

ТЕХНОЕКОЛОГІЯ

ДК 662.613.1

*Тутка В.В., Михайлова Ю.О.
Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу*

РЕКОНСТРУКЦІЯ І МОДЕРНІЗАЦІЯ ЗОЛОУЧИСНОГО ОБЛАДНАННЯ БУРШТИНСЬКОЇ ТЕС

У статті подано опис експлуатації діючого газоочисного обладнання та проблеми, що виникають у процесі їхньої роботи. Запропоновано шляхи малозатратної реконструкції, які забезпечують відновлення очистки до проектної. Виконано опис впровадження нових електрофільтрів на енергоблоках Бурштинської ТЕС. Проведено порівняння техніко-економічних показників роботи старих і нових електрофільтрів

Ключові слова: електрофільтр, обладнання системи золовидалення, забруднення атмосферного повітря, екологічно чистий кіловат, модернізація електрофільтра.

В статье выполнено описание эксплуатации действующего газоочистного оборудования и проблемы, возникшие в процессе его работы. Предложено пути малозатратной реконструкции, которая обеспечивает возобновление очистки до проектной. Сделано описание внедренных новых электрофильтров на энергоблоках Бурштинской ТЭС. Проведено сравнение технико-экономических показателей работы старых и новых электрофильтров.

Ключевые слова: электрофильтр, оборудование системы золоудаления, загрязнения атмосферного воздуха, экологически чистый киловатт, модернизация электрофильтра.

In the article there is a description of application of operating gas cleaning equipment and problems connected with its working process. There have been suggested ways of low-cost reconstruction which provide renewal of cleaning process to the project. There is a description of new electrical filters at Burshtyn EPS units. Comparison of technical and economical data of the old and new electrical filters is made.

Keywords: electrical filter, equipment of ash cleaning system, air pollution, ecologically clean kilowatt, electrical filter modernization.

Постановка проблеми. Використання вугілля для виробництва електроенергії на теплових електростанціях має свої переваги перед іншими видами палива. По-перше, роль теплової генерації у Європі набуває все більшого значення після того, як деякі країни взяли курс на поступове закриття своїх атомних електростанцій. По-друге, вугілля є стратегічним ресурсом України, запасів якого нам вистачить на 600 років і який не треба імпортувати, як газ. Але ціною за використання вугілля є значні масштаби впливу на оточуюче середовище через викиди в атмосферу від його спалювання. Питання подальшого розвитку теплової генерації в Україні пов'язане з тим, яким чином теплові електростанції (ТЕС) вже намагаються зменшити свій негативний вплив на навколишнє середовище, від якого залежить стан нашого здоров'я.

Теплові електростанції є одним з основних забруднювачів повітря в Україні. Так, на галузь припадає майже 80 % загальнонаціональних викидів діоксиду сірки та 25 % оксидів азоту. Але, все ж таки, дим у трубі ми бачимо, перш за все, через наявність у ньому саме золи, або вугільного пилу.

До того ж, викиди з труби шкодять і самій ТЕС. Діоксид сірки пришвидшує корозію металів і підвищує швидкість зношення обладнання ТЕС. І через це 92 % українських ТЕС, що вже працюють на межі свого потенціалу, вичерпають свій термін експлуатації значно швидше, утворюючи ще більше викидів.

Бурштинська ТЕС одна з найпотужніших в Україні теплових електричних станцій, виробляє електричну та теплову енергію, виконує ремонти, налагодження та обслуговування обладнання, роботи з капітального будівництва, реконструкції та ремонту об'єктів, будівель та споруд. Частка підприємства в промисловому виробництві Івано-Франківської області становить 16 %.

Аналіз останніх досліджень. Упродовж 2006–2008 років українські екологічні нормативи наблизилися до європейських стандартів. Так, накази Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 р. № 306 «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел» та № 541 від 22.12.2008 р. «Про затвердження технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт» – визначили граничні значення викидів забруднюючих речовин на рівні кращих існуючих ТЕС, а для нових і тих, що модернізуються, – такі, як в Європі (Директиви 2001/08/ЄС) й зобов'язують українські теплові електростанції будувати газоочисні системи.

