

**О РОЛИ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В МЕХАНИЗМЕ  
ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДЕСОРБЦИИ ГАЗА ПРИ РАЗРУШЕНИИ  
УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА**

Описані результати вивчення властивості порід вугільних формацій емітувати заряджені частки, що здатні активувати зв'язані молекули метану під час руйнування масиву.

**ABOUT A ROLE OF MECHANO-ELECTRICAL EFFECTS IN THE  
MECHANISM OF PADDING DESORPTION OF GAS AT FRACTURE  
OF A COAL-ROCKMASS**

The property of rocks of coal formations is discrilad to emit charged particles, which one are carable to activate bound molucas of methane during fracture of a massif.

Несмотря на определенные успехи в познании природы внезапных выбросов угля, породы и газа, анализ концепций теорий выбросов свидетельствует, что более полное представление о механизме газодинамических явлений может быть получено дополнением традиционных энергетических теорий результатами исследований сопутствующих явлений с учетом организации системы "уголь-газ" на атомарно-молекулярном уровне. Такой подход позволяет восполнить ряд пробелов в теории выбросов, в частности, объяснить причину интенсивной дополнительной десорбции газа, объем которого почти на порядок превышает естественную газообильность пласта и который является основным переносчиком энергии внезапного выброса.

Развивая гипотезу, выдвинутую в работе [1] о наличии в момент развязывания выброса дополнительной активационной десорбции молекул газа под действием механоэмиссии пьезоактивных пород при их разрушении, нами выполнены более глубокие исследования механоэлектрических эффектов пород угольных формаций и их роли в механизме этой десорбции [2-6]. В качестве объекта исследований были выбраны угли средней степени метаморфизма, обладающие аномально высоким (по сравнению с другими углями) значением сейсмoeлектрического модуля, а также песчаники угольных формаций, которые, как известно, также имеют склонность к внезапным выбросам. Из [2] следует, что в углях наблюдается только сейсмoeлектрический эффект второго рода, а механоэлектрический эффект песчаников имеет смешанную природу. Пьезоэлектрические свойства песчаников обусловлены содержанием в них кварцевых зерен, а сейсмoeлектрические - двойных электрических слоев на границах раздела "вода-твердая фаза". Несмотря на низкое значение пьезоэлектрического модуля песчаника, по сравнению с сейсмoeлектрическим, его необходимо учитывать, т.к. во время разрушения адгезионных контактов кристаллов образуется, как правило, значительное количество эмитирующих электронов. В табл. 1 представлены результаты измерений динамических пьезоэлектрических модулей ( $M$ ) склонных (Центральный район Донбасса) и не склонных (Западный район Донбасса) к выбросам песчаников, из которых следует, что первая группа песчаников обладает значительно более высокими

показателями механоэлектрических свойств. Их пьезоэлектрический модуль в 3-5 раз превышает модуль песчаников Западного района Донбасса, что указывает на высокое содержание кварца, а значительно больший коэффициент анизотропии свидетельствует о большей крупности кварцевых зерен.

Таблица 1 - Динамические пьезоэлектрические модули песчаников

Тип	Центральный район Донбасса							Западный район Донбасса								
	№ скважины	1278	937	1931	1625	1314	622	1012	2073	1124	1432	1241	1197	1098	1572	1343
М·10 <sup>7</sup> , В·м/Н	6,8	7,1	5,9	8,2	9,2	7,7	8,6	8,1	2,1	3,2	1,7	1,9	3,6	2,4	0,9	2,7
Кoeff. анизотропии	2,2	2,7	1,9	2,4	2,3	2,0	2,3	2,1	1,20	1,4	1,2	1,2	1,3	1,3	1,1	1,3

