

**В. Н. Захарченко, Ю. Р. Руденко\*, Ю. К. Лебедь\***

Объединение предприятий «Укрметаллургпром», Днепр

\*ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат», Каменское

## Освоение технологии ведения плавки с применением ПУТ в условиях повышенного шлакообразования на ПАО «ДМК»

*Рассмотрены основные этапы освоения технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) на ПАО «ДМК» в условиях повышенного шлакообразования, представлено влияние химического состава основного компонента шихты – агломерата – на показатели доменного процесса.*

**Ключевые слова:** доменная печь, пылеугольное топливо, выход шлака, сумма выхода шлака и расхода ПУТ, расход условного топлива, содержание оксида железа ( $FeO$ ) в агломерате.

С 1960 г. в доменной плавке активно применяются дополнительные виды топлива, вдуваемые в воздушные фурмы (природный газ, мазут, уголь и др.), снижая теоретическую температуру горения, что позволяет увеличить производство чугуна за счет повышения концентрации кислорода в дутье и его температуры [1]. Сегодня вдувание ПУТ играет главенствующую роль среди других топливных добавок.

В 2004 г. за рубежом выплавлено около 50% чугуна с применением ПУТ (более 120 доменных печей в 25 странах) с расходом кокса 250-350 кг/т и ПУТ 100-250 кг/т с долей замены кокса 20-50% [2].

Учитывая сложившиеся цены на природный газ в последние годы, технологию вдувания ПУТ начали активно внедрять на металлургических предприятиях Украины.

В 1 полугодии 2016 года ПУТ вдували в доменных цехах ПАО «Днепропетровский МК» (151,8 кг/т), ПАО «Алчевский МК» (125,0 кг/т), ПАО «Запорожсталь» (123,2 кг/т), ЧАО «ММК им. Ильича» (133,2 кг/т), ДП-9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (51,9 кг/т) и ЧАО «Енакиевский МЗ» (42,3 кг/т) [3].

Подготовка к внедрению технологии вдувания ПУТ на ПАО «ДМК» начата в 2005-2012 гг.

Проработку коммерческих предложений производили с основными мировыми поставщиками оборудования и технологии – «Paul Wurth», «Kuttner», «Danieli Corus», «Claudius Peters» и др.

В конечном итоге, контракт на поставку оборудования был заключен в 2012 г. с «Paul Wurth». Строительство объектов продолжалось до 2014 г.

На момент освоения технологии вдувания ПУТ в состав доменного цеха ПАО «ДМК» входили три доменные печи (ДП): ДП №1М полезным объемом 1500 м<sup>3</sup> (последний капремонт I разряда – 2007 г.); ДП № 9 полезным объемом 1386 м<sup>3</sup> (последний капремонт I разряда – 2007 г.); ДП № 12 полезным объемом 1386 м<sup>3</sup> (последний капремонт I разряда – 1986 г.).

Доменные печи оснащены двухконусными загрузочными устройствами, скиповой системой загрузки

шихты, воздухонагревателями со встроенной камерой горения.

Комплекс по подготовке и вдуванию ПУТ в доменные печи включает в себя участки:

- отделение углеподготовки (вагонопрокидыватель с вагонотолкателем, конвейерная система подачи угля к четырем силосным складам угля, горизонтальный сборный конвейер подачи смеси угля в пылеприготовительное отделение);

- пылеприготовительное отделение (две вертикальные валковые мельницы фирмы «LOESCHE» производительностью 70 т/ч каждая, два бункера хранения ПУТ емкостью 800 м<sup>3</sup> каждый, два инъекционных бункера емкостью 18 м<sup>3</sup> на каждую доменную печь);

- отделение вдувания ПУТ (транспортировка ПУТ в плотной фазе, динамический распределитель ПУТ по воздушным фурмам, погрешность расхода  $\pm 2,5\%$ ).

Для наработки технологии освоение ПУТ производили поэтапно с целью компенсации нарушений процесса, вызываемых горением ПУТ и снижением доли кокса в составе шихты. Увеличение расхода ПУТ снижает теоретическую температуру горения, ухудшает газодинамику печи, условия сгорания ПУТ и режим схода шихтовых материалов, для чего необходимо вывести на оптимальный технологический режим с помощью теории полной и комплексной компенсации [2]. Повышению эффективности вдувания ПУТ способствуют: снижение выхода шлака и расхода известняка, повышение температуры дутья и содержания кислорода, улучшение прочности и фракционного состава железорудной шихты, качества кокса, ПУТ, равномерное распределение ПУТ по воздушным фурмам и другие мероприятия [2, 4].

