксацию магнитных моментов резонирующих ядер после действия на систему мощных радиочастотных импульсов (в нашем случае ^1H), которая выражается через времена спин-спиновой (поперечной) релаксации T_2 и спин-решеточной (продольной) релаксации T_1 [3–5]. Исследование релаксационных процессов в заполненных флюидами пористых средах позволяет прямо получить информацию о состоянии и количестве флюидов, размерах, объемах и удельных поверхностях пор, коэффициентах диффузии флюидов. Однако определение времен релаксации на обычном спектрометре – это длительный и достаточно трудоемкий процесс. С целью его ускорения и упрощения необходимо было разработать и изготовить новый автоматизированный спектрометр спин – эхо, ориентированный на изучение ископаемых углей, насыщенных метаном и водой.

Модернизация оборудования для научных исследований является длительным процессом. Темп его развития замедляют как материальные и технические средства и возможности, так и прерывисто-поступательный характер самого процесса. Для достижения желаемого результата необходимо выяснить реальные возможности разрабатываемого оборудования.

Модернизация ЯМР-спектрометров в ИФГП НАН Украины производилась по трем направлениям:

- 1) повышение стабильности работы спектрометров при переходе на современную электронную базу;
- 2) перевод спектрометров под управление компьютера (управление режимами и настройками спектрометра, регистрация и запись спектров в цифровой форме, создание простого и понятного пользовательского интерфейса);
- 3) укомплектование спектрометров дополнительными устройствами, расширяющими их исследовательский потенциал.

Целью этих работ было совершенствование методики исследования сорбционных свойств ископаемых углей.

Блок-схема автодинного спектрометра, в котором наиболее полно реализованы на сегодняшний день новые технические решения, показана на рис. 2.

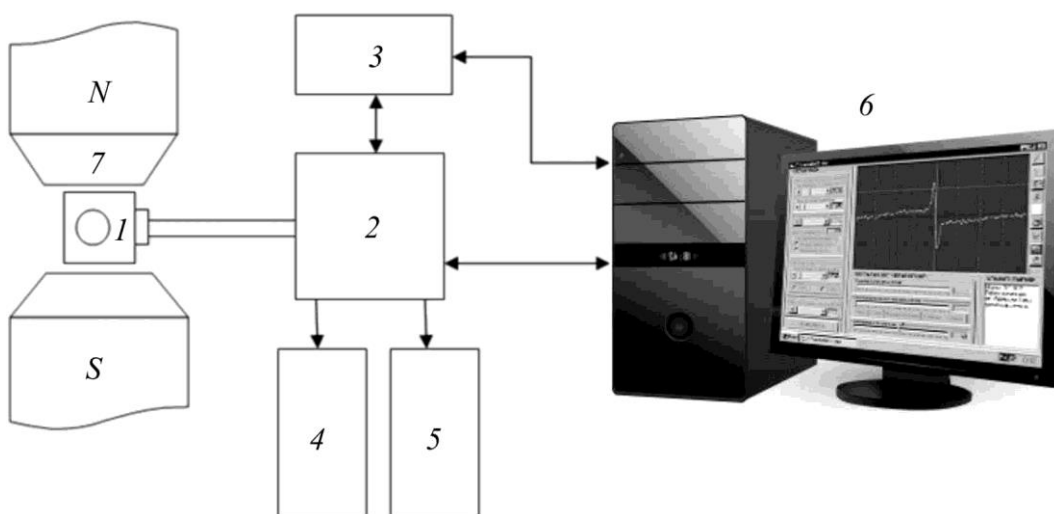


Рис. 2. Блок-схема автодинного ЯМР-спектрометра: 1 – головка с приемным контуром, 2 – автодинный детектор, 3 – блок управления и обработки сигнала, 4 – частотомер, 5 – осциллограф, 6 – управляющий компьютер, 7 – магнит

Приемный контур спектрометра в экранированной головке 1, располагаемой в межполюсном пространстве магнита, соединен с автодинным детектором 2 латунным фидером длиной 275 мм. Механически головка 1 соединяется с фидером с помощью фланцевого соединения. Управление работой автодинного детектора, выделение сигнала ЯМР и питание узлов спектрометра выполняются блоком управления и обработки сигнала 3. Предусмотрены отдельные частотомер 4 и осциллограф 5 для контроля частоты ЯМР и визуального контроля и настройки сигнала. Установка параметров записи спектров и параметров их графического представления осуществляется с экрана компьютера. Вид экранного интерфейса показан на рис. 3. Графический вид спектра записывается в виде файла данных в память компьютера и может быть в дальнейшем обработан с помощью математических программ. Диапазон развертки поля относительно резонансного значения составляет от 0 до ± 25 Э.