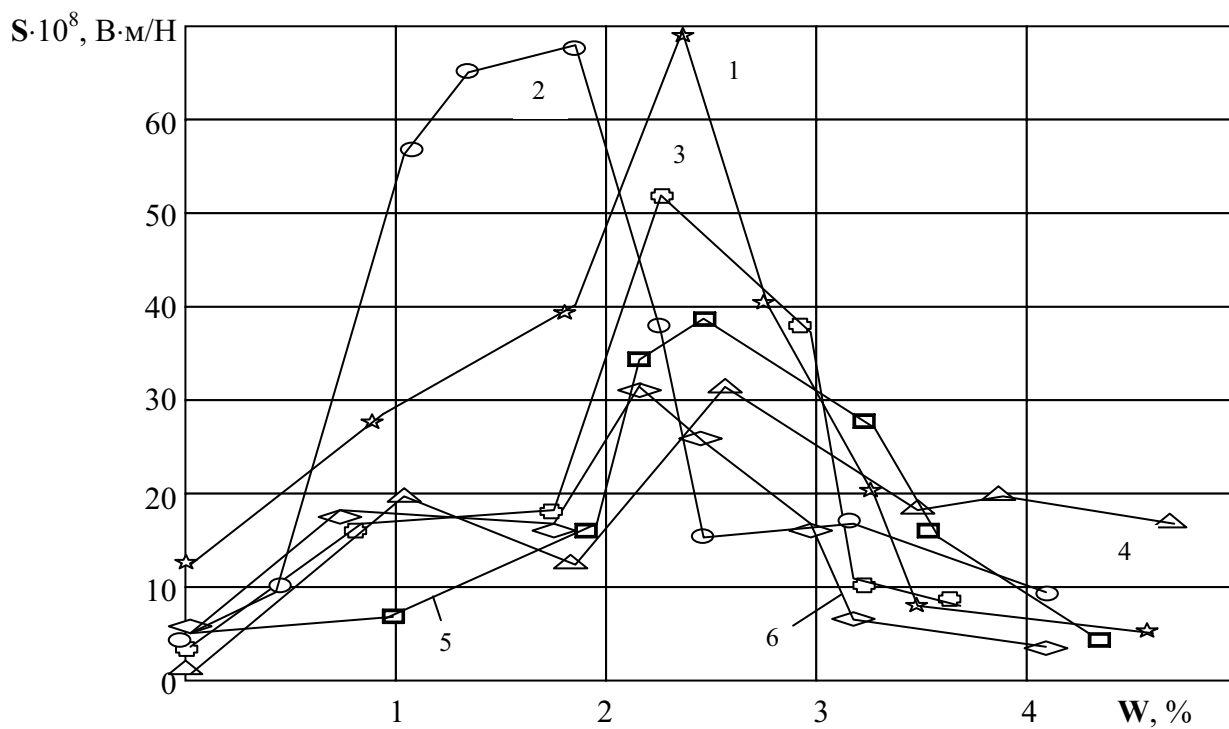
Исследования механоэлектрических свойств углей различной степени метаморфизма выполнены в зависимости от их влажности, поскольку именно она является определяющей в формировании сейсмоэлектрического эффекта второго рода. Результаты измерений представлены в виде графиков на рис. 1, из которых следует, что максимум эффекта  $E$  наблюдается в углях с содержанием воды от 1,5 до 3,5 %, т.е. в диапазоне их естественной влажности. Причем угли средней степени метаморфизма обладают наибольшим сейсмоэлектрическим эффектом. Справедливость такого вывода подтверждается соответствием графиков зависимости для абсолютных значений эффекта  $E$  и его модуля. В работе [2] было показано, что для углей характерен сейсмоэлектрический эффект трехфазной среды с преобладающим вкладом границ раздела "вода-газ" и "уголь-газ". Т.е. присутствие в среде газа усиливает эффект  $E$ . Для проверки этой гипотезы были проведены исследования на образцах углей с различной газопроницаемостью ( $\eta_r$ ), результаты которых представлены на рис. 2. Установленная корреляционная зависимость подтверждает рост эффекта  $E$  с увеличением проницаемости углей. Зависимость описывается уравнением регрессии линейного типа ( $S = a\eta_r + b$ ), где  $a = 10,02$ ;  $b = 35,08$ . Коэффициент корреляции равен 0,81, что свидетельствует о тесной корреляционной связи, а доверительные интервалы (при доверительной вероятности 0,95) составляют, соответственно, для средних значений параметров:

$$1,85 < \eta_r < 2,33; \quad 52,9 \cdot 10^{-8} < S < 59,1 \cdot 10^{-8};$$

для коэффициентов уравнения:

$$7,82 < a < 12,23; \quad 30,10 < b < 40,06.$$

Несмотря на особенность сейсмоэлектрического эффекта в углях, обусловленную наличием газовой фазы, установленные зависимости эффекта  $E$  пород от пористости, минерализации растворов, типа флюида, температуры и т.д., справедливы и для углей. На рис. 3 приведены результаты исследований