З 1 лютого 2011 р. Україна стала повноправним членом європейського Енергетичного співтовариства. Тому, до 2018 р. усі українські ТЕС повинні, як і всі ТЕС держав-членів цієї організації, – зменшити свої викиди до рівня європейських стандартів, зокрема, згаданої Директиви.

Про це йдеться у Зеленій книзі Міжнародного центру перспективних досліджень щодо проблеми зменшення шкідливих викидів у тепловій електроенергетиці України через виконання вимог Енергетичного співтовариства.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, формулювання цілей. Спалювання в топках котлів вугілля щорічно приводить до забруднення атмосферного повітря валовими викидами, здебільшого, сірчистого ангідриду, твердих речовин (золи), оксидів азоту та оксидів вуглецю.

Незважаючи на те, що загальна кількість шкідливих речовин, які викидає в атмосферу електростанція, значна, шкідливий їх вплив на навколишнє середовище проявляється на невеликій території Галицького району Івано-Франківської області.

Про це свідчать отримані висновки Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України за результатами проведених обстежень забруднення атмосферного повітря в радіусі 30 кілометрової зони Бурштинської ТЕС ліхеноіндикаційними методами у 1991 р. Як біоіндикатори забруднення природного середовища, використовувалися спорові рослини і лишайники, життєдіяльність яких безпосередньо залежить від стану атмосферного повітря.

Аналогічні висновки отримано у результаті проведених досліджень з визначення якості атмосферного повітря над територією Галицького району від спеціалістів Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу у 2003–2004 роках [3].

Все це пов'язано значною мірою з висотою димових труб (180 м, 250 м, 250 м), що дозволяє збільшити радіус розсіювання забруднюючих речовин, а також – з роззою вітрів. Протягом року переважають північно-західні і західні (близько 70 %) та південно-східні (20 %) вітри. У межах тридцятикілометрової зони розташування ТЕС осідають практично тверді речовини (зола), а газоподібні викиди мають здатність переноситись на досить значні відстані.

Аналіз структури викидів забруднюючих речовин показує, що левову їх частину (близько 80 %) складають викиди сірчистого ангідриду, які неможливо зменшити режимними методами. Необхідно впроваджувати сіркоочисні установки, що виготовляються провідними зарубіжними фірмами, або парогенератори по технології спалювання вугілля в циркулюючому киплячому шарі (ЦКШ). Впровадження даних технологій потребує в першу чергу реконструкцію (заміну) діючого газоочисного обладнання.

Виклад основного матеріалу. Електростанція розташована поблизу міста Бурштин Івано-Франківської області на р. Гнила Липа на площі 25 га.

Проектна потужність електростанції 2400 МВт (12 блоків по 200 МВт).

З 1 січня 1999 р. перемарковано потужність на 2300 МВт (4 енергоблоки по 185 МВт та 8 енергоблоків по 195 МВт).

З 1 липня 2002 р. Бурштинська ТЕС працює відокремлено від ОЕС України, паралельно і під контролем ENTSO-E (Європейське товариство операторів магістральних мереж в області електроенергетики).

нергетики), забезпечуючи енергопостачання трьох областей Західної України (Закарпатської – повністю, Івано-Франківської та Львівської – частково), а також експорт до Угорщини, Словаччини та Румунії.

Робота підприємства в режимі „Острова Бурштинської ТЕС” зобов’язує колектив електростанції плідно працювати у вирішенні екологічних проблем.

Джерелами утворення викидів забруднюючих речовин від основного виробництва є котлоагрегати типу ТП-100 (блоки №№ 1–7) і ТП-100А (блоки №№ 8–12) Таганрозького котельного заводу номінальною паропродуктивністю 640 т/год.

Котли однобарабанні з природною циркуляцією, вторинним перегрівом пари і рідким шлаковидаленням, призначені для роботи в моноблоці з турбіною К-200-130 ЛМЗ. Котли розраховані на спалювання кам’яного вугілля Львівсько-Волинського басейну.

Для очистки димових газів від твердих речовин (золи) на Бурштинській ТЕС встановлено електрофільтри Семибратівського заводу типу УГ–2 (блоки №№ 1–7), які складаються з 4-х паралельно працюючих електрофільтрів. Для живлення полів електрофільтрів встановлено електроагрегати типу АТФ–600, які працюють в автоматичному режимі. Кожне поле має автоматичне живлення. Видалення золи з бункерів гідравлічне. Режим роботи механізмів струшування електродів – постійний.

