

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7

АНАЛИЗ ГИДРОФОБНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМЕ “АЛМАЗ – ОРГАНИЧЕСКАЯ ЖИДКОСТЬ – НЕОРГАНИЧЕСКИЙ ЛЮМИНОФОР” ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛМАЗОВ

В. В. Морозов, В. А. Чантурия, Г. П. Двойченкова, Е. Л. Чантурия

*Институт проблем комплексного освоения недр им. акад. Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: dvoigr@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований композиций люминофоров для модифицирования спектральных характеристик и извлечения аномально люминесцирующих алмазов. Показано, что закрепление люминофорсодержащей композиции на поверхности кристалла алмаза происходит за счет формирования устойчивых агрегатов алмаза, органической жидкости и неорганического люминофора, протекающей по механизму гидрофобного взаимодействия в полярной среде. Устойчивость таких агрегатов обеспечивается интенсивным адгезионным взаимодействием компонентов, обладающих близкой поверхностной энергией. Для алмаза и сульфида цинка выявлен экстремальный характер зависимости краевого угла смачивания каплями органической жидкости в водной среде от поверхностного натяжения органической фазы. По координате максимума зависимости краевого угла смачивания от поверхностной энергии органической жидкости определена поверхностная энергия алмаза и сульфида цинка. Установлено, что используемые в качестве органического коллектора органические жидкости и нефтепродукты с энергиями поверхности, близкими к поверхностной энергии люминофора, обеспечивают максимальное увеличение силы гидрофобных взаимодействий и устойчивость комплекса “алмаз – органическая жидкость – неорганический люминофор”.

Алмазы, рентгенолюминесцентная сепарация, люминофоры, композиция, органический коллектор, гидрофобные взаимодействия, спектрально-кинетические характеристики, модифицирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20220209

Перспективный путь решения проблемы снижения потерь слабо- и аномально люминесцирующих алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации — разработка и применение технологии модифицирования их спектральных характеристик с помощью специально выбранных композиций люминофоров [1]. Технология модифицирования спектрально-кинетических

характеристик слабо- и аномально люминесцирующих алмазов основана на эффекте концентрирования специально подобранных смесей люминофоров в органической жидкости с ее последующим закреплением на поверхности алмазов [2]. Повышение устойчивости гетерофазного комплекса “алмаз – органическая фаза – люминофор” — главное условие эффективности разрабатываемой технологии. Как процесс экстракции люминофора органической жидкостью, так и последующее закрепление люминофорсодержащей композиции на поверхности алмазов принадлежат к группе гидрофобных взаимодействий в полярной среде и подчиняются схожим закономерностям [3, 4].

Цель настоящей работы — разработка подходов и методик для выбора жидких органических коллекторов, обеспечивающих необходимую устойчивость применяемых люминофорсодержащих композиций, их эффективное закрепление на поверхности алмазов и сохранение необходимых спектрально-кинетических характеристик.

ОБЩИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ОРГАНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ-КОЛЛЕКТОРОВ ДЛЯ ЛЮМИНОФОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЙ

Процессы, протекающие в рабочей среде при подготовке и применении люминофорсодержащей композиции, могут быть рассмотрены с позиций теории гидрофобных взаимодействий. Гидрофобное взаимодействие — притяжение между неполярными и слабополярными частицами в воде или других полярных растворителях, которое обусловлено термодинамической невыгодностью контакта воды с неполярными веществами [5]. Гидрофобные взаимодействия возникают в водных растворах в результате взаимодействия полярных молекул воды с неполярными гидрофобными частицами, молекулами или неполярными радикалами молекул. Для конденсированных сред понятие гидрофобного взаимодействия связано с адгезионным взаимодействием между двумя гидрофобными веществами, погруженными в воду [6]. Энергия гидрофобного взаимодействия, обуславливающая притяжение между макроскопическими гидрофобными поверхностями в воде, определяется межфазной энергией, отнесенной к единице поверхности, и называется поверхностным натяжением [7].

Поверхностное натяжение органических жидкостей, применяемых в качестве основы люминофорсодержащей композиции, существенно зависит от их химического строения. Поверхностное натяжение отличается для разных групп углеводородов: максимально для ароматических и минимально для парафиновых. С увеличением молекулярной массы углеводородов поверхностное натяжение повышается [8]. С повышением температуры и давления поверхностное натяжение в системе “газ – жидкость” снижается [9].

