

Національна академія наук України
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Гоман Віталій Олександрович

УДК 665.754: 62.611

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ СТВОРЕННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО ПАЛИВА ЗА ДОПОМОГОЮ ГІДРОКАВІТАЦІЙНОЇ АКТИВАЦІЇ

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Гоман В.О.

Науковий керівник
Кравченко Олег Вікторович,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Гоман В.О. Підвищення ефективності процесів створення та спалювання композиційного палива за допомогою гідрокавітаційної активації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» (144 – Теплоенергетика). – Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, 2019.

Рациональне використання вуглеводневих енергоресурсів, розробка та впровадження ресурсозберігаючих екологічно безпечних технологій паливоспоживання у системах виробництва теплової енергії на даний час є одним з найбільш актуальних завдань теплоенергетичної галузі. Ефективним вирішенням цього завдання може стати часткова заміна традиційних вуглеводневих енергоресурсів на промислових і енергетичних об'єктах новими видами рідких композиційних палив. Останні являють собою стійкі емульсії і суспензії на основі вуглеводнів з можливістю додавання відходів різного походження. До складу таких гідросумішей можуть входити промислові стоки або їх концентрати різноманітного походження: фенольні стічні води, нафтозмиви, некондиційні вуглеводні, відпрацьовані технологічні рідини нафтовидобутку, відходи вуглезбагачувальних підприємств, очисних споруд, продукти переробки твердих побутових відходів, полімерів, гуми та ін. Визначено, що основними критеріями оцінки якості паливної суміші є питома теплота згоряння, в'язкість, стабільність, зольність, екологічні показники процесу спалювання та ККД енергетичного обладнання.

В дисертаційній роботі запропоновано підвищувати ефективність процесів створення та спалювання нових видів композиційних палив за допомогою гідрокавітаційної активації. Це дозволяє отримувати паливні суміші на основі

некондиційних вуглеводнів та рідких вологовмісних промислових відходів з метою отримання додаткової теплової енергії та утилізації екологічно шкідливих стоків вогневим методом. Створені таким способом композиційні палива вирізняються покращеними теплофізичними, фізико-хімічними та енергоекологічними властивостями.

Основною проблемою способу є те, що високий вміст водної фази у складі паливної суміші значно ускладнює не тільки процеси створення, але й подальшого використання композиційного палива в якості енергоресурсу, оскільки даний показник в значній мірі впливає на стабільність, енергетичні та реологічні властивості отримуваної паливної суміші. При високому вмісті водної фази в'язкість створюваної паливної суміші значно підвищується у порівнянні з вихідними компонентами, що може призводити до погіршення якості диспергування при спалюванні. Дані наслідки негативно впливають на процеси горіння композиційного палива, оскільки при зниженні якості диспергування погіршується сумішеутворення паливних крапель з окиснювачем, що значно знижує ККД енергетичного котла і збільшує кількість шкідливих викидів в атмосферу. При наявності в композиційному паливі твердої фази ресурс розпилюючих пристроїв значно знижується через абразивне зношування конструктивних елементів в процесі роботи. Саме тому для створення, диспергування та спалювання високов'язких композиційних палив з високим вмістом водної фази та наявністю твердих часток необхідне застосування спеціальних вискоефективних пристроїв, принцип роботи яких базується на застосуванні гідрокавітаційної активації.

Із застосуванням методів математичного, чисельного та фізичного моделювання розроблено новий тип гідрокавітаційного пристрою для створення композиційного палива, а також гідровихрову форсунку та пальниковий пристрій для спалювання виготовлених паливних сумішей. Використання розробленого двороторного гідрокавітаційного пристрою вперше дозволило отримати паливні емульсії з вмістом водної фази до 50 % підвищеної стабільності та з покращеними реологічними властивостями. Застосування розроблених гідровихрової форсунки

та пального пристрою дозволяє здійснювати спалювання композиційних палив високої в'язкості з наявністю твердих часток та вмістом водної фази до 60 %.

Розроблено методологію визначення впливу гідрокавітаційної активації на показники процесів створення та спалювання композиційних палив. З метою експериментального визначення впливу гідрокавітаційної активації на теплофізичні, гідродинамічні, фізико-хімічні характеристики отримуваних композиційних палив та енергоекологічні показники їх спалювання розроблено та створено мобільний енерготехнологічний дослідницький комплекс. Застосування розроблених методології та енерготехнологічного комплексу дозволяє встановлювати необхідний рівень інтенсивності гідрокавітаційної активації для отримання композиційного палива із заданими споживчими, теплофізичними та енергоекологічними властивостями, відпрацьовувати технологічні регламенти створення та спалювання паливних сумішей в промислових умовах безпосередньо на енергетичних об'єктах, а також визначати основні показники енергоефективності та екологічності створених технологій з подальшою видачою рекомендацій щодо їх промислового впровадження.

Експериментальним шляхом встановлено залежність підвищення питомої теплоти згоряння композиційного палива від режиму гідрокавітаційної активації під час його створення, що дозволило визначити ефективні режими роботи гідрокавітаційного обладнання для виготовлення та спалювання даного виду енергоресурсу. Експериментально досягнуто збільшення на 16 % питомої теплоти згоряння композиційного палива на основі кубових залишків нафтопереробки та мулових осадів очисних споруд.

Розроблено спосіб створення та спалювання водовугільного палива з відходів вуглезбагачувальних підприємств високої зольності, яке відрізняється високими калорійністю та якістю розпилювання, що забезпечують надійне запалювання та стабільне горіння без використання підсвічування, а також низькою в'язкістю і задовільною седиментаційною стійкістю для здійснення трубопровідного транспортування і тривалого зберігання. Крім того, запропоноване композиційне

паливо може використовуватися теплоенергогенеруючими підприємствами без суттєвої реконструкції існуючого обладнання як альтернатива рідким і газоподібним паливам високої вартості.

Проведено експериментальні дослідження процесів створення та спалювання композиційного палива на основі дизельного пального з додаванням в якості водної фази відпрацьованої рідини гідророзриву пласта нафтогазових свердловин. Результати цих досліджень показали можливість ефективної вогневої утилізації промислових відходів даного походження за повної відповідності екологічним нормам і вимогам до енергетичних промислових котлів.

Методологію гідрокавітаційної активації при створенні та спалюванні композиційного палива на основі кубових залишків нафтопереробки та мулових осадів комунальних очисних споруд впроваджено на ТОВ МВВФ «Енергетик». Промислові випробування, які проведено з використанням розробленого енерготехнологічного комплексу та парового котла Е–1,0–0,9Г–3(Е), довели економічну доцільність використання гідрокавітаційної активації при створенні та спалюванні композиційних палив – економія до 10 % вуглеводневої сировини при виробництві теплової енергії.

Експериментально доведено, що застосування гідрокавітаційної активації при створенні та спалюванні композиційного палива на основі некондиційних вуглеводнів та вологовмісних промислових відходів дає можливість одночасного вирішення двох взаємопов'язаних задач: отримання додаткової теплової енергії та утилізації екологічно небезпечних стоків вогневим методом.

Ключові слова: гідрокавітаційна активація, штучне рідке композиційне паливо, гідровихрова форсунка, гідрокавітаційний пристрій, енерготехнологічний дослідницький комплекс, енергоекологічні показники процесів спалювання композиційного палива.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Комплекс для проведения исследований процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив / О.В. Кравченко,

И.Г. Суворова, В.А. Гоман, Е.Ю. Мусиенко, А.М. Даниленко // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. Днепропетровск: Лири ЛТД, 2013. № 5. С. 150 – 160.

2. Перспективні технології отримання і згорання композиційних палив на основі методів активації / О.В. Кравченко, І.Г. Суворова, І.А. Баранов, В.А. Гоман // Комунальне господарство міст. Сер. енергоефективна техніка та технології в житлово-комунальному господарстві. Харків: Харківський національний університет імені О.М. Бекетова. 2014. Вип. 118 (1). С. 29 – 33.

3. Гоман В.А., Кравченко О.В. Совершенствование технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // Экология и промышленность. Харьков, 2016. № 4. С. 57 – 64.

4. Hydrocavitation activation in the technologies of production and combustion of composite fuels/ O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, V.Goman // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. 4 /5 (88). P. 33 - 42.

5. Innovative Technologies for Utilization and Disinfection of Waste to Ensure Sustainable Development of Civilization / I.G. Suvorova, O.V. Kravchenko, I.A. Baranov, V.A. Goman // European Journal of Sustainable Development. Rome, 2018. Vol. 7, № 4. P. 423-434.

6. Пат. 113894 (Україна), МПК В01F /16 Гідрокавітаційний пристрій для обробки рідин / Кравченко О.В., Гоман В.О, Сімбірський О.В., Момот В.І.; заявник і патентотримувач Інститут проблем машинобудування НАН України. № а 2015004466; заявл. 07.05.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6. 4 с.

7. Пат. 114935 (Україна), МПК С10L 1/32 Водовугільне паливо / Кравченко О.В., Гоман В.О, Сімбірський О.В., Момот В.І.; заявник і патентотримувач Інститут проблем машинобудування НАН України. № а 2015004460; заявл. 07.05.2015; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. 4 с.

8. Гоман В.А. Установка для исследования процессов получения и сжигания композиционных топлив // IX конференция молодых ученых и

специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 5-8 ноября, 2012. С. 68.

9. Гоман В.А. Комплекс для исследований процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив // X конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 11-13 ноября, 2013. С. 44.

10. Гоман В.А. Совершенствование процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 17-20 ноября, 2014. С. 49.

11. Гоман В.А. Огневая утилизация отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 16-19 ноября, 2015. С. 36.

12. Гоман В.А., Кравченко О.В. Совершенствование технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // V Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения, защиты окружающей природной среды: сборник трудов. Харьков, 23-24 марта, 2016. С. 148-157.

13. Гоман В.А. Повышение эффективности технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта методами математического и физического моделирования / В.А. Гоман, О.В. Кравченко // Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології: наука й виробництво (ГЕОФОРУМ-2016): матеріали III міжнародного геологічного форуму, Україна, Миколаївська обл., с. Коблеве, 15 – 20 серпня 2016 року. К.: УкрДГПІ, 2016. С. 68 – 75.

14. An Innovation Technology for Production and Combustion of Composite Fuels Based on Hydrocavitation Activation / O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov,

V. Goman // Book of abstract 11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. Lisbon, Portugal, September 4-9, 2016. P. 67.

15. Гоман В.А. Сжигание композиционного топлива с добавлением иловых осадков очистных сооружений // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 21-24 ноября, 2016. С. 58.

16. Гоман В.О. Вдосконалення технології виготовлення й спалювання композиційного палива на основі мазуту з додаванням мулових осадів комунальних очисних споруд // Конференція молодих вчених і спеціалістів ИПМаш НАН України: тез. доповіді. Харків, 17-20 квітня, 2018. С. 32.

17. Innovative Technologies for Utilization and Disinfection of Waste to Ensure Sustainable Development of Civilization / O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, V. Goman // 6th International Conference on Sustainable Development, September 12-13, Rome, Italy. P. 214.

18. Гоман В. О. Промислові випробування енергоефективності й екологічності технології гідрокавітаційної активації при виробництві й спалюванні композиційного палива з додаванням мулових осадів очисних споруд // Конференція молодих вчених і спеціалістів ИПМаш НАН України: тез. доповіді. Харків, 15-18 квітня, 2019. С. 28.