1 – марка ОС; 2 – марка Ж; 3 – марка Т; 4 – марка А; 5 – марка Г; 6 – марка Д

Рис. 1 – Зависимости сейсмoeлектрических модулей углей различной степени метаморфизма от содержания влаги

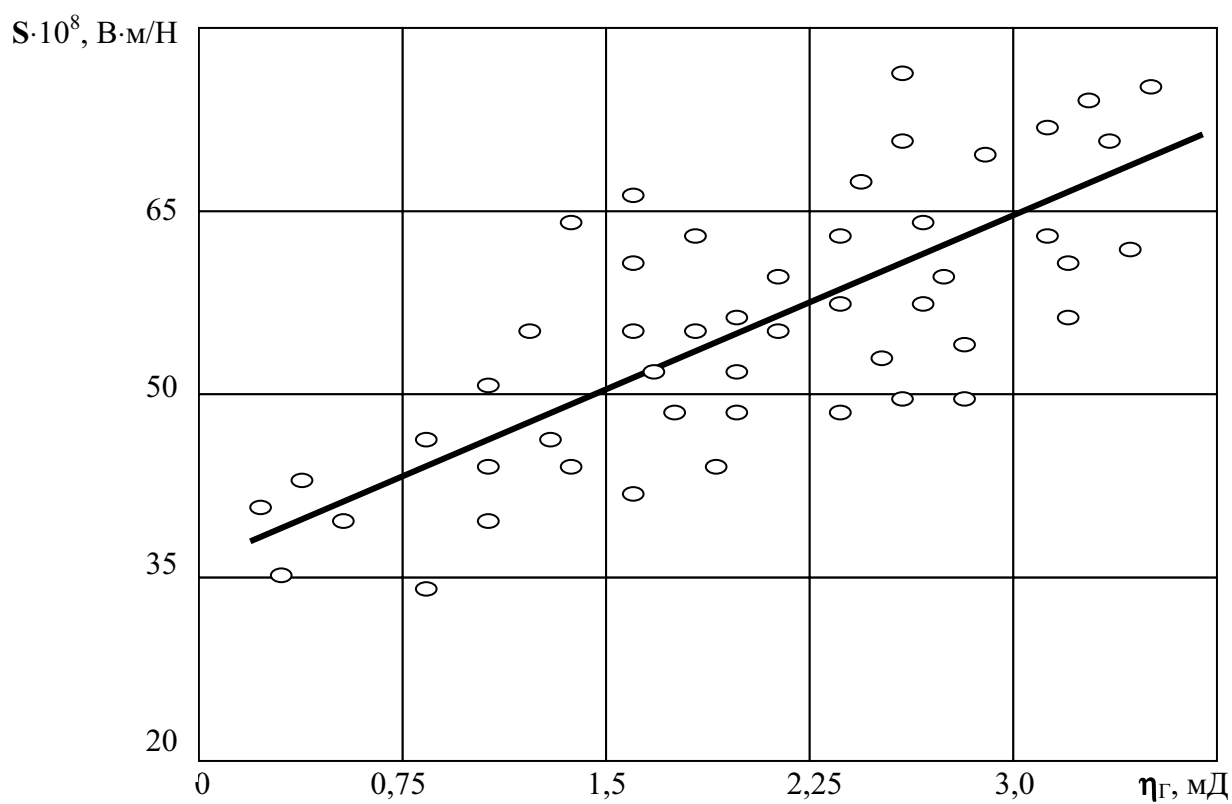
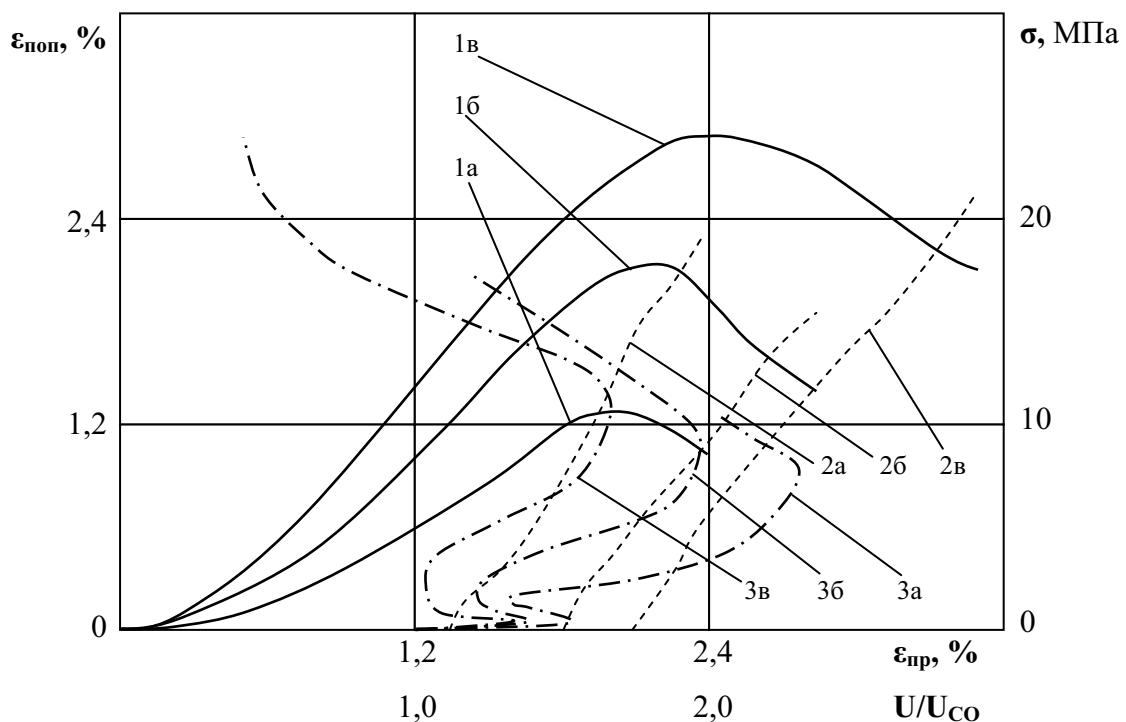


