

В.П. СОКОЛОВА, канд. техн. наук, **Е.О. ШМЕЛЬЦЕР**
(Украина, Кривой Рог, Национальная металлургическая академия Украины,
Криворожский металлургический факультет)

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЕЙ

В настоящее время в Украине ежегодно перерабатывается порядка 70 млн т углей с получением продукции для коксования (около 40%) и энергетики [1]. Уголь остается основным энергоносителем в Украине.

За последние 40 лет зольность угля, поступающего на обогатительные фабрики (ОФ) Украины, увеличилась, в среднем, на 15% (с 23,4 до 38,4%) [2]. Повышение содержания минеральных примесей в рядовых углях связано с расширением разработки высокозольных пластов, ухудшением горно-геологических условий ведения добычных работ в связи с ростом глубины разработки (> 1 км), развитием механизации добычи угля, внедрением комплексной механизации и автоматизации забоев, исключаяющих раздельную выемку угля и вмещающих пород [3].

В этой связи необходимость понижения зольности углей до приемлемого уровня в условиях возрастающих требований к качеству кокса обуславливает актуальность совершенствования обогащения рядовых углей.

С развитием механизации угледобычи наметилась тенденция к повышению выхода мелких классов (< 1мм) до 30-35% вместо допустимых ранее 10-15% [3]. Повышение доли мелких классов требует более широкого применения соответствующих методов обогащения: флотации, шламовой отсадки, обогащения на винтовых сепараторах, в тяжелосредних и водных гидроциклонах. Наиболее эффективным методом в перечисленном ряду является флотационное обогащение. Анализ зависимости эффективности оборудования для обогащения угольной мелочи от диаметра частиц обогащаемого угля показывает, что для флотационных машин она составляет 40-60% при крупности частиц 0,1-1 мм (с максимумом 70% внутри интервала) и 35-40% при крупности частиц < 0,1 мм. Для тяжелосредних и водных гидроциклонов, шламовых отсадочных машин эффективность составляет 15-50% при крупности частиц 0,1-1 мм, а частицы < 0,1 мм в таких машинах вообще не обогащаются [3]. Как показано в работе [4], традиционные методы флотации с механическим перемешиванием оказываются более эффективными при обогащении мелких классов угля (0,1-0,5 мм) по сравнению с применением отсадочных машин.

В настоящее время 10,8% угля в Украине обогащается флотацией (после отсадки и тяжелых сред для крупных классов) [1]. Таким образом, флотация является основным методом обогащения тонких классов углей. Повышение эффективности углеобогащения в общем смысле тесно связано с совершенствованием процесса флотации.

В настоящее время достигнут высокий уровень развития процесса флотации: разработано высокоэффективное флотационное оборудование, используются селективно действующие реагенты, применяются различные решения схем флотации.

Рассмотрим основные тенденции современного развития флотационного обогащения углей, направленные на повышение качества концентрата и уменьшение потерь угля. Среди них можно выделить следующие:

- оптимизация конструктивных и технологических параметров флотационных машин, основанная на анализе гидродинамических особенностей флотационного процесса;
- улучшение процесса подготовки и подачи реагентов, использование аэрозольной флотации;
- оптимизация реагентного режима на основе более глубокого изучения физико-химических основ флотации и минералого-петрографических характеристик угольного шлама, использование новых реагентов;
- интенсификация обогащения ультратонких углей, развитие селективной флокуляции;
- повышение эффективности гидравлической классификации угольных шламов с целью удаления из питания флотационных машин частиц нефлотационной крупности;
- совершенствование технологических схем флотации угольных шламов в условиях повышения его зольности и увеличения доли тонких частиц.

Определение оптимальных конструктивных и технологических параметров флотационных машин ориентировано на машины механического и пневмомеханического типов (импеллерные) и пневматические (безимпеллерные) машины, в том числе колонного типа. Наиболее распространенными во всем мире являются флотационные машины с перемешиванием. Существующий парк флотационных машин, в том числе в Украине, ориентирован, главным образом, на машины механического типа.