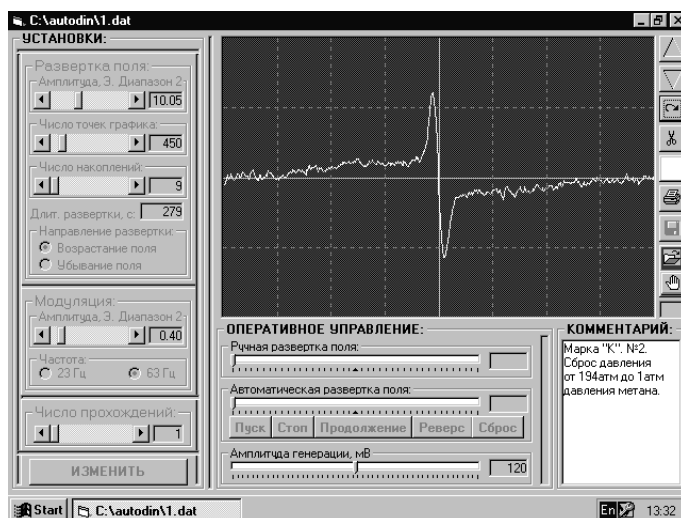


Рис. 3. Экранный интерфейс автодинного спектрометра ЯМР

Для более полной реализации возможностей, предоставляемых методом ЯМР при изучении сорбционных процессов, в ИФГП НАН Украины разработан современный спектрометр спин-эхо. Он предназначен для изучения релаксационных процессов спинов ядер водорода ^1H в пористых флюидонасыщенных средах и жидкостях. Существует целый ряд последовательностей радиочастотных импульсов для возбуждения сигнала ЯМР и измерения времен спин-спиновой (T_2) и спин-решеточной (T_1) релаксации. Для измерений T_1 флюида, сорбированного пористыми средами, используется метод прогрессивного насыщения [4], при котором задают последовательность 90° -х радиоимпульсов, разделенных интервалом τ . Его целесообразно использовать в случае, когда $T_2 < T_1$, что реализуется для угля и флюидов в его поровом объеме. Зависимость амплитуды сигнала эхо от времени t описывается выражением:

$$A(t) = A_0[1 - \exp(-t/T_1)]. \quad (1)$$

Для определения времени спин-спиновой релаксации T_2 и коэффициента самодиффузии метана D используют последовательность импульсов Хана ($90^\circ - \tau - 180^\circ$) [3, 4]. С учетом диффузии амплитуда сигнала изменяется согласно выражению:

$$A(\tau) = a \exp(-2\tau/T_{2c}) + b \exp(-2\tau/T_{2m}) \exp\left\{-\frac{D}{3}(G_0\gamma)^2(2\tau)^3\right\}, \quad (2)$$

где G_0 – градиент магнитного поля в зазоре магнита спектрометра; γ – гиромагнитное отношение для протона; 2τ – задержка эхо-сигнала. Первое слагаемое отождествляется с сигналом от спинов ядер водорода, входящих в структуру угля, T_{2c} – время их спин-спиновой (поперечной) релаксации. Экспоненциальный множитель второго слагаемого с характерным временем релаксации T_{2m} описывает пристеночный эффект и может быть важен при наличии сорбированной компоненты флюида на поверхности пор. Собственно подвижность молекул в объеме пор описывает множитель с коэффициентом D .