Рис. 2 - Корреляционная зависимость сейсмoeлектрического модуля углей марок ОС, Ж, Т, Г от их газопроницаемости ( $r = 0,84$ )

углей в напряженно-деформированном состоянии. Исследования выполнены в до- и запредельной областях напряжений в режимах одноосного, трехосного неравнокомпонентного и трехосного с одной свободной гранью, моделирующей обнажение массива, сжатия. Как следует из рисунка, закономерности изменения сейсмoeлектрического эффекта углей с ростом напряжений совпадают с установленными для вмещающих пород. Для углей, подверженных всестороннему сжатию, характерно резкое снижение амплитуды эффекта  $E$  уже в области упругих деформаций и ее падением до минимума при приближении к пределу прочности, что обусловлено полным закрытием трещин, вытеснением из них значительной части воды и газа и уменьшением площади границ раздела "вода–уголь–газ". Сопоставление результатов исследований эффекта  $E$  с данными деформирования, позволило сделать вывод, что для одноосного и трехосного с одной свободной гранью режимов нагружения характерна суперпозиция эффектов вытеснения воды и газа из трещин в начальной стадии нагружения и увеличения площади соприкосновения фаз "вода–уголь–газ", за счет разрушения образца, при дальнейшем нагружении в области упругих деформаций. Уменьшение эффекта при приближении к пределу прочности обусловлено образованием макротрещин и повышением акустического сопротивления угля.



1а, 1б, 1в – зависимости  $\epsilon = f(\sigma)$  для условий:  
а – одноосного сжатия; б – трехосного с одной свободной гранью и боковым подпором, равным 1,8 МПа; в – трехосного с боковым подпором, равным 3,2 МПа;  
2а, 2б, 2в – соответствующие зависимости  $\epsilon_{\text{поп}} = f(\epsilon_{\text{пр}})$ ;  
3а, 3б, 3в – соответствующие зависимости  $U/U_{\text{со}} = f(\sigma)$  в допредельной области