Поверхностные натяжения органических соединений существенно меньше, чем чистой и водопроводной воды, не содержащей поверхностно-активных веществ (табл. 1), что является причиной сокращения площади контакта этих жидкостей при протекании межфазных процессов. Поверхностное натяжение дизельного топлива и других нефтепродуктов, используемых в качестве экстрагента люминофоров, — переменная величина, зависящая от количества присутствующих в них поверхностно-активных компонентов. Высокомолекулярные органические жидкости и очищенные нефтепродукты имеют достаточно высокое поверхностное натяжение на границе с водой. С увеличением концентрации поверхностно-активных веществ поверхностное натяжение органической жидкости снижается. Природными поверхностно-активными веществами, снижающими поверхностное натяжение нефти и нефтепродуктов, являются спирты, фенолы, смолы, асфальтены, различные органические кислоты [8]. Поверхностное натяжение органических веществ, получаемых из нефтепродуктов, можно оценить расчетным путем [9].

ТАБЛИЦА 1. Поверхностное натяжение (энергия поверхности границы раздела фаз “вещество – пар”) воды и органических соединений [10 – 12]

Вещество	Поверхностное натяжение, мДж/м ²	Вещество	Поверхностное натяжение, мДж/м ²
Вода	72.5 – 72.8	Нефть	26 – 30
Вода водопроводная	68.0	Бензин	21.0
Пиридин	36.5	Керосин	24.0
Анилин	44.0	Мазут	45 – 48
Сероуглерод	37.7	Дизельное топливо	30.8
Четыреххлористый углерод	28.0	Масло вазелиновое	31.8
Формамид	52.7	Масло машинное	41 – 48
Фенол	36.5 – 42.3	Гексан	18.5
Бензол	29.0	Октан	21.3
Толуол	36.1	Декан	23.9
Глицерин	59.4 – 63.4	Гексадекан	27.6

Немаловажным фактором при оценке устойчивости дисперсных систем является учет динамических факторов, например упрочнение поверхностного натяжения на контакте “частица – пузырек” при переменных нагрузках в турбулентной среде, открытое для процессов флотации В. И. Мелик-Гайказяном [13]. Исходя из изложенного, признано целесообразным при выборе органической жидкости, экстрагирующей и удерживающей люминофор, руководствоваться параметром межфазной энергии, отнесенной к единице поверхности, т. е. поверхностным натяжением.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЮМИНОФОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЙ

Для анализа механизма взаимодействия алмазов, люминофоров и органической жидкости в водной среде применялся метод люминесцентной и комбинированной микроскопии. Люминесцентный микроскоп отраженного света — наиболее распространенный способ наблюдения и регистрации в свете флуоресценции изображений макро- и микрообъектов [14]. В данных исследованиях использовался люминесцентный микроскоп “Микромед 3 ЛЮМ”.

Энергетические характеристики гидрофобных взаимодействий оценивали методом измерения краевых углов смачивания [15]. Поверхность минералов обрабатывали исследуемой водной системой, наносили каплю органического вещества и измеряли краевой угол смачивания. Измерения проводили на установке “OCA 15EC Package 1”, содержащей основной прибор с одианным модулем прямого дозирования SD-DM, электронный шприц-модуль ESr-N и модуль программного обеспечения SCA 20 для анализа контура капли. Угол смачивания определяли по изображению капли органической жидкости на плоском участке поверхности алмаза, погруженном в водную фазу.

Эффективность закрепления люминофоров на поверхности алмазов и минералов кимберлита оценивали по изображению изучаемых объектов в ультрафиолетовом излучении. Для получения изображения алмазов и минералов кимберлита после обработки люминофорсодержащими средами использовали люминескоп “Луч-1Ф”, оснащенный источниками ультрафиолетового излучения с длиной волны 273 и 365 нм. Полученные изображения диагностировали визиометрическим анализом, позволяющим оценить концентрацию и распределение люминофора по поверхности анализируемых образцов [16].

Для определения результатов модифицирования поверхности алмазов люминофорсодержащими композициями традиционно применяются приборы, регистрирующие конечный сигнал рентгенолюминесценции. В настоящих исследованиях применен портативный сепаратор “Полюс-М”, воспроизводящий настройки промышленных рентгенолюминесцентных сепараторов [17]. В сепараторе реализован люминесцентно-абсорбционный режим анализа, предполагающий расположение рентгеновской трубки и приемника люминесценции по разные стороны потока материала. Аналого-цифровая система регистрации обеспечивала возможность работы как в амплитудно-временном, так и в специальном режиме повышенной селективности, использующем кинетические характеристики сигнала рентгенолюминесценции: свертку, постоянную времени затухания, амплитуду медленной компоненты, амплитуду быстрой компоненты, отношение амплитуд компонент.

МАКРОМОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОФОБНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМЕ “АЛМАЗ – ОРГАНИЧЕСКАЯ ЖИДКОСТЬ – НЕОРГАНИЧЕСКИЙ ЛЮМИНОФОР”

Получение устойчивой гетерофазной системы “алмаз – органическая жидкость – неорганический люминофор” обеспечивается интенсивными гидрофобными взаимодействиями между компонентами системы. Требуемый результат может быть достигнут выбором или модифицированием их свойств, обеспечивающим эффективную экстракцию органической жидкостью неорганического люминофора и адгезию люминофорсодержащей композиции (смеси люминофоров и органического коллектора) на алмазах.

