

Список літератури

1. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ./ Р. Галлагер— М.: Мир, 1984 - 428 с.
2. Гетопанов В.Н. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов Учебник для вузов/ В.Н. Гетопанов., В.М. Рачек., В.И. Солод. - Недра, Москва, 1982 г., 350 стр.;
3. Доронин С.В., Чурсина Т.А. Основы проектных расчетов горных машин и оборудования Учебное пособие/ С.В. Доронин, Т.А. Чурсина. - Красноярск: ГАЦМиЗ, 2002. - 76 с.
4. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. — М.: Мир, 1986 – 309 с
5. Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем/ Ю.Б.Колесов.- СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. 240 с.
6. Лобанов В.А. Конечноэлементное моделирование гидродинамики льда / В.А. Лобанов //Вестник научно-технического развития. Национальная Технологическая М. 2011 .- № 11 (51), С.10-19.
7. Малеев Г.В. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов/ Г.В.Малеев, В.Г.Гуляев, Н.Г. Бойко. - М.: Недра, 1988. - 368с.
8. Официальный сайт EDEM software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.edemsimulation.com/>
9. Официальный сайт SimulationX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simulationx.com/>
10. Шахторин И.О. Доводка машин ударного действия при помощи современного программного обеспечения / И.О. Шахторин, В.В. Тимонин //Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых» Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева 17-19 ноября 2015 г.
11. Möller M. Particle-based fluid simulation for interactive applications / M. Möller, D. Charypar, M. Gross // Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH / Eurographics symposium on Computer animation. — Aire-la- Ville, 2003. — P. 154–159
12. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics / J. J. Monaghan // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — Clayton, 1992. — P. 543–574.
13. Pande G., Beer G., Williams J.R. Numerical Modeling in Rock Mechanics/ G. Pande, G. Beer, J.R Williams.- John Wiley and Sons, 1990.
14. Williams J.R. O'Connor R. Discrete Element Simulation and the Contact Problem/ J.R. Williams, R.O'Connor// Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 6, 4,1999 - P. 279—304,
15. G R Liu, M B Liu. Smoothed Particle Hydrodynamics.A Meshfree Particle Method.-2003.-472pp

Рукопись поступила в редакцию 19.03.16

УДК (62-531.9:622.234.6):621.51

О.В. ЗАМИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., М.Ю. ЛІДЕР, аспірант
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ В ШАХТНИХ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВКАХ

Мета. Метою даної статті є аналіз сучасного стану виробництва стисненого повітря та шляхів підвищення енергетичної ефективності компресорних установок в умовах шахт.

Методи дослідження. У роботі використовувалися теоретичні та емпіричні методи дослідження. Проведено аналіз сучасного стану парку компресорних установок, досліджено можливі схеми охолодження стисненого повітря між ступенями компресора та вибрано найбільш ефективну систему.

Наукова новизна. Вдосконалено схему охолодження стисненого повітря між ступенями компресора за допомогою пари «труба Вентурі-відцентровий сепаратор-краплевловлювач»; подальшого розвитку набуло дослідження щодо підвищення енергетичної ефективності виробництва стисненого повітря.

Практична цінність. Розроблена схема дозволить підвищити ефективність роботи турбокомпресора за рахунок оптимізації функціонування апаратів контактної системи охолодження стисненого повітря. Застосування даної системи охолодження дозволить зменшити енергетичну залежність та підвищити ефективність виробництва на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

Результати роботи. Обов'язковою умовою нормальної експлуатації шахтних турбокомпресорів є проміжне охолодження стисненого повітря між ступенями. Цим досягається істотне зменшення питомих витрат електроенергії.

Способи охолодження, які застосовуються в даний час, не завжди забезпечують зниження температури повітря до необхідного рівня, в той же час вибір більш ефективного способу охолодження є суттєвим резервом для вдосконалення функціонування гірничого устаткування.

Аналіз показав, що більш ефективним є застосування саме контактної системи охолодження стисненого повітря. Контактна система охолодження стисненого повітря для роботи гірничого устаткування дозволяє значно підвищити ефективність його функціонування. Разом з тим, аналіз цієї системи охолодження вказує на необхідність оптимізації її параметрів з метою мінімізації втрат.

