

УДК 552.574

С. І. КОЧЕТКОВ, завідувач відділу (Український державний геологорозвідувальний інститут), kochetkov_sergey@ukr.net, ORCID-0000-0001-5844-4307, **Ю. І. ВОЙТЕНКО**, д-р техн. наук, головний науковий співробітник (Український державний геологорозвідувальний інститут), voytenkou@gmail.com, ORCID-0000-0003-3077-2207

ПРО ПРИЧИНИ САМОЗАЙМАННЯ ВУГІЛЛЯ

О ПРИЧИНАХ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ

(Матеріал друкується мовою оригіналу)

Рассмотрены основные причины повышения температуры и склонности угля к самовозгоранию в естественном состоянии и после техногенного воздействия. Обращается внимание на влияние энергии деформирования и разрушения в условиях горного давления на дополнительное повышение температуры, а также влияние фрактальных свойств раздробленного угля на физико-химические процессы, способствующие повышению температуры. Влияние фрактальных свойств раздробленного угля на интенсивность физико-химических процессов проверено экспериментально. В экспериментах по высушиванию и контролю веса после пребывания на воздухе исследовали фракции угля размером от 10 до 0,2 мм и меньше. В опытах установлено, что фрактальные свойства разрушенного экспериментального материала обеспечиваются при раскалывании в шаровой мельнице и нарушаются при раздавливании в щековой дробилке.

Основной результат исследований:

- очаги самовозгорания приурочены к скоплениям фракций микронного и субмикронного масштаба, имеющим фрактальные свойства;
- процессы деформирования и разрушения угля в массиве и целиках являются дополнительным фактором повышения температуры.

Ключевые слова: самовозгорание угля, фрактальные свойства, энергия деформирования и разрушения.

S. I. Kochetkov, Ukrainian State Geological Research Institute, kochetkov_sergey@ukr.net, ORCID-0000-0001-5844-4307, **Yu. I. Voitenko**, Ukrainian State Geological Research Institute, voytenkou@gmail.com, ORCID-0000-0003-3077-2207

ON THE CAUSES OF SPONTANEOUS COMBUSTION OF COALS

The main reasons for temperature increase and tendency of coals to spontaneous combustion in the natural state and after the technogenic impact have been considered. Attention is drawn to the influence of the deformation and destruction energy in the conditions of mountain pressure on the additional increase in temperature, as well as on the influence of fractal properties of fractured coal on the physico-chemical processes, which contribute to the increase in temperature. The influence of fractal properties of fractured coal on the intensity of physico-chemical processes has been verified experimentally. In experiments on drying and weight control after being in the air, coal fractions of 10 to 0.2 mm and less were investigated. It has been established in the experiments that the fractal properties of the destroyed experimental material are ensured during crushing in a ball mill and are breached during crushing in a jaw crusher.

The main result of the research:

- fires of self-ignition are confined to clusters of fractions of micron and submicron scale, which have fractal properties;
- processes of deformation and destruction of coal in the massifs and the pillars are an additional factor in temperature increase.

Keywords: spontaneous combustion of coals, fractal properties, energy of deformation and fracture.

Поиск взаимосвязи между физико-химическими свойствами угля и его склонностью к возгоранию ведется не один десяток лет. Несмотря на заметные успехи в исследованиях механизмов самонагрева и самовозгорания угля, физического и математического моделирования развития очага самовозгорания в локальной зоне угленосного массива [3–6, 10], на текущий момент нет окончательного решения проблемы возникновения эндогенных пожаров и достаточно надежной системы критериев, отвечающих за прогноз возникновения и предупреждения этих опасных явлений. Предыдущими исследованиями было установлено [6], что источником самонагрева угля является его окисление. Под ним понимают взаимодействие органических веществ с кислородом воздуха, проходящее по радикально-цепному механизму через образование перекисных соединений. В работах ведущих специалистов, прежде всего Т. С. Пашковского и С. В. Грекова, приводятся данные, указывающие на зависимость концентрации кислорода в угле от таких факторов, как пористость, дробимость, фракционный состав, степень метаморфизма [4, 5, 10]. Они же акцентируют внимание на том, что у процесса окисления существует инкубационный период, а зависимость константы скорости

окисления угля (k) от температуры имеет резкий перегиб. С позиций физической химии при низкотемпературном окислении угля в шахтах имеют место: внешний приток кислорода, его внутренняя диффузия, внешняя и внутренняя адсорбция и хемосорбция, постоянный газообмен на обнаженных поверхностях, включая десорбцию O₂, CO₂, H₂O, CO [3, 5, 6]. В “Методических рекомендациях по определению склонности угля к самовозгоранию” [7] оцениваются и геологические факторы, способствующие самовозгоранию угля. К основным относят тектонические нарушения и связанное с ними разрушение и измельчение угля как в естественных условиях, так и в процессе разработки месторождения.