Процесс закрепления люминофорсодержащей композиции на поверхности кристалла алмаза включает стадию образования устойчивых агрегатов алмаза, органической жидкости и люминофора (рис. 1). Закрепившиеся на поверхности кристаллов алмаза капли органической жидкости с объемно или поверхностно экстрагированным люминофором являются источником сигнала рентгенолюминесценции, модифицирующим собственный сигнал алмаза.

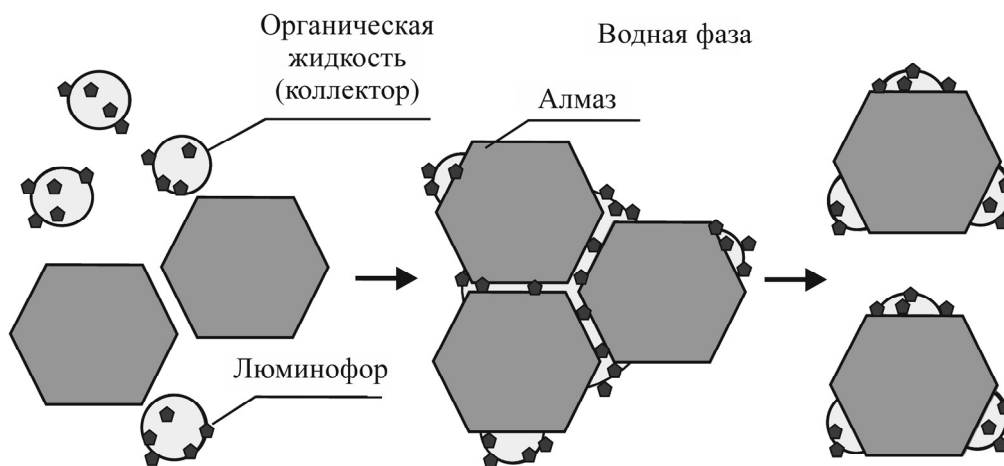


Рис. 1. Процесс закрепления люминофорсодержащей композиции на кристалле алмаза

Образование групповых агрегатов алмазов, в которых отдельные кристаллы связаны между собой люминофорсодержащей жидкостью, подтверждено результатами люминесцентной микроскопии (рис. 2а). После подсушивания содержащиеся в органической жидкости люминофору устойчиво закрепляются на поверхности кристаллов алмаза (рис. 2б).

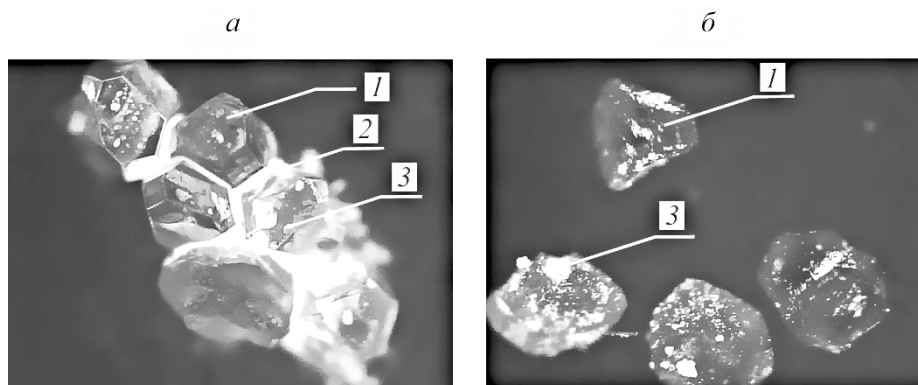


Рис. 2. Групповой агрегат алмазов в органической жидкости, содержащей растворимые люминофоры (а) и отдельные кристаллы алмазов после удаления избытка люминофорсодержащей жидкости и подсушивания (б): 1 — алмаз; 2 — люминофорсодержащая органическая жидкость; 3 — покрытия органического люминофора на поверхности алмаза

В случае использования композиций с неорганическими люминофорами, не растворимыми в органической жидкости и воде, образуются групповые агрегаты алмазов и зерен люминофоров, связанные между собой каплями органической жидкости (рис. 3а). Формирование такого агрегата в водной среде — результат взаимодействий между гидрофобными компонентами системы. Его устойчивость обеспечивается эффективным адгезионным взаимодействием органической жидкости с алмазами и люминофорами. После удаления избытка органической жидкости и подсушивания достигается устойчивое закрепление зерен неорганического люминофора на поверхности алмазов через пленку неиспарившейся высокомолекулярной фракции (рис. 3б).