Проектні характеристики:

- об’ємна витрата димових газів на виході з електрофільтру – 970000 м³/год;
- температура димових газів, що поступають на очистку – 145 °С;
- площа активного перерізу одного електрофільтру – 42 м²;
- площа осаджування – 5 575 м²;
- швидкість газу в активному січенні – 2,62 м/сек;
- максимальне розрідження – 275 мм водного стовпа;
- крок між електродами – 275 мм;
- запиленість на вході – 17,7–24,2 г/м³;
- виході – 0,495–0,744 г/м³;
- ступінь очистки – 97–98 %.

На енергоблоках №№ 8–12 до модернізації були встановлені електрофільтри типу ПГДС–4х70, які складаються з двох паралельно працюючих електрофільтрів.

Проектні технічні характеристики електрофільтрів практично аналогічні. Фактична ефективність зололовлювання становила в межах 93–95 %.

Основними причинами недостатньої ефективності даних електрофільтрів є:

- фактичний об’єм димових газів становить 1200 000–1 500 000 м³/год, а не проектний 970 000 м³/год, що спричиняє збільшення швидкості потоку в активній зоні;
- недосконала конструкція електрофільтрів заводу виробника, низька культура виготовлення, монтажу;
- висота електродів до 7,5 м;
- надзвичайно великі швидкості димових газів в активних січеннях електрофільтрів 1,65–2,62 м/с з одночасною нестачею площі осідання;
- відсутність оптимальної періодичності струшування електродів;
- нерівномірність газорозподілу між окремими апаратами і в їх активних січеннях.

Слід відмітити, що близько 62 % пиловугільних потужностей України оснащені електрофільтрами того ж Семибратівського заводу, 35 % – мокрими зололовлювачами і 3% – циклонами.

Встановлені електрофільтри Семибратівського заводу по надійності і ефективності поступають кращим зарубіжним зразкам.

Необхідно впроваджувати електрофільтр на рівні світових стандартів.

Основою майбутніх реконструкцій повинен бути електрофільтр, який забезпечує експлуатаційну ступінь очистки 99,9 % (не більше 50 мг/м³) за рахунок підтримання швидкостей димових газів в активних січеннях на рівні 1,0–1,3 м/с.

Для цього необхідно впровадження цілого ряду заходів:

- заміна або підсилення існуючих фундаментів і опорних конструкцій;

- збільшення висоти електрофільтрів до 12–15 м;
- забудова електродними системами проходів між існуючими електрофільтрами.

Забезпечення необхідних площ осадження повинно також досягатися за рахунок кількості встановлених полів, яких повинно бути 4–5.

Електрофільтри повинні оснащуватися вузлами газорозподілу з використанням верхнього і нижнього підводу газів, об'ємних газорозподільчих елементів і решіток.

При пуску електрофільтрів необхідно проводити доналадку газорозподілу. Повинні також виключатися перетоки газів повз системи електродів і надбункерного простору.

Вирішення проблеми оптимізації періодичного струшування електродів можливо за рахунок:

- застосування пневматичного видалення золи із бункерів електрофільтрів в промбункер – подальший транспорт можливий гідравлічним або пневматичним способом;
- встановлення на межах бункерів дозаторів золи;
- використання редукторів привідних електродвигунів із підвищеним передаточним числом та інші.

Вирішення проблеми надзвичайної запиленості і, особливо, підвищеного вмісту недопалу, можливо шляхом установа передвключених механічних золовловлювачів спрощеної конструкції. Однак їх гідравлічний опір повинен бути мінімальний. Для цього можуть використовуватися існуючі вигини (переломи) газоходів, а також золовловлювачі типу жалюзійних решіток, вмонтованих у форкамерах перед електрофільтрами. Тоді в ряді випадків стане можливою економія палива за рахунок вловлювання і повернення недопалу в котел.

Важливу роль у забезпеченні експлуатаційної ефективності електрофільтрів відіграють питання культури експлуатації. Для цього необхідно, щоб усі вузли і механізми підтримувались у робочому стані, електричні характеристики полів електродів слід підтримувати на рівні пускових або налагоджувальних, димові гази повинні мати температуру на 15–20 °С вище сірчистої точки роси, дотримуватись нормативних присосів по всьому тракту котла і т.п. [1].