В лабораторных условиях мы попытались оценить характеристики угля, отвечающие за его предрасположенность к разрушению: прочность, дробимость и фрактальные свойства раздробленного материала. Напомним, что показателем фрактальности раздробленного материала является снижение насыпной плотности по мере уменьшения фракций в отличие от компактного распределения по фракциям, когда плотность не зависит от их размеров. Исследования по оценке склонности угля к самовозгоранию показали, что результат опытов зависит от способа подготовки проб к хроматографическим экспериментам – их дробления. Измельчение угля возможно двумя способами: раздавливанием или

раскалыванием. При сопоставлении поглощающей способности проб, подготовленных этими способами, установлено, что при раздавливании нарушаются фрактальные свойства угля. Это проявляется в более резком ходе зависимости $\ln k = f(1/T)$ в аррениусовских координатах и иной динамике процесса сушки: уголь высыхает быстрее, чем раздробленный в шаровой мельнице. У последнего наблюдается интересная особенность, связанная с окислением при достижении определенной влажности, что приводит к увеличению веса угля, а не стабилизации. Создается впечатление, что при раздавливании у мелких частиц угля нарушается внутренняя структура и активной становится только внешняя поверхность. При раскалывании же уголь сохраняет свойство фрактальности. Об этом свидетельствуют результаты опытов по сушке угля разных фракций. На графиках, приведенных на рис. 1, по оси ординат отложены этапы сушки и соответствующий им вес пробы по оси абсцисс. Для мелких фракций <0,2 и 0,2–0,5 мм вес достигает минимального значения уже на 2–3 этапах сушки; для фракций 0,5–5,0 мм – на 4–5 этапах; у фракций >5,0 мм вес не стабилизируется и после 6-го этапа. При достижении минимальных значений веса дальнейшая сушка фракций <1,0 мм приводит к его увеличению. Здесь следует отметить, что перед проведением эксперимента пробы фасуются по отдельным бумажкам, а взвешивание проб после очередного этапа сушки в муфельной печи проводится после их остывания в эксикаторе

с силикагелем, т. е. влияние влаги практически исключается. Для наглядности на 6 этапе сушки, перед нагреванием, пробы выдерживались на воздухе с естественной влажностью, взвешивались (результаты взвешивания показаны красными точками) и снова сушились. Положение значений веса после описанных процедур только подчеркивает закономерный ход практически всех графиков. Все это указывает на то, что для угля существует значение критической влажности, начиная с которой запускается процесс окисления. Чем меньше размер угольных частиц, тем быстрее они высыхают и чем их больше, тем активнее идет окисление скоплений угля в целом. Отсюда понятна негативная роль зон дробления, переизмельчения и трещиноватости в угольных пластах. Из нашего опыта лабораторных исследований установлено, что пробы угля, отобранные из таких зон, как правило, склонны к самовозгоранию. Но здесь необходимо отметить, что соотношение участков, на которых произошло возгорание угля, и тектонически нарушенных участков – крайне мало. Это связано с тем, что низкотемпературное окисление угля представляет собой совокупность конкурирующих реакций, приоритетность и направление которых непредсказуемы и определяются составом и структурой угля, доступом кислорода к реагирующим поверхностям, внешним условиям протекания процесса. Это подтверждается статистикой эндогенных пожаров, которые могут возникать в выработанном пространстве действующих