Найбільш прийнятним варіантом для застосування в якості апаратів контактної системи охолодження шахтних турбокомпресорів є система, що складається з змішувального пристрою типу труба Вентурі і відцентрового сепаратора-краплевловлювача. Запропонована принципова схема охолодження стисненого повітря між ступенями компресора за допомогою пари «труба Вентурі - відцентровий сепаратор-краплевловлювач», з якої видно, що дана пара «труба Вентурі - відцентровий сепаратор-краплевловлювач» є головним конструктивним елементом як контактних повітроохолоджувачів, так і охолоджувача циркуляційної води. Такий контактний апарат поєднує досить високу ефективність тепломасообміну з відносно невеликим гідравлічним опором.

Тому, вдосконалення системи забезпечення шахт стисненим повітрям є одним з основних напрямків енергозбереження у гірничій галузі.

Ключові слова: турбокомпресори, енергетична ефективність, стиснуте повітря, пневмопостачання, енергозбереження, енергоносія.

Постановка проблеми і стан її вирішення. Компресорні станції та установки є невід'ємною частиною промислових підприємств гірничої галузі. Повітряні компресори становлять понад 80 % від загального парку компресорів. Таке велике поширення повітряних компресорів пояснюється необхідністю використання стисненого повітря як найбільш зручного і порівняно недорогого енергоносія. Основними перевагами стисненого повітря перед іншими енергоносіями (природний газ, електроенергія, водяна пара) є простота й дешевизна його вироблення і транспортування до місця споживання. Системи виробництва та розподілу стисненого повітря в промисловості споживають до 10 % електроенергії. На жаль, існує думка, що стиснене повітря коштує дешево, хоча лише 5–10 % спожитої електроенергії витрачається на здійснення корисної механічної роботи. Витрати на вироблення стисненого повітря становлять 5–15 % від собівартості продукції, а для деяких виробництв досягають 30 % та більше [7]. Тому, вдосконалення системи забезпечення шахт стисненим повітрям є одним з основних напрямків енергозбереження у гірничій галузі.

Аналіз досліджень та публікацій. Дослідженням щодо підвищення ефективності компресорних установок присвячені праці видатних науковців Мурзіна В. Ф., Фролова П. П., Цейтліна Ю. А., Ріса В. Ф., Самусі В. І., Оксеня Ю. І. та інших.

Стиснене повітря – найпоширеніший енергоносіє. Він використовується практично на будь-якому підприємстві. Широкому застосуванню стисненого повітря, як енергоносія, сприяють його позитивні якості: пружність; швидка передача тиску; прозорість; нездатність до конденсації (в умовах навколишнього середовища); нешкідливість; висока транспортабельність; необмежений запас у природі [10].

Головна перевага стисненого повітря як енергоносія - це можливість використання технологічних, малогабаритних та легких пневмоінструментів і пристроїв з високою питомою потужністю.

Але поряд з позитивними якостями і зручністю у використанні стиснене повітря як енергоносія має і недоліки: великі втрати через різні витоки (можуть досягати 10-40%); висока собівартість стисненого повітря через велику енергоємність його виробництва [12].

Виробництво стисненого повітря надзвичайно неефективний процес. За даними роботи [15], біля 90 % електроенергії, яка витрачається для його виробництва, губиться у вигляді теплоти. Менше 10 % електроенергії, яка витрачається, перетворюється в корисну роботу. Погана конструкція і витоки в системах, зокрема, витоки повітря з розподільних трубопроводів сприяють подальшому зниженню ефективності ще на 30...50 %. Ситуацію можна виправити встановивши на компресор систему, яка дозволить використовувати викидну теплову енергію компресора з користю (наприклад, підігрів води для технології, потреб підприємства або опалення). Такі системи називаються системами утилізації. Вони дозволяють підвищити загальний ККД компресора до 70 – 80%.

