

вания минерального Кольского полуострова". Апатиты, 2007. - С.95-100.

12. В. А. Ровкушин., Б. А. Боковиков, С. Г. Братчиков, Бескоксовая переработка титановых руд. – М.: Металлургия, 1985. – 247 с.

13. Л. И. Леонтьев, Н. А. Ватолин, С. В. Шаврин и др. Пирометаллургическая переработка комплексных руд. М: Metallurgiya. – 1997. - 431 с.

Рукопись поступила в редакцию 14.02.19

УДК 004.358:621.186.1

О.В. ЗАМИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., Б.М. ЛІТОВКО, канд. техн. наук, доц.,  
М.І. ШЕПЕЛЕНКО, аспірант, Криворізький національний університет

## ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ВІДЦЕНТРОВОГО СЕПАРАТОРА КРАПЛИННОЇ ВОЛОГИ

**Мета.** В гірничій промисловості, зазвичай використовують систему підготовки стисненого повітря, яке являється основним видом енергії для механізації елементів пневмозабезпечення, таких як пневматичні бурильні машини, відбійні молотки і т.д. Існує проблема постійного забруднення при транспортуванні стисненого повітря від турбокомпресора до споживача. Для забезпечення необхідної надійності та збільшення періоду експлуатації система пневмозабезпечення потребує використання додаткового устаткування для підготовки стисненого повітря. Доцільно в даному випадку використовувати контактну схему охолодження повітря.

**Методи.** У науковій праці розглянуті основні принципи 3D-моделювання об'єкту дослідження. В якості об'єкта візуалізації була обрана модель відцентрового сепаратора краплинної вологи. Даний апарат проектується та виготовляється в складальному виконанні. Дослідження моделі проводилось з використанням методу кінцевих елементів та методами математичної статистики для обробки даних. Використання імітаційного моделювання як бази для дослідження сепараційних об'єктів дозволяє значно скоротити час та ресурси на виготовлення об'єкта досліджень. Обґрунтованість та достовірність роботи обумовлена аналітичними та експериментальними методами досліджень, які були проведені на віртуальних моделях.

**Наукова новизна** полягає у встановленні закономірностей раціональних конструктивних та технологічних параметрів сепаратора. Завдяки створенню зменшеної моделі відцентрового сепаратора краплинної вологи, який є частиною апарату контактної системи охолодження стисненого повітря та на її основі виготовлено макетну модель, що дозволить встановити раціональні параметри відцентрових краплевловлювачів системи пневмозабезпечення гірничого устаткування.

**Практична значимість.** Результати цієї роботи мають практичне значення, так як одержані в ній дані дають змогу збільшити ефективність стандартного обладнання, яке використовується на гірничих виробництвах нашого регіону.

**Результати.** Робота супроводжується віртуальною моделлю апарату, з допомогою якої є можливим виготовлення прототипу для лабораторного дослідження сепарації. Дана модель відповідає характеристикам реальних об'єктів та процесів.

**Ключові слова:** повітроохолоджувач, турбокомпресор, відцентровий сепаратор, газорідина система, краплинна волога, моделювання.

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-48-64-68

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Основною задачею на промислових підприємствах є дотримання політики максимального енергозбереження. Саме поглиблений аналіз структури виробництва енергетичних ресурсів та їх розподілу між виробничими технологіями дає можливість досягнути найбільшого енергозбереження.

В теперішній час важко вказати галузь промисловості, в котрій не використовувалось стиснене повітря. Його застосування обумовлене енергетичною політикою та зміною в енергетичній структурі балансу виробництва. Також використання стисненого повітря має ряд переваг з технічної та економічної точки зору. Завдання його виготовлення та розподілу між пневмоприймачами до теперішнього часу являється актуальним, так як дане виробництво вагомо впливає на енергетичну складову собівартості продукції.