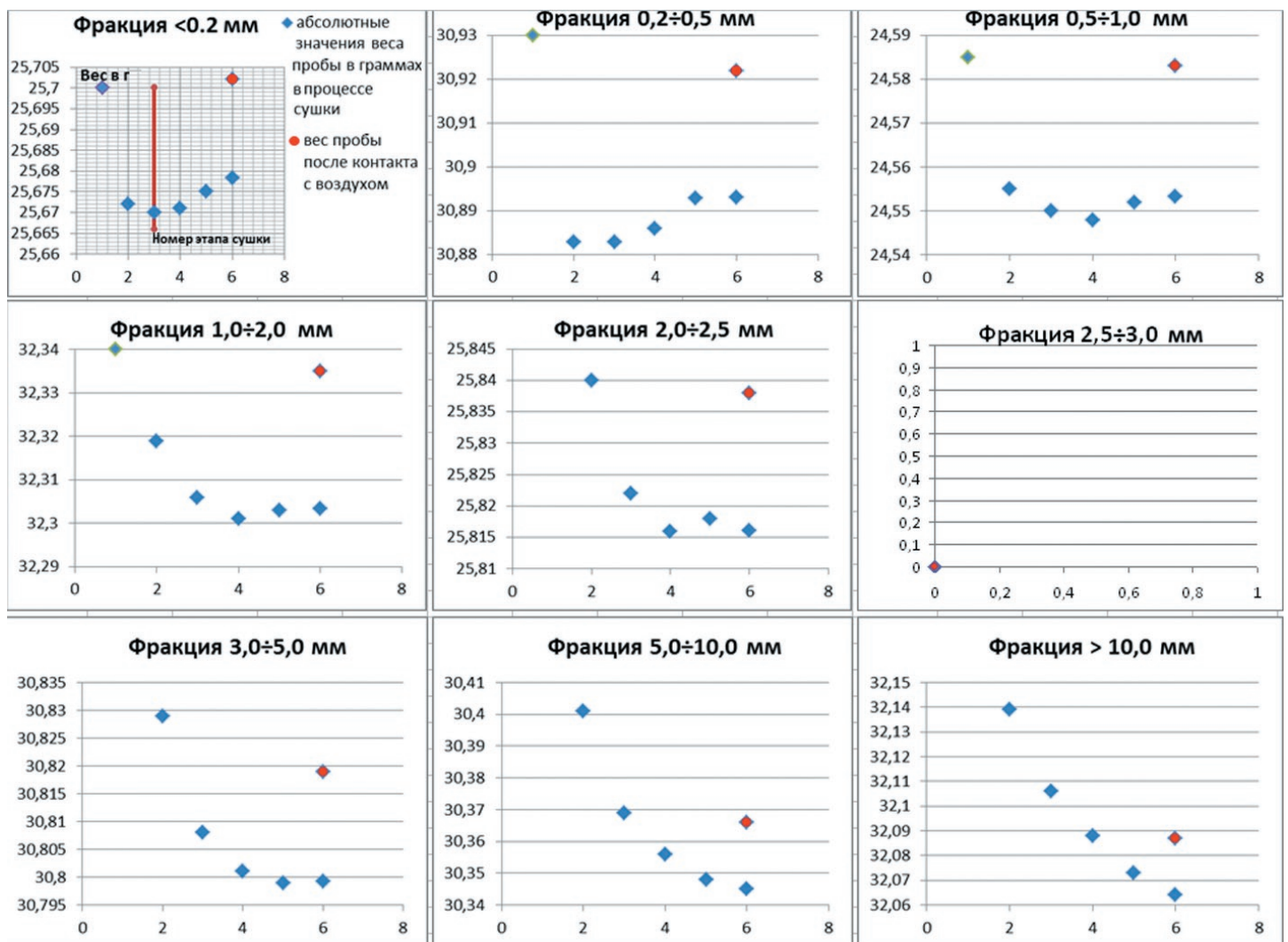


Рис. 1. Результаты высушивания проб угля по фракциям

очистных забоев (25 %), на отработанных изолированных (30÷40 %) и неизолированных участках (12÷37 %), в капитальных и подготовительных выработках (30÷40 %). В дополнение к этому уголь возгорается и в отвалах породной массы, причем гораздо чаще. С учетом вышесказанного можно сделать вывод, что, в конечном итоге, возможность возгорания угля появляется при достижении критической влажности. На этот факт указывается в трудах [2, 9]. Однако влажность угля может не только уменьшаться, но и увеличиваться. На рис. 2 показан график приращения веса высушенных проб угля после трехминутного пребывания на воздухе: мелкие фракции угля в разы активнее крупных. Таким образом, наличие мелких фракций угля, преимущественно микронного и субмикронного диапазона, как в выработанном пространстве шахт, так и в породных отвалах является необходимым условием для образования очагов самовозгорания. Здесь следует отметить, что само по себе образование микронных фракций происходит в основном в процессе разработки пласта и этот материал непроизвольно попадает в породные отвалы. Возможно, этим и свободным доступом кислорода объясняется большое количество (до ≈50 % от общего числа) перегоревших или горящих отвалов, по сравнению с количеством пожаров в отработанных пластах всех марок угля, включая антрацит. Образование дополнительных свободных ювенильных (неокисленных) поверхностей в естественном залегании все-таки проблематично. Но то, что пласты угля возгораются, позволяет считать, что процесс их деформирования и разрушения подпитывает пласты дополнительной энергией.