ABSTRACT

Goman V.A. Increasing the effectiveness of the processes of producing and combusting composite fuel by using hydrocavitation activation. – A manuscript.

The thesis for the scientific degree of the Candidate of Thecnical Sciences (Doctor of Philosophy) by specialty 05.14.06 – Technical Thermal Physics and Industrial Heat-Power Engineerig (141 – Thermal Power Engineering). – A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The effective usage of hydrocarbon energy resources, and the development and introduction of resource-saving environmentally friendly technologies of fuel consumption in heat energy production systems is currently one of the most challenging problems in the heat power industry. An effective solution of this problem can be a partial replacement of conventional hydrocarbon energy resources at industrial and power facilities with new kinds of liquid composite fuels. They are a stable emulsion and suspension mix based on hydrocarbons with the option of adding waste of different origin. Such fluid mixtures can include industrial waste or their concentrates of different origin: phenol waste effluents, petroleum washoffs, off-grade hydrocarbons, spent oil production process liquids, waste from coal preparation plants and sewage treatment plants, products recycled from solid municipal waste, polymers, rubber, and so forth. The key criteria for assessing the quality of a fuel mixture were specified as follows: gross calorific value, viscosity, stability, ash content, environmental indicators of the combustion process, and power equipment efficiency.

The dissertation proposes to increase the effectiveness of the processes of producing and combusting new kinds of composite fuels by using hydrocavitation activation. This enables the production of fuel mixtures based on off-grade hydrocarbons and liquid moisture-containing industrial waste to produce extra heat energy and dispose of environmentally hazardous sewage by using the firing method. The composite fuels produced in such a manner are distinguished by enhanced thermophysical, physico-chemical and energy-ecological properties.

The challenge of the method is that the high content of the aqueous phase in the composition of the fuel mixture complicates significantly not only the production processes, but also the further usage of composite fuel as an energy resource because this indicator affects dramatically the stability, and the energy and rheological properties of the fuel mixture produced. With high aqueous phase content, the viscosity of the fuel mixture being produced increases significantly as compared to the source components, and this can degrade dispersion quality during combustion. These consequences have an adverse effect on composite fuel combustion because degrading dispersion quality impairs the formation of fuel droplets and oxidiser mixture. This reduces significantly

utility boiler efficiency and increases the amount of emissions release to the atmosphere. With a solid phase in the composite fuel, the service life of spraying devices drops considerably due to abrasive wear of construction elements during operation. This is why the production, dispersion and combustion of high-viscosity composite fuels with a high content of an aqueous phase and presence of solid particles calls for using special very effective devices whose principle of operation is based on hydrocavitation activation.

Mathematical, numerical and physical simulation methods were used to develop a new type of hydrocavitation device to produce composite fuel, and a hydrovortex nozzle and burner for combustion of the produced fuel mixtures. Using the developed two-rotor hydrocavitation device helped for the first time to produce fuel emulsions with an aqueous phase content within 50 % with increased stability and better rheological properties. Using the developed hydrovortex nozzle and the burner enables the combustion of high-viscosity composite fuels with solid particles and an aqueous phase content within 60 %.

A methodology was developed for determining the impact of hydrocavitation activation on the indicators of the processes of producing and combusting composite fuels. A mobile energy-technological research complex was developed and made to determine experimentally the effect of hydrocavitation activation on the thermophysical, fluid dynamic and physico-chemical characteristics of produced composite fuels and the energy ecological indicators of their combustion. Using the developed methodologies and the energy-technological complex enables the following: to determine the requisite intensity level of hydrocavitation activation to produce composite fuel with specified consumer, and the thermophysical and energy-ecological properties; to work out process regulations for producing and combusting fuel mixtures in industrial conditions on site at power facilities; to determine the key indicators of energy effectiveness and environmental compatibility of the technologies developed, followed by issuing recommendations on their industrial introduction.

Experiments established the dependence of increasing composite fuel gross calorific value on hydrocavitation activation process conditions during its creation. This

helped determine effective operation duties of hydrocavitation activation equipment for producing and combusting the given kind of energy resource. Experimentally, the gross calorific value of composite fuel was increased by 16 %. The fuel was composed of stillage residue of petroleum refining and sludge from sewage treatment plants.

A method was developed for producing and combusting hydrocarbon fuel with high ash content waste from coal preparation plants, which is distinguished by high calorific value and pulverization quality. This ensures reliable ignition and stable combustion without support flaming, as well as low viscosity and satisfactory sedimentation resistance to favour pipeline transportation and long-term storage. Besides, the composite fuel offered can be used by heat power generation facilities without a complete reconstruction of existing equipment as an alternative to liquid and gaseous high-cost fuels.

Experiments were conducted to investigate the processes of production and combustion of composite fuel based on diesel fuel with addition, as an aqueous phase, of spent fluid from hydrocracking oil-and-gas well formations. These studies demonstrated the possibility of effective firing disposal of industrial waste of given origin with complete correspondence to environmental regulations and requirements to industrial utility boilers.

The methodology of hydrocavitation activation for producing and combusting composite fuel based on stillage residue of petroleum refining and sludge from sewage treatment plants was introduced at LLC MVVF Enerhetyk. Industrial tests conducted with the use of the developed energy-technological complex and steam boiler E–1,0–0,9G–Z(E) have confirmed the economic feasibility of using hydrocavitation activation while producing and combusting composite fuels, yielding a saving of up to 10 % of hydrocarbon materials for producing heat energy.

Experiments demonstrated that hydrocavitation activation for producing and combusting composite fuel based on off-grade hydrocarbons and moisture-containing industrial waste helps solve two interrelated tasks at the same time: produce extra heat energy and dispose of environmentally hazardous waste by using the firing method.

LIST OF APPLICANT PUBLICATIONS

1. Комплекс для проведения исследований процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив / О.В. Кравченко, И.Г. Суворова, В.А. Гоман, Е.Ю. Мусиенко, А.М. Даниленко // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. Днепропетровск: Лира ЛТД, 2013. № 5. С. 150 – 160.
2. Перспективные технологии получения и сжигания композиционных топлив на основе методов активации / О.В. Кравченко, И.Г. Суворова, И.А. Баранов, В.А. Гоман // Комунальне господарство міст. Сер. енергоефективна техніка та технології в житлово-комунальному господарстві. Харків: Харківський національний університет імені О.М. Бекетова. 2014. Вип. 118 (1). С. 29 – 33.
3. Гоман В.А., Кравченко О.В. Совершенствование технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // Экология и промышленность. Харьков, 2016. № 4. С. 57 – 64.
4. Hydrocavitation activation in the technologies of production and combustion of composite fuels/ O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, V.Goman // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. 4 /5 (88). P. 33 - 42.
5. Innovative Technologies for Utilization and Disinfection of Waste to Ensure Sustainable Development of Civilization / I.G. Suvorova, O.V. Kravchenko, I.A. Baranov, V.A. Goman // European Journal of Sustainable Development. Rome, 2018. Vol. 7, № 4. P. 423-434.
6. Пат. 113894 (Україна), МПК B01F /16 Гідрокавітаційний пристрій для обробки рідин / Кравченко О.В., Гоман В.О, Сімбірський О.В., Момот В.І.; заявник і патентоутримувач Інститут проблем машинобудування НАН України. № а 2015004466; заявл. 07.05.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6. 4 с.
7. Пат. 114935 (Україна), МПК C10L 1/32 Водовугільне паливо / Кравченко О.В., Гоман В.О, Сімбірський О.В., Момот В.І.; заявник і патентоутримувач Інститут проблем машинобудування НАН України. № а 2015004460; заявл. 07.05.2015; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. 4 с.

8. Гоман В.А. Установка для исследования процессов получения и сжигания композиционных топлив // IX конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 5-8 ноября, 2012. С. 68.
9. Гоман В.А. Комплекс для исследований процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив // X конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 11-13 ноября, 2013. С. 44.
10. Гоман В.А. Совершенствование процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 17-20 ноября, 2014. С. 49.
11. Гоман В.А. Огневая утилизация отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 16-19 ноября, 2015. С. 36.
12. Гоман В.А., Кравченко О.В. Совершенствование технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // V Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения, защиты окружающей природной среды: сборник трудов. Харьков, 23-24 марта, 2016. С. 148-157.
13. Гоман В.А. Повышение эффективности технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта методами математического и физического моделирования / В.А. Гоман, О.В. Кравченко // Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології: наука й виробництво (ГЕОФОРУМ-2016): матеріали III міжнародного геологічного форуму, Україна, Миколаївська обл., с. Коблеве, 15 – 20 серпня 2016 року. К.: УкрДГРІ, 2016. С. 68 – 75.

14. An Innovation Technology for Production and Combustion of Composite Fuels Based on Hydrocavitation Activation / O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, V. Goman // Book of abstract 11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. Lisbon, Portugal, September 4-9, 2016. P. 67.

15. Гоман В.А. Сжигание композиционного топлива с добавлением иловых осадков очистных сооружений // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 21-24 ноября, 2016. С. 58.

16. Гоман В.О. Вдосконалення технології виготовлення й спалювання композиційного палива на основі мазуту з додаванням мулових осадів комунальних очисних споруд // Конференція молодих вчених і спеціалістів ИПМаш НАН України: тез. доповіді. Харків, 17-20 квітня, 2018. С. 32.

17. Innovative Technologies for Utilization and Disinfection of Waste to Ensure Sustainable Development of Civilization / O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, V. Goman // 6th International Conference on Sustainable Development, September 12-13, Rome, Italy. P. 214.

18. Гоман В. О. Промислові випробування енергоефективності й екологічності технології гідрокавітаційної активації при виробництві й спалюванні композиційного палива з додаванням мулових осадів очисних споруд // Конференція молодих вчених і спеціалістів ИПМаш НАН України: тез. доповіді. Харків, 15-18 квітня, 2019. С. 28.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГКА ПРИ СТВОРЕННІ ТА СПАЛЮВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПАЛИВ НА ОСНОВІ ВУГЛЕВОДНІВ ТА РІДКИХ АБО ВОЛОГОВМІСНИХ ВІДХОДІВ....	26
1.1 Властивості композиційного палива та особливості процесу його створення.....	26
1.2 Особливості процесів спалювання композиційних палив. Обґрунтування необхідності використання ГКА в технологіях спалювання ШКРП.....	30
1.3 Основні критерії оцінки якості композиційного палива.....	35
1.4 Висновки за розділом 1.....	39
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СТВОРЕННЯ, РОЗПИЛЮВАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО ПАЛИВА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГІДРОКАВІТАЦІЙНОЇ АКТИВАЦІЇ.....	41
2.1 Математичне й чисельне моделювання течії в'язкої рідини в плоских та осесиметричних каналах з використанням структурного методу R-функцій для створення нових і вдосконалення існуючих розпилюючих пристроїв....	41
2.1.1 Розрахунок гідродинамічних характеристик потоку в плоскому модельному каналі гідровихрової форсунки.....	41
2.1.2 Чисельне моделювання процесів розпилювання композиційного палива.....	46
2.1.3 Фізичне моделювання процесів розпилювання композиційного палива.....	50
2.2 Моделювання процесів створення композиційних палив з застосуванням гідрокавітаційної активації.....	52
2.2.1 Чисельне моделювання тривимірної турбулентної течії в проточних частинах гідрокавітаційного пристрою.....	52

