

Е.В. СЕМЕНЕНКО, д-р техн. наук,
С.А. РЫЖОВА, Т.Д. ДЕМЧЕНКО

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА УРОВНЕЙ ДЕТАЛИЗАЦИИ СВОЙСТВ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЙ

Актуальная для отечественной экономики необходимость снижения себестоимости продукции, на фоне ухудшения качества минерального сырья и повышения требований к экологической безопасности, делает необходимым модернизацию производства, основанную на снижении его энергоемкости. Для геотехнологических систем наиболее рациональным решением в этом случае является повышение эффективности процессов приготовления и транспортирования структурированных суспензий. Параметры и режимы обоих этих процессов в значительной мере зависят от реологических параметров суспензий, которыми, в свою очередь, можно управлять, изменяя свойства смешиваемых компонентов. Это возможно если известны зависимости начального напряжения сдвига и эффективной вязкости готовой суспензии от свойств твердой и жидкой фаз с учетом особенностей геотехнологических систем. Отечественные и зарубежные исследователи в области транспортирования структурированных суспензий (СС) не рассматривают вопрос зависимости реологических характеристик от свойств их компонентов. Обычно исследуется влияние структурной вязкости и начального касательного напряжения суспензии на гидравлические параметры установки. В таких случаях вопросы идентификации реологических параметров считался второстепенным, следовательно, анализ и обобщение полученных результатов не был обязательным. Аналогичный подход был характерен в исследованиях специалистов по обогащению минерального сырья и переработке техногенных россыпей. В этих работах можно найти только разрозненную информацию по данному вопросу. Таким образом, обобщенных исследований и анализа известных результатов по данной тематике для условий геотехнологических систем не проводилось. Результатом такого обобщающего анализа могла бы быть структурная схема, отражающая влияние различных свойств твердой и жидкой фазы, на плотность смеси, ее начальное касательное напряжение и эффективную вязкость, учитывающую различные уровни детализации свойств СС.

Целью статьи является проведение указанного обобщающего исследования известных результатов и разработка соответствующей структурной схемы уровней детализации свойств СС.

При этом наиболее актуальной проблемой для отечественных геотехнологических систем является снижение энергоемкости транспортирования полезного ископаемого и техногенного влияния на окружающую среду, а также повышение ресурсосбережения и экологической безопасности. Отличительной

Загальні питання технології збагачення

особенностью СС является практически одинаковая величина массовой и объемной доли твердой и жидкой фаз. При этом массовая доля твердой фазы может быть большей или равной доли жидкости, а объемная доля твердых частиц – меньше или равной соответствующей доли жидкой фазы. СС относятся к гидросмесьям высокой концентрации, для которых объемная доля твердого материала изменяется от 30 до 50% [1-5].

Таким образом, объемная доля твердой фазы СС сверху ограничена плотной упаковкой твердых частиц, характерной для пористых сред, образуемых из сыпучих дисперсных материалов, а, минимальное значение этой величины пока что ни чем не обосновывается. Граничные величины массовых долей твердой фазы для СС получаются из объемных по известным формулам пересчета, с учетом плотностей обеих фаз (рис. 1, 2):

$$C = \frac{C'}{1 + Ar(1 - C')}, \quad (1)$$

$$C' = \frac{(1 + Ar)C}{1 + ArC}, \quad (2)$$

$$Ar = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}, \quad (3)$$

где C – объемная доля твердой фазы в СС; C' – массовая доля твердой фазы в СС; Ar – параметр Архимеда; ρ_s – средневзвешенная плотность частиц твердой фазы; ρ_0 – плотность жидкой фазы.

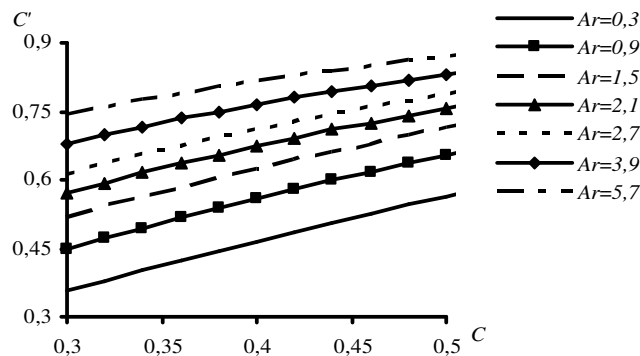


Рис. 1. Зависимость массовой концентрации СС от ее объемной концентрации при различных значениях параметра Архимеда

Из рис. 1 видно, что максимально допустимые значения массовой концентрации СС достигают от 75 до 80 %. При этом, большим плотностям твердой фазы соответствует большее различие между рассматриваемыми величинами, а с увеличением объемной концентрации СС это различие уменьшается (рис. 2).