Учитывая, что выделяемая энергия при образовании и раскрытии трещин $\approx(\sigma_p \cdot L)/E$, величина этой энергии при образовании магистральной трещины или системы трещин суммарной длиной в $L = 1$ м для угля с прочностью на разрыв $\sigma_p = 30 \cdot 10^5$ Па и модулем Юнга $E = 0,51 \cdot 10^{10}$ Па [8] составит ~1,8 кДж. Такой энергии достаточно для повышения температуры угля на первые десятки градусов в окрестности образующихся трещин. При увеличении горного давления, при разрушении сжатием или сдвигом энергия будет еще большей. Эффект повышения температуры при образовании трещин в твердом теле известен давно и характеризует переход механической энергии в тепловую. Показательны в этом отношении работы, посвященные механизмам теории возгорания металлов при разрушении, например исследование [1]. В этой работе автора и в ряде других сделано предположение, что возгорание титановых сплавов происходит в момент прохождения через образец разрушающей трещины. Инициатором возгорания выступают микрофрагменты

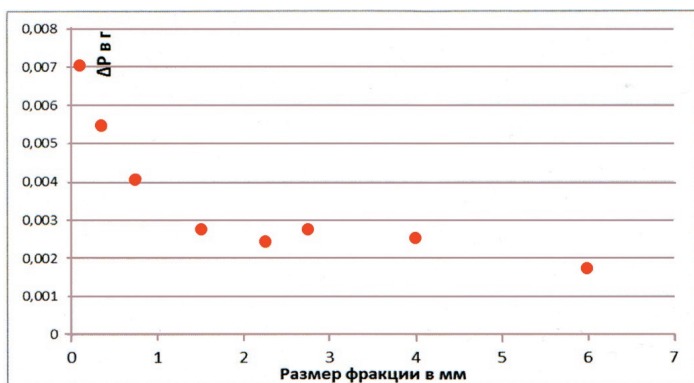


Рис. 2. Приращение веса сухого угля по фракциям после трехминутного пребывания на воздухе

появляющейся ювенильной поверхности металла, разогретье за счет работы разрушения на величину ΔT до температуры:

$$T = T_0 + \Delta T,$$

где T_0 – температура окружающей среды и образца до разрушения. Величину ΔT можно определить по формуле $\Delta T = \sigma_a (0,8 + 2,06\psi)k/\delta C_p$, где σ_a , ψ – условный предел прочности и относительное сужение (при сжатии – расширение); k – коэффициент, характеризующий долю работы, переходящей в тепло (принимали $k = 1$); δ , C_p – плотность и теплоемкость угля. В расчетах брали $\sigma_a = 3,3 \cdot 10^7$ Па; $C_p = 1,4$ кДж/кг·К; $\delta = 1,28 \cdot 10^3$ кг/м³. В результате выяснили, что при $\psi = 0,2$ и $0,5$ $\Delta T = 22$ и 33 °К соответственно.