2.2.2 Вдосконалення конструкції робочих органів гідрокавітаційного пристрою.....	62
2.2.3 Фізичне моделювання процесів створення композиційного палива з використанням розробленого гідрокавітаційного пристрою.....	67
2.3 Розробка конструкції пального пристрою для спалювання композиційних палив з високим вмістом водної фази.....	70
2.3.1 Загальні відомості про горіння палива.....	70
2.3.2 Процес горіння рідких видів композиційних палив.....	71
2.3.3 Чисельне моделювання процесів горіння композиційного палива в пальному пристрої.....	74
2.3.4 Фізичне моделювання процесів горіння композиційного палива в пальному пристрої.....	77
2.4 Висновки за розділом 2.....	80
РОЗДІЛ 3 ВПЛИВ ГІДРОКАВІТАЦІЙНОЇ АКТИВАЦІЇ НА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПАЛИВ.....	82
3.1 Методологія визначення впливу гідрокавітаційної активації на теплофізичні, фізико-хімічні характеристики створюваних композиційних палив та енергоекологічні показники їх спалювання.....	82
3.2 Розробка комплексу для проведення експериментальних досліджень впливу ГКА на фізико-хімічні характеристики створюваних композиційних палив та енергоекологічні показники їх спалювання.....	98
3.3 Мобільний експериментальний енерготехнологічний комплекс та алгоритм проведення досліджень впливу гідрокавітаційної активації на теплові, гідродинамічні, фізико-хімічні, енергетичні та екологічні показники процесів створення та спалювання композиційних палив.....	103
3.4 Висновки за розділом 3.....	114
РОЗДІЛ 4 ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОКАВІТАЦІЙНОЇ АКТИВАЦІЇ ПРИ СТВОРЕННІ ТА СПАЛЮВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПАЛИВ.....	116

4.1 Експериментальні дослідження процесів створення та спалювання композиційного палива на основі некондиційних вуглеводнів та мулових осадів очисних споруд із застосуванням гідрокавітаційної активації.....	116
4.2 Експериментальні дослідження процесів створення та спалювання водовугільного палива із застосуванням гідрокавітаційної активації.....	127
4.3 Безстічна утилізація відпрацьованої рідини гідророзриву пласта нафтогазових свердловин у складі композиційного палива.....	134
4.4 Висновки за розділом 4.....	148
ВИСНОВКИ.....	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	153
Додаток А Список публікацій за темою дисертації.....	166
Додаток Б Апробація результатів дисертації.....	169
Додаток В Акт про впровадження.....	171
Додаток Г Акт про впровадження.....	172

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Буквені позначення фізичних і математичних величин

P – статичний тиск

Re – число Рейнольдса

V_x, V_y, V_r, V_z – вектор швидкості

Ψ – функція току

Скорочення

ВВП – водовугільне паливо

ВВПП – водовугільнопіролізне паливо

ВМЕ – водомазутна емульсія

ВФ – водна фаза

ГВП – гідровихровий перетворювач

ГКА – гідрокавітаційна активація

ГКП – гідрокавітаційний пристрій

ДП – дизельне паливо

ІПМаш НАНУ – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України

ККД – коефіцієнт корисної дії

КП – композиційне паливо

ОВВП – органоводовугільне паливо

ПП – пічне паливо

РІА – роторно-імпульсний апарат

РПА – роторно-пульсаційний апарат

ШКРП – штучне композиційне рідке паливо

ВСТУП

Актуальність теми. Раціональне використання вуглеводневих енергоресурсів, розробка та впровадження ресурсозберігаючих екологічно безпечних технологій паливоспоживання у системах виробництва теплової енергії на даний час є одними з найбільш актуальних завдань теплоенергетичної галузі.

Ефективним вирішенням даних задач може стати часткова заміна традиційних вуглеводневих енергоресурсів на промислових і енергетичних об'єктах новими видами рідких композиційних палив. Останні являють собою стійкі емульсії і суспензії на основі вуглеводнів з можливістю додавання відходів різного походження. До складу таких гідросумішей можуть входити різні промислові стоки або їх концентрати: фенольні стічні води, нафтозмиви, некондиційні вуглеводні, відпрацьовані технологічні рідини нафтовидобутку, відходи вуглезбагачувальних підприємств, очисних споруд, продукти переробки твердих побутових відходів, полімерів, гуми та ін.

Порівняно з традиційними вуглеводнями застосування композиційних палив розв'язує не тільки енергетичну задачу отримання більш дешевої теплової енергії, а й екологічну проблему зниження шкідливих викидів в атмосферу під час спалювання, утилізації або знешкодження відходів, що додаються до складу паливної композиції, вогневим методом.

Високий вміст водної фази у складі паливної суміші значно ускладнює не тільки процеси створення, але й подальшого використання композиційного палива в якості енергоресурсу, оскільки даний показник в значній мірі впливає на стабільність, енергетичні та реологічні властивості отримуваної паливної суміші. При високому вмісті водної фази в'язкість створюваного композиційного палива значно підвищується у порівнянні з вихідними компонентами, що може призводити до погіршення якості диспергування при спалюванні. Дані наслідки негативно впливають на процеси горіння композиційного палива, оскільки при зниженні якості диспергування погіршується сумішеутворення паливних крапель з окиснювачем, що значно знижує ККД енергетичного котла і збільшує кількість

шкідливих викидів в атмосферу. При наявності в композиційному паливі твердої фази ресурс розпилюючих пристроїв значно знижується через абразивне зношування конструктивних елементів в процесі роботи.

Для забезпечення ефективного горіння з екологічними показниками, що відповідають сучасним нормативам, створення та спалювання композиційного палива потребує застосування спеціальних технологій та пристроїв. Для ефективного розв'язання цих задач необхідне застосування пристроїв, принцип роботи яких ґрунтується на застосуванні гідрокавітаційної активації. Такий підхід дозволяє отримувати паливні суміші з високими споживчими властивостями, здійснювати їх якісне спалювання з поліпшеними енергоекологічними показниками.

Таким чином, підвищення ефективності процесів виготовлення та екологічно безпечного спалювання штучних композиційних рідких палив на основі некондиційних вуглеводнів та промислових відходів з високим вмістом водної фази є актуальною науково-практичною задачею, на розв'язання якої спрямована дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України згідно з планами держбюджетних НДР НАН України та МОН України: «Енергоактиваційні технології підвищення ефективності спалювання низькорекційних композиційних палив, створених з відходів виробництва» (ДР № 0113U001772); «Проведення промислових досліджень з енергоефективності та екологічності технології гідрокавітаційної активації вуглеводнів при виробництві й спалюванні композиційного палива на основі активного мулу комунальних очисних споруд» (ДР № 0118U001688); «Застосування методів активації для інтенсифікації фізико-хімічних процесів в паливних технологіях (ДР № 0113U001620), де автор був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності процесів створення та екологічно безпечного спалювання штучних композиційних рідких палив (ШКРП), виготовлених на основі некондиційних

вуглеводнів і промислових відходів з високим вмістом водної фази, шляхом застосування гідрокавітаційної активації (ГКА).

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

- визначити основні критерії оцінки ефективності використання ГКА і обладнання, що його реалізує, під час створення та спалювання ШКРП на основі вуглеводнів, рідких або вологовмісних відходів з заданими фізико-хімічними та енергоекологічними властивостями;
- провести математичне й комп'ютерне моделювання гідродинаміки потоків в'язкої нестисливої рідини в елементах гідрокавітаційного обладнання для удосконалення існуючих та виготовлення нових зразків ефективних пристроїв створення та розпилювання ШКРП;
- розробити методологію та створити експериментальний енерготехнологічний комплекс для визначення впливу ГКА на теплові, гідродинамічні, фізико-хімічні процеси при виготовленні та спалюванні паливних емульсій і суспензій на основі вуглеводнів та різноманітних вологовмісних відходів;
- експериментально дослідити вплив ГКА під час створення нових видів ШКРП на їх теплофізичні та енергоекологічні властивості;
- провести експериментальні дослідження енергоефективності та екологічної безпеки застосування ГКА в технологіях створення та спалювання ШКРП на основі некондиційних вуглеводнів з додаванням відпрацьованої рідини гідророзриву пласта нафтогазових свердловин, мулових осадів комунальних очисних споруд, а також надати рекомендації з промислового використання гідрокавітаційної активації.

Об'єкт дослідження – гідрокавітаційна активація рідких вуглеводнів в процесах створення та спалювання штучних композиційних рідких палив.

Предмет дослідження – вплив термогідродинамічних і фізико-хімічних процесів в гідрокавітаційних апаратах на енергоефективність, ресурсозбереження та екологічну безпеку спалювання в енергоустановках нових видів штучних композиційних рідких палив.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач у дисертаційній роботі використано комплексний підхід, який включає математичне моделювання теплогідродинамічних процесів в осесиметричних каналах з використанням структурного методу R-функцій, чисельне CFD 3-вимірне моделювання, фізичне моделювання та експериментальні дослідження, в яких використано сучасні методи вимірювання та аналізу: термометричні, калориметричні, хіміко-аналітичні, віскозиметричні, ультразвукові, мікроскопічні, оптичні, об'ємні, масові, спектральні, газоаналітичні, хроматографічні, а також швидкісна оптична реєстрація.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено методологію визначення впливу ГКА на споживчі та енергоекологічні властивості ШКРП з високим вмістом відходів різного походження, використання якої дозволяє встановити ефективні режими роботи обладнання під час створення, розпилювання та спалювання паливних сумішей.

2. Вперше виявлено вплив ГКА на теплові, гідродинамічні, фізико-хімічні процеси, енергетичні та екологічні показники процесів створення та спалювання паливних емульсій і суспензій з високим вмістом промислових відходів за допомогою створеного експериментального енерготехнологічного комплексу.

3. Вперше визначено необхідний рівень інтенсивності ГКА для отримання ШКРП із заданими споживчими та енергоекологічними властивостями.

4. Вперше встановлено залежність теплотворної здатності ШКРП на основі кубових залишків нафтопереробки з додаванням мулових осадів комунальних очисних споруд від режиму гідрокавітаційної обробки під час його виготовлення, що дозволило визначити ефективні режими роботи гідрокавітаційного обладнання при створенні та спалюванні цього виду енергоресурсу.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропоновано та виготовлено новий тип гідрокавітаційного пристрою для обробки рідин (патент України № 113894), який дозволяє отримувати паливні композиції з заданими теплофізичними та високими споживчими властивостями.

2. Створено новий тип гідровихрової форсунки-активатора з підвищеним експлуатаційним ресурсом та здатністю розпилювати високов'язкі ШКРП з вмістом твердої фази до 72 % за витрат до 50 кг/год, що відкриває перспективи широкого застосування таких палив в енергоустановках малої потужності.

3. Розроблено спосіб виготовлення та спалювання водовугільного палива (патент України № 114935), яке відрізняється високими калорійністю та якістю розпилювання, що забезпечують надійне запалювання та горіння без використання підсвічування під час спалювання, а також низькою в'язкістю і задовільною седиментаційною стійкістю для здійснення трубопровідного транспортування і тривалого зберігання.