Спектрометр спин-эхо позволяет проводить запись зависимостей амплитуды сигнала эхо для исследуемого образца в автоматическом режиме. Для этого используется математическое обеспечение, содержащее процедуру записи исходных и текущих данных в память компьютера. Изучение процесса десорбции метанонасыщенных угольных образцов заключается в регистрации затухания амплитуды сигнала спин-эхо с последующей его аппроксимацией уравнениями вида (1) и (2) для вычисления времен релаксации T_1 и T_2 .

Блок-схема спектрометра показана на рис. 4.

Программный комплекс спектрометра (4) содержит 4 функционально независимых блока, которые генерируют последовательности импульсов возбуждения и измерения сигналов спин-эхо. Каждый блок дает возможность устанавливать в широких диапазонах параметры этих импульсов и отличается

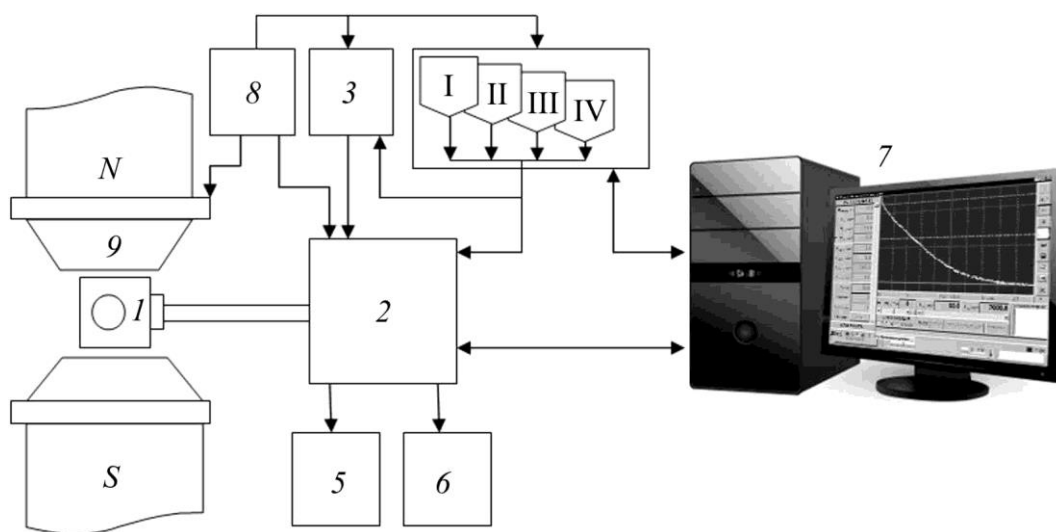


Рис. 4. Блок-схема спектрометра ЯМР спин-эхо: 1 – головка с приемным контуром, 2 – приемо–передатчик, 3 – формирователь высоковольтных импульсов, 4 – программный комплекс, 5 – частотомер, 6 – осциллограф, 7 – управляющий компьютер, 8 – блок питания спектрометра, 9 – магнит

от других параметром, который изменяется (протягивается) в процессе измерений. Каждый из этих блоков имеет свой интерфейс и применяется для получения различных зависимостей и функций, изучаемых с помощью спектрометра спин-эхо. Основной программный блок (I) спектрометра ЯМР спин-эхо выполняет следующие функции:

- а) формирует 2-х и 3-х импульсные последовательности возбуждающих импульсов в широком диапазоне длительностей и амплитуд;
- б) формирует задержку между ними, которую также можно изменять в широком диапазоне;
- в) формирует строб-импульсы, отслеживающие положение сигнала эхо и управляющие приемником, и времена их задержки;
- г) формирует управляющий сигнал для протяжки магнитного поля вблизи резонанса (изменяемый в процессе измерений параметр);
- д) управляет функциями цифрового накопления;
- е) формирует файл данных, в котором сохраняются результаты измерений.

Второй программный блок (II), как и блок (I), позволяет устанавливать параметры возбуждающих последовательностей в широких пределах, но при этом изменяемым в процессе измерений параметром (протягиваемым параметром) является задержка между импульсами (τ), что дает возможность, настроившись на резонанс ядра водорода ^1H , записывать не отдельные спектры, а сразу зависимость амплитуды сигнала эхо от задержки τ_{12} , $A(\tau_{12})$. Это удобно для определения времени спин-спиновой релаксации и целого ряда других параметров системы уголь-флюид.