Таким образом, разрушение угля в зонах опорного давления при технологических воздействиях или при несоосном расположении целиков может являться причиной дополнительного разогрева. Естественно, что такое увеличение температуры не приводит к возгоранию, поскольку для осушения угля, а в момент раскрытия трещин, для заполнения их кислородосодержащей смесью и разогрева наиболее активной части материала пласта (частиц C, S, F₂S) требуется время – инкубационный период [10]. Его продолжительность зависит как от теплофизических свойств вмещающих пород, так и способности к окислению самого угля. Кроме того, существенным влияющим фактором является динамическое давление и температура воздушного вентиляционного потока, сопровождающего процесс добычи [11]. Необходимо учитывать тот факт, что адсорбционные свойства большинства марок угля, как и скорость окисления, определяются не только размером фракций, но и фрактальным распределением пор в раздробленном материале. Фрактальность выдерживается при дроблении проб в шаровой мельнице; в щековой дробилке она нарушается. Фактически фракции раздробленного угля микронного и субмикронного диапазона могут являться той “спичкой”, которая запускает процесс нагревания и воспламенения угля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болобов В. И. К теории возгорания металлов при разрушении//Физика горения и взрыва. – 2012. – Т. 48. – № 6. – С. 35–40.
2. Ворошилов А. С. Исследование закономерностей влияния влаги на процесс самовозгорания угля: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2012. – 17 с.
3. Гольинская Ф. А. Концептуальные положения о геологических факторах самовозгорания углей//Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 1. – С. 35–39.
4. Греков С. П., Костенко В. К., Котовский Б. И., Толкачев О. Э. Влияние параметров окисления угля и его фракционного состава на самонагревание в скоплении//Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля. Сб. науч. тр. НИИ ГД. – Донецк, 2000. – С. 63–74.
5. Греков С. П., Пашковский П. С., Орликова В. П. Определение температуры очага самовозгорания и времени его зарождения по концентрации пожарных газов//Научовий вісник УкрНДІПБ. – 2015. – № 1 (31). – С. 12–72.
6. Захаров Е. И., Овсянников Г. Д., Сарычев В. И. Самонагревание угля и прогноз условий возникновения эндогенных пожаров//Известия Тул ГУ. Естественные науки. – 2012. – Вып. 1. – Ч. 2. – С. 75–89.
7. КД 12.01.04.009-2000 “Склонность к самовозгоранию углей, шахтных пород и отходов углеобогащения. Методика определения”. Утверждена Министерством топлива и энергетики Украины 26 сентября 2000 года.
8. Михалюк А. В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. – Киев: Наукова думка, 1980. – 154 с.
9. Пашковский П. С., Греков С. П., Зинченко И. Н. Влияние химической активности и влажности угля на процесс самонагревания//Горноспасательное дело. – 2007. – Вып. 44. – С. 17–25.

10. Пашиковский П. С., Греков С. П., Орликова В. П. Критические параметры самовозгорания угля//Уголь Украины. – 2016. – № 1. – С. 23–27.

11. Ren Wan-xing, Kang Zeng-hui, Wang De-ming. Causes of Spontaneous Combustion of Coal and Its Prevention Technology in The Tunnel Fall of Ground of Extra-thick Coal Seam. First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2228>. – 2011. – P. 717–724.

REFERENCES

1. Bolobov V. I. Theory of ignition of metals at fracture//Fizika goreniya i vzryva. – 2012. – Vol. 48. – № 6. – P. 689–693. (In Russian).

2. Voroshilov A. S. Investigation of the regularities of the influence of moisture on the process of spontaneous combustion of coal. RHD thesis. – Kemerovo, 2012. – 17 p. (In Russian).

3. Golynskaya F. A. Conceptual provisions on the geological factors of spontaneous combustion of coals//Gornyi inf.-analit. byulleten. – 2009. – № 1. – P. 35–39. (In Russian).

4. Grekov S. P., Kostenko V. K., Kotovskij B. I., Tolkachev O. Je. Influence of parameters of coal oxidation and its fractional composition on self-heating in the cluster//Aktual. vopr. borby s samovozgoraniem uglya. Sb. nauch. tr. NII GD. – Doneck, 2000. – P. 63–74. (In Russian).

5. Grekov S. P., Pashkovskij P. S., Orlikova V. P. Determination of the temperature of the source of self-ignition and the time of its of spontaneous combustion according to the concentration of fire gases//Naukovy visnyk UkrNDİPB. – 2015. – № 1 (31). – P. 12–72. (In Russian).

6. Zaharov E. I., Ovsyannikov G. D., Sarychev V. I. Spontaneous combustion of coal and forecast of conditions of occurrence of endogenous fires//Izvestiya Tul GU. Estestvennye nauki. – 2012. – Iss. 1. – Part 2. – P. 75–89. (In Russian).