4. Впроваджено методологію гідрокавітаційної активації під час створення та спалювання ШКРП на основі некондиційних вуглеводнів та мулових осадів комунальних очисних споруд. Промислові випробування, що проведено з використанням створеного енерготехнологічного комплексу та парового котла Е–1,0–0,9Г–3(Е), який укомплектовано розробленим пальниковим пристроєм на основі гідровихрової форсунки, довели ефективність використання ГКА для розв'язання як екологічних проблем утилізації водовмісних відходів, так і економічних – економія до 10 % вуглеводневої сировини під час виробництва теплової енергії.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові положення та результати теоретичних і експериментальних досліджень, що містяться в дисертаційній роботі, здобувачем одержані особисто.

У роботах, які опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: проведено чисельне моделювання гідродинаміки потоків у каналах складної форми гідрокавітаційного пристрою та гідровихрової форсунки

з використанням варіаційних методів і структурного методу R-функцій [3, 4, 11-13], за результатами яких розроблено конструкції [6] та виготовлено дослідні зразки обладнання для створення та спалювання ШКРП з високим вмістом водної фази. Розроблено методологію визначення впливу гідрокавітаційної активації [1, 14, 18] на фізико-хімічні, теплофізичні та реологічні властивості отримуваних ШКРП, використання якої дозволило розробити та створити мобільний експериментальний енерготехнологічний комплекс [1, 2, 8, 9] для проведення досліджень впливу ГКА на теплові, гідродинамічні, фізико-хімічні, енергетичні та екологічні показники процесів створення та спалювання композиційних палив. Проведено експериментальні дослідження процесів створення і спалювання ШКРП на основі некондиційних вуглеводнів з додаванням рідких та вологовмісних промислових відходів різноманітного походження [5, 10, 15, 16, 17]. Розроблено спосіб виготовлення водовугільного палива [7] на основі відходів вуглезбагачувальних підприємств з додаванням продуктів переробки гуми, поліетилену та пластмаси.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися на: конференції молодих вчених і спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» (Харків, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2018, 2019); 3-й науково-практичній конференції «Сучасні тенденції і технології видобутку, виробництва, переробки і використання вугільних і вуглеводневих палив у промисловості та енергетиці» (Алушта, 2013); третьому міжнародному геологічному форумі «Актуальні проблеми і перспективи розвитку геології: наука і виробництво» (Коблево, 2016); V міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених та спеціалістів «Інноваційні шляхи модернізації базових галузей промисловості, енерго- і ресурсозбереження, охорона навколишнього природного середовища» (Харків, 2016); 11th Conference of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (Lisbon, Portugal, 2016), 6th International Conference of Sustainable Development (Rome, Italy, 2018).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено в 18 публікаціях, з яких: 5 статей (3 – в журналах і збірниках, внесених до переліку спеціалізованих видань

України, де можуть публікуватися результати дисертаційних робіт, 1 – у виданні, що індексується в наукометричній базі Scopus, 1 – в закордонному журналі, що індексується в наукометричній базі Web of Science); 2 патенти України на винахід; 11 матеріалів наукових конференцій.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГКА ПРИ СТВОРЕННІ ТА СПАЛЮВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПАЛИВ НА ОСНОВІ ВУГЛЕВОДНІВ ТА РІДКИХ АБО ВОЛОГОВІСНИХ ВІДХОДІВ

1.1 Властивості композиційного палива та особливості процесу його створення

В даний час однією з найважливіших проблем сталого розвитку економіки держави є забезпечення промислових та комунальних підприємств енергоресурсами. Енергетичні потреби практично повністю задовольняються за рахунок викопних палив, головним чином – нафти і природного газу. Іншими, не менш важливими задачами, є зниження негативного впливу промислових підприємств на навколишнє середовище і необхідність утилізації накопичуваних відходів різноманітного походження. Виходячи з цього, одними з найбільш актуальних завдань на сучасному етапі розвитку теплоенергетичної галузі є раціональне використання вуглеводневих енергоресурсів і розробка та впровадження нових ресурсозберігаючих екологічно безпечних технологій паливоспоживання у системах виробництва теплової енергії.

Одним з ефективних рішень цих завдань є часткова заміна традиційних видів вуглеводневих енергоресурсів на промислових і енергетичних об'єктах новими видами рідких композиційних палив, які являють собою стійкі емульсії і суспензії на основі вуглеводнів з можливістю додавання у якості паливних компонентів відходів різноманітного походження. До складу таких гідросумішей можуть входити різні промислові стоки або їх концентрати, такі як фенольні стічні води, нафтозмиви, некондиційні вуглеводні, відпрацьовані технологічні рідини нафтовидобутку і нафтопереробки, відходи збагачувальних підприємств, комунальних очисних споруд, продукти переробки твердих побутових відходів, полімерів, гуми та ін.

Для використання у якості енергоресурсу композиційне паливо повинне відповідати ряду вимог: седиментаційна стійкість до стратифікації, висока питома теплота згоряння, відповідність сучасним екологічним вимогам процесу його спалювання та ін. З метою забезпечення заданих споживчих властивостей при створенні композиційного палива однією з найефективніших є гідродинамічна кавітаційна активація (ГКА) [1]. Даний метод полягає в тому, що потік рідких вуглеводнів разом з водною фазою піддають попередній гомогенізації та диспергуванню в роторно-пульсаційному апараті (РПА), а потім ультрадиспергуванню та впливу кавітаційних полів. На режимах інтенсивного гідрокавітаційного впливу відбувається розрив суцільності середовища, утворення кавітаційних каверн з подальшим колапсом парових пухирців. При цьому в кавітаційних зонах відбуваються процеси крекінгу вуглеводнів та часткова дисоціація води на іони H^+ і OH^- , що сприяє гідрогенізації і гідролізу вуглеводневих фракцій, та, як наслідок, зміни їх властивостей. Виходячи з цього, при застосуванні гідрокавітаційної активації композиційне паливо має покращені енергоекологічні, седиментаційні та реологічні властивості.

Альтернативні композиційні палива (КП) в даний час широко поширені, що зумовлено прагненням отримати максимальну кількість теплової енергії із дешевих енергоресурсів, а також некондиційних вуглеводнів, відходів різноманітного походження, біомаси та ін.

Одними з найбільш розповсюджених відходів у нафтовій промисловості є шлами, які містять в середньому 10-56 % нафтопродуктів, 30-85 % води, 1-46 % твердих домішок [2]. Вихід їх складає близько 7 кг на 1 т перероблюваної нафти, що призводить до накопичення значних кількостей відходів на нафтопереробних підприємствах.

В роботі [3] для підвищення седиментаційної стійкості композиційного палива пропонується проводити механохімічну активацію паливних компонентів. Активація досягається послідовною обробкою компонентів в дезінтеграторах і кавітаторах [4, 5]. Дослідження цих процесів викладено в роботі [6].

Застосування гідрокавітаційної активації [1] при створенні та спалюванні штучних композиційних рідких палив (ШКРП) необхідне для збільшення площі поверхні розділу фаз вуглеводнів та інших рідин, здійснення кавітаційного впливу і, як наслідок, зміни фізико-хімічних властивостей як вуглеводнів, так і їх емульсій та суспензій для досягнення ультрадисперсної гомогенізації гетерофазного середовища. В роботі [7] зазначено, що застосування гідрокавітаційної активації є найбільш ефективним методом при необхідності отримання високоякісних ШКРП. Крім того, даний метод активації хіміко-технологічних процесів ініціює часткове протікання хімічних реакцій [8–15], таких як гідроліз, гідрогенізація, гідрокрекінг, завдяки чому можна досягти покращення споживчих властивостей композиційних палив. Згідно [16–19], при виникненні кавітаційних процесів в оброблюваному рідкому середовищі утворюються бульбашки газової фази при знижених локальних тисках, які при потраплянні в зону з більш високим тиском схлопуються з утворенням високошвидкісних кумулятивних струменів. В даному випадку, при наявності водної фази в емульсії, молекули води переходять в збуджений стан і розщеплюються на H^+ та гідроксильну групу OH^- , а температура та тиск в зонах схлопування кавітаційних бульбашок забезпечують протікання описаних хімічних реакцій. Таким чином, наявність водної фази у вуглеводневій фракції значно підсилюють ефект гідрокавітаційної активації.

В роботі [20] зазначено, що перспективним науково-технічним напрямом є розробка високоефективних апаратів з багатофакторним впливом на оброблюване середовище за рахунок дискретного введення в робочу зону маси та енергії великої щільності. До апаратів, які реалізують метод дискретного, багатофакторного енергетичного впливу на хіміко-технологічні процеси, також відносять роторно-пульсаційні пристрої, принцип роботи яких засновано на нестационарності потоків речовини, енергії та імпульсу.

При використанні в якості енергоресурсу водовугільного палива [21–27] значною мірою вирішується питання зниження шкідливих викидів в атмосферу, таких як діоксиди вуглецю, сірки, тверді мінеральні частки та ін. При

виготовленні водовугільного палива (ВВП) вугілля подрібнюють сухим або мокрим методами, далі додають необхідну кількість води і гомогенізують паливну суміш. Для забезпечення необхідних реологічних властивостей ВВП застосовують спеціальні хімічні домішки (поверхнево-активні речовини), однак використання таких добавок може значно впливати на собівартість отримуваної паливної суміші. Також однією з важливих проблем ВВП є стабільність, оскільки при транспортуванні та зберіганні можливе розшарування суспензії, що в подальшому впливає на процеси розпилювання та спалювання при отриманні теплової енергії.

Вплив кавітаційної обробки і органічної добавки (мазут) на фізико-хімічні та енергетичні характеристики органоводовугільного палива (ОВВП) досліджено в роботі [28]. На першому етапі досліджень проводилась кавітаційна обробка водовугільної суспензії без додавання до її складу мазута з метою оцінки впливу кавітаційних процесів на зміну властивостей отриманого палива, стабільність, а також зміну дисперсного складу без органічних добавок. Встановлено, що при збільшенні часу кавітаційної обробки стабільність паливних зразків значно підвищилась, а при додаванні органічних компонентів стабільність зменшувалась через зниження об'єму вугілля в складі паливної суміші. Слід зазначити, що в даній роботі не приділено належної уваги одному з найважливіших властивостей композиційного палива – в'язкості, оскільки при зміні компонентного складу реологічні властивості паливної суміші можуть в значній мірі змінюватись, що негативно впливає на організацію стійкого ефективного спалювання.

Наряду з багаточисельними експериментальними роботами, які пов'язані з вивченням процесу отримання водовугільних суспензій, проводились і теоретичні дослідження фізико-хімічних основ процесів диспергування, утворення дисперсних систем на основі суспензій вугілля [29-31]. Дані дослідження стосувались насамперед загальних питань отримання дисперсних систем, в них не розглянуто вплив окремих компонентів водовугільної суспензії на процеси утворення її коагуляційної структури. В роботі [32] досліджено вплив компонентів твердої фази на міцнісні характеристики ВВП з використанням

статистичної теорії міцності. Отримані дані дають можливість оцінювати вплив окремих складових на процес формування коагуляційної структури ВВП, однак вплив на енергоекологічні показники розглянутих компонентів не висвітлено.

В роботі [33] показані експериментальні дані роботи гідроударного вузла мокрого помелу для виготовлення ВВП. В технологічній схемі приготування ВВП використано роторно-імпульсний апарат (PIA), який здійснює кавітаційну обробку компонентів при створенні паливної суміші. Застосування PIA при отриманні композиційного палива забезпечує високу стабільність та енергетичні показники отримуваної паливної суміші.