Загальні питання технології збагачення

Концентрация и плотность твердой фазы являются наиболее распространенными характеристиками, которые специалисты учитывают при рассмотрении свойств СС [2, 3, 5, 6]. Эти параметры, совместно с плотностью и кинетическим коэффициентом вязкости жидкой фазы, составляют характеристики первого уровня детализации (рис. 3).

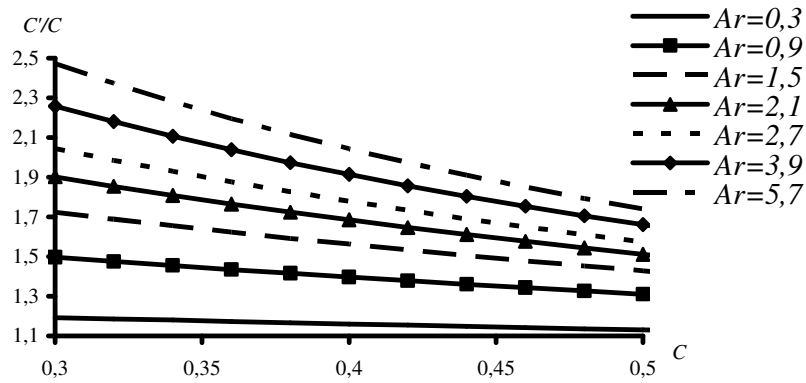


Рис. 2. Зависимость отношения массовой к объемной концентраций СС от объемной концентрации при различных значениях параметра Архимеда

Первые известные экспериментальные исследования реологических характеристик СС ориентировались на установление зависимостей эффективной вязкости (ВЭ) и начального касательного напряжения (НКН) от концентрации твердой фазы [2, 3, 5]. Эти исследования проводились в различных областях, поэтому и частицы твердой фазы имели разную плотность.

То есть, если обобщать результаты исследований по разным областям, таким как: тампонажные растворы, меловые суспензии, гидротранспорт угольного топлива, складирование отходов обогащения (ОО) руд в виде пасты, то можно установить зависимость реологических характеристик (РХ) СС, от плотности твердого материала. Хотя специальных исследований вопроса зависимости НКН и ВЭ от плотности твердых частиц не проводилось. В большей части методов расчета РХ, работающих на первом уровне детализации, химический состав твердой фазы практически не учитывается, так как плотность частиц учитывается только при определении средневзвешенной плотности твердого материала.

Следующим уровнем детализации характеристик СС является учет влияния гранулометрического состава твердой фазы на плотность, НКН и ЭВ суспензии (рис. 3). Первые исследования проводились с СС из частиц фракций узкого диапазона крупности. Как правило, для приготовления суспензии, обладающей структурными свойствами, использовались частицы с крупностью менее 100 мкм или 0,076 мм, которые обеспечивают появление вязкопластических свойств смеси. В этом случае изменение концентрации СС автоматически сопровождалось изменением в ней частиц этих фракций. Такая ситуация была нарушена при попытках транспортирования кусковых фракций угля в СС, а также при складировании ОО руд с концентрацией пасты. В этих

Загальні питання технології збагачення

случаях, когда материал твердой фазы был существенно полидисперсным, изменение концентрации СС приводило к увеличению доли всех фракций, и для различных гранулометрических составов были получены различные типы зависимостей РХ от концентрации суспензии. Кроме того, для различных гранулометрических составов различной оказалась предельно возможная концентрация СС, а, следовательно, и ее плотность [2].

Как показали исследования отечественных и зарубежных авторов [2, 5], наиболее существенным свойством гранулометрического состава твердой фазы, влияющим на РХ СС является содержанием частиц с крупностью 0,076 мм. Недостаточное количество этих фракций приводит к отсутствию у суспензии вязкопластических свойств, а соотношение массовых долей этих частиц и остальных фракций гранулометрического состава определяет величины НКН и ЭВ [2, 7].