Поэтапное освоение ПУТ на ПАО «ДМК» начато на ДП № 1М и ДП № 9 в августе 2014 г., на ДП № 12 – в сентябре 2014 г.

В течение 6 месяцев – с сентября 2014 по февраль 2015 г. – производили освоение технологии с расходом ПУТ 100-120 кг/т (средний расход – 105 кг/т). Расход природного газа сокращен с 12-19 м<sup>3</sup>/т (период 2014 г. до вдувания ПУТ) до 5-8 м<sup>3</sup>/т.

В дальнейшем, с марта 2015 по сентябрь 2016 г. (на момент написания статьи) доменный цех работает с расходом ПУТ 128-157 кг/т (средний расход 148 кг/т), в том числе.: ДП № 1М – 147 кг/т; ДП № 9 – 153 кг/т; ДП № 12 – 142 кг/т. Расход природного газа в указанный период составлял – 0,2-1,9 м<sup>3</sup>/т.

На рис. 1 представлена динамика освоения ПУТ в целом по доменному цеху и по ДП № 9 (наиболее высокий расход ПУТ).

Наибольший максимально стабильный ежемесячный расход ПУТ (кг/т):

– доменная печь № 1М: январь 2016 г. – 157; февраль 2016 г. – 163;

– доменная печь № 9: декабрь 2015 г. – 165; апрель 2015 г. – 169;

– доменная печь № 12: май 2016 г. – 158; июнь 2016 г. – 158;

– доменный цех: июнь 2016 г. – 157; декабрь 2015 г. – 159.

Итого с сентября 2014 по сентябрь 2016 г. по доменному цеху выплавлено чугуна с вдуванием ПУТ – 4,564 млн. т, в том числе ДП № 1М – 1,624; ДП № 9 – 1,656; ДП № 12 – 1,284 млн.т.

В соответствии с требованиями разработчика ПУТ-технологии – «Paul Wurth» необходимым условием для стабильного вдувания ПУТ в количестве 160 кг/т и более является достижение условия: выход шлака + расход ПУТ ≤ 470 кг/т чугуна.

На рис. 2 приведена диаграмма (данные «Paul Wurth»), определяющая соотношение интенсивности вдувания ПУТ и выхода шлака для различных предприятий.

В соответствии с предъявленными требованиями «Paul Wurth», из-за особенностей шихтовых условий уровень выхода шлака свидетельствует о несоответствии заявленным условиям фактического выхода шлака (за период 25 мес. вдувания ПУТ с сентября 2014 по сентябрь 2016 г.: ДП № 1М – 563; ДП № 9 – 566; ДП № 12 – 544; ДЦ – 559 кг/т).

За 9 месяцев 2014 г. (до начала вдувания ПУТ) доменный цех работал с выходом шлака 448 кг/т (диапазон по ДП – от 445 до 450 кг/т), при содержании железа в железорудной части шихты 54,80% (диапазон по ДП – от 54,79 до 54,82%).

В сентябре 2014 г., с началом вдувания ПУТ, выход шлака снижен с 466 до 447 кг/т и до 416 кг/т в октябре 2014 г.; содержание железа в ЖРЧ шихты – увеличено с 54,20 до 54,79 % и до 55,81% соответственно.

В дальнейшем, с ноября 2014 по сентябрь 2016 г. ДЦ работает с выходом шлака 422 кг/т и содержанием железа в ЖРЧ шихты 55,79%, в том числе: ДП № 1М – 427 кг/т (диапазон 382-483 кг/т) и 55,72% (диапазон 54,53-56,39%); ДП № 9 – 422 кг/т (диапазон 389-473 кг/т) и 55,76% (диапазон 54,53-56,39%); ДП № 12 – 415 кг/т (диапазон 390-454 кг/т) и 55,89% (диапазон 54,75-56,39%).

Динамика освоения ПУТ и содержания железа в железорудной части шихты на ПАО «ДМК» по ДЦ указана на рис. 3.