Отже, при отриманні рідких видів композиційних палив одним з найважливіших процесів є кавітаційна обробка, застосування якої забезпечує отримання необхідних реологічних, фізико-хімічних та енергетичних показників отримуваної паливної суміші.

1.2 Особливості процесів спалювання композиційних палив. Обґрунтування необхідності використання ГКА в технологіях спалювання ШКРП

Традиційне використання рідких вуглеводневих продуктів нафтового або вугільного походження в якості палива в теплоенергетичних установках пов'язано зі значними складнощами у випадку їх обводненості. Вода, що вноситься з паром або потрапляє в паливо іншим способом, розподіляється у вигляді шарових або лінзових скупчень, які при подачі пального до пальників призводять до порушення теплового режиму топки або навіть до зриву полум'я. Отже, доцільно перетворювати обводнені рідкі палива в тонкодисперсні стійкі водовуглеводневі системи, які можуть спалюватися ефективно.

При використанні в якості альтернативних енергоресурсів штучних рідких композиційних палив можуть виникати складності не тільки на стадії його виготовлення, а й спалювання, оскільки процес горіння паливної краплі значно відрізняється від аналогічного процесу традиційних видів вуглеводневих

енергоносіїв. Передполум'яний процес і процеси запалювання та горіння краплі палива ускладнюються явищами фізико-хімічного впливу води у складі паливної суміші. Також значний вплив на організацію стійкого ефективного процесу горіння можуть мати реологічні властивості композиційних палив, оскільки при отриманні емульсій та суспензій на вуглеводневій основі при додаванні водної фази значно підвищується в'язкість паливної суміші, що може ускладнювати процеси розпилювання при спалюванні, призводячи до збільшення хімічного й механічного недопалів. Тому організація ефективного спалювання композиційних палив потребує застосування спеціальних пристроїв для забезпечення високої якості процесу горіння.

В роботі [34] представлено результати досліджень розпилювання водовугільного палива пневмомеханічними форсунками, згідно з якими при розпилюванні паливної суміші утворюються дві якісно різні системи крапель. Перша система з «краплями» діаметром вище 80-100 мкм представлена вугільними частками, решта – водовугільними краплями. Така фізична особливість процесу розпилювання палива може негативно впливати на організацію стійкого горіння, оскільки можливе виникнення додаткових теплових втрат при випаровуванні вільної вологи.

Вивчення особливостей передполум'яних процесів в композиційних паливах на основі G-фази, яка є відходами виробництва біодизеля, показані в роботах [35, 36]. Експериментальні дослідження показали, що стабільне горіння G-фази в чистому вигляді можливе лише за умови застосування «підсвічування», для цього можуть використовуватися спирти (метанол і етанол), дизельне паливо, мазут, газоподібне паливо. На рис. 1.1 показано графік залежності питомої теплоти згоряння КП на основі G-фази від вмісту речовин-активаторів.

Досліджувані зразки G-фази мали питому теплоту згоряння 23-25 МДж/кг і наступний хімічний склад: гліцерин $C_3H_5O_3$ – 45-55 %; метанол CH_3OH – 5-10 %; ароматичні речовини $C_xH_yO_z$ – до 10 %; KOH – 5-10 %; вода – 10-20 %. Середня щільність зразків G-фази при 20 °C складає 1062 кг/м³, кінематична в'язкість при 200 °C – $150 \cdot 10^{-6}$ м²/с, а при 800 °C – $8 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Для порівняння, кінематична

в'язкість мазуту марки М-100 при 800 °С – $118 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Таким чином, немає необхідності в підігріві КП на основі G-фази.

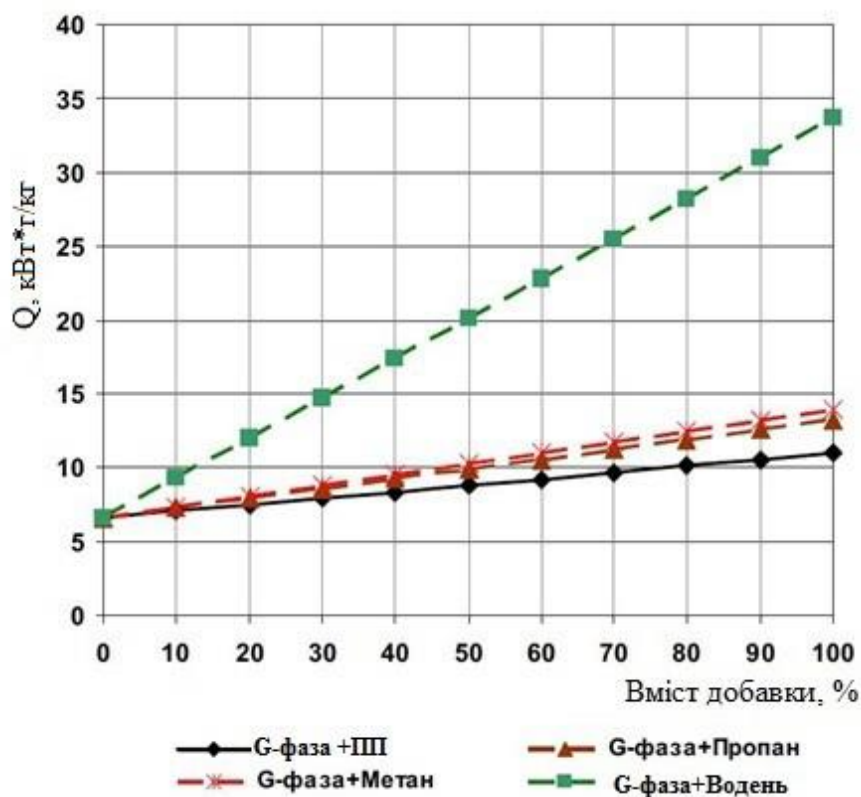


Рисунок 1.1 – Залежність зміни теплотворної здатності КП на основі G-фази від вмісту речовин-активаторів

Проведено дослідження [37] передполум'яних процесів G-фази термометричним і термогравіметричним методами для 100 % G-фази і для G-фази, емульгованої з пічним паливом (ПП) в різних пропорціях. Емульгування зразків проводилося в гідрокавітаційному пристрої, аналогічному описаному в роботі [38]. Однак, результати дослідження емульсій G-фази і ПП на стійкість до розшарування після гідрокавітаційної обробки, наведені в таблиці 1.1, показали, що готувати емульсію за допомогою гідрокавітаційного пристрою необхідно безпосередньо перед подачею в камеру згоряння, що також дозволяє реалізувати форсунка-змішувач, описана в роботі [39]. Таким чином, описане в даних роботах гідрокавітаційне обладнання не забезпечує необхідної стабільності створюваної паливної суміші, яку перед спалюванням необхідно додатково гомогенізувати.

Результати термогравіметричних досліджень показали, що фаза випаровування крапель КП на основі G-фази в підвісі починається раніше, тобто при більш низьких температурах, і проходить більш інтенсивно, ніж у мазуту, а також зменшується частка вогнетривкого залишку на 20-22 %. Добавка ПП до складу КП несуттєво впливає на час випаровування, але дозволяє скоротити вогнетривкий залишок ще на 5-7 %.

Таблиця 1.1 – Склад і час розшарування зразків КП

Масова частка G-фази, %	Масова частка ПП, %	Час початку розшарування, хв	Час закінчення розшарування, хв
100	-	-	-
90	10	15	30
80	20	5	15
70	30	3	10
60	40	3	50
50	50	3	70

Термометричні дослідження показали, що час горіння краплі КП на основі G-фази скорочується в 3 рази порівняно з часом горіння мазуту, і в 2 рази порівняно з чистим гліцерином. Чітко видно стадійність горіння мазуту. Таким чином, показана можливість введення в енергетичний комплекс альтернативних котельних палив на основі відходів виробництва біодизельного палива.

В роботі [40] розглянуто механізм горіння крапель суспензійного водовугільного палива, запропонована фізико-хімічна схема процесу, яка складається з декількох незалежних паралельно-послідовних стадій:

- На поверхні краплі – миттєвий прогрів і поверхневе випаровування вологи, низькотемпературна активація реакційної поверхні палива перед його займанням, горіння мікрочасток вугілля на поверхні краплі;
- Всередині краплі – поступове прогрівання, випаровування вологи з внутрішньої області краплі, вихід і горіння летючих навколо краплі ВВП,

перенесення мікрочасток вугілля з утворенням ксеносфери, горіння мікрочасток вугілля в результаті хімічних реакцій з киснем повітря та водяним паром.

Внаслідок обробки результатів гранулометричного аналізу та стеріомікроскопічних досліджень встановлено, що при згорянні крапель ВВП утворюються порожнинні сферичні частки більшого розміру, ніж вихідна паливна суміш. Однак крім зміни кількості мінеральних твердих часток інші шкідливі викиди з димовими газами при згорянні даного виду палива в даній роботі не розглянуто.

Актуальність використання водовугільного палива в енергетичних агрегатах з попереднім дослідженням теплотехнічних характеристик і параметрів роботи даного обладнання з метою встановлення оптимальних режимів роботи на цьому паливі розглянуто в [41]. При спалюванні композиційних палив необхідно передбачати заходи з підвищення стабільності горіння, ступеню вигорання і підтриманню заданого температурного рівня. Як зазначено в даній роботі, особлива увага повинна приділятися організації розпилювання паливних сумішей в топочному просторі, оскільки оптимальні умови диспергування дозволяють уникнути утворення великих крапель, які сприяють агломерації твердих часток. Необхідною умовою ефективного спалювання композиційного палива з наявністю водної фази є забезпечення температур не нижче 900-1000 °C в зоні займання в районі розміщення пальникових пристроїв енергетичного котла.

Таким чином, при використанні штучних рідких композиційних палив в якості енергоресурсу з метою здійснення ефективного спалювання необхідно забезпечувати якісне розпилювання та необхідний температурний рівень топочного простору. Якість розпилювання та температурні характеристики процесу горіння значною мірою впливають на екологічні показники процесу спалювання та ККД енергетичного котла.

1.3 Основні критерії оцінки якості композиційного палива

Використання в теплоенергетичній галузі штучних рідких композиційних палив в якості енергоресурсу має ряд переваг в порівнянні з застосуванням традиційних видів пального. Однак забезпечення якісного сумішоутворення та горіння паливних композицій супроводжується рядом проблем, пов'язаних з ефективністю використовуваних паливоприготувальних пристроїв та методів спалювання створених композиційних палив. З метою визначення ефективності застосування різноманітних технологій створення, розпилювання та спалювання композиційних палив необхідне застосування визначених критеріїв оцінювання якості даних технологічних прийомів.

Експлуатаційні властивості палив оцінюють показники, які характеризують процеси подачі, сумішеутворення, згоряння, а також здатність викликати нагароутворення і абразивне зношування деталей та вузлів енергетичних паливоспоживаючих установок.

Однією з основних характеристик використовуваного палива є питома теплота згоряння – фізична величина, яка показує кількість тепла, що виділиться при повному згорянні палива масою 1 кг. Чим більше питома теплота згоряння палива, тим менше питома витрата палива при тому ж ККД енергоустановки. Також даний показник є одним з головних вихідних параметрів при проектуванні енергетичного паливоспоживчого обладнання, оскільки визначення необхідного теплового режиму енергоустановки проводиться з обов'язковим урахуванням питомої теплоти згоряння застосовуваного палива. Також з використанням даної паливної характеристики може розраховуватись економічна доцільність застосування окремих видів палива при виробництві теплової енергії, оскільки при однаковій собівартості перевага надаватиметься паливним енергоресурсам з більшою теплотворною здатністю.