Аналогично блокам (I) и (II) третий программный блок (III) позволяет настроить последовательность возбуждающих импульсов и резонансные условия, однако изменяемым в процессе измерений параметром является

время повторения последовательностей. Получаемые зависимости используются для вычислений времени спин-решеточной релаксации T_1 .

Файл данных и его графическое представление содержат последовательность амплитуды сигнала от частоты повторения $A(f)$. Для вычисления времени спин-решеточной релаксации T_1 проводится преобразование к аргументу времени $t = 1/1000f$, выраженному в миллисекундах. Тогда амплитуду сигнала можно представить в виде суммы двух функций:

$$A(t) = a[1 - \exp(-t/T_{1,a})] + b[1 - \exp(-t/T_{1,b})], \quad (3)$$

где предполагается, что $T_{1,a} \ll T_{1,b}$.

В программном модуле IV протягиваемым параметром является задержка строб-импульса (измерительного импульса). Это необходимо для записи формы сигнала эхо, из чего можно получать значения действующего постоянного градиента магнитного поля G_0 на образце, значение которого используется при определении важного физического параметра – коэффициента диффузии. Для этого во времени изменяется положение считывающего строб-импульса, что позволяет записать форму сигнала эхо для цилиндрического образца (ампула с водой) после 90° импульса. Форма сигнала при этом описывается функцией [3]:

$$F(x) = F_0[2J_1(x)/x], \quad x = \gamma G_0 r \Delta t, \quad (4)$$

где $J_1(x)$ – функция Бесселя первого порядка первого рода; γ – гиромагнитное отношение для протона; r – радиус цилиндрического образца; Δt – интервал между максимумом $F(x)$ и первым минимумом функции Бесселя $x_1 = 3,832$. Тогда из (4) имеем $G_0 = 15,33/\gamma dt$ (Э/см), где d – диаметр образца, выраженный в см; t – интервал времени между первыми минимумами сигнала эхо (в секундах). Измерения на спектрометре спин-эхо в ИФГП НАН Украины обычно проводятся при $G_0 = 30\text{--}100$ Э/см.

Для примера на рис. 5 показан один из экранных интерфейсов спектрометра спин-эхо, соответствующий случаю измерения времени T_2 .

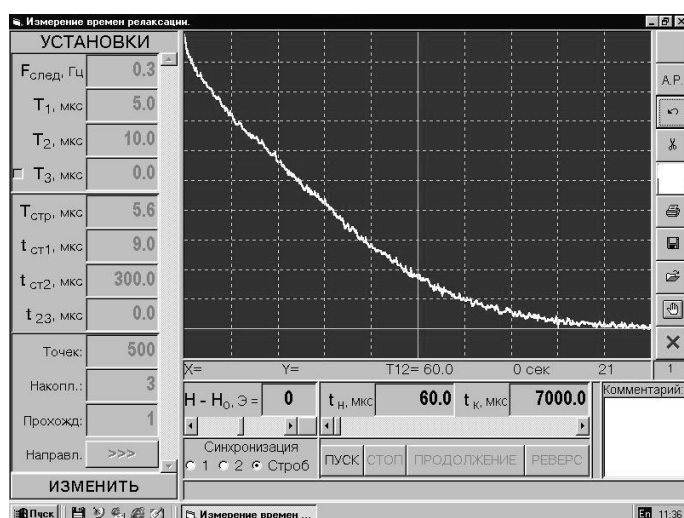


Рис. 5. Экранный интерфейс спектрометра ЯМР спин-эхо для случая измерения времени спин-снтовой релаксации

Стационарная головка спектрометра с приемным контуром хорошо изолирована от электрических помех, но, к сожалению, не изолирована от окружающей атмосферы, что нежелательно при проведении количественных измерений, когда на результатах может отразиться сорбция образцом атмосферной влаги. Этого недостатка нет у специальной головки спектрометра, которая функционально является также насытителем камеры высокого давления, рассчитанной на давления до 25 МПа. Ее эскиз показан на рис. 6 со схемой подсоединения газовых магистралей.