В связи с этим определенный интерес представляют разработки Института обогащения твердых горючих ископаемых (ИОТТ) [5]. Авторы полагают, что наиболее перспективными можно считать машины, оснащенные аэраторами с тихоходным импеллером широколопастного типа и системой регулирования внутрикамерной циркуляции пульпы. Благодаря развитой рабочей поверхности лопасти широколопастные импеллеры позволяют создать оптимальный аэрогидродинамический режим при пониженной частоте вращения и окружной скорости. Это способствует эффективному перемешиванию пульпы в камере, всасыванию достаточно большого количества воздуха; обеспечивается быстрая настройка машины на оптимальный технологический режим. Модернизированные в соответствии с найденными конструктивными решениями серийные машины ФМ-6 и ФМ-12 эксплуатируются на углеобогатительных фабриках Кузнецкого, Карагандинского и Донецкого бассейнов. Модернизированные машины, в сравнении с серийными, обеспечивают увеличение производительности на 30-50% при снижении энергозатрат на 20-30%, а эксплуатационных –

Флотация

вдвое. На ряде фабрик Кузбасса успешно работают флотационные машины ФМ-16, обеспечивая не только повышение производительности, но и лучшее качество концентратов.

За последние 10-15 лет в мире все более прочные позиции начинает занимать колонная флотация, в которой используют те же принципы разделения, но процесс осуществляется в аппаратах колонного типа без механического перемешивания среды. Во флотационных машинах колонного типа используется противоточное движение пульпы и пузырьков. В этих аппаратах флотации могут подвергаться даже мелкие зерна размером менее 0,25 мм. Для повышения селективности разделения в случае малых размеров зерен снижается размер пузырьков воздуха при колонной флотации до 50-300 мкм. При этом за счет варьирования высоты колонны можно регулировать время пребывания сырья в зоне обработки, а при орошении пены чистой водой отделять (смыть) высокозольные частицы, захваченные поднимающимся слоем пены. Все это обуславливает повышение выхода и качества концентрата. Особенно перспективно применение метода колонной флотации для переработки тонкозернистых (< 0,15 мм) отходов углеобогащения с зольностью 40-60%. Степень извлечения органического вещества в этом случае на колоннах с насадкой достигает 57-63% при зольности концентрата 6,8-7,2% [4].

Начало новому направлению во флотации положено в Канаде. Сейчас метод колонной флотации использует ряд угледобывающих стран: Австралии, Великобритании, США [4]. Интенсивное распространение колонных флотационных машин за рубежом обусловлено: высокими технологическими показателями, возможностью обогащения тонких частиц и грубозернистого материала, простотой регулирования процесса, низкими энергозатратами, эффективной флотацией плотных пульп и снижением в этой связи объема аппарата и расхода реагентов, отсутствием движущихся частей, малой установочной площадью, несложной конструкцией. Одним из достоинств также является возможность создания различных аэрогидродинамических условия протекания процесса в одном аппарате. Низкая интенсивность перемешивания пульпы приводит к повышению селективности флотации шламов вследствие резкого сокращения числа механически выносимых частиц. В ИОТТ ведутся разработки большеобъемных пневматических флотационных машин. Американские и канадские колонны, как правило, изготавливают высотой 10-12 м. Высота колонных флотационных машин, разработанных ранее в СССР и разрабатываемых в последние годы в России, составляют 4-6 м. Так, двухкамерная колонна высотой 5 м и сечением 8 м² (емкость камеры 40 м³) успешно работала на одной из углеобогащительных фабрик Кузбасса. Зона минерализации в этой машине разделена на вертикальные секции. Секционирование позволяет повысить производительность машины на 20%. Средняя производительность по пульпе составила 600-700 м³/ч, по твердому 60-70 т/ч. При близких технологических показателях (выход концентрата 86%, зольность концентрата 8,8%, зольность отходов 64%) и рабочих объемах пневматической (ФППМ-40) и механической (МФУ-2-63) машин металлоемкость пневматической в 3 раза ниже, площадь установки