У роботі [13] визначено, що для оцінки досконалості процесів, що протікають в компресорних установках, доцільно використовувати ексергетичний метод. Втрати ексергії в компресорних агрегатах складають біля 50% потужності, яка підводиться до їхніх приводних двигунів, 37,3% енергії втрачається при транспортуванні стиснутого повітря по трубопроводу, 11% енергії втрачається в пневмодвигунах і лише 2,5% є корисною роботою.

Отже, основними причинами низьких енергетичних показників компресорної установки [14] є непродуктивні втрати повітря, нераціональні режими охолодження компресорів при виробництві стисненого повітря, нераціональне використання або не використання енергії тепла, яке відводиться від компресорних установок.

Отже, дослідження щодо підвищення енергетичної ефективності компресорних установок є досить актуальним.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз сучасного стану виробництва стисненого повітря та шляхів підвищення енергетичної ефективності компресорних установок в умовах шахт.

Викладення основного матеріалу. Як машини для стиснення повітря широко використовуються поршневі, відцентрові, а останніми роками й гвинтові компресори. Спочатку всюди застосовувалися виключно поршневі компресори, які постійно вдосконалювалися. З появою великих промислових підприємств для задоволення їх потреб щодо стисненого повітря почали використовувати високопродуктивні відцентрові компресори, а в окремих випадках і осьові машини. У період спаду економіки в країнах СНД на підприємствах різко знизилися обсяги виробництва, що привело до необхідності виведення з експлуатації великих компресорних станцій та установок і насамперед відцентрових компресорів [11]. У боротьбі за зниження собівартості продукції все більш широко використовуються енергозберігаючі технології, знижується споживання енергоресурсів, зокрема й стисненого повітря.

У табл. 1 наведено дані про парк компресорів, які експлуатуються на підприємствах гірничої промисловості України [7].

Таблиця 1

Склад парку компресорів на підприємствах гірничої галузі України

Типи компресорів, країна виробник	Продуктивність, м ³ /хв	Загальна кількість по типам, шт
Турбокомпресори, Росія	135; 250; 500	187
Поршневі компресори, Росія, Німеччина	100	412
Поршневі компресори, Росія, Україна	20-30;50	132
Гвинтові компресори, Росія	20-50	200
Гвинтові компресори, Росія, Україна	5	1215

Аналіз засвідчує, що загальний стан компресорного парку у ряді галузей, зокрема провідних, не відповідає сучасним вимогам. На підставі досвіду, накопиченого у ВАТ «НВАТ ВНДІ Компресормаш» (головної організації України з компресоробудування) [8], під час обстеження систем забезпечення стисненим повітрям промислових підприємств різних галузей промислового виробництва виявлений ряд типових недоліків:

потужність компресорних станцій підприємств, створена в основному ще в доперевбудовні роки з орієнтацією на великі обсяги випуску продукції, щодо потреб, які виникли на сьогодні, явно надмірна;

компресорні станції часто оснащені морально і фізично застарілим устаткуванням, технічний стан якого характеризується як незадовільний;

складне компресорне господарство вимагає значних витрат на утримання експлуатаційного та ремонтного персоналу, придбання запасних частин для компресорів, ряд з яких уже знятий із виробництва;

системи повітропроводів громіздкі, з істотними доповненнями і змінами проектних схем, мають «тупикові» та невикористовувані ділянки, в яких утворюється волога, а в зимовий час – обмерзання, багато свищів, теч, нещільність арматури і т. п., це зумовлює втрати повітря, що набагато перевищують нормативні;

здебільшого не налагоджений сучасний контроль вироблення і споживання стисненого повітря, відсутні необхідні засоби контролюючо-вимірювальних приладів та автоматики;

відсутні ефективні засоби регулювання виробництва стисненого повітря. Пристосування компресорної станції до змінюваного режиму споживання здійснюється або вмиканням – вимиканням агрегатів, або стравлюванням надмірного повітря в атмосферу, величина якого досягає 50 % та більше від продуктивності компресора, - найбільш неефективний спосіб регулювання;

постачання стисненого повітря підприємствам здійснюється, як правило, з центральної компресорної станції. На великих підприємствах деякі споживачі повітря віддалені на сотні й навіть тисячі метрів. У результаті в трубопроводах мають місце великі гідравлічні втрати, кон-

денсатні пробки, теча, і віддалені споживачі зазнають нестачі повітря, що потрясає виробництво і призводить до значних збитків.