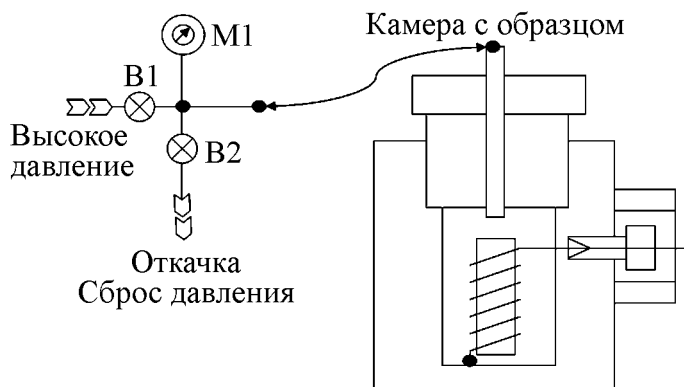


Рис. 6. Головка – камера высокого давления для спектрометра ЯМР

Головка выполнена из бериллиевой бронзы БрБ2 и свободно размещается в зазоре магнита. Со спектрометрами данное устройство сочленяется при помощи фланцевого соединения, как и стационарная головка. Электрическое соединение выполнено через конусный электроввод, обычно применяемый в камерах высокого давления. Электрические параметры приемного контура спектрометра, размещенного внутри камеры, подобраны таким образом, что нет необходимости в перестройке спектрометра при смене рабочих головок.

Все работы с «газовой» частью устройства, жестко устанавливаемой на платформе автодина, – откачка системы через вентиль В2, заполнение ее метаном системы через вентиль В1 до рабочего давления, регистрируемого манометром М1, насыщение образца углем газом, сброс давления – производятся без изъятия камеры из магнита спектрометра, что гарантирует соблюдение условий записи спектров в течение всего времени проведения эксперимента. При исследовании десорбции метана, сорбированного угольным образцом, после сброса избыточного давления через вентиль В2 система не открывается на атмосферу, а подключается либо к балластной емкости большого объема (намного большего, чем объем камеры с образцом и возможный объем метана, выделяющегося при десорбции), либо к измерительной системе для точного определения объема выделяющегося газа.

Расширить возможности при проведении барических исследований позволяет присоединяемая к спектрометру описанным выше способом камера фиксированного давления типа цилиндр-поршень, рассчитанная на работу с давлением до 1000 МПа. В качестве рабочей жидкости в данной камере ис-

пользуется перфтороктан C_8F_{18} , что исключает возможное влияние «постороннего» водорода, который присутствует в традиционно используемых средах, передающих давление в камерах такого типа (масло-керосин, бензин и другие органические жидкости), на результаты проводимого эксперимента. Эта камера и результаты, полученные с ее помощью, описаны в работе [6].

Перспективной является новая установка высокого давления, разработанная в ИФГП НАН Украины. На ней могут производиться исследования в условиях высоких газовых давлений до 150–160 МПа. В основу ее работы положен принцип термокомпрессии, заключающийся в следующем: высокое давление в рабочей ячейке создается расширяющимися в малый объем предварительно замороженными газами (аргон, метан). Блок-схема установки, поясняющая принцип ее действия, показана на рис. 7.