вдвое меньше, в 3 раза ниже потребление электроэнергии [5]. В ИОТТ разработаны многозонные колонные машины, в которых для более полного извлечения флотируемых частиц выделены зоны с различными гидродинамическими характеристиками. Известна оригинальная конструкция многозонной колонны флотационной машины вместимостью 15 м³ высотой 4,5 м, успешно эксплуатируемая в операциях основной и контрольной флотации. Такая конструкция позволяет реализовать различные схемы внутри аппарата. Преимущества новой машины заключаются в повышении селективности процесса, снижении времени флотации и капитальных затрат, а также в простоте обслуживания и уменьшении установочной площади. В машине применен новый аэратор пневмогидравлического типа, обеспечивающий высокое газосодержание (до 35%) при оптимальном и регулируемом дисперсном составе пузырьков со значительным содержанием пузырьков < 0,15 мм. Высокий срок службы и эффективность такой конструкции диспергатора по сравнению с обычной – диспергации воздуха через пористые среды – обуславливает технико-экономические преимущества новых флотационных машин [5].

Технология флотационного обогащения всегда рассматривается в совокупности трех аспектов: флотационные машины, реагентный режим и схемы флотации. Основные направления совершенствования реагентного режима анализируем в соответствии с выше изложенными тенденциями современного развития флотации.

С точки зрения улучшения технологии подготовки реагентов и угольных пульп к флотации авторы работы [6] выделяют несколько направлений исследований: совершенствование методов активации реагентов перед введением в пульпу; разработка новых аппаратов специального назначения; определение точек подачи реагентов по фронту флотации. Исследования, направленные на совершенствование подготовки пульпы перед флотацией, в основном, связаны с получением высокодисперсных стабильных эмульсий реагентов и поиском надежных и простых по конструкции диспергирующих устройств. Из новых разработок аппаратов подготовки пульпы заслуживают внимания АРКП, АКП-2, АППФ, В АРКП использован принцип отдельного кондиционирования мелких и крупных частиц, причем последние, обладающие более высокой диффузионной способностью по сравнению с каплями собирателя, выступают в качестве переносчиков реагентов на поверхность тонких минералов. В АКП-2 улучшение кондиционирования достигается благодаря многократному механическому воздействию на поток пульпы. При этом периодически меняется турбулентность потока, и имеет место увеличение времени контактирования частиц с реагентами. В АППФ реализован вариант кондиционирования пульпы в аэрозоле реагентов, получаемом с помощью пневматических форсунок, установленных в потоке суспензии [6].

Во многих случаях реагенты подают непосредственно в устройства технологического назначения. При этом не всегда достигается эффективное кондиционирование пульпы, а именно сочетание высокой диспергированности реагентов, их равномерного распределения в пульпе и предварительного аэрирова-

Флотация

ния пульпы. В ИОТТ разработан универсальный аппарат подготовки реагентов, который может быть установлен перед насосами, аппаратами кондиционирования и флотационными машинами [6]. Характерной его особенностью является сочетание преимуществ двухступенчатого струйного диспергирования с высокой эффективностью распределения реагентов в пульпе, которая достигается применением специального узла для ввода смеси в пульпу. Аппарат испытан на ЦОФ "Березовская". Аппарат установлен перед АКП. Выход концентрата увеличился на 1%, зольность отходов флотации повысилась на 1,5%, расход реагента-собиравателя сократился на 20%. Улучшение технологических показателей обусловлено правильным выбором точки подачи реагентов в пульпу – в трубопровод питания флотации, где достигается хорошее перемешивание компонентов, и увеличением времени кондиционирования пульпы.

На технологические показатели флотации заметное влияние оказывает способ подачи реагентов. Так, изменение реагентного режима со смешанной подачи масел на последовательную с предварительным вводом собирателя на ЦОФ "Суходольская" позволило увеличить выход флотационного концентрата на 2,1%, повысить зольность отходов флотации на 4,3% при уменьшении расхода реагентов (керосина на 15%, масла "Х" – в два раза). Исследования на ЦОФ "Березовская" подтвердили, что при последовательной подаче реагента-собиравателя – в АКП-1600 выход флотационного концентрата увеличился на 1,5%, зольность отходов флотации возросла на 2,9% при общем улучшении качества концентрата на 0,9% и незначительном сокращении расхода реагента-собиравателя [6].

Для повышения эффективности действия реагентов при флотации, особенно в случае их повышенного расхода может быть целесообразным введение во флотационную пульпу аэрозоля реагентов. По мнению авторов работы [7], аэрозольная подача реагентов по фронту флотации углей представляется перспективным направлением совершенствования технологического процесса флотационного обогащения. Эффект от применения аэрозольной подачи флотореагентов состоит в увеличении выхода флотационного концентрата на 0,2% и зольности отходов флотации на 1,5% при сокращении расхода основного реагента на 25%.