Поряд з цим можна запропонувати малозатратну модернізацію електрофільтрів без нарощування висоти електродів, внаслідок якої можливо досить суттєво підвищити ефективність роботи діючого газоочисного обладнання. Таку реконструкцію можна впроваджувати під час капітальних ремонтів основного обладнання, включаючи раніше запропоновані заходи (зменшення присосів по тракту, газорозподіл, оптимізація струшування і використання передвключених механічних золовловлювачів, заміна агрегатів живлення і т.д.).

Додатково до вище викладеного можна запропонувати використання дифузорів і конфузорів електрофільтрів для установа в них додаткових площ електричного осадження золи. При цьому в якості осаджувальних електродів можуть використовуватися існуючі газорозподільчі решітки, між якими встановлюються коронуючі електроди. Тобто отримуються додаткові поля електродів з поперечним ходом газів.

Впровадження даних заходів може підвищити ККД на 2,5–3,0 %.

Виходячи з основних вимог щодо підвищення ефективності роботи діючих електрофільтрів, у 2001 р. на енергоблоці № 8 Бурштинської ТЕС, в період капітального ремонту, проведено малозатратну реконструкцію електрофільтрів [2].

У виконанні робіт приймали участь: ЗАТ «Техенерго», Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, ВАТ «Південькольтметгазоочистка», ВАТ «ЛьвівОРГРЕС» при значному сприянні керівництва ВАТ «Західенерго» і Бурштинської ТЕС.

У процесі реконструкції виконано наступне:

- змінена конструкція дифузорів з їх бункерами;
- на вході в дифузори між газорозподільчими решітками змонтована додаткова система коронуючих електродів із живленням від окремого електроагрегату;
- виконана заміна електродної системи з ліквідацією проміжних штоків на механізмах струшування;
- відновлена система струшування коронуючих електродів;
- в конфузори встановлено додаткову газорозподільчу решітку;

- на останніх рамах підвісу коронуючих електродів встановлені додаткові коронуючі елементи;
- змонтована система пневмозоловидалення;
- виконана реконструкція агрегатів типу АРС із заміною магнітного підсилювача на тиристори;
- замінено систему керування електроагрегатом типу «ЦЕМЕС» на сучасну типу АРН-А виробництва ВАТ «Техенерго»;
- встановлено сучасну систему управління механізмами струшування типу ПУМСЕ конструкції Інституту вугільних енерготехнологій, м. Київ.

Перед здачею електрофільтрів в експлуатацію проведено повний комплекс налагоджувальних робіт:

- перевірка і центровка електродів;
- наладка реконструйованих електроагрегатів;
- наладка системи керування періодичним струшуванням (на осаджувальних електродах повинен накопичуватись шар золи товщиною 7–10 мм);
- наладка газорозподілення як в камерах електрофільтрів, так і між ними.

У результаті проведеної малозатратної реконструкції електрофільтрів (затрати близько 5 млн. грн) вдалося підняти ступінь очистки димових газів з 94,2 % до 97,31 %. Запиленість димових газів на виході із електрофільтра складала 304–439 мг/м³. Викиди твердих частинок в атмосферне повітря знизились з 6033 т до 2798 т на рік. Дана реконструкція не знімає питання заміни електрофільтрів на нові.

Поряд з цим на енергоблоці № 12 в 2002 р. завершено роботи і введено в експлуатацію нові електрофільтри Семибратівського заводу типу ЕГБМ 2-40-12-6-4 (два паралельно змонтованих електрофільтри) з висотою електродів 12 метрів.

Електрофільтри обладнані системою попередньої електричної зарядки частинок золи в димових газах. Система попередньої зарядки розташована в дифузорі електрофільтра перед першою та другою газорозподільною решіткою. Вона являє собою систему коронуючих електродів, що забезпечують іонізацію частинок золи перед газорозподільними решітками. Крім того, отвори в решітках використовуються як коагулятори частинок, що проходять через ці отвори. Електроди забезпечують попередню зарядку частинок золи, що поступають на електроди першого поля, що дозволяє використовувати перше поле в повному обсязі, і тим самим збільшувати час перебування золи в активній зоні електрофільтра. Очищення газорозподільних решіток здійснюється за рахунок сил гравітації та вібрації решіток під дією набігаючого потоку газів.