7. KD 12.01.04.009-2000 “Propensity to spontaneous combustion of coals, mine rocks and waste of coal enrichment. Method of determination”. Approved by the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine on September 26, 2000. (In Russian).

8. Mihalyuk A. V. Rocks with uneven dynamic loads. – Kiev: Naukova dumka, 1980. – 154 p. (In Russian).

9. Pashkovskij P. S., Grekov S. P., Zinchenko I. N. Influence of Chemical Activity and Moisture of Coal on the Process of spontaneous combustion of coals//Gornospasatelnoe delo. – 2007. – Iss. 44. – P. 17–25. (In Russian).

10. Pashkovskij P. S., Grekov S. P., Orlikova V. P. Critical parameters of spontaneous combustion of coal//Ugol Ukrainy. – 2016. – № 1. – P. 23–27. (In Russian).

11. Ren Wan-xing, Kang Zeng-hui, Wang De-ming Causes of Spontaneous Combustion of Coal and Its Prevention Technology in The Tunnel Fall of Ground of Extra-thick Coal Seam. First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2228>. – 2011. – P. 717–724.

Рукопис отримано 9.11.2017.

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

МІНЕРАЛЬНІ РЕСУРСИ УКРАЇНИ

З метою подальшого підвищення наукового рейтингу журналу та його дописувачів варто звернути увагу на таке:

1. Обсяг анотації англійською мовою разом з назвою статті, ініціалами та прізвищами всіх авторів має містити мінімум 1000 знаків.

2. Вимоги до анотації англійською мовою: інформативність (відсутність загальних слів); змістовність (відображення основного змісту статті та результатів досліджень); застосування термінології, характерної для іноземних спеціальних текстів; єдність термінології в межах анотації; відсутність повторення відомостей, що містяться в заголовку статті.

3. Прізвища авторів статей надаються в одній з прийнятих міжнародних систем транслітерації (з української — відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 55 від 27.01.2010 “Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею”; з російської — відповідно до “Системы транслитерации Библиотеки конгресса США”). Зазначення прізвища в різних системах транслітерації призводить до дублювання профілів (ідентифікаторів) автора в базі даних (профіль створюється автоматично в разі збігу його даних по двох публікаціях).

4. Для повного й коректного створення профілю автора дуже важливо наводити місце його роботи. Дані про публікації автора використовуються для отримання повної інформації щодо наукової діяльності організацій і загалом країни. Застосування в статті офіційної, без скорочень, назви організації англійською мовою запобігатиме втраті статей у системі аналізу організацій та авторів. Бажано вказувати в назві організації її відомство за належністю.

5. В аналітичній системі SCOPUS потрібні пристатейні списки використаної літератури латиницею. Можливості SCOPUS дають змогу проводити такі дослідження: за посиланнями оцінювати значення визнання робіт конкретних авторів, науковий рівень журналів, організацій і країн загалом, визначати актуальність наукових напрямів і проблем. Стаття з представленим списком літератури демонструє професійний кругозір та якісний рівень досліджень її авторів.

6. Правильний опис джерел, на які посилаються автори, є запорукою того, що цитовану публікацію буде враховано в процесі оцінювання наукової діяльності її авторів, а отже, й організації, регіону, країни. За цитуванням журналу визначається його науковий рівень, авторитетність тощо. Тому найважливішими складовими в бібліографічних посиланнях є прізвища авторів і назви журналів. В опис статті треба вносити всіх авторів, не скорочуючи їх кількості. Для уникнення неточностей в ідентифікації авторства й визначення персональних метрик (показників) бібліометрії авторам наукових публікацій необхідно використовувати персональні коди ORCID.

7. Для українсько- та російськомовних статей з журналів, збірників, матеріалів конференцій структура бібліографічного опису така: автори (транслітерація), переклад назви статті англійською мовою, назва джерела (транслітерація), вихідні дані, в дужках — мова оригіналу.

8. Список використаної літератури (References) для SCOPUS та інших закордонних баз даних наводиться повністю окремим блоком, повторюючи список літератури до українсько- та російськомовної частини, незалежно від того, містяться в ньому чи ні іноземні джерела. Якщо в списку є посилання на іноземні публікації, вони повністю повторюються в списку, який створюється в латинському алфавіті.

Подання рукопису статті до редакції супроводжується підписами авторів.