Влияние соотношения фракций гранулометрического состава твердой фазы СС на ее плотность и предельно возможную концентрацию, некоторые авторы [2, 5] объясняют возможностью формирования структуры из крупных твердых частиц, между которыми размещаются более мелкие. Из чего делается вывод об оптимальности бимодального гранулометрического состава. Другие авторы [8-10], считают, что бимодальность гранулометрического состава определяется выбранными методами дробления и измельчения твердого материала, которые обеспечивают необходимое для проявления у суспензии вязкопластических свойств содержание в материале частиц крупностью 0,076 мм.



Рис. 3. Структурная схема уровней детализации свойств СС

Загальні питання технології збагачення

Ряд авторов, исследовавших РХ СС на основе ОО руд различных металлов предлагают характеризовать вязко-пластические свойства содержанием в материале частиц крупностью 0,076 мм. В этих случаях нет задачи приготовления твердой фракции с бимодальным гранулометрическим составом. Эта задача существует при приготовлении СС на основе углей, антрацитов и угольных шламов и ОО углей. Для этих условий некоторые авторы предлагают характеризовать бимодальность гранулометрического состава твердой фазы СС соотношением суммарных содержаний частиц, приходящихся на каждую из мод [2, 5]:

$$\Gamma = \frac{P_{-0,08}}{P_{+0,08}}, \quad (4)$$

где Γ – параметр, характеризующий бимодальность гранулометрического состава твердой фазы СС; $P_{-0,08}$ – доля частиц твердой фазы СС крупностью менее 0,08 мм; $P_{+0,08}$ – доля частиц твердой фазы СС крупностью более 0,08 мм.

Однако, оба подхода являются равнозначными, поскольку учитывая соотношение:

$$P_{+0,08} = 1 - P_{-0,08}, \quad (5)$$

выражение (4) преобразуется в однозначную зависимость от доли частиц твердой фазы СС крупностью менее 0,08 мм (рис. 4)

$$\Gamma = \frac{P_{-0,08}}{1 - P_{-0,08}}. \quad (6)$$

Рассмотренные выше два уровня детализации свойств СС могут использоваться для характеристики свойств гидросмесей низкой, средней и высокой концентрации. Для суспензий низкой концентрации учет свойств гранулометрического состава сводится к выбору математической модели для описания зависимости параметров гидротранспорта от концентрации. Для не структурированных суспензий влияние гранулометрического состава будет состоять не в проявлении вязко-пластических свойств, а в появлении нелинейных эффектов в зависимостях гидравлического уклона и критической скорости гидротранспортирования от концентрации [4].

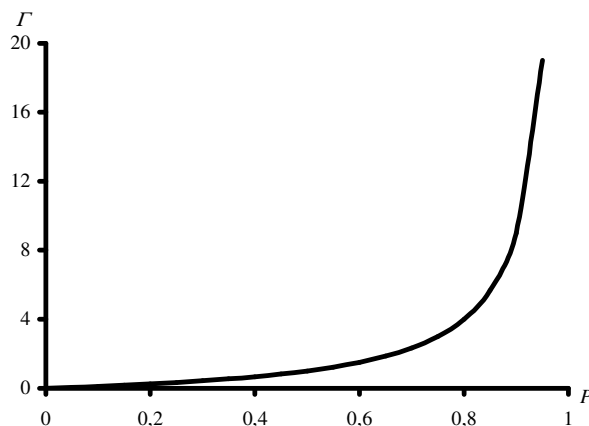


Рис. 4. Залежність величини G від доли частиц твердої фази СС крупністю менше 0,08 мм

Для методів розрахуку РХ, що працюють на другому рівні деталізації, щільність частиц враховується як при визначенні середневзвешеної щільності твердого матеріалу, так і при розрахуку гідрравлічної крупності. Це дозволяє для суспензій середньої концентрації, утворених з полідисперсних частиц з суттєвою різницею в щільностях, коректувати їх розподіл за типами частиц, для яких передбачені різні формули розрахуку параметрів гідротранспорту [1, 4, 10].