Технічні характеристики електрофільтрів:

- площа активного перерізу одного електрофільтра – 154,8 м²;
- кількість газових проходів – 40 шт.;
- кількість полів – 4 шт.;
- відстань між одноіменними електродами – 350 мм;
- температура димових газів на вході в електрофільтр – 143 °С, на виході – 135 °С;
- об'ємна витрата димових газів – 1,5 млн. м³;
- ступінь очищення димових газів – 99 % (250 мг/ м³).

Струшування осаджувальних і коронуючих електродів молоткове.

На початку 2003 р. на засіданні технічної ради Міністерства палива та енергетики України прийнято рішення про впровадження пілотного проекту українського електрофільтру на блоці № 11 Бурштинської ТЕС. Робочий проект заміни електрофільтра блоку № 11 розроблений ВАТ «Львівтеплоелектропроект» із залученням інституту «Укрдіпрогазоочистка», консорціуму «Енергомашінжиніринг», ТЗОВ «Інфокс», ВАТ «ЛьвівОРГРЕС» на основі технічного завдання БТЕС ВАТ «Західенерго», затвердженого Мінпаливенерго 04.02.2003 р.

У I кварталі 2005 р. вперше в Україні, у межах комірки котла № 11 Бурштинської ТЕС, введено в експлуатацію вітчизняний електрофільтр типу ЕГТ-175-38-12-10WS-380-5. Електрофільтр має наступну технічну характеристику (1 компонент з двох корпусів):

- площа активного січення – 175 м²;
- кількість газових проходів – 38;

- висота осаджувальних електродів – 12 м;
- кількість елементів в осаджувальному електроді – 10;
- міжелектродна відстань – 380 мм;
- кількість полів – 5.

Струшування осаджуючих електродів здійснюється почергово падаючими молотками на обертових валах.

Для струшування коронуючих електродів застосовано ударно-молотковий механізм. Струшування здійснюється молотками з системою типу «дзвін», застосованій на пневмоімпульсному ударі.

У проекті передбачена система обігріву низу бункерів. Основні технічні показники електрофільтра (електрофільтр у складі двох корпусів):

- продуктивність по очищеному газу при швидкості 1,16 м/с – 208 м³/с;
- температура очищеного газу – 148 °С;
- присоси повітря в електрофільтр – до 3 %;
- залишкова запиленість – до 50 мг/м³;
- ступінь очистки газу – 99,875 %;
- гідравлічний опір електрофільтра – до 200 Па.

Розміри між крайніми стійками двох корпусів електрофільтра складають:

- по довжині – 26600 мм;
- по ширині – 32600 мм.

Відмітка верху електрофільтра дорівнює 24,49 м. Довжина нового електрофільтра в порівнянні з довжиною старих збільшилася на 9 м.

Проектом передбачена розробка двох систем золовидалення:

- основне пневмозоловидалення на силосний склад;
- резервне гідрозоловидалення, змив в канал гідрозоловидалення (ГЗВ).

При системі пневмозоловидалення зола від бункерів електрофільтрів через золові течі скидаються в золорозподільники, від яких пневмозолопроводами подається в бункер сухої золи за допомогою стиснутого повітря. Зола з бункерів сухої золи пневмогвинтовими насосами подається на склад сухої золи.

При системі гідрозоловидалення зола від бункерів електрофільтрів через золові течі скидається в золорозподільники, з яких зола направляється в золозмивні апарати. Із золозмивного апарату зола скидається в існуючий канал ГЗВ. По каналу ГЗВ зола змивними соплами змивається в багерну насосну станцію.

Випробування показали, як видно з таблиці 1 при порівнянні основних показників, що встановлені сучасні електрофільтри забезпечують проектну питому масову концентрацію золи в димових газах після очищення. Кількість викидів золи в атмосферу зменшилась з 1589 до 50 мг/м³. Ступінь очищення димових газів при максимальному навантаженні блока знаходиться в межах 99,875 %. Це сприяло підвищенню ефективності вловлювання золи в електрофільтрах і підвищило їх коефіцієнт корисної дії.