Рис. 3 – Результаты исследований углей в напряженно-деформированном состоянии

Влияние размеров трещин на сейсмоэлектрический эффект углей косвенно оценивали по результатам исследований зависимости эффекта  $E$  от скорости деформирования образцов. Установлено, что при увеличении скорости деформирования на два порядка приращение параметра  $S'$  (сейсмоэлектрической чувствительности) вблизи предела прочности составляет 100 %. Такое явление объясняется уменьшением влияния поверхностной электрической проводимости токопроводящих каналов образца на сейсмоэлектрический эффект при значительном увеличении размеров трещин, возникающих в процессе быстрого деформирования. Установлено также, что различная ориентация трещин, относительно направления акустического воздействия, приводит к изменению сейсмоэлектрической чувствительности на несколько десятков процентов. Максимальное значение параметра  $S'$  отмечается вблизи предела прочности образца при акустическом воздействии по нормали к направлению сжимающего усилия.

Анализируя полученные результаты, можно сформулировать следующие положения, которые служат фундаментом положения о роли механоэлектрических эффектов пород угольных формаций в механизме дополнительной десорбции газа при разрушении углепородного массива.

1. Песчаники угольных формаций отличаются более высоким пьезоэлектрическим модулем и выраженной анизотропией тензора пьезоэлектрической активности. Разрушение таких пород, как правило, сопровождается эмиссией электронов с энергий, достаточной для активации связанных молекул метана.

2. Все породы угольных формаций обладают сейсмоэлектрическим эффектом второго рода, значение которого сравнимо, а в случае песчаников и песчанистых сланцев значительно выше пьезоэлектрического эффекта песчаника с высоким содержанием зерен кварца.

3. Для механоэлектрических явлений в углях характерен сейсмоэлектрический эффект трехфазной среды с преобладанием эффекта границ "уголь–газ" и "вода–газ". Т.е. рост количества адсорбированного газа в углях ведет к увеличению эффекта  $E$ .

4. Сейсмоэлектрический эффект вмещающих пород пропорционален их влажности в диапазоне от 0 до 2-3 %. При дальнейшем увеличении содержания воды наблюдается выполаживание зависимости  $U_c = f(W)$ . Учитывая, что влажность пород в условиях естественного залегания не ниже 2 %, их сейсмоэлектрический модуль будет максимальным.

5. При фиксированном значении влажности пород и наличии в них свободной (не связанной физически) воды увеличение микротрещиноватости приводит к пропорциональному росту сейсмоэлектрического эффекта. Таким образом, в процессе формирования выброса, сопровождающегося ростом трещиноватости среды, сейсмоэлектрический модуль пород увеличивается, соответственно возрастает напряженность электрического поля, создаваемого эффектом, количество и энергия эмитируемых электронов.

6. Сейсмоэлектрический модуль пород и углей возрастает с увеличением сжимающих напряжений и достигает максимальных значений при приближении к их пределу прочности, т.е. в момент развязывания выброса.

7. Максимальный сейсмоэлектрический эффект наблюдается в направлении, ортогональном действию основного сжимающего усилия. Т. е. максимальный эффект, а значит и максимальное электрическое поле, ускоряющее заряженные частицы, наблюдается в плоскости развязывания выброса.

Суммируя эти положения, можно сделать вывод, что при разрушении углепородного массива, происходящего в момент развязывания газодинамического явления, наблюдается максимальное для данной среды влияние механоэлектрических эффектов на механизм дополнительной десорбции газа, что требует их учета при обосновании природы явления на атомарно-молекулярном и надмолекулярном уровнях.

К перечисленному следует добавить ряд положений, существующих в теории адгезии тел, базирующихся на фундаментальных основах квантовой химии и экспериментальных данных, полученных в Институте физической химии РАН (ИФХ РАН) [7], а также ИГТМ НАН Украины.

1. Природа сил, ответственных за адгезионную связь, может быть либо химической, либо ван-дер-ваальсовой, соответственно и адсорбция может быть химической (хемосорбция) и физической. Поскольку в нашем случае структура электронных оболочек системы "газ-твердое тело" изменяется незначительно, можно заключить, что имеет место физическая адсорбция, осуществляемая силами Ван-дер-Ваальса.

2. Энергия активации физически связанной молекулы метана составляет  $2,3 \cdot 10^{-19}$  Дж. Т.е. для ее десорбции в момент развязывания выброса в углепородном массиве должны появиться свободные заряженные частицы с энергией не ниже указанной.