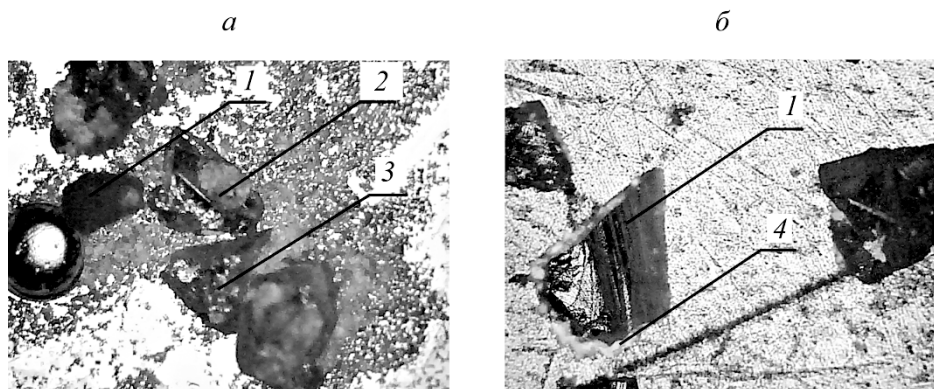


Рис. 3. Групповой агрегат алмазов и неорганического люминофора в органической жидкости (а) и отдельные кристаллы алмазов после удаления избытка органической жидкости (б): 1 — алмаз; 2 — зерна неорганического люминофора; 3 — органическая жидкость (коллектор); 4 — частички неорганического люминофора на поверхности алмаза

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗА И ЛЮМИНОФОРОВ

Энергия межфазного взаимодействия определяется силами поверхностного натяжения воды и органических жидкостей и смачиванием жидкостями поверхности минералов или неорганического люминофора. Равновесное состояние гетерофазной системы описывается уравнениями Гиббса, предполагающими стремление суммарной поверхностной энергии к минимуму [18].

Общепринятый критерий равновесного энергетического состояния гетерофазной системы, в том числе системы “твердое – жидкое – жидкое”, — трехфазный краевой угол смачивания, определяемый как угол между поверхностью твердой фазы и примыкающей к линии трехфазного контакта линейной части границы раздела фаз “жидкое – газ” [15, 18] или для рассматриваемой системы — линейной части границы “водная фаза – органическая жидкость”.

Поверхностная энергия и, соответственно, гидрофобность и олеофильность алмазов — переменная величина, зависящая от состояния поверхности. На основании [19–21] можно оценить теплоту смачивания алмазов водой и органическими жидкостями в 30–60 мДж/м². Энергия поверхности алмаза увеличивается при окислении и снижается при гидрировании [22]. Снижение силы поверхностного натяжения на границе “алмаз – вода” наблюдается также при добавках ПАВ. Теплота смачивания сульфидов переходных металлов и алюмосиликатов островного и слоистого строения по литературным данным оценивается 35–50 мДж/м² [23, 24]. Действие ПАВ может способствовать повышению и снижению гидрофобности минералов [25]. Гидрофобизация минералов цинка ксантогенатами, аэрофлотами и жирными кислотами приводит к увеличению краевого угла смачивания и лиофильности поверхности минерала [26]. Наряду с ионогенными собирателями в качестве гидрофобизаторов поверхности минералов при флотации находят применение различные типы аполярных и слабополярных реагентов [27].

В сложных системах с переменным составом водной фазы расчет поверхностной энергии твердых веществ затруднителен и требуемая величина может определяться экспериментально на основе результатов измерений краевого угла смачивания поверхности различными жидкостями. Краевой угол смачивания находится соотношением сил поверхностного натяжения на границах раздела трех основных фаз, в нашем случае алмаза или люминофора (твердой фазы), водной фазы и органической жидкости (рис. 4а). Используемая методика измерения краевых углов смачивания несколько отличалась от классической [15] и включала последовательные операции смачивания минерального шлифа водной средой с формированием тонкого пограничного слоя, нанесение на смоченный шлиф капли органической жидкости, повышение уровня жидкости в кювете, фотографирование образца. В принятой методике использован динамический режим формирования краевого угла, обеспечиваемый изменением формы капли в водной среде и приближением ее к сферической при заполнении кюветы водной фазой (рис. 4б).