Для более полного извлечения в концентрат труднофлотируемых частиц следует вводить в пульпу такие реагенты, которые, осуществляя собирательное действие, не только не увеличивали бы объем и прочность пены, а наоборот, даже несколько уменьшали бы их, что должно сопровождаться снижением скорости флотации породы. Это утверждение положено авторами работы [8] в основу разработанного ими метода оптимизации реагентного режима флотации. Одним из параметров контроля эффективности процесса флотации угля при этом является прочность трехфазной пены. Для реагентов-собиравателей, которые чаще всего используются при флотации углей, ими установлены пороговые концентрации, характеризующие оптимальные прочностные свойства флотационных пен. Для керосина этот интервал концентрации составляет 200-500, для АФ-2 и ААР-1, соответственно, 200-800 и 200-300 г/т.

Дальнейший прогресс в области флотации связан с более глубоким изучением физико-химических основ процесса, позволяющего обоснованно рекомендовать и успешно использовать новые реагенты для повышения эффективности флотационного обогащения. Так, в работе [9] на основе теоретического анализа и лабораторной проработки нашли замену керосину в виде реагента-собирателя дигликольтерефталата. Его удельный расход (на 1 т сырья) снизился по сравнению с керосином с 2,5 до 0,4 кг. При этом в присутствии реагента-вспенивателя Т-80 выход концентрата при флотации угольной мелочи марки Г вырос на 2,3%. Извлечение горючей массы составило 77,2%. Зольность исходного угля, концентрата и отходов составила, соответственно, 12,8; 6,3; 29,3%. Степень извлечения органической низкозольной массы может быть повышена до 98-99%, а зольность отходов флотации – до 82-89% при обогащении угля в среде водомасляной эмульсии, когда в качестве масел используют парафинистые продукты плотностью $< 900 \text{ кг/м}^3$. Для повышения степени удаления тонкодисперсного пирита используют специальные депрессанты на основе полисахаридов и их соединений с ксантанами [4].

В настоящее время наиболее значительными в области совершенствования реагентных режимов флотации углей являются разработки по селективной флокуляции. Использование селективной флокуляции позволяет обогащать ультратонкие шламы ($< 35\text{-}40 \text{ мкм}$), количество которых неуклонно возрастает. Избирательный флокулянт марки БС-30Ф, разработанный в УХИНе, продолжительное время применяли в углеподготовительных цехах коксохимических заводов и на центральных ОФ Донбасса. В НТУ ХПИ (харьковский политехнический институт) в 2006 г. был разработан селективный флокулянт марки ТКП "О", который получают при пиролизе [3]. Данные исследований свидетельствуют, что коэффициент селективности при использовании этого реагента в качестве селективного флокулянта для обогащения шламов составляет 96,26% (по сравнению с флокулянтом БС-30Ф – 92,66%). Применение ТКП "О" позволяет уменьшить расход реагента-собирателя, увеличить выход концентрата, повысить зольность отходов флотации, таким образом снизив потери угля с ними. В условиях ОАО "ЗСМК" при повышении доли шлама стали применять низкомолекулярный флокулянт А1 30LMW (0,08-0,12%-ный раствор) при расходе 5-7 г на 1т твердого шлама. Благодаря этому влажность кека после дисковых вакуум-фильтров снилась на 1,9%, потери флотационного концентрата с фильтрами уменьшились на 0,8%, производительность фильтров увеличилась на 12% [10].