Разбег значений между показателями (рис. 3) связан: в период с октября 2014 по январь 2015 г. и с марта по июль 2015 г. – с отработкой режима вдувания ПУТ 100-120 и 140-150 кг/т; в августе 2015 г. – раздувкой ДП № 1М после внеплановой остановки; в период с октября 2015 по январь 2016 г., апрель

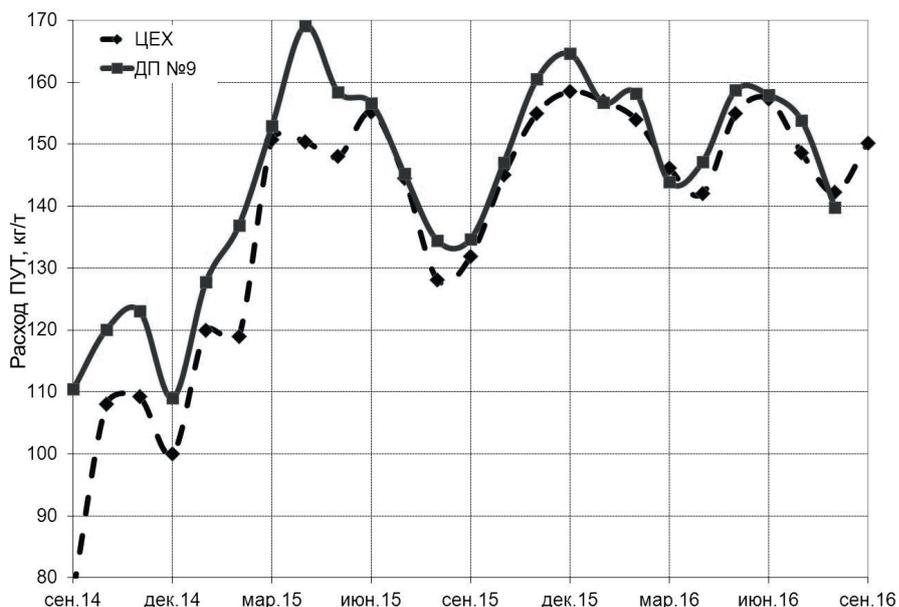


Рис. 1. Динамика освоения ПУТ на ПАО «ДМК» по ДП № 9 и доменному цеху

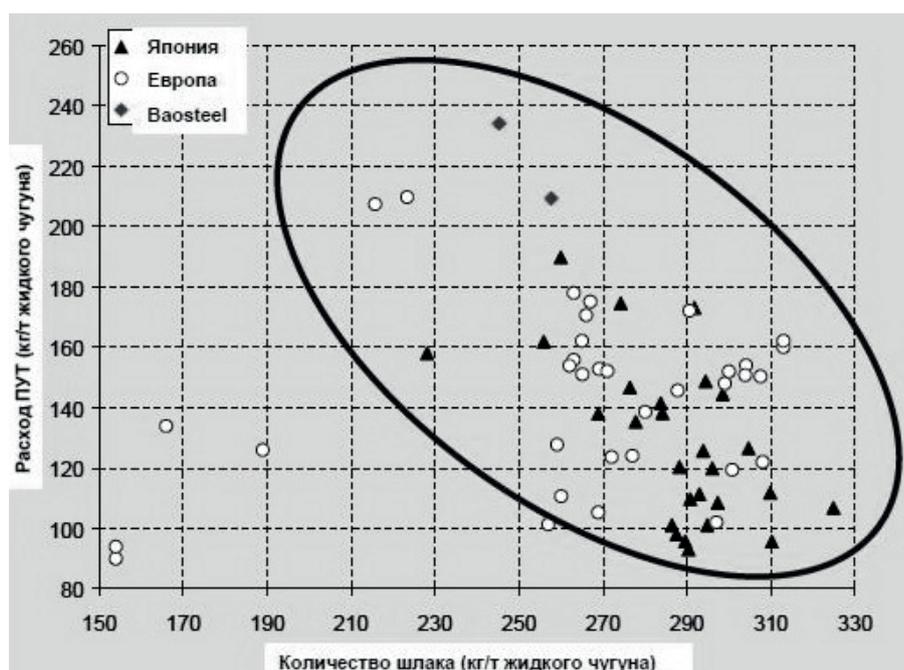


Рис. 2. Соотношение интенсивности вдувания ПУТ и выхода шлака

и август 2016 г. – недостаточным обеспечением сырьем и топливом.