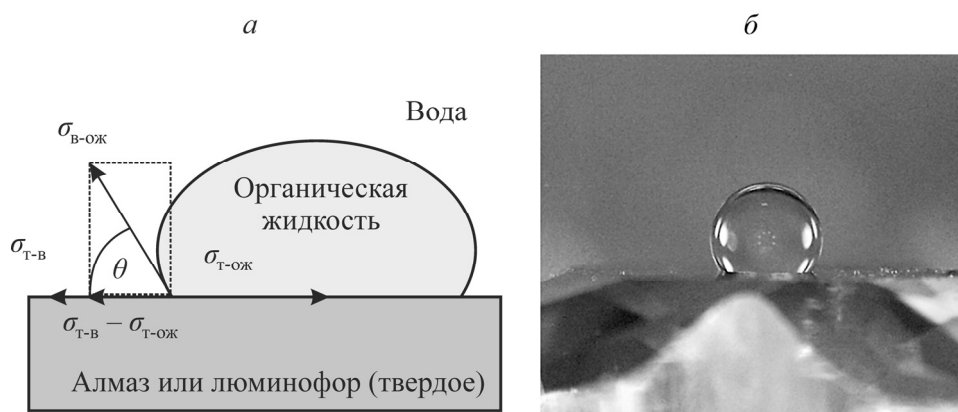


Рис. 4. Принципиальная схема формирования краевого угла смачивания θ как равнодействующей сил поверхностного натяжения (а) и изображение капли органического вещества на поверхности алмаза в водной среде (б): $\sigma_{Т-В}$ — поверхностное натяжение на границе “твердое – вода”; $\sigma_{Т-ОЖ}$ — поверхностное натяжение на границе “твердое – органическая жидкость”; $\sigma_{В-ОЖ}$ — поверхностное натяжение на границе “вода – органическая жидкость”

Краевой угол смачивания связан с энергетическими параметрами поверхностей по уравнению закона Юнга [18]: $\theta = \arccos[(\sigma_{\text{т-в}} - \sigma_{\text{т-ож}}) / \sigma_{\text{в-ож}}]$. Значения поверхностного натяжения для границ раздела фаз жидкостей рассчитывались как разность поверхностных натяжений границ раздела “вещество–пар” (правило Антонова) [7]: $\sigma_{\text{в-ож}} = \sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{ож}}$. Для границ “твердое–жидкое” правило Антонова неприменимо, так как невозможно измерить значения поверхностного натяжения для твердых веществ в условиях обычных температур (0–25 °С) [18]. Исходя из анализа известных методик, предложено оценивать поверхностную энергию смачивания методом Зисмана, согласно которому максимальное значение краевого угла смачивания достигается при формальном равенстве поверхностных энергий твердой фазы и органической жидкости [28].

Формальное равенство поверхностного натяжения органической жидкости и поверхностной энергии твердого вещества не означает равенство нулю поверхностного натяжения. При адсорбции или адгезии компенсируется лишь часть энергии поверхности обеих фаз и поверхностное натяжение границы раздела достигает не нулевого значения, а минимума. Зависимость поверхностного натяжения на границе раздела фаз “твердое–жидкое” будет иметь минимум в области формального равенства поверхностных энергий фаз, а трехфазный краевой угол смачивания в системе “минерал–органическая жидкость–водная фаза” будет достигать максимального значения, называемого критическим поверхностным натяжением [28].

Связь интенсивности смачивания с поверхностной энергией компонентов гетерогенной системы проверена экспериментальными исследованиями — измерениями краевых углов смачивания алмаза и сульфида цинка, представляющего собой основу люминофора Э-515-115, каплями органической жидкости в водной среде. Экстремальный характер зависимости краевого угла смачивания от поверхностного натяжения органической жидкости подтвержден экспериментально. Максимального значения краевого угла смачивания для алмаза достигает в интервале энергий поверхности органической жидкости 28–47 мДж/м². Наибольший краевой угол смачивания сульфида цинка наблюдается при использовании органических жидкостей с поверхностной энергией 31–52 мДж/м² (рис. 5). Аппроксимационные уравнения по координате максимума зависимости краевого угла смачивания позволяют оценить поверхностную энергию алмаза в 34 мДж/м², а поверхностную энергию сульфида цинка — 43 мДж/м².

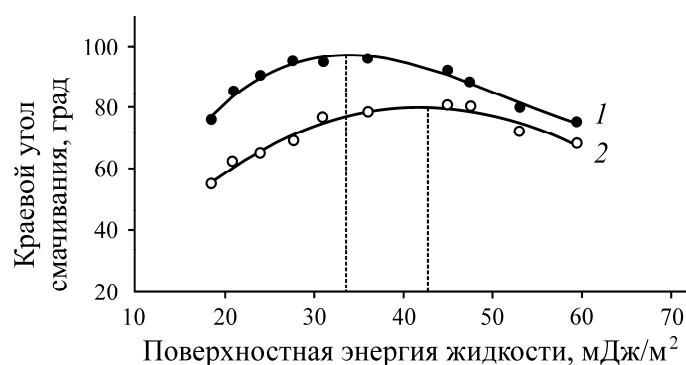


Рис. 5. Зависимость краевого угла смачивания алмаза (1) и сульфида цинка — основы люминофора Э-515-115 (2) от поверхностной энергии органической жидкости (гексан, бензин, керосин, гексадекан, дизельное топливо, пиридин, машинное масло, мазут, формамид, глицерин)

ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ КАК ОСНОВЫ ЛЮМИНОФОРСОДЕРЖАЩЕЙ КОМПОЗИЦИИ

При реализации технологии модифицирования спектральных характеристик алмазов люминофорсодержащими композициями важное условие эффективности процесса — правильный выбор используемой в качестве коллектора люминофоров органической жидкости. Выбор органической жидкости как основы люминофорсодержащей композиции предполагает существенное отличие ее поверхностной энергии от энергии воды. Одновременно полагается соблюдение принципа уравнивания полярностей на границе раздела фаз (принцип Ребиндера), когда наибольшей адсорбционной или адгезионной способностью характеризуется вещество с промежуточной полярностью относительно адсорбента и раствора. При высокой гидрофобности алмаза, люминофоров и коллектора система “алмаз – люминофор – органический коллектор” будет весьма устойчивой. Требуемый результат можно получить физико-химической модификацией свойств минералов и применением добавок, активирующих адгезию органического коллектора на люминофорах и алмазах. Для наилучшего адгезионного взаимодействия органической жидкости с алмазами и люминофорами целесообразно использовать вещество с поверхностной энергией, наиболее близкой к поверхностной энергии минералов. Это обеспечивает минимальное поверхностное натяжение границы раздела фаз и максимальное значение трехфазного угла смачивания, отождествляемое с максимальной лиофильностью алмазов и неорганических люминофоров.

Результаты анализа зависимости краевого угла смачивания алмаза и сульфида цинка от поверхностной энергии органической жидкости позволили рекомендовать в качестве коллектора люминофорсодержащей композиции органические вещества и нефтепродукты с энергиями поверхности 25 – 52 мДж/м² (гексадекан, дизельное топливо, машинное масло, мазут), при взаимодействии которых с поверхностью алмаза и люминофора возможно максимальное увеличение силы гидрофобных взаимодействий, отождествляемых с максимальными значениями краевого угла смачивания. Справедливость сделанных выводов подтверждена результатами экспериментов по изучению взаимодействия капель люминофорсодержащей композиции, состоящей из органической жидкости и экстрагированного в ней люминофора, с кристаллами алмаза и зернами кимберлита. В случае использования в качестве коллектора гексадекана обеспечивается удерживание люминофора и экстракция кристаллов алмаза внутрь капель композиции (рис. 6а). При этом сохраняется требуемая селективность процесса, заключающаяся в отсутствии гидрофобного взаимодействия, адгезии и объемной экстракции зерен кимберлита на поверхность или внутрь капель люминофорсодержащей композиции (рис. 6б). Агрегаты алмазов и люминофорсодержащей композиции сохраняют устойчивость после подсушивания и разделяются на отдельные кристаллы только при механическом воздействии (рис. 6в).

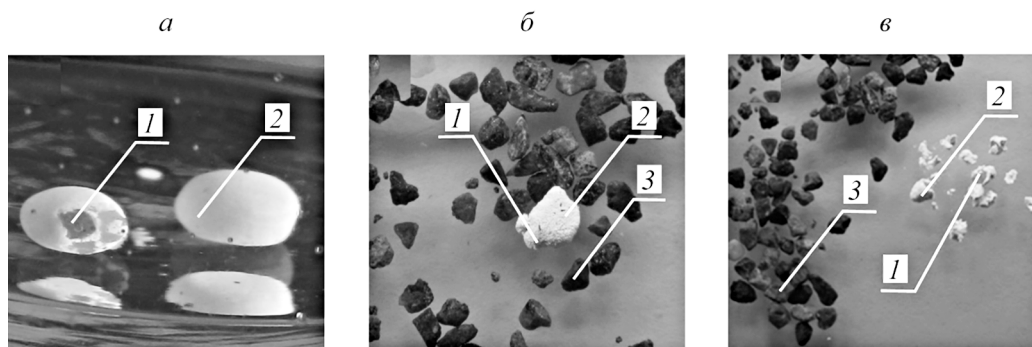


Рис. 6. Агрегат алмазов с каплями люминофорсодержащей композиции в водной фазе (а), подсушенный (б) и после механического разрушения (в): 1 — кристаллы алмазов; 2 — люминофорсодержащая композиция; 3 — зерна кимберлита

Аналогичный результат получен при обработке смеси алмазов и минералов кимберлита композицией неорганических люминофоров ФЛ-530 и Э-515-115 с антраценом в дизельном топливе (ДТ). В процессе эксперимента также достигалась высокая устойчивость люминофорсодержащей композиции и хорошая адгезионная способность органической жидкости к алмазу. Как и в случае применения гексадекана, объемная экстракция алмазов каплями коллектора органической жидкости не сопровождалась захватом минералов кимберлита. При использовании в качестве коллектора машинного масла и мазута наблюдалась как экстракция в объем капли органического коллектора и удерживание в ней люминофора, так и последующее закрепление композиции на алмазах.