На шахтах і рудниках розповсюдження одержали поршневі, гвинтові компресори та турбокомпресори.

У галузі великих продуктивностей найбільш ефективні відцентрові компресори (турбокомпресори). Перевага їх застосування визначається потребою у великих масах газу, стисненого в одній машині, більш високою надійністю та довговічністю роботи, поданням стисненого газу без пульсацій тиску [8]. Межі максимальної потужності відцентрових компресорів значно розширилися, на цей час експлуатуються відцентрові компресори продуктивністю до 1 000 м³/хв і більше.

Як в процесі стиснення, так і підготовки стисненого газу перед подачею його споживачеві, стиснений газ охолоджується. Цим досягається істотне зменшення питомих витрат електроенергії. Виносні повітроохолоджувачі, що застосовуються для цих цілей, не завжди забезпечують необхідне охолодження повітря [1]. Це пов'язано, в першу чергу, з погіршенням їх ефективності через забруднення теплообмінних поверхонь накипними відкладеннями внаслідок відсутності на шахтних компресорних станціях водопідготовки. При цьому, температура повітря на виході їх повітроохолоджувачів може досягати 75-90 °С (замість 35 °С). Це несприятливо позначається на показниках роботи турбокомпресорів. Крім того, забруднення збільшують гідравлічний опір апаратів по повітрю і воді. Перше, призводить до погіршення характеристики турбокомпресора через зростання падіння тиску на повітроохолоджувачі, друге до зниження витрати охолоджувальної води, що призводить до збільшення температури повітря.

Охолодження повітря в процесі стиснення в компресорних агрегатах обумовлене наступними факторами. Перший фактор - економічний. Охолоджуючи повітря, яке стискується, знижують його внутрішню енергію. Це приводить до зниження роботи на його стиснення. Чим інтенсивніше охолодження, тим менше витрачається електроенергії на стиснення повітря і вище ККД компресору. Другий фактор - безпека. При роботі компресорного агрегату змащування його рухомих елементів приводить до утворення нагару і вибухонебезпечних сумішей. Вибухонебезпечність нагару і сумішей збільшується з підвищенням температури стисненого повітря. Тому правила експлуатації компресорів вимагають, щоб температура повітря після кожної ступені стиснення компресора в нагнітаючому патрубку не перевищувала 170 °С [16].

Тому, суттєвим резервом зниження енерговитрат при виробництві стисненого повітря є підвищення ефективності системи охолодження турбокомпресорів.

Аналіз показав, що більш ефективним є застосування саме контактної системи охолодження стисненого повітря.

Основною перевагою цього способу є висока інтенсивність теплообміну через відсутність розділяючих поверхонь, схильних до забруднення накипом, так як тут тепломасообмін протікає при безпосередньому контакті середовищ [2].

Контактна система охолодження стисненого повітря для роботи гірничого устаткування дозволяє значно підвищити ефективність його функціонування. Разом з тим, аналіз цієї системи охолодження вказує на необхідність оптимізації її параметрів з метою мінімізації втрат.

Ефективність роботи турбокомпресорів і їх енерговитрати також істотно залежать від ступеня охолодження циркуляційної води в градирні.

Застосовувані в даний час, для цих цілей, вентиляторні градирні мають цілий ряд істотних недоліків, до яких відносяться: значне винесення води в краплинному вигляді; її забруднення твердими частинками і продуктами руйнування зрошувачів; велика залежність ступеня охолодження води від умов навколишнього середовища [5].

Підвищене крапельне винесення викликає необхідність в безперервному поповненні системи водою. Це, крім додаткових витрат, збільшує жорсткість води, що призводить до забруднення тепловіддаючих поверхонь повітроохолоджувачів турбокомпресора.

При цьому погіршується охолодження стисненого повітря між секціями турбокомпресора, що також призводить до підвищення витрат електроенергії, так підвищення температури повітря після проміжних охолоджувачів повітря на 10°С збільшує питомі витрати електроенергії в середньому на 1,2% [4]. Ці чинники спонукають до пошуку нових, більш ефективних охолоджувачів циркуляційної води.