При розгляданні моторних палив важливими характеристиками є самозаймання, октанове (цетанове) число, температура спалаху та займистості, наявність механічних домішок, фракційний склад, кислотність, наявність

механічних домішок та ін. Однак у випадку використання в якості енергоресурсу для промислових та теплоенергетичних котлів композиційних палив з вмістом водної фази та наявністю твердих часток, показники температури спалаху та займистості можуть характеризувати лише пожежонебезпечність паливних сумішей, а фракційний склад у випадку використання в якості основи для паливних композицій важких видів вуглеводнів особливого впливу на загальну питому теплоту згоряння паливної суміші не має. Тому в даній дисертаційній роботі цим характеристикам значної уваги не приділено.

При наявності в складі паливної суміші вуглеводневої сировини та водної фази, після попереднього емульгування в'язкість отриманого композиційного палива значно підвищується за рахунок утворення адсорбційно-сольвантного шару на кордоні розділу фаз паливної краплі. Дана особливість може призводити до значних ускладнень організації якісного спалювання, оскільки при застосуванні традиційних пальникових пристроїв дисперсність розпилювання композиційних палив високої в'язкості може значно погіршуватися, що призводить до втрат теплоти з хімічним та механічним недопалом, а також погіршення екологічних показників процесу горіння. Тому одним із важливих критеріїв якості композиційної паливної суміші є в'язкість, оскільки за даним показником необхідно обирати методи та пристрої для диспергування ШКРП при спалюванні. Також показники в'язкості можуть бути визначними факторами при перекачуванні палива насосами, а також проектуванні пальникових та розпилюючих пристроїв, оскільки даний критерій значно впливає на процеси розпилювання і сумішоутворення паливоповітряної суміші.

Важливим показником якості композиційної паливної суміші є стабільність. При створенні композиційних палив, до складу яких входять компоненти, що погано змішуються (наприклад, вуглеводень і вода), а також наявності твердої фази, стабільність паливної суміші може бути одним з найважливіших показників, оскільки при транспортуванні та зберіганні можливе розшарування суспензії, що в подальшому впливає на процеси спалювання при отриманні теплової енергії.

Одним з важливих показників можливості застосування котельного композиційного палива на теплогенеруючому обладнанні є зольність, оскільки дана характеристика показує необхідність наявності системи золошлакоочистки теплообмінних поверхонь котла, або взагалі - золошлаковидалення. Зольність – відсотковий вміст негорючого залишку, який утворюється з мінеральних домішок палива при його повному згорянні. Зольність вуглеводневої сировини пов'язана з наявністю твердих часток мінерального походження, які залишаються після спалювання. При високій зольності, застосування паливної суміші на газомазутних котлах без конструктивних змін енергетичного обладнання неможливе, оскільки золові відкладення на теплообмінних поверхнях значно знижують ККД енергоустановки. Тому показник зольності застосовуваного палива є суттєвим при визначенні типу котла для спалювання того чи іншого виду ШКРП.

Слід зазначити, що при постійному посиленні сучасних екологічних вимог до процесів застосування енергоресурсів при виробництві теплової та електричної енергії, необхідно приділяти значну увагу екологічним показникам процесів спалювання створених паливних сумішей. У разі відповідності діючим екологічним нормативам застосування штучних композиційних палив можливе не тільки на великих промислових та енергетичних об'єктах, а й на малих котельних, комунальних підприємствах та інших галузях промисловості, що значно підвищує економічну доцільність створення та спалювання паливних сумішей.

Таким чином, основними критеріями оцінки якості штучних рідких композиційних палив є: рівень питомої теплоти згоряння, в'язкість, стабільність, зольність, екологічні показники процесу спалювання та ККД енергоустановки. Враховуючи той факт, що ГКА може значно поліпшувати дані критерії, одним з основних завдань даної дисертаційної роботи є дослідження впливу даного методу при створенні та спалюванні композиційних палив на енергоекологічні, теплофізичні та реологічні показники створюваних паливних сумішей.

На основі проведеного аналітичного огляду визначено основні вимоги до устаткування та обладнання для створення й спалювання композиційного палива:

підвищений ресурс пристроїв, висока інтенсивність гідрокавітаційної обробки паливних компонентів, забезпечення якісних реологічних та енергоекологічних характеристик отримуваної паливної суміші, забезпечення високоякісного розпилювання та відповідності складу димових газів діючим екологічним вимогам при спалюванні даного виду енергоресурсу.

В результаті проведеного аналітичного огляду технологій та обладнання для створення і спалювання композиційних палив сформульовано мету даного дослідження – підвищення ефективності процесів створення та екологічно безпечного спалювання в теплоенергетичних установках штучних композиційних рідких палив на основі некондиційних вуглеводнів та промислових відходів з високим вмістом водної фази шляхом застосування гідрокавітаційної активації. Для досягнення даної мети дослідження поставлено такі задачі:

- Визначити основні критерії оцінки ефективності використання ГКА та обладнання, яке її реалізує, при створенні та спалюванні композиційних палив на основі вуглеводнів, рідких або вологовмісних відходів з заданими фізико-хімічними та енергоекологічними властивостями;
- Провести математичне й чисельне моделювання гідродинаміки потоків в'язкої нестисливої рідини в елементах гідрокавітаційного обладнання для удосконалення існуючих та виготовлення нових зразків ефективних пристроїв для створення та розпилювання ШКРП;
- Розробити методологію та створити експериментальний енерготехнологічний комплекс для визначення впливу гідрокавітаційної активації на теплові, гідродинамічні, фізико-хімічні процеси при створенні та спалюванні паливних емульсій та суспензій на основі вуглеводнів і різноманітних вологовмісних відходів;
- Експериментально дослідити вплив гідрокавітаційної активації під час створення нових видів композиційних палив на їх теплофізичні та енергоекологічні властивості;
- Провести експериментальні дослідження енергоефективності та екологічної безпеки застосування гідрокавітаційної активації в технологіях створення та

спалювання ШКРП на основі некондиційних вуглеводнів з додаванням відпрацьованої рідини гідророзриву пласта нафтогазових свердловин, мулових осадів комунальних очисних споруд, а також надати рекомендації з промислового використання гідрокавітаційної активації.

1.4 Висновки за розділом 1

Проведено аналітичний огляд існуючих технологій виробництва та спалювання композиційних палив, розглянуті переваги та недоліки основних типів устаткування для виконання задач даного типу. Показано, що одним з найбільш ефективних способів отримання якісної паливної суміші є кавітаційний вплив, який можливо реалізувати шляхом застосування спеціальних сучасних ефективних пристроїв [7].

Одними з найважливіших умов якісного спалювання композиційних палив є забезпечення якісного розпилювання та необхідний температурний рівень топочного простору, оскільки дані показники значною мірою впливають на енергоекологічні характеристики процесу спалювання паливної суміші та ККД енергетичного обладнання.

Визначено, що основними критеріями оцінки якості паливної суміші є питома теплота згоряння, в'язкість, стабільність, зольність, екологічні показники процесу спалювання композиційного палива та ККД енергетичного обладнання.

Визначені основні вимоги до устаткування та обладнання для створення й спалювання композиційного палива: підвищений ресурс пристроїв, висока інтенсивність гідрокавітаційної обробки паливних компонентів, забезпечення якісних реологічних та енергоекологічних характеристик отримуваної паливної суміші, забезпечення високоякісного розпилювання та відповідності складу димових газів діючим екологічним вимогам при спалюванні даного виду енергоресурсу.

В результаті проведеного аналітичного огляду технологій та обладнання для створення і спалювання композиційних палив сформульовано мету та задачі даного дослідження.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СТВОРЕННЯ, РОЗПИЛЮВАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО ПАЛИВА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГІДРОКАВІТАЦІЙНОЇ АКТИВАЦІЇ

2.1 Математичне й чисельне моделювання течії в'язкої рідини в плоских та осесиметричних каналах з використанням структурного методу R-функцій для створення нових і вдосконалення існуючих розпилюючих пристроїв

2.1.1 Розрахунок гідродинамічних характеристик потоку в плоскому модельному каналі гідровихрової форсунки

При створенні композиційних палив з додаванням вологовмісних відходів в'язкість отримуваних паливних композицій значно підвищується у порівнянні з вихідними компонентами, що призводить до погіршення якості розпилювання при спалюванні. Також при створенні композиційних палив з наявністю твердої фази можливе утворення конгломератів, що може негативно впливати на організацію стійкого горіння, оскільки можливе засмічення паливоподаючого тракту та прохідних перерізів розпилюючих форсунок. Тому для розпилювання високов'язких композиційних палив при спалюванні необхідне застосування спеціальних гідровихрових форсунок, які здатні забезпечити якісне диспергування для покращення змішування паливних крапель з окиснювачем. При проектуванні гідровихрових форсунок необхідно прагнути до виникнення в течії розпилюваної рідини інтенсивних кавітаційних зон для забезпечення якісного диспергування і запобігання утворення конгломератів. Таким чином, при проектуванні проточної частини гідровихрової форсунки необхідно досягти виникнення зон знижених тисків нижче тиску насичення парів.

Як зазначено в роботі автора [42], математичне моделювання задач гідродинаміки засноване на чисельному рішенні системи рівнянь Нав'є-Стокса. Різноманітні методи вирішення таких задач розглянуто в роботах [43-45].

Математичні моделі побудовані на базі системи рівнянь Нав'є-Стокса з використанням методу R-функцій [46, 47], які в двовимірному та осесиметричному випадках зводяться до нелінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних 4-го порядку відносно функції току ψ і рівняння Пуассона відносно статичного тиску.

Плоска стаціонарна течія в'язкої нестискуваної рідини описана системою рівнянь Нав'є-Стокса [48, 49]

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{\text{Re}} \Delta V_x = 0, \quad (2.1)$$

$$V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{1}{\text{Re}} \Delta V_y = 0, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0, \quad (2.3)$$

де (2.1), (2.2) – рівняння руху; (2.3) – рівняння нерозривності руху; Re – число Рейнольдса; (V_x, V_y) – вектор швидкості; P – статичний тиск.

З використанням функції току ψ , яка визначається через співвідношення $V_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}$, $V_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$, система (2.1) – (2.3) зводиться до нелінійного диференціального рівняння в частинних похідних 4-го порядку відносно функції току ψ [46]

$$\frac{1}{\text{Re}} \Delta \Delta \psi - \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Delta \psi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Delta \psi}{\partial y} = 0. \quad (2.4)$$

Для опису руху в'язкої нестискуваної рідини в каналі, крім диференціального рівняння, необхідно задати граничні умови. При вирішенні задачі в області Ω межею буде $\partial\Omega$. Ділянки межі області можуть відповідати твердим стінкам каналу, входу в канал і виходу з каналу. Граничні умови для рівняння (2.4) витікають з умови прилипання на твердій стінці і заданої швидкості на вході (виході). На вході в канал задається розподіл швидкості, за яким визначається функція току. Якщо розподіл швидкості на виході відомо (наприклад, стала ламінарна течія Пуазейля [49]), то його можна також задати.