Выбираемый состав органической жидкости не должен обладать выраженными эффектами поглощения рентгеновского и светового излучения, а также эффектом гашения рентгенолюминесценции. Такие требования делают затруднительным использование темных нефтепродуктов (например, мазутов). Композиции люминофоров ФЛ-530 и антрацена с мазутом характеризуются меньшей интенсивностью люминесценции (меньшими амплитудами быстрой и медленной компонент) относительно композиций на основе дизельного топлива при одинаковом количестве люминофоров в композиции (табл. 2). Однако высокомолекулярные фракции нефти обладают высокими адгезионными свойствами по отношению к алмазам, что делает целесообразным их добавление в органические коллекторы. Смесь дизельного топлива и мазута в соотношении 4:1 обеспечивает необходимую эффективность модифицирования спектрально-кинетических характеристик несветящихся алмазов (табл. 2). Подтверждена перспективность применения компаундных коллекторов, состоящих из смеси органических жидкостей, соответствующих требованиям по экстракционно-адгезионным свойствам и не ухудшающих спектрально-кинетические характеристики люминофоров.

ТАБЛИЦА 2. Спектрально-кинетические характеристики люминофорсодержащих композиций из ФЛ-530 и антрацена в дизельном топливе и мазуте Ф-5 и результаты диагностики обработанных алмазов на сепараторе «Полус-М»

Состав органического коллектора	Свертка	Отношение амплитуд компонент	Постоянная времени затухания, мс	Амплитуда компоненты, мВ		Результат идентификации	
				медленной	быстрой	Коллективный режим	Селективный режим
Люминофорсодержащая композиция							
ДТ	0.64	1.9	3.6	7333	6937	—	—
Мазут Ф-5	0.44	2.0	3.0	1230	2251	—	—
Смесь мазута Ф-5 и ДТ (1:4)	0.60	1.0	3.8	6360	5022	—	—
Обработанные алмазы							
ДТ	0.58	1.2	2.8	233	331	Обнаружен	Обнаружен
Мазут Ф-5	0.56	1.1	3.2	43	125	Не обнаружен	Не обнаружен
Смесь мазута Ф-5 и ДТ (1:4)	0.57	1.0	3.8	183	330	Обнаружен	Обнаружен

Полученные результаты устанавливают возможность и целесообразность применения в качестве основы люминофорсодержащей композиции — оптически прозрачных слабополярных органических жидкостей с энергией поверхности 28–45 мДж/м², таких как дизельное топливо, минеральные нефтяные масла, гексадекан и др., а также их смесей.

ВЫВОДЫ

Установлен механизм закрепления люминофорсодержащей композиции (смеси люминофоров и органической жидкости) на поверхности кристалла алмаза, заключающийся в формировании в процессе гидрофобного взаимодействия в полярной среде устойчивых агрегатов алмаза, органической жидкости и неорганического люминофора. Устойчивость таких агрегатов обеспечивается интенсивным адгезионным взаимодействием алмазов, органической жидкости и люминофоров и достигается при максимальных значениях трехфазного краевого угла смачивания.

Экспериментально определено, что высокая эффективность экстракции люминофоров органической жидкостью и адгезия люминофорсодержащей композиции на алмазах достигается при существенном различии энергий смачивания алмазов и люминофоров водной и органической фазами при близких значениях поверхностной энергии люминофоров и органической жидкости.

Теоретически и экспериментально подтверждено, что наиболее эффективной основой люминофорсодержащей композиции являются оптически прозрачные слабополярные органические жидкости с энергией поверхности $28 - 45 \text{ мДж/м}^2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Морозов В. В., Яковлев В. Н., Ковальчук О. Е., Подкаменный Ю. А. Экспериментальное обоснование состава люминофорсодержащих композиций для извлечения не люминесцирующих алмазов // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 128–136.
2. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Морозов В. В., Ковальчук О. Е., Подкаменный Ю. А., Яковлев В. Н. Исследование механизма и выбор режимов селективного закрепления люминофорсодержащей эмульсии на алмазах // ФТПРПИ. — 2020. — № 4. — С. 104–113.
3. Tanford C. The hydrophobic effect, N. Y., Wiley, 1980. — 200 p.
4. Tsao Y., Yang S. X., and Evans D. F. Interaction between hydrophobic surfaces. Dependence on temperature and alkyl chain length, Langmuir, 1991, Vol. 7, No. 12. — P. 3154–3159.
5. Пчелин В. А. Гидрофобные взаимодействия в дисперсных системах. — М.: Знание, 1976. — 64 с.
6. Griffith J. H. and Scheraga H. A. Statistical thermodynamics of aqueous solutions. I. Water structure, solutions with non-polar solutes, and hydrophobic interactions, J. Molecular Structure: Theoretical, 2004, Vol. 682. — P. 97–113.
7. Дерябин В. А., Фарафонтова Е. П. Физическая химия дисперсных систем: учеб. пособие под ред. Е. А. Кулешова. — М.: Юрайт, 2018. — 86 с.
8. Гуревич И. Л. Общие свойства и первичные методы переработки нефти и газа. Ч. 1. — М.: Химия, 1972. — 359 с.
9. Галламова А. Е. Зависимость поверхностного натяжения от температуры на различных границах раздела фаз // Вест. науки. — 2010. — № 5. — С. 174–180.
10. Новый справочник химика и технолога: общие сведения. Строение вещества. Физические свойства важнейших веществ. Ароматические соединения. Химия фотографических процессов. Номенклатура органических соединений. Техника лабораторных работ. Основы технологии. Интеллектуальная собственность / Е. Е. Бибик, Л. М. Быкова, В. Г. Вавилов и др. — СПб.: Профессионал, 2006. — 1463 с.