Питання підвищення ефективності охолодження циркуляційної води досліджувалися в роботах Проскураєва Б.В., Бермана Л.Д., Гоголін А.А., Брусилівського І.В., Носова А.Я., Ареф'єва Ю.І. та ін.

Найбільш прийнятним варіантом для застосування в якості апаратів контактної системи охолодження шахтних турбокомпресорів є система, що складається з змішувального пристрою типу труба Вентурі і відцентрового сепаратора-краплевлловлювача [5,6].

На рис.1 представлена принципова схема охолодження стисненого повітря між ступенями компресора за допомогою пари «труба Вентурі - відцентровий сепаратор-краплевлловлювач», з якої видно, що дана пара «труба Вентурі - відцентровий сепаратор-краплевлловлювач» є головним конструктивним елементом як контактних повітроохолоджувачів, так і охолоджувача циркуляційної води. Такий контактний апарат поєднує досить високу ефективність тепломасообміну з відносно невеликим гідравлічним опором [3].

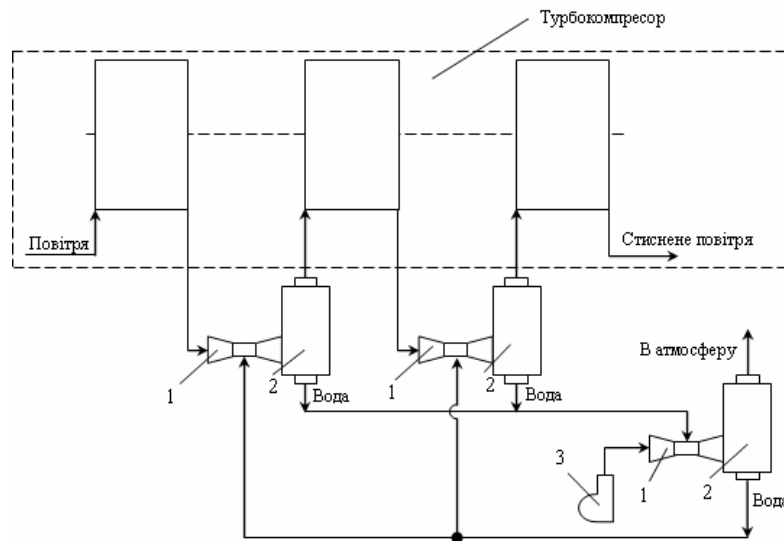


Рис. 1. Принципова схема охолодження стисненого повітря між ступенями компресора за допомогою пари «труба Вентурі-відцентровий сепаратор-краплевлловлювач»: I, II, III - неохоложені ступені компресора; 1- труба Вентурі; 2 - відцентровий сепаратор-краплевлловлювач; 3- вентилятор

У роботах [5,6] визначені раціональні параметри системи «труба Вентурі- відцентровий сепаратор-краплевлловлювач» для номінального режиму роботи турбокомпресора при нормальних початкових умовах.

Як один з можливих шляхів підвищення ефективності виробництва стисненого повітря в умовах шахт за доцільне встановити залежність раціональних параметрів апаратів контактної системи охолодження шахтних турбокомпресорів від режиму роботи та початкових умов.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Аналіз сучасного стану питання виробництва стисненого повітря в компресорних агрегатах в умовах шахт, дозволив зробити такі висновки:

1. Найбільш енергоємними споживачами електричної енергії шахт є стаціонарні установки - водовідлив, вентиляція, підйом, компресорні, - які разом споживають понад 80 % усієї споживаної електроенергії шахти. Особливо великі витрати на вироблення стисненого повітря центральними компресорними станціями, які складають більше 30% від усієї споживаної комбінатом електроенергії.

2. Основними причинами низьких енергетичних показників компресорної установки є непродуктивні втрати повітря, нераціональні режими охолодження компресорів при виробництві

стисненого повітря, нераціональне використання або не використання енергії тепла, яке відводиться від компресорних установок.