При підготовці стисненого повітря та розподілу поміж пневмоприймачами виробництва витікає проблема в його постійному забрудненні. Як відомо, при транспортуванні стиснутого повітря в повітропроводі та подачі повітря в збірники повітря, воно охолоджується, що приводить до конденсації мастила та вологи. Також повітря, яке буде використане, вмішує в собі механіч-

ні домішки (пил). Для забезпечення необхідної надійності та збільшення періоду експлуатації система пневмозабезпечення потребує використання додаткового устаткування для підготовки стисненого повітря. Доцільно в даному випадку використовувати контактну схему охолодження повітря, а саме апарати типу «труба Вентурі – сепаратор краплинної вологи».

Процес охолодження та очищення стисненого повітря в апаратах такого типу безпосередньо заснований на контакті часток пилу та крапель розпиленої води, з її подальшою сепарацією.

При дослідженні та проектуванні процесів сепарації в газорідній суміші мають широке розповсюдження загальні засоби обчислень. Зазвичай виконання таких досліджень перетворюється в складну задачу, що потребує значної кількості часу та сил, тим паче якщо виникає потреба дослідити процеси сепарації в реальному промисловому об'єкті, який зазвичай має складну конструкцію та значні габарити. Складні розрахунки та їх закоснілий характер не дають можливості повною мірою звернути увагу на основну мету проектування – прийняття складних процесів, які протікають в устаткуванні та взаємозв'язків між параметрами та характеристиками. Складність загальних засобів обчислень не дає можливості здійснювати поглиблені дослідження, оптимізувати різноманітні параметри та характеристики, створювати або модернізувати реальне теплотехнічне устаткування. Розробка адекватних фізичних моделей, можлива при переході від складних розрахунків до засобів автоматизованих систем проектування.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Як згадувалось вище присутність вологи в стисненому повітрі є невід'ємною складовою при контактному охолодженні повітря, яку необхідно відокремити при без посередньому використанні повітря, так як вона негативно впливає на надійність обладнання.

Фізичний вплив надмірної кількості вологи в початковому повітрі полягає в забитті отворів та сопел вологою, кригою та твердими частинами; у змиві мастила; в пошкодженні мембран, золотників; в зношуванні робочих елементів. Хімічний вплив надмірної кількості вологи в початковому повітрі полягає в корозії металевих деталей, руйнуванні покриттів та гумових деталей розчинами кислот.

Питання зменшення загального вологовмісту повітря досліджувались в роботах Федорова Ю.І., Дегтярьова В.І., Лободи В.В. [1,2], Галужина А.С. [3], Алієва Г.М. [4,5], Кобельова Н.С. [6], Брусиловського І.В., Бушель А.Р., Носова А.Я. [7], Квагінідзе В.С., Фірсова А.Л., Акіменко В.В., Бобровського Д.А. [8] та ін.

**Постановка завдання.** Використання труб Вентурі в мокрій газовій очистці знайшло широке розповсюдження. Це пояснюється рядом переваг: очищення від пилу є одночасно швидким та ефективним, при достатньо простій конструкції апарату. Процес пиловловлення безпосередньо заснований на контакті часток пилу та крапель розпиленої води, з її подальшою сепарацією. В основі такого методу стоять багаторазові повторювальні фізичні процеси взаємодії крапель та частин пилу в момент проходження суміші через елементи скрубера Вентурі [9].