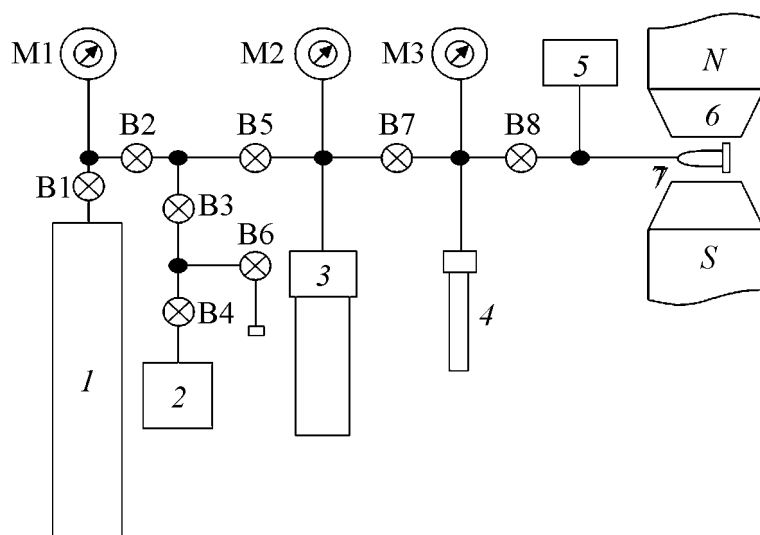


Рис. 7. Блок-схема термокомпрессионной установки высокого давления: 1 – транспортный газовый баллон, 2 – вакуумный насос, 3 и 4 – компрессионные емкости, 5 – электронный преобразователь давления типа IS-20-N фирмы WIKA, 6 – магнит спектрометра ЯМР, 7 – ячейка высокого давления, В1–В8 – вентили высокого давления, М1–М3 – манометры

Подготовленный к исследованиям образец угля располагается в резонансном контуре спектрометра внутри ячейки высокого давления 7, выполненной из бериллиевой бронзы БрБ2. Ячейка 7 с помощью капилляра высокого давления подключается к вентилю высокого давления В8. После этого вся система емкостей и трубопроводов высокого давления вакуумируется вакуумным насосом 2. По окончании вакуумирования вентили В3 и В4 перекрываются и вся система заполняется рабочим газом из транспортного баллона 1 через вентили В1, В2, В5, В7, В8 под необходимым давлением P_1 .

Далее жидким азотом охлаждается емкость 3 (~ 1 л), в которой ожижается и затвердевает рабочий газ. Вентиль высокого давления В5 перекрывается и емкость 3 отогревается до комнатной температуры. При этом давление в ем-

костях 3, 4 и в ячейке высокого давления 7 поднимается до 40–50 МПа. Далее захлаживается жидким азотом емкость 4 из бериллиевой бронзы объемом ~ 200 мл. По окончании этого цикла охлаждения перекрывается вентиль высокого давления В7 и емкость 4 отогревается. При этом во втором контуре, включая ячейку высокого давления, может быть достигнуто давление вплоть до максимального рабочего 150–160 МПа. При необходимости ступенчатого подъема давления цикл во втором контуре установки можно проводить несколько раз. Избыточное давление газа сбрасывается в первый контур или в транспортный баллон 1. После достижения необходимого давления вентили В7 и В8 перекрываются и фиксируется давление в ячейке 7. Рабочее давление в ячейке регистрируется электронным преобразователем 5 типа IS-20-Н. При испытаниях установки в ячейке создавалось давление порядка 200 МПа. Давление, создаваемое в ступенях установки, регистрируется манометрами высокого давления М1–М3. С помощью вентилей В4 отсекается от системы высокого давления вакуумный насос 2, если возникает необходимость сбросить избыточное давление в атмосферу через вентили В3 и В6.

Ячейка высокого давления этой установки непосредственно сопрягается с автодинным спектрометром ЯМР описанным выше способом. Электроввод ячейки с керамическим конусом аналогичен электровводу камеры высокого давления, описанной в работе [7]. Конструктивно последняя ступень установки выполнена так, что ячейка высокого давления 7 вместе с преобразователем 5 и вентилем В8 может быть отсоединена без потери давления от установки и перенесена на спектрометр ЯМР спин-эхо для проведения исследований на нем.

Технология получения высокого давления с помощью термокомпрессии [8] была освоена нами при содействии сотрудников отдела тепловых свойств молекулярных кристаллов ФТИНТ НАН Украины под руководством В.А. Константинова.

Ввод в эксплуатацию этой установки позволит выполнить исследования углей в условиях давлений, реально присутствующих в угольном пласте на современных глубинах разработки, а сочетание ее со спектрометрами ЯМР позволит сделать эти исследования максимально информативными.

Учитывая, насколько сильно влияет на содержание метана в угольном веществе и на скорость его эмиссии температурный фактор, исследовательский комплекс ЯМР-спектрометров был дополнен оборудованием для проведения температурных исследований. Уникальные возможности для этого дает проточный азотный криостат с эффективной системой задания и стабилизации температуры. Проточный криостат обеспечивает проведение исследований в диапазоне температур 90–300 К при точности поддержания температуры на образце не хуже $\pm 0,5$ К.