Із системи рівнянь Нав'є-Стокса, після диференціювання (2.1) по x , а (2.2) по y та, склавши ці два рівняння, отримаємо:

$$\Delta P = 2 \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial x} \frac{\partial V_x}{\partial y} \right).$$

Дане рівняння можна переписати відносно функції току ψ наступним чином

$$\Delta P = 2 \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right)^2 \right). \quad (2.5)$$

Рух в'язкої нестискуваної рідини описується системою рівнянь Нав'є-Стокса, яка в циліндричних координатах має вигляд [48]

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\Delta v_r - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right), \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{v_r v_\varphi}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \nu \left(\Delta v_\varphi - \frac{v_\varphi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} \right), \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta v_z, \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (2.9)$$

де (2.6)–(2.8) – рівняння Нав'є-Стокса; (2.9) – рівняння нерозривності руху; оператор Δ визначається за формулою

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Для стаціонарного і осесиметричного випадку дана система рівнянь в безрозмірному вигляді перетвориться в наступну

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \right), \quad (2.10)$$

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right), \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r v_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (2.12)$$

де Re – число Рейнольдса; (v_r, v_z) – вектор швидкості; p – статичний тиск.

Продиференціюємо рівняння (2.10) по z , а (2.11) – по r та віднімемо з першого отриманого рівняння друге, виключаючи члени з тиском p , введемо функцію току за допомогою співвідношень $v_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}$, $v_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}$.

В результаті проведених перетворень отримаємо наступне нелінійне рівняння 4-го порядку відносно функції току ψ [50]

$$\begin{aligned} & -\frac{3}{r^4} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{3}{r^3} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{2}{r^3} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r^3} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z} - \\ & -\frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^3 \psi}{\partial r^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^3 \psi}{\partial r \partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial^3 \psi}{\partial r^2 \partial z} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial^3 \psi}{\partial z^3} + \\ & + \frac{1}{\text{Re}} \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial^4 \psi}{\partial r^4} - \frac{2}{r} \frac{\partial^4 \psi}{\partial r^2 \partial z^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial^4 \psi}{\partial z^4} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial^3 \psi}{\partial r^3} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial^3 \psi}{\partial r \partial z^2} - \frac{3}{r^3} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{3}{r^4} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) = 0. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Для опису руху в'язкої нестискуваної рідини в осесиметричному каналі необхідно задати граничні умови. При вирішенні задачі в області Ω межею буде $\partial\Omega$. Ділянки меж області можуть відповідати твердим стінкам каналу, входу в канал, виходу з каналу і осі симетрії. Граничні умови для рівняння (2.13) витікають з умови прилипання на твердій стінці, швидкості на вході (виході) та умови непроникності на осі симетрії.

На вході в канал задається розподіл швидкості, за яким визначається функція току. Якщо розподіл швидкості на виході відомо (наприклад, стала ламінарна течія Пуазейля [49]), то його можна також задати.

Після побудови рішення для функції току, тиск можна визначити з рівняння Пуассона [9], права частина якого виражається через похідні функції току

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{2}{r^2} \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial r} \right) \right]. \quad (2.14)$$

На рисунках 2.1, 2.2 подано графіки функцій у вигляді ліній постійного рівня на площині rOz , які побудовано за результатами обчислювальних експериментів. Результати обчислювальних експериментів проводилися на сітці 40×40 сплайнів 5-го порядку, кількість ітерацій – 9. Розрахунки проведено в системі POLE [51, 52].

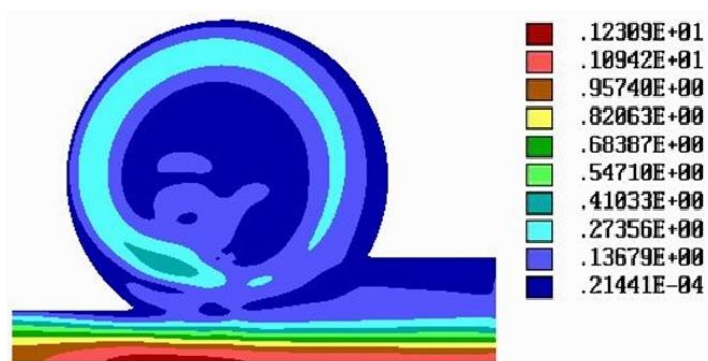


Рисунок 2.1 – Функція модуля швидкості ($Re=200$)

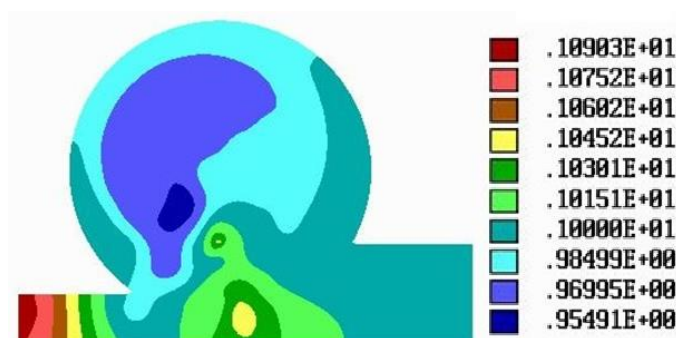


Рисунок 2.2 – Функція модуля статичного тиску ($Re=200$)

Математичне моделювання потоку рідини в каналі складної форми за описаним вище алгоритмом дозволило вдосконалити проточну частину гідрокавітаційної форсунки-активатора [53]. Гідрокавітаційна форсунка з вдосконаленою проточною частиною показана на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Гідрокавітаційна форсунка

В подальшому дана гідрокавітаційна форсунка була використана в експериментальних дослідженнях при спалюванні композиційного палива з

додаванням відпрацьованої рідини гідророзриву пласта нафтогазових свердловин. Дана форсунка не призначена для диспергування композиційних палив з високим вмістом твердої фази та наявністю твердих часток розміром більше 500 мкм, оскільки прохідні перерізи проточної частини можуть засмічуватися, що негативно впливає на процеси горіння. Тому для диспергування при спалюванні композиційних палив з високим вмістом твердої фази необхідне використання розпилюючих пристроїв іншого типу.

2.1.2 Чисельне моделювання процесів розпилювання композиційного палива

При розпилюванні високов'язких композиційних палив з високим вмістом вологи та наявністю твердої фази забезпечення якісного диспергування є доволі складним завданням. При великій кількості твердої фази ресурс розпилюючих пристроїв може значно знижуватися в результаті абразивного зношування поверхонь деталей, що призводить до погіршення якості диспергування паливної суміші. Також значний вплив на роботу гідровихрових форсунок може мати необхідна продуктивність, оскільки при малих витратах палива необхідно значно зменшувати прохідні перерізи отворів розпилюючого пристрою, що може викликати засмічення паливодиспергуючих каналів та зрив факелу під час спалювання.

Для CFD 3-вимірного моделювання процесів розпилювання композиційного палива використано програмний комплекс OpenFOAM 4.1 (відкрита інтегрована платформа для чисельного моделювання задач механіки суцільних середовищ). Даний програмний комплекс є інструментарієм обчислюваної гідродинаміки для операцій зі скалярними, векторними і тензорними полями, призначених для FVM-обчислень. Використання даного програмного комплексу дозволяє вирішувати задачі гідродинаміки ньютонівських та неньютонівських в'язких рідин як у стискуваному, так і в нестискуваному наближеннях з урахуванням конвективного

теплообміну і дії сил гравітації. Для моделювання турбулентних течій можливе використання RANS-моделей (стандартна к-ε модель турбулентності), LES- («вихродозволяючий») та DNS-методів (концепція дисипації вихрів). Можливе рішення дозвукових, білязвукових та надзвукових задач.

В основі пакету програм даного програмного комплексу є набір бібліотек, які являють собою інструменти для вирішення систем диференціальних рівнянь в частинних похідних як у просторі, так і в часі. Більшість математичних диференціальних і тензорних операторів у програмному коді рівнянь може бути представлено у зручній формі з можливістю внесення коригуючих верифікаційних коефіцієнтів, а метод дискретизації і вирішення для кожного оператора може бути обраний користувачем в процесі розрахунків. Таким чином, в коді інкапсулюються і розподіляються поняття розрахункової сітки (метод дискретизації), дискретизації основних рівнянь та методів рішення алгебраїчних рівнянь.

Проведено CFD 3-вимірне моделювання процесів розпилювання композиційного палива за допомогою гідровихрової форсунки. З метою забезпечення високоякісного диспергування та утворення первинної паливоповітряної суміші подача розпилюючого агента здійснюється тангенційно, завдяки чому збільшується вихроутворення в камері змішування та за рахунок відцентрових сил виникають локальні зони знижених тисків. З метою забезпечення більш високого ресурсу розпилюючого пристрою за рахунок пливчастої подачі повітря в сопло розпилювання струмені палива не торкаються стінок деталей, що перешкоджає абразивному зношуванню внутрішніх поверхонь гідровихрової форсунки.

Для дискретизації розрахункової області гідровихрової форсунки використано блочні сітки, тобто область розбивається на непересічні комірки кубічної форми. Дискретизація системи рівнянь руху в розрахунковому пакеті OpenFOAM 4.1 проводиться по методу кінцевих об'ємів FVM (Finite-volume method). Локалізація дискретних значень швидкості і тиску здійснюється в

центрах комірок побудованої розрахункової сітки. Розрахункова сітка проточної частини гідровихрової форсунки (рис. 2.4) складається з 1586031 вузлів та 8935897 комірок.

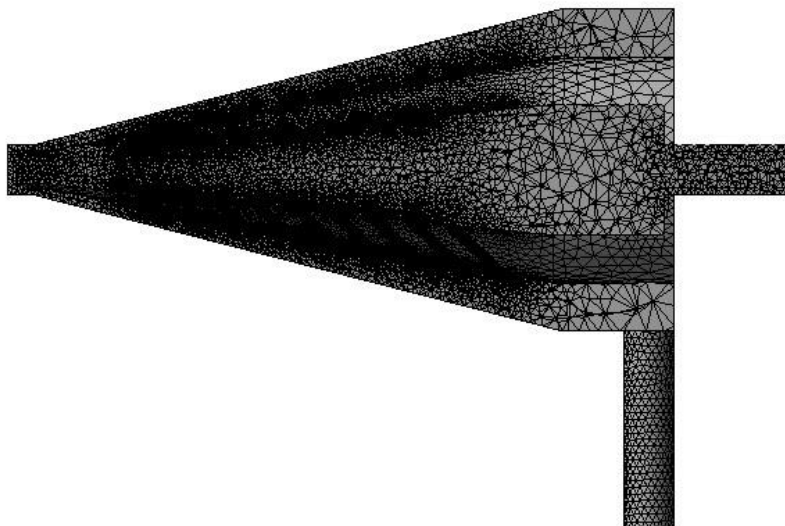


Рисунок 2.4 – Розрахункова сітка проточної частини гідровихрової форсунки

На рис. 2.5-2.7 показано результати моделювання процесу розпилювання композиційного палива з використанням гідровихрової форсунки.