Третій рівень деталізації властивостей суспензій присущ тільки СС (рис. 3), оскільки характеризує і пояснює суголбо реологічні характеристики суспензії, враховує фізико-хімічне взаємодія між фазами, а також проявлення електрогідродинамічних ефектів [1, 2, 5, 10, 11].

На цьому рівні деталізації, хімічний склад твердої фази має першостепенне значення, однак, напередодні всього, враховується не щільність частиц, яка по-прежнему впливає на середневзвешену щільність і масову концентрацію СС, найбільш суттєвими стають поверхнісні і адсорбційні властивості твердих частиц. Так же суттєвими на третьому рівні деталізації стають властивості рідинної фази, що характеризують процес утворення подвійного електрокінетичного шару, а також властивості поверхнісно активних речовин (ПАВ) і пластифікуючих домішок, що впливають на розглядавані процеси [4, 10, 11].

Характерним для методів третього рівня деталізації є відмова від реологічних моделей, які розглядають СС як однофазні в'язкіє середовища, РХ яких визначаються тільки контактними взаємодіями частиц [10]. Замість цього пропонується вважати, що СС при розрахуку РХ слід розглядати як двохфазні системи, в'язкість яких визначає вільна частина дисперсійного середовища, не включена всередині агрегатів частиц і не приєднана будь-яким чином до самих частиц [10].

Іменно на третьому рівні деталізації найбільш сильно проявляються умови, що характеризують особливості застосування СС в геотехнологічних системах – це властивості поверхнісної частиц, що складають тверду фазу. В

Загальні питання технології збагачення

отличии от кварцевого песка, ОО руд, и даже от глини угли имеют сложную структуру, степень метаморфизма, плотность, а состав углей индивидуален для каждого месторождения [12-14].

Международная классификация каменных углей и антрацитов принята в 1956 г. Комитетом по углю Европейской экономической комиссии ООН. В 1956-1980 г.г. в СССР были введены в действие, так называемые, "бассейновые" типовые классификации углей, для основных каменноугольных бассейнов и экономических районов. Угли в каждом бассейне подразделялись на технологические марки и группы по близости генетических особенностей и основных энергетических и технологических свойств [12-14]. Современная классификация углей построена по кодовой системе. Бурые, каменные угли и антрациты в зависимости от их технологических свойств (класс, категория, тип и подтип) объединяют в технологические марки, группы и подгруппы. При этом тип угля фактически равен величине его V^{daf} , то есть выходу летучих на сухое беззольное топливо, для антрацитов – величине его V^{daf} деленной на 10. Эти показатели устанавливаются для каждого пласта. По результатам анализов определяют кодовый номер. Угли различных кодовых номеров со сходными технологическими свойствами в основных процессах переработки объединены в технологические марки, группы, подгруппы. Всего выделено 17 марок, при этом для бурых углей и антрацитов – по одной марке (соответственно Б и А), для каменных 15: длиннопламенные (Д), длиннопламенные газовые (ДГ), газовые (Г), газовые, жирные, отошённые (ГЖО), газовые жирные (ГЖ), жирные (Ж), коксовые жирные (КЖ), коксовые (К), коксовые отошённые (КО), коксовые слабо-спекающиеся (КС), отошённые спекающиеся (ОС), тощие спекающиеся (ТС), слабоспекающиеся (СС), тощие (Т).

Каждой из марок угля можно поставить в соответствие степень метаморфизма и диапазон изменения V^{daf} (табл. 1). Известно, что от степени их метаморфизма, которая характеризуется величиной V^{daf} , зависит удельный вес, цвет, скорости ультразвука, упругость и прочность углей (табл. 2, рис. 5) [12-14].

Таблица 1

Зависимость удельного веса углей от вещественного состава и выхода летучих [12-14]

| Марка угля | Удельный вес | V^{daf} , % | Стадия метаморфизма |
|------------|-----------------|---------------|---------------------|
| Г | 1,27 | ≥ 35 | каменные I – II |
| ПЖ | от 1,27 до 1,29 | 30 | каменные II – IV |
| К | от 1,30 до 1,33 | 20 | каменные IV – V |
| ПС | 1,34 | 18 | каменные V – VI |
| Т | от 1,35 до 1,39 | 12 | каменные VI |
| А | 1,45 | < 8 | антрациты VII – X |