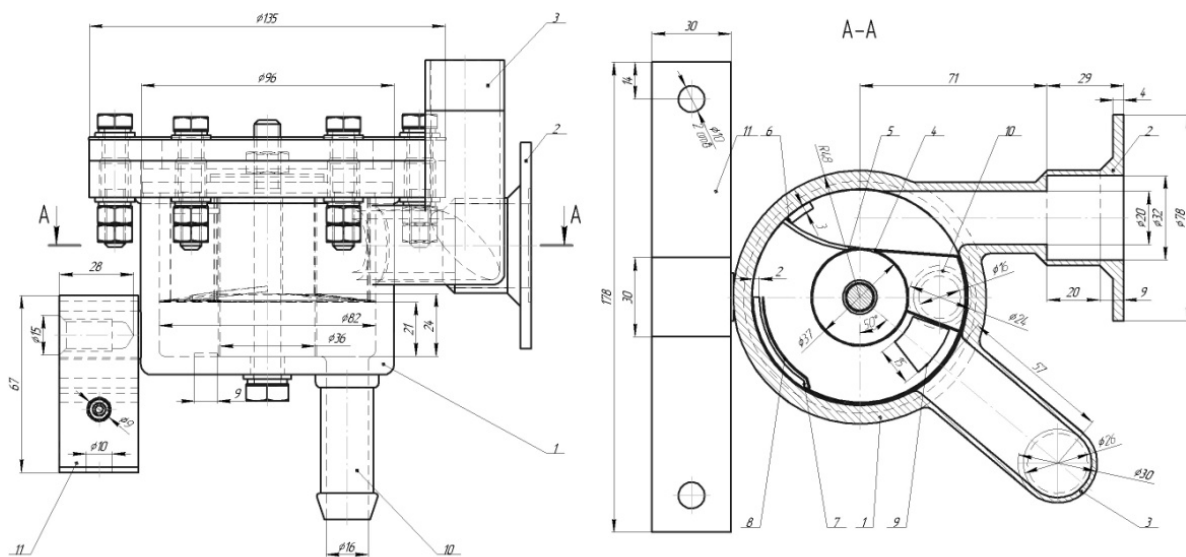
До недоліків скрубєрів Вентурі можна віднести те, що відомі методи розрахунку ефективності роботи даних очисних приладів не дають повністю урахувати фактори уловлення краплин вологи. Також дане устаткування практично не розглядається в роботі з підвищеним тиском [10,11]. Існуючі методи розрахунку не в повній мірі описують процес вологовідділення, тому доцільним є пошук більш точних способів опису сепарації гетерогенної суміші.

**Викладення матеріалу та результати.** Як описувалось вище, для забезпечення необхідної надійності та збільшення періоду експлуатації система пневмозабезпечення потребує використання додаткового устаткування для підготовки стисненого повітря. Доцільно в даному випадку використовувати контактну схему охолодження повітря. В такому виді устаткування процес охолодження та очищення стисненого повітря безпосередньо заснований на контакті часток пилу та крапель розпиленої води, з її подальшою сепарацією. Сепаратор краплинної вологи в даному випадку має вагоме значення, так як недопустимою є подальша подача повітря з надмірною вологою в пневмоприймачі. Дана конструкція сепаратора була запропонована М.І. Великим, О.В. Замыцким, Б.М. Літовко, В.А. Трегубовим [12]. Сепаратор є частиною повітроохолоджувача ВКС-658. В такому апараті охолодження стисненого повітря протікає при безпосередньому контакті повітря з водою, внаслідок чого утворюється гетерогенна суміш, яка потребує сепарації. Використання контактної системи охолодження є доцільним на відміну від традиційної поверхневої. Про це свідчить ряд переваг: такий контактний апарат поєднує досить високу ефективність тепломасообміну з відносно невеликим гідравлічним опором; невисоку вартість

виробництва; невелику металоємність; дані апарати можливо використовувати в якості теплообмінників змішання; в апаратах такого типу вирішується проблема забруднення теплообмінних поверхонь, так як при їх роботі стиснене повітря має безпосередній контакт з циркулярною водою, в процесі експлуатації ефективність контактного повітроохолоджувача практично є незмінною. До недоліків такого устаткування можна віднести те що існуючі методи розрахунку не в повній мірі описують процес вологовідділення, тому доцільним є пошук більш точних способів опису сепарації гетерогенної суміші.

Для спрощення процесу дослідження було вирішено звернутись до методу імітаційного моделювання. У теперішній час стали значно поширені системи автоматизованого проектування (САПР, computer aided design), які дозволяють проектувати технологічні процеси з меншими витратами часу та матеріальних засобів, зі збільшенням точності спроектованих процесів та програм обробки, що скорочує витрати матеріалів та час обробки, завдяки тому, що режими обробки також розраховуються та оптимізуються за допомогою персональних комп'ютерів.