У 2006 р. на енергоблоці № 10 введено в експлуатацію новий електрофільтр типу ЕГУ-175-38-12-10WS420-375-5, що дозволило зменшити викиди твердих речовин в атмосферне повітря з 5269 т/рік до 276 т/рік (з 1300 мг/м³ до 50 мг/м³). Вартість електрофільтра 39,399 млн. грн.

У 2007 р. на енергоблоці № 9 введено в експлуатацію новий електрофільтр типу ЕГУ-175-38-12-10WS420-375-5, що дозволило зменшити викиди твердих речовин в атмосферне повітря з 5287 т/рік до 314 т/рік (з 1589 мг/м³ до 50 мг/м³). Вартість електрофільтра 38,309 млн. грн.

У результаті конкурсних торгів керівництвом підприємства було прийняте рішення про встановлення пілотного проекту по реконструкції електрофільтра блока № 7. Так, на протязі 2011 р. на енергоблоці № 7 встановлено два чотирьохпольних односекційних електрофільтра ЕСГ-1х4-34х40х75х150х5 фірми «Альстом», які повинні забезпечити залишкову концентрацію золи не більше 50 мг/м³ з системи пневмозоловидалення і гідрозоловидалення. Ступінь очищення димових газів згідно проектних характеристик становитиме не менше 99,875 %.

Порівняння роботи котла ТП-100А з різними електрофільтрами при умові спалювання котлом вугілля з калорійністю 4575 ккал/кг і річною витратою палива 450 тис. т.

№ ч/ч	Тип електрофільтра	Ступінь очистки димових газів, %	Запиленість димових газів після електрофільтра, мг/м ³	Показник емісії твердих частинок (золи), г/ГДж	Валовий викид золи, т/рік
1	Робота котла при відсутності електрофільтра	0	-	12154,6	104162,4
2	Робота котла з електрофільтром ПГДС-4-70 (існуючі блоки № 8-10)	92	-	972,4	8333,3
3	Робота котла з електрофільтром ЕГТ 175-38-12-10WS-380-5 (блок № 11)	99,875	50	15,2	130,3
4	Робота котла з електрофільтром ЕГБМ 2-40-12-6-4 (блок № 12)	99	250-300	121,5	1041,3

Висновки. Виконання екологічних стандартів Європейського співтовариства в енергетичному секторі потребує масштабного переобладнання нині працюючих енергоблоків, будівництва нових та консервації застарілих потужностей. Такі досягнення стали можливими завдяки створеним електрофільтрам, які за всіма параметрами і показниками відповідають європейським стандартам. Це створює передумови для прискореної заміни зношеного парку електрофільтрів, що не відповідають екологічним нормам.

На сьогодні успішно працюють три нових електрофільтри на БТЕС, де запиленість димових газів після електрофільтра становить не більше 50 мг/м³, ще один в стадії підготовки до пуску. Досягнуті результати суттєво кращі від діючих нормативів ЄС.

Результати проведеної реконструкції підтвердили рішення керівництва ПАТ «Західенерго» та Бурштинської ТЕС виконати аналогічну роботу на решті електрофільтрах.

Турбота про оточуюче середовище – справа не з дешевих. Але це саме та справа, на яку шкодувати кошти просто небезпечно для життя всього живого на Землі, у тому числі і людини.

Література

1. Березницький О.О. Реконструкція електрофільтрів – один із основних шляхів для дотримання чинного природоохоронного законодавства / О.О. Березницький, В.В.Новицький, В.О. Сторожук, Н.С. Шамаль // Енергетика та Електрифікація. – К., 2010. – № 5. – С. 54-56.
2. Дем'ян М.М. Науково-технічний прогрес на Бурштинській ТЕС / М.М. Дем'ян // Енергетика та Електрифікація. – К., 2005. – №11. – С. 21-24.
3. Екологія Галицького району: монографія / Під ред. доктора геолого-мінералогічних наук, професора О.М. Адаменка. – Івано-Франківськ : Нова Зоря, 2004. – 198 с.

Поступила в редакцію 1 березня 2012 р.

Рекомендував до друку д.т.н. Я.О. Адаменко