На рис. 8 показаны узлы криостата. Задатчик потока хладагента 1 герметично устанавливается в транспортном сосуде Дьюара с жидким азотом. Нагревателем задатчика создается необходимый поток паров азота с температурой,

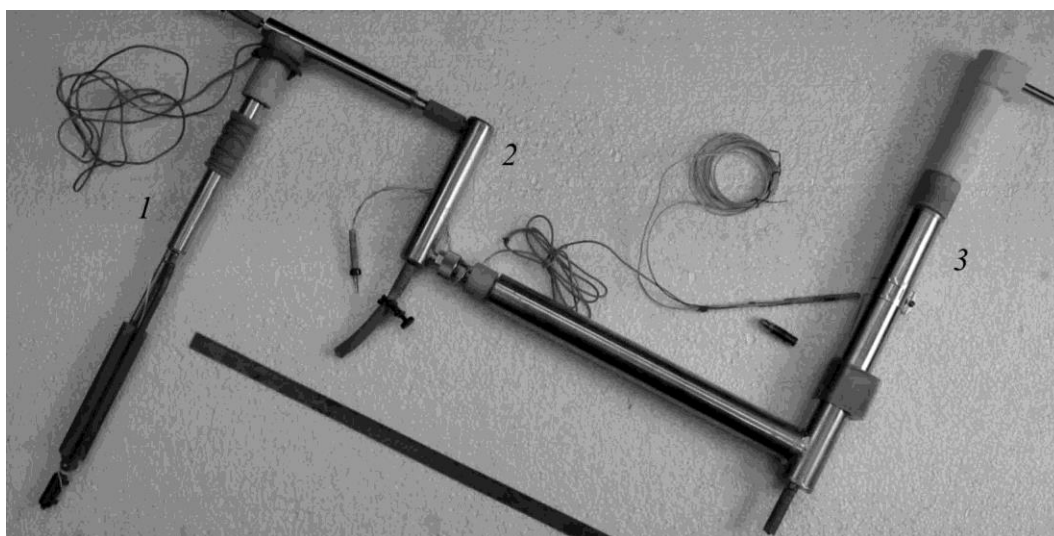


Рис. 8. Сочлененные узлы проточного криостата: 1 – датчик потока хладагента, 2 – звено, сопрягающее узлы криостата по высоте при монтаже криостата на спектрометре, 3 – основной узел криостата, сопрягаемый с автодинным детектором спектрометра в зазоре магнита

близкой к 80 К. Величина потока задается терморегулятором. Поток паров азота через сопрягающее звено подается в основной узел криостата, в котором располагается контур спектрометра с исследуемым образцом, нагреватель системы стабилизации температуры с контрольными термопарами. Температура на образце устанавливается и стабилизируется терморегулятором путем изменения температуры потока нагревателем криостата и балансом температуры нагревателя и скорости потока. На рис. 9 в разрезе даны основные узлы проточного криостата.



Рис. 9. Основные узлы проточного криостата: а – датчик потока хладагента располагаемый в транспортном сосуде Дьюара; б – криостат, сопрягаемый с автодинным детектором спектрометра в зазоре магнита

Поскольку проточный криостат позволяет проводить исследования в диапазоне температур от азотных до комнатных, то для расширения его в сторону высоких температур нами применяются современные весы-влажмеры с компьютерным интерфейсом типа ADS-50. С их помощью нам удается поднять верхнюю границу температурного диапазона сорбционных исследований до 320 К.

Для дальнейшего расширения возможностей нашего исследовательского комплекса оборудования предполагается разработать камеру высокого давления для работы в широком диапазоне температур. В частности, для использования совместно с проточным криостатом, описанным выше, или с новым стационарным криостатом.

Введение в эксплуатацию описанного современного комплекса оборудования для исследования сорбционных процессов в углях позволило нам повысить точность и сократить время проведения экспериментальных работ. Уже полученные результаты [6, 9–12] подтверждают высокую эффективность нашего оборудования. Дальнейшее его совершенствование и использование в комплексе с другим современным физическим оборудованием может получить новые, еще более интересные результаты.