В якості об'єкту моделювання було обрано зменшену в 20 разів модель сепаратора (рис.1) з робіт [12-15]. Принцип дії заснований на тангенціальній подачі гетерогенної суміші через патрубок 2 в циліндричний корпус 1. Така геометрія устаткування проковує до появи відцентрової сили потоку, що призведе до початкової сепарації вологи, так як більш важкі краплини направляються до периферії де коагулюють та стікають по стінці в зазор 7 звідки видаляються через зливну трубу 10. Далі потік суміші рухається в напрямку торцевої стінки 8 та виходить через вихідний патрубок 3. Канал утворений стаканом 4, торцевою стінкою 8, отворами 6 та 9, приводять до сепарації надлишкової вологи. Специфічна аеродинаміка конструкції проковує породження фізичних процесів, в яких спостерігається одночасний вплив на потік гетерогенної суміші декількох факторів: раптова зміна режиму руху (обертання, кривизна внутрішніх стінок), відрив прикордонного шару, градієнти температури і тиску, турбулентність та інше. Відповідно для моделі речовини гетерогенної суміші (повітря та вода) представляють собою ньютонівське середовище з постійним розподілом маси.

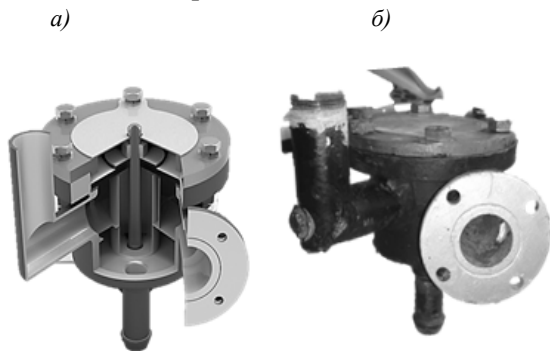


**Рис.1.** Розріз моделі лабораторного зразка: 1 – корпус; 2 – вхідний патрубок; 3 – вихідний патрубок очищеного повітря; 4 – стакан; 5 – конденсаційний жолоб; 6 – додатковий зливний отвір для вологи; 7 – зазор; 8 – торцева стінка; 9 – основний зливний отвір «вікно»; 10 – зливна труба для вологи; 11 – упор для монтажу конструкції на стенді

Проблема при моделюванні об'єкта - наближеність математичних апроксимацій в операціях з математичними моделями складних геометричних об'єктів: дуг кіл, сплайнів; криволінійних поверхонь і «твердих» тіл. Лінії ґрунтуються на точках, поверхні - на опорних лініях, а створення тіла проводиться на основі поверхонь, що створюють замкнутий простір, з відсіканням «зайвого». Одні апроксимації замінюються іншими, похибки накопичуються і приводять до того, що на гладких, але розсічених, поверхнях з'являються начебто незначні уступи. Такі дефекти заважають подальшим операціям та навіть можуть привести до повної відмови у їх

виконанні, до зависання програми або закінчення її роботи.

Дана модель (рис.2а) відповідає запропонованим креслярським розмірам та може використовуватись для подальших досліджень в виборі раціональних параметрів для ефективної роботи відцентрового сепаратора краплинної вологи. Також 3D модель сепаратора має відповідні властивості для створення та подальшого дослідження віртуальних фізичних процесів.



**Рис.2.** Відцентровий сепаратор краплинної вологи: *а* – імітаційна модель; *б* – макетна модель

За результатами моделювання та дослідження її засобами автоматизованого проектування розроблено макетну модель (рис. 2б), яку можливо використовувати на лабораторному стенді для перевірки адекватності даних математичного моделювання. Така модель дозволить встановити раціональні параметри відцентрових крапельловлювачів системи пневмозабезпечення гірничого устаткування.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Отже, використання імітаційного моделювання як бази для дослідження сепараційних об'єктів дозволяє значно скоротити час та ресурси на виготовлення об'єкта досліджень.