Классификация углей по Н.И. Сарбеевой [12-14]

| Номер группы | V^{daf} , % | Цвет черты |
|--------------|---------------|-------------------------------|
| 1 | от 41 до 49 | Коричнево-бурый |
| 2 | от 35 до 40 | Коричневый |
| 3 | от 18 до 30 | Темно-коричневый |
| 4 | от 12 до 70 | Черный (слегка сероватый) |
| 5 | от 5 до 11 | Темно-серый |
| 6 | от 1 до 4 | Интенсивно-черный бархатистый |

Выход летучих веществ – это относительное количество газов и пара, образующихся при разложении угля от нагревания без доступа воздуха. Летучие представлены газами CO, CO₂, H₂, углеводородами, сернистым газом, паром и др. Количество и состав летучих веществ зависит от петрографического состава, степени углефикации и первичной восстановленности, от количества и состава минеральных примесей, которые при термическом воздействии разлагаются и выделяют углекислоту, сернистый газ, пар и другие газообразные продукты, искажающие газовые составляющие органической массы.

В бурых углях выход летучих составляет от 40 до 67%, в антрацитах – от 1 до 2%. Особенно детально дифференцируются каменные гумусовые угли с V^{daf} от 14 до 35%.

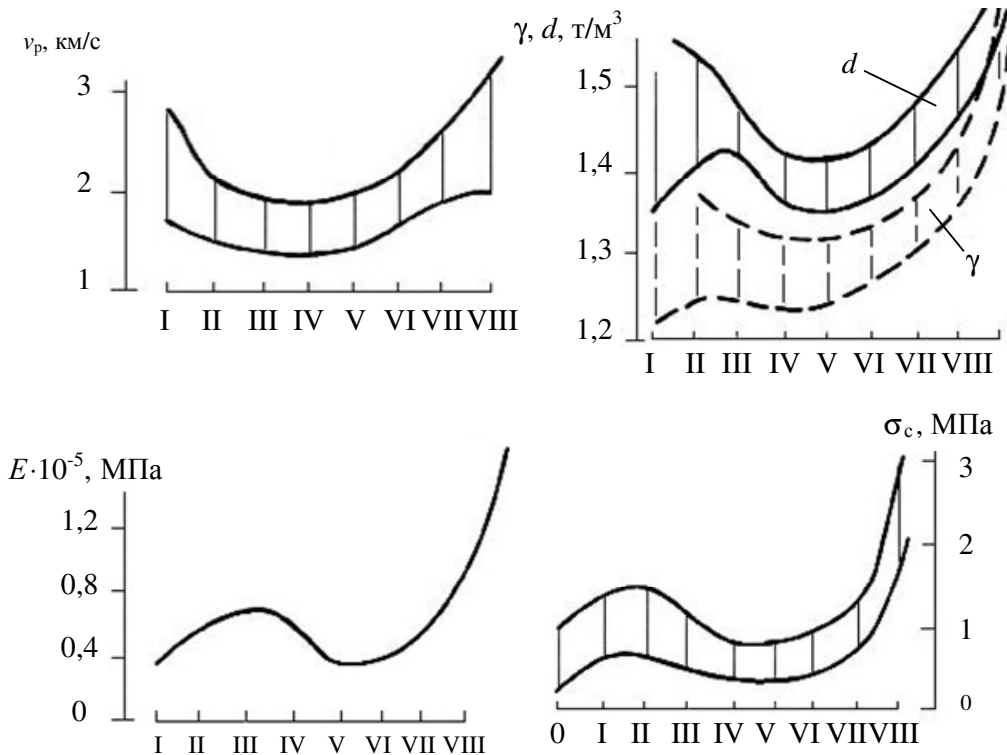


Рис. 5. Изменение скорости ультразвука v_p , плотности d , γ , упругости E и прочности σ_c в углях разной стадии метаморфизма [12-14]

Загальні питання технології збагачення

Для углей марок Б, Д, Г V^{daf} во многом определяется составом угля, особенно содержанием лейптинита, а также степенью первичной восстановленности. Колебания составляют от 5 до 10 %. Международная система классификации углей определяет код угля в зависимости от класса, группы и подгруппы. Класс определяется выходом летучих на сухое беззольное топливо V^{daf} (табл. 3) [12-14].