1. *Алексеев А.Д.* Радиофизика в угольной промышленности [Текст] / А.Д. Алексеев, В.Б. Зайденварг, В.В. Синолицкий, Е.В. Ульянова. – М.: Недра, 1992. – 183 с.
2. *Алексеев А.Д.* Аппроксимация экспериментальных спектров H^1 ЯМР углей [Текст] / А.Д. Алексеев, В.В. Завражин, А.Д. Меляков, Г.А. Троицкий // Физика и техника высоких давлений. – 2002. – Т. 12, №1. – С. 71–78.
3. *Вашман А.А.* Ядерная магнитная релаксационная спектроскопия [Текст] / А.А. Вашман, И.С. Пронин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
4. *Чижики В.И.* Ядерная магнитная релаксация: Учеб. пособие [Текст] / В.И. Чижики. – Петербург: Изд-во Петербургского ун-та, 2004. – 388 с.
5. *Сликтер Ч.П.* Основы теории магнитного резонанса [Текст] / Ч.П. Сликтер. – М.: Мир, 1967. – 324 с.
6. *Алексеев А.Д.* Исследование методом ЯМР кинетики структурных изменений в угольном веществе при высоком давлении [Текст] / А.Д. Алексеев, Н.Н. Коврига, А.Н. Молчанов, В.Г. Сынков // Физика и техника высоких давлений. – 2003. – Т. 13, № 2. – С. 83–90.
7. *Бородин В.А.* Комплекс устройств для ЯКР-исследований ВТСП при высоких давлениях и низких температурах [Текст] / В.А. Бородин, В.Д. Дорошев, С.Ф. Иванов и др. // Препринт / АН УССР, ДонФТИ ; №89-42. – Донецк: ДонФТИ, 1989. – 23 с.
8. *Константинов В.А.* Установка для исследования изохорной теплопроводности отвердевших газов и жидкостей [Текст] / В.А. Константинов, С.А. Смирнов, В.П. Ревякин // Приборы и техника эксперимента. – 1999. – №1. – С. 145–147.
9. *Василенко Т.А.* Исследование структуры ископаемых углей методом ЯМР-спектроскопии [Текст] / Т.А. Василенко, А.К. Кириллов, А.Н. Молчанов, Г.А. Тро-

- ицкий, Г.П. Стариков // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – Т. 18, № 2. – С. 128–136.
10. *Алексеев А.Д.* Изменение динамических параметров флюидов в объеме пор ископаемых углей в зависимости от температуры [Текст] / А.Д. Алексеев, Т.А. Василенко, А.К. Кириллов, А.Н. Молчанов, Г.А. Троицкий, А.В. Дончук // Физика и техника высоких давлений. – 2010. – Т. 20, № 2. – С. 143–153.
11. *Алексеев А.Д.* Подвижность метана в углях: температурные зависимости [Текст] / А.Д. Алексеев, Т.А. Василенко, А.К. Кириллов, А.Н. Молчанов, Г.А. Троицкий, А.В. Дончук // Физика и техника высоких давлений. – 2010. – Т. 20, № 3. – С. 150–156.
12. *Алексеев А.Д.* Система уголь – метан в условиях высоких газовых давлений [Текст] / А.Д. Алексеев, Т.А. Василенко, А.К. Кириллов, А.Н. Молчанов, Г.А. Троицкий, А.В. Вишняков // Физика и техника высоких давлений. – 2011. – Т. 21, № 2. – С. 127–130.

О.М. Молчанов

УДОСКОНАЛЕНИЙ КОМПЛЕКС ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СОРБЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИКОПНОГО ВУГІЛЛЯ

У роботі описаний сучасний комплекс обладнання для дослідження сорбційних властивостей та пористої структури викопного вугілля в широкому діапазоні температур і тисків.

A.N. Molchanov

IMPROVED COMPLEX EQUIPMENT FOR RESEARCH SORPTION PROPERTIES OF COALS

This paper describes a modern complex of equipment for the study of sorption properties and pore structure of coals in a wide range of temperatures and pressures.