У подальшому планується на базі макетної моделі відцентрового сепаратора краплинної вологи створити лабораторний стенд для дослідження параметрів сепараторів системи пневмозабезпечення гірничого устаткування.

#### Список літератури

1. Федоров Ю.И. Улучшение очистки воздуха всасываемого шахтными компрессорами / Ю.И. Федоров, В.И. Дегтярев, В.В. Лобода //Сб. научн. тр. Создание и совершенствование шахтных стационарных установок. Шахтные турбомашини. – Донецк: ИГММК им. Федорова.–1976. – № 40.– С. 49–53
2. Лобода В.В. Улучшение экологичности шахтных передвижных винтовых компрессорных установок / В.В. Лобода, Н.В. Манец // Проблемы эксплуатации оборудования шахтных стационарных установок. - 2012-2013. - Вып. 106-107. - С. 271-275.
3. Галюжин А.С. Анализ устройств очистки сжатого воздуха пневмосистем мобильных машин / А.С. Галюжин. - Вестник Белорусско-Российского университета : научно-методический журнал. - Могилев : ГУ ВПО "БРУ", 2001 - ISSN 2077-8481. – С.17-27.
4. Алиев Г.М.-А. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок / Г.М.-А. Алиев. – М.: Металлургия, 1983. – 286 с.
5. Алиев Г. М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов / Г.М.-А. Алиев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
6. Кобелев Н.С. Снижение энергозатрат при производстве сжатого воздуха для горных машин / Н.С. Кобелев //Изв. вузов. Геол. и разведка.–1987.–№ 6.– 167–168 с.
7. Брусиловский И.В. Исследование на моделях влияния элементов градиент и ветра на структуру потока перед вентилятором и его работу / И.В. Брусиловский, А.Р. Бушель, А.Я. Носов // Труды координационных совещаний по гидротехнике.–Вып. 44. Л.: Энергия, 1968.– 178 с.
8. В.С. Квагинидзе Влияние климатических условий на надежность и производительность горного оборудования / В.С. Квагинидзе, А.Л. Фирсов, В.В. Акименко, Д.А. Бобровский // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 11, Якутия-4, 2007. – 424 с.
9. Довгалюк В.Б. Ймовірнісна блок-схема моделювання процесу пило очищення газів в скруберах Вентури / В.Б. Довгалюк, І.О. Качан // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип. 19 – К.: КНУБА, 2016. – С.131-136.
10. Дубинская Ф. Е. Скрубберы Вентури. Выбор, расчёт, применение / Ф.Е. Дубинская, Г.К. Лебедюк // - ЦИНИТХимнефтемаш.- М.-1977. - 61 с.
11. Темеровский Б.З. Очистка газов в чёрной металлургии / Б.З. Темеровский // – Днепропетровск.- Проминь. -1971.- 91 с.
12. Декл. пат. 52028. Украина, МКИ В04С1/00, В04С5/103, В04С5/16. Сепаратор капельной влаги/ М.И. Великий, О. В. Замыцкий, Б. М. Литовко, В. А. Трегубов. – Опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12.–2 с.
13. Замыцкий О.В. Анализ способов охлаждения при производстве сжатого воздуха для горных машин / О.В. Замыцкий //Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ.–2001.–№ 10.–С. 67–71.
14. Замыцкий О.В. Влияние температуры окружающей среды на эффективность производства сжатого воздуха для горных машин / О.В. Замыцкий //Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ.–2001.–№ 12.–С.33–34
15. Трегубов В.А. Обоснование применения и выбор конструктивных параметров контактных воздухоохлаждателей шахтных турбокомпрессоров / В.А. Трегубов, О.В. Замыцкий, Б.М. Литовко // Разработка рудных месторождений. –Вып. 90.–Кривой Рог: КТУ.–2006.– С.145–149.

Рукопис подано до редакції 03.04.2019