3. Силы Ван-дер-Ваальса имеют электрическую природу и обусловлены образованием на контакте (границе) двух тел (сред) двойного электрического слоя. Работа по расслаиванию таких контактов (пленок), достигающая значений  $10-100$  Дж/м<sup>2</sup>, симбатно зависит от скорости расслоения, давления и рода газа, окружающего образец. При этом, после отрыва, наблюдается эмиссия электронов с энергией  $10^{-14} - 10^{-15}$  Дж. Удельную работу ( $A$ ), затрачиваемую на отрыв, в теоретических расчетах можно приравнять энергии конденсатора при разведении его обкладок:

$$A = \frac{2\delta q d}{\dot{a}} = \frac{U^2}{8\delta d} = \frac{E^2 d}{8\delta},$$

где  $q$  - плотность зарядов двойного электрического слоя;  $d$  - расстояние между обкладками конденсатора.

4. Количество электромагнитных импульсов в секунду, зарегистрированное при разрушении адгезионного контакта твердого тела, при скорости роста трещины, соизмеримой со скоростью деформирования пород в процессе зарождения и протекания выброса, составляет порядка 10000.

С учетом изложенных положений, действие дополнительного элемента механизма дополнительной десорбции газа при разрушении углепородного массива происходит по следующей схеме.

В процессе зарождения и протекания выброса происходит разрушение угля и породы и, как следствие, разрыв адгезионных контактов. Эмитирующие из рвущихся двойных электрических слоев электроны ускоряются полем, обусловленным разноименными зарядами, образовавшимися при деструкции молекулярных и кристаллических связей. Как отмечалось, энергия таких электронов достигает  $10^{-14}$  Дж, что на четыре порядка выше энергии активации связанной молекулы метана. Это означает, что активационной способностью будут обладать и вторичные заряженные частицы, образовавшиеся при торможении первичных электронов. Если предположить, что время развязывания газодинамического явления равно, например, 10 с, что соответствует реально существующим условиям, то эмитирующими заряженными частицами в  $1 \text{ м}^3$  угля может быть активировано до  $4 \cdot 10^{27}$  молекул метана. Это составляет порядка  $150 \text{ м}^3$  газа, что даже больше тех объемов, которые были зафиксированы при внезапных выбросах в угольных шахтах Донбасса.

Результаты, базирующиеся на статистически значимом объеме экспериментальных материалов, полученных в данной работе с относительной погрешностью 12-15 % при достижении доверительной вероятности 0,9-0,95, тесной корреляционной связи, а также основополагающих положениях теории адгезии твердых тел, позволили сформулировать следующий научный вывод:

Угли средней степени метаморфизма обладают аномально высоким значением сейсмoeлектрического модуля, обусловленного наличием в трехфазной среде "вода-газ-уголь" двойных электрических слоев, разрушение которых с параллельным разрывом трещин в песчанике приводит к эмиссии электронов, способных активировать связанные молекулы метана, что позволяет объяснить причину их дополнительной десорбции в процессе разрушения углепородного массива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зборщик М.П., Назимко В.В. О роли механоэмиссии в механизме газодинамических явлений // Уголь Украины. - 1985. - №1. - С.32-34.
2. Скипочка С.И. Механоэлектрические эффекты в породах и их использование в горной геофизике. - Днепропетровск: НГАУ, 2002. - 178 с.
3. Ильяшов М.А. Безопасная разработка свит угольных пластов, склонных к газодинамическим явлениям, в зонах повышенного горного давления. - Донецк: Донбасс, 1998. - 178 с.
4. Скипочка С.И., Усаченко Б.М. Об использовании механоэлектрических эффектов пород для контроля состояния массива // Уголь Украины. - 1986. - №6. - С.31-32.
5. Скипочка С.И., Мухин А.В., Черватюк В.Г. Геомеханика охраны выемочных штреков в неустойчивых породах. - Днепропетровск: НГАУ, 2002. - 125 с.
6. Булат А.Ф., Скипочка С.И., Усаченко Б.М. Механоэлектрические эффекты пород угольных формаций и их роль в механизме газодинамических явлений // Доповіді НАН України. - 1998. - №1. - С.153-158.
7. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. - М.: Наука, 1973. - 280 с.