За 9 месяцев 2014 г. (до начала вдувания ПУТ) основной компонент железорудной части шихты – агломерат производства агломерационного цеха № 2 со следующими показателями: доля в ЖРЧ шихты 98,4%; рассев агломерата 14,5%; содержание железа в агломерате 54,69%; содержание FeO в агломерате 10,76%; основность агломерата 1,26; суммарная основность агломерата 1,41.

С началом вдувания ПУТ (сентябрь 2014 г. – сентябрь 2016 г.) произошло изменение качественных характеристик основного компонента железорудной части шихты – агломерата производства агломерационного цеха № 2: доля в ЖРЧ шихты 99,0%; рассев агломерата 14,2%; содержание железа в агломерате 55,67%; содержание FeO в агломерате 11,73%; основность агломерата 1,17; суммарная основность агломерата 1,31.

В условиях освоения ПУТ-технологии, при высоком уровне выхода шлака, дополнительно установлены следующие зависимости:

– содержание FeO в агломерате: увеличение содержания FeO в агломерате на 1,0% приводит к повышению расхода ПУТ на 9,5 кг/т чугуна (база данных 25 мес. с сентября 2014 по сентябрь 2016 г.) и на 5,7 кг/т чугуна (база данных 15 мес. – плановое постепенное увеличение содержания FeO в агломерате в период с июля 2015 по сентябрь 2016 г.).

Дополнительный приход FeO в горн ДП требует увеличения расхода топлива на его восстановление (кокса или ПУТ) и приводит к дополнительному «промывочному» эффекту.

Параллельно в 2015 г. на ДП № 9 ПАО «ДМК» проводили опытно-промышленное испытания железосодержащих брикетов марки БЖС-Д производства Концерна «НПП ДиМет» с повышенным содержанием закиси железа (Fe – 58,25%; FeO – 46,94%). Расход брикетов за 2015 г. составил 19,7 кг/т, изменяясь по месяцам от 4,3 до 38,1 кг/т.

По результатам регрессионного анализа установлено, что увеличение расхода указанных брикетов на 10 кг/т, в условиях повышенного шлакообразования, способствовало снижению расхода скипового кокса на 11,4 кг/т чугуна и увеличению расхода ПУТ на 2,25 кг/т чугуна.

– расход условного топлива: увеличение выхода шлака на 10 кг/т приводит к повышению расхода условного топлива на 8,7 кг/т чугуна (база данных 25 мес. с октября 2014 по сентябрь 2016 г., расход ПУТ 100-159 кг/т).

Полученные значения свидетельствуют о комплексном негативном влиянии выхода шлака на расход условного топлива с высокой степенью достоверности (фактический коэффициент парной корреляции «+0,593», статистически значимый – более «+0,465»). Увеличение выхода шлака на каждые 10 кг/т, согласно пофакторному анализу, приводит к увеличению расхода кокса на 0,35% [5], что значительно меньше установленной нами зависимости.

Динамика расхода условного топлива и выхода шлака на ПАО «ДМК» по доменному цеху за период с сентября 2014 по сентябрь 2016 г. указана на рис. 4.