Ефективність роботи системи охолодження визначає економічність всього процесу одержання стисненого повітря, а від її надійності залежить надійна та безпечна робота компресорного агрегату. Отже, підвищення ефективності охолодження стиснутого повітря є першочерговим завданням, розв'язання якого підвищує енергетичну ефективність компресорної установки.

Подальші дослідження будуть направлені на знаходження раціональних параметрів апаратів контактної системи охолодження залежно від режимів роботи та початкових умов, що дозволить підвищити енергетичну ефективність виробництва стисненого повітря в шахтних компресорних установках.

Список літератури

1. **Замицький О. В.** Наукове обґрунтування технічних рішень по вдосконаленню системи пневмопостачання гірничого обладнання : автореф. дис. д-ра тех. наук : 05.05.06 / **Замицький О.В.** ; М-во освіти і науки України, Криворізький технічний університет. – Кривий Ріг, 2007. – 35 с.
2. **Замыцкий О. В.** Анализ способов охлаждения при производстве сжатого воздуха для горных машин//Горн. инф.-анал. бюл./Моск. горн. ун-т. Научн. техн. сб. – 2001. – №10. – С.67-70.
3. **Замыцкий О. В.** Тепломассообмен в контактных воздухоохладителях турбокомпрессора//Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГУ, 2004. – №9. –С.327-330.
4. **Замыцкий О. В.** Тепломассообмен в контактном охладителе циркуляционной воды турбокомпрессора // Разработка рудных месторождений, 2004. - Кривой Рог: КТУ. – Вып. 87. – С.125–129.
5. **Замицький О. В.** Выбор параметров контактных охладителей циркуляционной воды турбокомпрессора / О.В. Замыцкий, Н.В. Бондарь // *Металлургическая теплотехника* : Сб. научн. трудов. – Днепропетровск: Новая идеология. – 2011. – Вып. 3(18). С.101-107.
6. **Замыцкий О. В.** Выбор параметров контактных воздухоохладителей рудничных турбокомпрессоров // *Вісник Криворізького технічного університету*, 2005. - Кривий Ріг: КТУ.– Вып. 6. – С.85-88.
7. **Бондаренко Г. А.** Компресорні станції: підручник / **Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик.** – Суми: Сумський державний університет, 2016. – 385 с.
8. **Коренькова Т. В., Лузан П. В., Михайличенко Д. А., Перекрест А. Л., Сердюк О. О.** Системи регулювання параметрів та підвищення ефективності роботи насосних, вентиляторних та компресорних установок: Навч. посібник. – Кременчук: КДПУ, 2006. – 152 с.
9. Системы воздухообеспечения промышленных предприятий. **Борисов Б. Г., Калинин Н. В., Михайлов В. А.** и др. / под ред. В. А. Германа. М.: Моск. энерг. ин-т, 1989. – 180 с.
10. **Кузнецов Ю. В., Кузнецов М. Ю.** Сжатый воздух. – Екатеринбург: Уро РАН, 2007. – 514 с.
11. Енергетична стратегія України до 2030 року // Розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.03.2006 за № 145-р.
12. О проблемах пневмоэнергетического комплекса шахт / [**Грядущий Б. А., Кирик Г. В., Коваль А. Н. Жарков П. Е.** и др.]// *Компрессорное и энергетическое машиностроение.* – 2008. – №1(11). – С. 2 – 5.
13. **Цейтлин Ю. А., Мурзин В. А.** Пневматические установки шахт. – М.: Недра, 1985. – 352 с.
14. **Chiou C.B.** The study of energy-saving strategy for direct expansion air conditioning system / [Chiou C.B., Chiou C.H., Cni C.M., Lin S.L.] // *Energy and Buildings.* – 2008. – Volume 40. – Issue 9. p.p. 1660 – 1665.
15. **Гойхман В. М.** Регулирование электропотребления и экономия электроэнергии на угольных шахтах / **В. М. Гойхман, Ю. П. Миновский.** – М.: Недра, 1988. – 320 с.
16. **Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М.** Справочник по теплообменным аппаратам. -М: Машиностроение, 1989.

Рукопис подано до редакції 04.04.16