11. **Amr Gazem, Rabeeh M. D., Shahbaz M. D., Muath Laheb, Srikanth Kumar, and Dr. A. Rajesh Kanna.** Surface and interfacial tension for various liquids, *Int. Refereed J. Eng. Sci. (IRJES)*, 2018, Vol. 7, Issue 1. — P. 64–66.
12. **Lange's handbook of chemistry**, 17th ed. by James Speight, McGraw-Hill Education, 2016. — 1104 p.
13. **Мелик-Гайказян В. И., Емельянова В. М., Моисеев А. А., Емельянов В. В., Емельянова Н. П., Юшина Т. И., Кулешова М. А.** О капиллярном механизме действия реагентов при пенной флотации, развитии методов его исследования и подбора реагентов // *ГИАБ*. — 2008. — № 9. — С. 228–235.
14. **Виноградова Г. Н., Захаров В. В.** Основы микроскопии. Ч. 2. — СПб.: Университет ИТМО, 2020. — 248 с.
15. **Киселев М. Г., Савич В. В., Павич Т. П.** Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях // *Наука и техника*. — 2006. — № 1. — С. 38–41.
16. **Demchenko A. P.** Introduction to fluorescence sensing. Volume 1: Materials and devices, N. Y., Springer, 2020. — 673 p.
17. **Сепаратор “Полюс-М”.** Паспорт и инструкция по эксплуатации. — СПб.: АО “Буревестник”, 2018. — 134 с.
18. **Сумм Б. Д.** Основы коллоидной химии. — М.: Академия, 2009. — 239 с.
19. **Островская Л. Ю., Пашинин А. С., Ральченко В. Г., Бойнович Л. Б., Ашкинази Е. Е., Большаков А. П.** Смачивание низкоиндексных граней алмаза: динамические измерения // *Журн. физ. химии*. — 2014. — Т. 88. — № 5. — С. 822–829.
20. **Ostrovskaya L. Yu., Ral'chenko V. G., Vlasov I. I., Khomich A. A., and Bol'shakov A. P.** Hydrophobic diamond films, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2013, Vol. 49. — P. 325–331.
21. **Ostrovskaya L. Yu., Dementiev A. P., Kulakova I. I., and Ralchenko V. G.** Chemical state and wettability of ion-irradiated diamond surfaces, *Diamond Related Materials*, 2005, Vol. 14. — P. 486–490.
22. **Hansen J. O., Copperthwaite R. G., Derry T. E., and Pratt J. M.** A tensiometric study of diamond (111) and (110) faces, *J. Colloid Interface Sci.*, 1989, Vol. 130, No. 2. — P. 347–358.
23. **Jung M.** Critical surface tension of sulfide minerals, *Materials Sci. J. Korean Society Mineral Energy Res. Eng.*, 2019, Vol. 56, No. 6. — P. 605–612.
24. **Ozcan O.** Classification of minerals according to their critical surface-tension of wetting values, *Int. J. Miner. Proc.*, 1992, Vol. 34, No. 3. — P. 191–204.
25. **Колмачихина Э. Б., Луговицкая Т. Н., Наумов К. Д.** Статические краевые углы смачивания воды и серы на поверхности сульфида цинка, модифицированной анионноактивными поверхностно-активными веществами и их композициями // *Цв. металлы*. — 2021. — № 4. — С. 29–34.
26. **Со Ту.** Повышение эффективности флотации сфалерита из медно-цинковых руд тиольными собирателями на основе анализа кинетики и фракционной селективности минерализации воздушно-дисперсной фазы: дис. ... канд. техн. наук, 2016. — 111 с.
27. **Морозов В. В., Пестряк И. В., Эрдэнэзуул Ж.** Влияние концентрации неионогенного собирателя — аллилового эфира амилксантогеновой кислоты на флотацию медно-молибденовых руд // *Цв. металлы*. — 2018. — № 11. — С. 14–20.
28. **Zisman W. A.** Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution, *Advances in Chemistry*, 1964, Vol. 43. — P. 1–51.

Поступила в редакцию 21/I 2022

После доработки 10/II 2022

Принята к публикации 14/III 2022