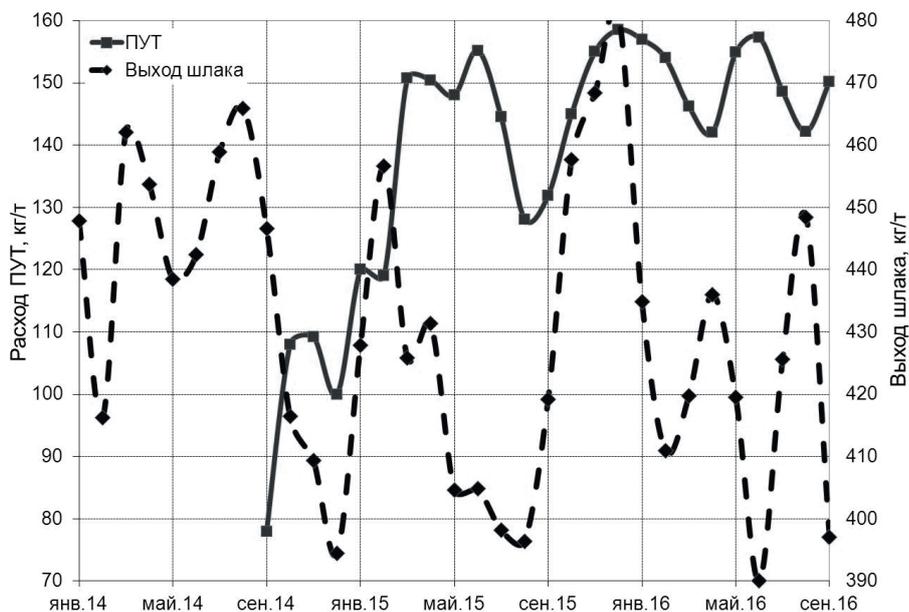


Рис. 3. Динамика расхода ПУТ и содержания Fe в железорудной части (ЖРЧ) шихты по ДЦ

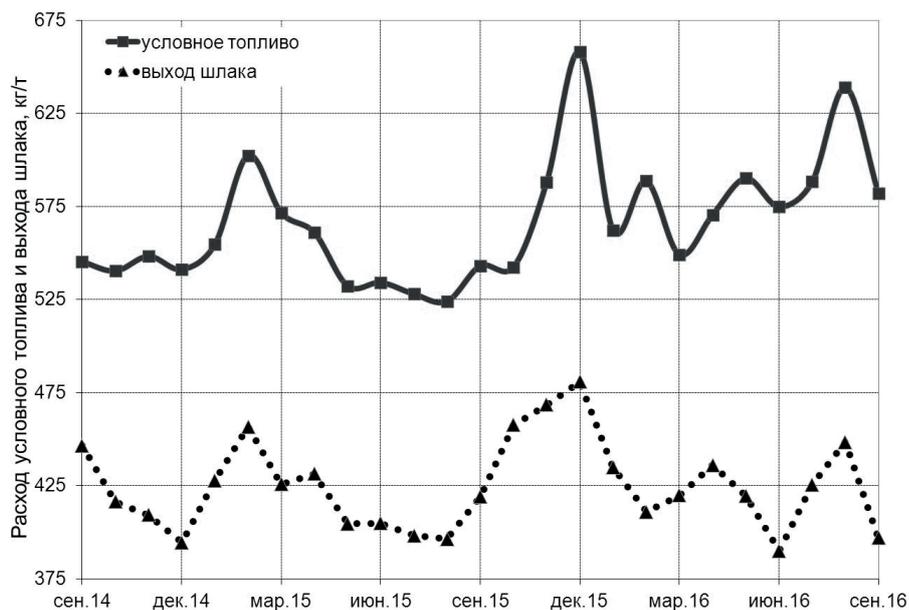


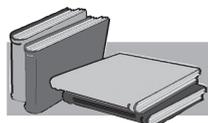
Рис. 4. Динамика выхода шлака и расхода условного топлива по ДЦ

## Выводы

Освоение технологии вдувания ПУТ на ПАО «ДМК» производили поэтапно (6 месяцев с расходом ПУТ 100-120 кг/т; в дальнейшем – около 150 кг/т).

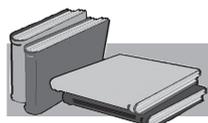
Внедрение технологии вдувания ПУТ на ПАО «ДМК» осуществляли в условиях повышенного выхода шлака (420-430 кг/т).

Выявлено влияние увеличения содержания FeO в агломерате на расход ПУТ, влияние выхода шлака на расход кокса и условного топлива в условиях работы доменного цеха ПАО «ДМК» указанного периода.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Геердес М., Токсопеус Х., Ван дер Влит К. Введение в современный доменный процесс. – Нидерланды. – 2004. – 131 с.
2. Перспективы и эффективность доменной технологии определяются степенью замены кокса пылеугольным топливом / С. Л. Ярошевский // Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна» (Донецк, 18-21 декабря 2006 г.) – Донецк: УНИТЕХ, 2006.
3. Захарченко В. Н. Техничко-економические показатели работы доменных и агломерационных цехов металлургических предприятий Украины за 1 полугодие 2016 года: – Днепр: ОП «Укрметаллургпром», 2016. – 20 с.
4. Ярошевский С. Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: Металлургия, 1988. – 176 с.
5. Товаровский И. Г. Доменная плавка. Монография. 2-е издание. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 768 с.