Потери горючей массы с флотоотходами связаны не только с тонкодисперсными частицами, но и с зернистой частью питания флотации. Поэтому одним из путей снижения потерь угля с отходами флотации является удаление из питания флотационных машин частиц нефлотационной крупности. В большинстве случаев классификацию осуществляют по граничному зерну 0,5 мм [5, 8]. Для этих целей в настоящее время на ОФ используют гидроциклоны, что объясняется сочетанием простоты конструкции аппарата с его высокой производительностью. Однако, необходимость снижения верхнего предела крупности пи-

Флотация

тания флотационных машин предопределяет необходимость двухстадиальной классификации шламов в гидроциклонах, так как в большинстве случаев слив гидроциклонов первой стадии классификации содержит частиц больше флотационной крупности. Наиболее эффективным при этом, с точки зрения авторов работы [2] является сочетание гидроциклонов ГЦ-1000 + ГЦ-630 и ГЦ-630 + ГЦ-360. Однако большая эффективность классификации достигается при пересортировке двух продуктов первой стадии классификации в гидроциклонах соответствующих диаметров. Так, при пересортировке слива ГЦ-1000 в гидроциклоне ГЦ-710, а сгущенного продукта в гидроциклоне ГЦ-630 содержание класса +0,5 мм в общем сливе отсутствует. Для эффективной классификации соотношение диаметров гидроциклонов второй стадии к первой должно быть 0,55-0,63. Однако при низкой плотности твердого материала гидроциклоны не обеспечивают кондиционность по крупности сливного продукта, идущего на флотацию, и двухстадиальная схема классификации угольных шламов в гидроциклонах малоэффективна [2, 11]. Авторы работ [2, 11] считают, что наиболее перспективным направлением решения задачи контроля крупности питания флотации является сочетание в одном аппарате достоинств гидроциклона и грохота с ситовой поверхностью. Сотрудниками ГП "Укрнииуглеобогащение" разработан трехпродуктовый циклонно-ситовый классификатор ЦСК-630, промышленные испытания экспериментального образца которого прошли на ЦОФ "Пролетарская". Применение циклонно-ситового классификатора, по сравнению с гидроциклоном ГЦ-630, позволяет уменьшить содержание частиц крупностью более 0,3 мм в питании флотации на 2,4% (с 2,6 до 0,2%) при размере отверстий сита 0,5 мм и тем самым снизить их содержание в отходах флотации на 0,7% (с 1,1 до 0,4%) [11].

На Печорской ЦОФ внедрена схема с классификацией угля крупностью < 1,5 мм в гидроциклонах диаметром 500 мм, обогащением сгущенного продукта гидроциклонов в винтовых сепараторах и флотацией слива гидроциклонов. При этом крупность питания флотации уменьшилась с < 0,5 до < 0,2 мм, что обеспечило снижение нагрузки по крупному шламу и сокращение вдвое расхода реагентов [12].

Необходимость совершенствования схем флотации в настоящее время обусловлено, главным образом, повышением содержания в питании флотации тонких частиц, высокозольных и труднообогатимых шламов. В зависимости от зольности, гранулометрического состава, наличия промпродуктовых фракций выбирается та или иная схема обогащения шлама, включающая различные операции предварительной и промежуточной классификации. Перспективными схемами флотационного обогащения угольного шлама, с точки зрения авторов [5], являются схемы: раздельной флотации крупного и мелкого шлама; флотации шламов при наличии высокозольных илов; обогащения шламов с низкозольными крупными классами; то же с высокозольными илами.

Схема раздельной флотации крупного и мелкого угольного шлама с использованием классификации в гидроциклонах по граничному зерну разделения 0,2 мм предусматривает совместную флотацию фильтрата вакуум-фильтров

с классом $> 0,2$ мм. Это позволяет учесть взаимное влияние классов при флотации. При наличии в угольном шламе высокозольных илов сначала извлекают в концентрат легкофлотируемый материал при низких расходах флотационных реагентов. Камерный продукт флотации классифицируют в гидроциклонах. Слив направляют в отходы, а сгущенный продукт гидроциклонов флотируют совместно с фильтратом. Применение такой схемы флотации с выводом из технологического цикла обогащения высокозольных илов при зольности исходного шлама 30,7% обеспечивает снижение зольности концентрата на 1,75 при одновременном повышении извлечения горючей массы на 0,4% и увеличении зольности отходов на 2,3%. При обогащении шламов с низкзольными крупными классами предлагается предварительная классификация в две стадии. Исходный шлам классифицируют вначале в гидроциклонах по граничному зерну 0,2 мм. Слив гидроциклонов направляют на флотацию, а сгущенный продукт – на вторую стадию классификации в гидроклассификатор. Сгущенный продукт последнего присоединяют к флотоконцентрату, а слив флотируют совместно с фильтратом и сливом гидроциклонов. Если в шламе присутствуют тонкие высокозольные илы, обезвоживание концентрата предлагается проводить на осадительных центрифугах с последующей флотацией фугата.