Таблица 3

Подразделение каменных углей на классы в международной системе классификации [12-14]

| Класс углей | Выход летучих на сухое беззольное топливо V^{daf} , % |
|-------------|---|
| 1A | от 3 до 6,5 |
| 1B | от 6,5 до 10 |
| 2 | от 10 до 14 |
| 3 | от 14 до 20 |
| 4 | от 20 до 28 |
| 5 | от 28 до 33 |
| 6 | от 33 до 41 |
| 7 | от 33 до 44 |
| 8 | от 35 до 50 |
| 9 | от 42 до 50 |

Таким образом, выход летучих V^{daf} является основным классификационным параметром ископаемых углей по маркам и используется для оценки степени метаморфизма. Именно этот параметр ряд исследователей предлагает использовать при расчетах РХ СС, применяемых в геотехнологических системах [2].

Таким образом, методы, описывающие зависимости реологических параметров структурированных суспензий от свойств твердой и жидкой фаз, можно разделить на три уровня детализации. При этом к методам первого уровня относятся методы, учитывающие наиболее распространенные свойства: концентрация и плотность твердой фазы, а также плотность и кинетический коэффициент вязкости жидкой фазы. Методы следующего уровня учитывают влияние гранулометрического состава и различия в плотности частиц твердой фазы на плотность и реологические характеристики суспензии. Методы третьего уровня учитывают физико-химическое взаимодействие между фазами, а также проявление электрогидродинамических эффектов, которые зависят от водородного показателя жидкой фазы, содержания в ней солей и активных веществ, абсолютной диэлектрической проницаемости, потенциала двойного электрического слоя диффузных частиц, константы Гамакера.

При описании реологических характеристик СС, приготовленных на основе угля и отходов углеобогащения, выход летучих веществ на зольную массу угля является основным параметром, характеризующим влияние свойств угольных частиц.

Список литературы

1. Булат, А.Ф. Модели элементов гидротехнических систем горных предприятий / **Збагачення корисних копалин, 2014. – Вип. 58(99)-59(100)**

Загальні питання технології збагачення

- А.Ф. Булат, О.В. Витушко, Е.В. Семенов. – Днепропетровск: Герда, 2010. – 216 с.
2. Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
 3. Александров, В.И. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации / В.И. Александров. – С.-Пб: СПГГИ (ТУ), 2000. – 117 с.
 4. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
 5. Мурко, В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водугольных суспензий: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.17.07 / Мурко В.И. – Новокузнецк: НГНПП Экотехника, 1999. – 289 с.
 6. Покровская, В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности / В.Н. Покровская. – М.: Недра, 1985. – 192 с.
 7. Ермолович, Е.А. Исследования реологических свойств закладочной пульпы / Е.А. Ермолович, А.А. Филенко // Горный информационно-аналитический бюллетень: Сб. науч. тр. / МГГУ. – М.: МГГУ, 2011. – № 9. – С. 9 – 11.
 8. Бовенко, В.Н. Применение автоколебательной теории разрушения для прогнозирования энергоемкости процесса измельчения твердых тел / В.Н. Бовенко, Л.Ж. Горобец // Доклады Академии наук СССР. – 1987. – Т. 292. – №5. – С. 106 – 111.
 9. Бовенко, В.Н. О проявлении дискретности твердых тел в процессе их измельчения / В.Н. Бовенко, Л.Ж. Горобец // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 292. – №5. – С. 1095 – 1100.
 10. Ходаков, Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование / Г.С. Ходаков // Российский химический журнал. – 2003. – т. XLVII, №2. – С. 33 – 44.
 11. Урьев, Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов / Н.Б. Урьев. – М.: Химия, 1988. – 256 с.
 12. Кафтанатий, А.Б. Ископаемые угли: учеб. пособие / А.Б. Кафтанатий, Г.С. Январев. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2001. – 45 с.
 13. ГОСТ 25543-88. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим параметрам. – Введ. 1990.01.01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1990. – 17 с.
 14. Гост 21489-76. Угли бурые, каменные и антрациты. Разделение на стадии метаморфизма и классы по показателю отражения витринита. – Введ. 1977.01.01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1977. – 48 с.

© Семенов Е.В., Рыжова С.А., Демченко Т.Д., 2014

*Надійшла до редколегії 14.08.2014 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. В.П. Надутим*