## REFERENCES

1. Geerdes M., Toksopeus H., Van der Vlit K. (2004) Vvedenie v sovremennyi domennyi process. [Introduction to the modern blast furnace process]. Niderlandy, 131 p.
2. Yaroshevskii S. L. (2006) Perspektivy i effektivnost' domennoj tekhnologii opredeliaiutsia stepen'iu zameny koksa pyleugol'nym toplivom. Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferencii «Pyleugol'noe toplivo – al'ternativa prirodnomu gazu pri vyplavke chuguna», Doneck, 18-21 dekabria 2006. Donetsk: UNITEX. [in Russian].
3. Zakharchenko V. N. (2016). Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli raboty domennykh i aglomeracionnykh cekhov metallurgicheskikh predpriyatii Ukrainy za 1 polugodie 2016 goda. [Technical and economic indexes of work blast furnaces and sinter plants metallurgical enterprises of Ukraine for the 1st half of 2016]. Dnepropetrovsk: Ukrmetallurgprom, 20 p. [in Russian].
4. Yaroshevskii S. L. (1988). Vyplavka chuguna s primeneniem pyleugol'nogo topliva. [Smelting of cast iron using dust-coal fuel]. Moscow: Metallurgia, 176 p. [in Russian].
5. Tovarovskii I. G. (2009). Domennaia plavka. Monografiia. 2-e izdanie. [Domain melting. Monograph. 2nd edition]. Dnepropetrovsk: Porogi, 768 p. [in Russian].

### Анотація

*Захарченко В. Н., Руденко Ю. Р., Лебедь Ю. К.*

Освоєння технології ведення плавки із застосуванням ПВП в умовах підвищеного шлакоутворення на ПАО «ДМК»

*Розглянуто основні етапи освоєння технології вдування пиловугільного палива на ПАО «ДМК» в умовах підвищеного шлакоутворення, представлено вплив хімічного складу основного компоненту шихти – агломерату – на показники доменного процесу.*

### Ключові слова

*Доменна піч, пиловугільне паливо, вихід шлаку, сума виходу шлаку і витрати ПУТ, витрата умовного палива, вміст оксиду заліза (FeO) в агломераті.*

*The article describes basic stages of pulverized coal process adoption under the conditions of excessive slag formation at PJSC «DMK» and shows the influence of chemical composition of the main component – agglomerate – on parameters of blast-furnace process.*

**Оформление рукописи для опубликования****в журнале "Металл и литьё Украины":**

*Материалы для публикации необходимо подавать на русском языке в формате, поддерживаемом Microsoft Word, размер страницы А4, книжная ориентация, шрифт – Arial, 10, междустрочный интервал – 1,5. Объём статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.*

**Рукопись должна содержать:**

- УДК;
- фамилии и инициалы всех авторов (на русском, украинском и английском языках);
- название статьи (на русском, украинском и английском языках);
- название учреждения(й), в котором(ых) работает(ют) автор(ы);
- аннотации (на русском, украинском и английском языках);
- ключевые слова (не менее шести) – на русском, украинском и английском языках;
- предлагаемая структура текста (Arial 10, прямой) научной статьи: «Введение», «Материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «Выводы».
- таблицы должны иметь порядковый номер (Arial 10, курсив) и заголовок (Arial 10, п/ж), текст в таблице (Arial 9, прямой), примечания к таблицам размещаются непосредственно под таблицей (Arial 8, курсивом).
- формулы (Arial 11, русские символы – прямым, английские – курсивом, греческие – Symbol 12, прямым) должны иметь порядковый номер (Arial 10, прямой);
- рисунки, схемы, диаграммы и другие графические материалы должны быть чёрно-белыми, чёткими, контрастными, обязательно иметь номер и подрисуночную подпись (Arial 9, прямой); все громоздкие надписи на рисунке следует заменять цифровыми или буквенными обозначениями, объяснение которых необходимо выносить в подрисуночную подпись;
- список литературы на 2 языках: оригинала и английском (Arial 9);
- ссылки нумеруются в порядке их упоминания в тексте, где они обозначаются порядковой цифрой в квадратных скобках (например – [1]).