Для труднообогатимых углей, в частности Карагандинского бассейна, с целью получения низкзольного флотоконцентрата предложена усовершенствованная технологическая схема [13]. В схеме с перечистой флотацией тонкозернистого шлама концентрат основной флотации фильтруют и на перечистную флотацию подают фильтрат вакуум-фильтров. В результате уменьшилось время флотации, улучшилась структура пенного продукта, возросла его плотность, снизилась зольность флотационного концентрата. Повышение плотности пенного продукта с одновременным снижением его зольности позволило исключить операцию сгущения флотационного концентрата. Работа ОФ №1 Карагандинского металлургического комбината по новой схеме позволила обеспечить стабильность зольности угольной шихты для коксования.

Таким образом, совершенствование флотационного обогащения углей в настоящее время, обусловленное увеличением доли тонкодисперсных углей и возрастанием их зольности, предполагает:

- оптимизацию аэрогидродинамических режимов работы механических флотационных машин, а также использование пневматических флотомаши, в частности машин колонного типа;
- повышение эффективности подготовки флотационных реагентов и кондиционирования пульпы, использование аэрозольной флотации, создание и применение новых реагентов, развитие селективной флокуляции;
- совершенствование схем предварительной классификации с использованием нового классифицирующего оборудования, а также технологических схем флотации, в том числе высокозольных и труднообогатимых шламов.

Флотація

Список литературы

1. Филиппенко Ю.Н., Курченко И.П. Состояние и перспективы развития углеобогащения в Украине // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 33(74). – С. 30-37.
2. Полулях А.Д. Пути снижения потерь угля при обогащении // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 34(75). – С. 7-19.
3. Никитин Н.И., Никитин И.Н. Разработка процесса обогащения ультратонких углей // Кокс и химия. – 2007. – №8. – С. 8-11.
4. Гагарин С.Г., Гюльмалиев А.М., Толченкин Ю.А. Современные тенденции в обогащении углей (обзор) // Кокс и химия. – 2008. – №2. – С. 2-15.
5. Рубинштейн Ю.Б. Тенденции в развитии технологии флотации углей и флотационного оборудования // Кокс и химия. – 1992. – №4. – С. 3-9.
6. Рубинштейн Ю.Б., Юфитенко С.Н. О совершенствовании процесса подготовки угольных пульп к флотации // Кокс и химия. – 1992. – №5. – С. 3-8.
7. Рубинштейн Ю.Б., Юфитенко С.Н. Исследование аэрозольной технологии флотации углей // Кокс и химия. – 1993. – №5. – С. 10-14.
8. Влияние прочностных свойств пен на оптимизацию реагентного режима флотации угля / Ю.Б. Рубинштейн, В.П. Горобей, Г.Н. Шадрин и др. // Кокс и химия. – 1993. – №3. – С. 10-12.
9. Медяник Н.Л., Гиревая Х.Я., Варламова И.А. Квантово-химический подход к выбору реагента-собирателя для флотации углей низкой стадии метаморфизма // Кокс и химия. – 2006. – №1. – С. 8-13.
10. Эффективность процесса флотации и обезвоживания при применении флокулянтов / М.Г. Фон, Т.А. Королева, А.А. Шеффер и др. // Кокс и химия. – 2007. – №2. – С. 16-17.
11. Исследование технологических параметров циклонно-ситового классификатора ЦСК-630 / А.Д. Полулях, В.Ф. Нелепов, Д.А. Полулях и др. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 31(72). – С. 50-57.
12. Совершенствование процессов классификации и обогащения угольного шлама / М.Л. Калабухов, В.В. Бобриков, М.В. Давыдов и др. // Кокс и химия. – 2001. – №8. – С. 5-8.
13. Плужников А.И., Кулаков К.К., Тимощук А.М. Совершенствование технологической схемы флотации труднообогатимых углей // Кокс и химия. – 1993. – №3. – С. 12-13.

© Соколова В.П., Шмельцер Е.О., 2012

*Надійшла до редколегії 18.03.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*