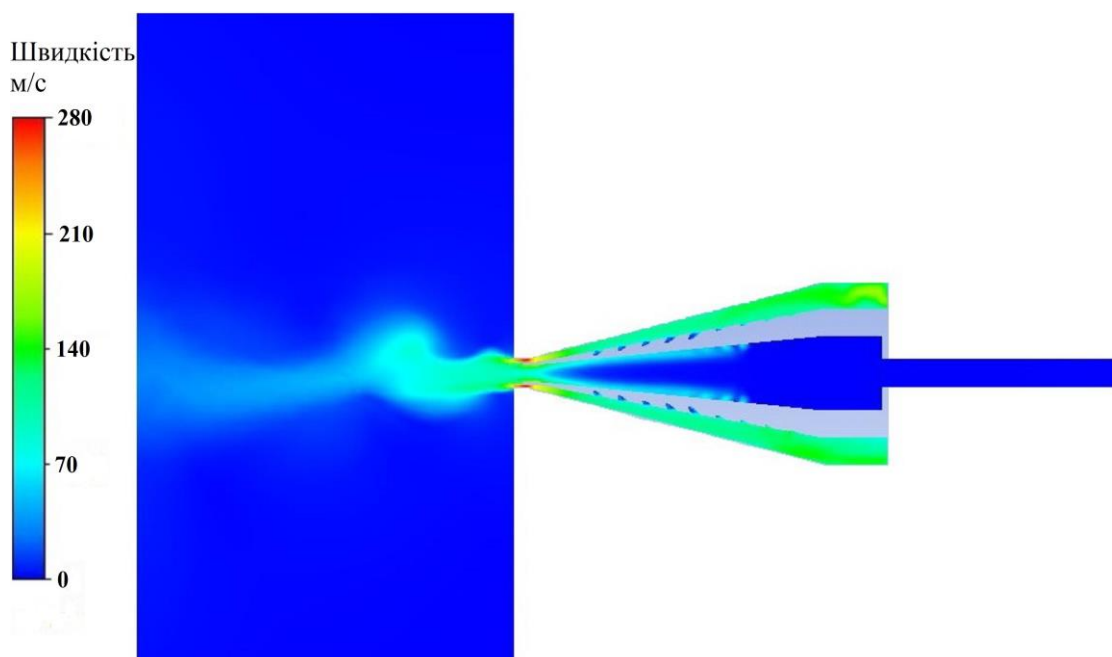


Рисунок 2.5– Розподілення швидкості при розпилюванні композиційного палива

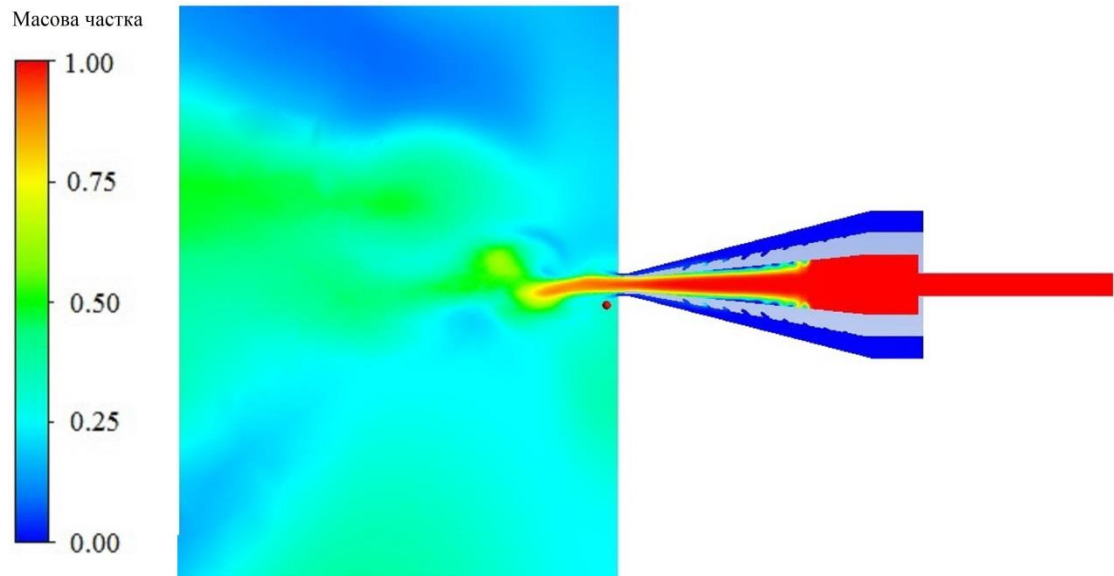


Рисунок 2.6 – Масове розподілення рідини при розпилюванні композиційного палива

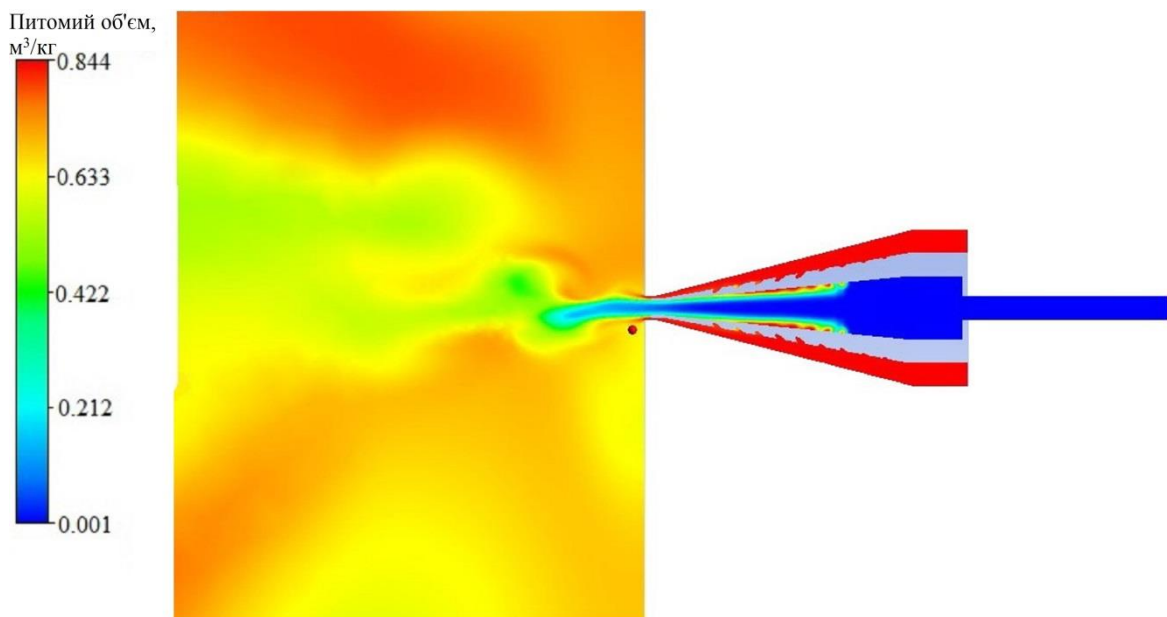


Рисунок 2.7 – Об'ємне розподілення повітря при розпилюванні композиційного палива

З результатів, показаних на рис. 2.5–2.7, можна зробити висновок, що розпилювана рідина не прилипає до стінок внутрішнього сопла для розпилювання, оскільки повітря під тиском подається через велику кількість тангенційно направлених отворів з утворенням повітряної плівки. Також згідно з результатами моделювання, застосування гідровихрової форсунки даного

конструктивного виконання забезпечує якісне розпилювання композиційного палива високої в'язкості і змішування паливних крапель з окиснювачем, що є необхідною умовою для стабільного спалювання паливної суміші.

2.1.3 Фізичне моделювання процесів розпилювання композиційного палива

На основі результатів чисельного моделювання розроблено принципово нову конструкцію гідровихрової форсунки для диспергування при спалюванні композиційних палив з високим вмістом води та наявністю твердої фази, 3-вимірною моделлю якої показана на рис. 2.8.

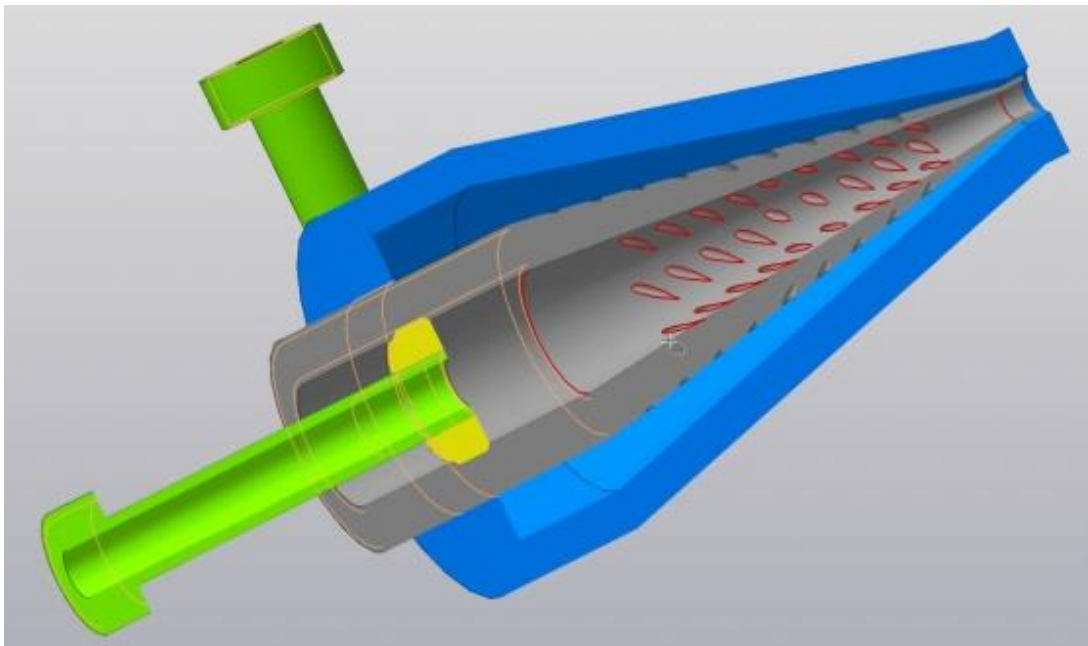


Рисунок 2.8 – 3-вимірною моделлю конструкції гідровихрової форсунки

З метою експериментального підтвердження якості розпилювання та проведення фізичного моделювання деталі розробленої гідровихрової форсунки було виготовлено за допомогою 3-D принтера. 3-D модель гідровихрової форсунки показана на рис. 2.9.



Рисунок 2.9 – 3-D модель гідровихрової форсунки

Фізичне моделювання розпилювання композиційного палива здійснювалось в широкому діапазоні тисків рідини і повітря, також здійснювалось регулювання гідровихрової форсунки з метою визначення ефективного положення розпилюючого сопла. Фізичне моделювання розпилювання композиційного палива показано на рис. 2.10.



Рисунок 2.10– Фізичне моделювання процесу розпилювання композиційного палива

При проведенні фізичного моделювання визначено ефективне регулювання гідровихрової форсунки та барометричні параметри рідини і повітря. З урахуванням всіх конструктивних особливостей та масштабування виготовлено дослідний зразок гідровихрової форсунки, яка показана на рис. 2.11.



Рисунок 2.11 – Дослідний зразок гідровихрової форсунки

Дослідний зразок гідровихрової форсунки (рис. 2.11) використано в подальших експериментальних дослідженнях для розпилювання композиційних палив при спалюванні.

2.2 Моделювання процесів створення композиційних палив з застосуванням гідрокавітаційної активації

2.2.1 Чисельне моделювання тривимірної турбулентної течії в проточних частинах гідрокавітаційного пристрою

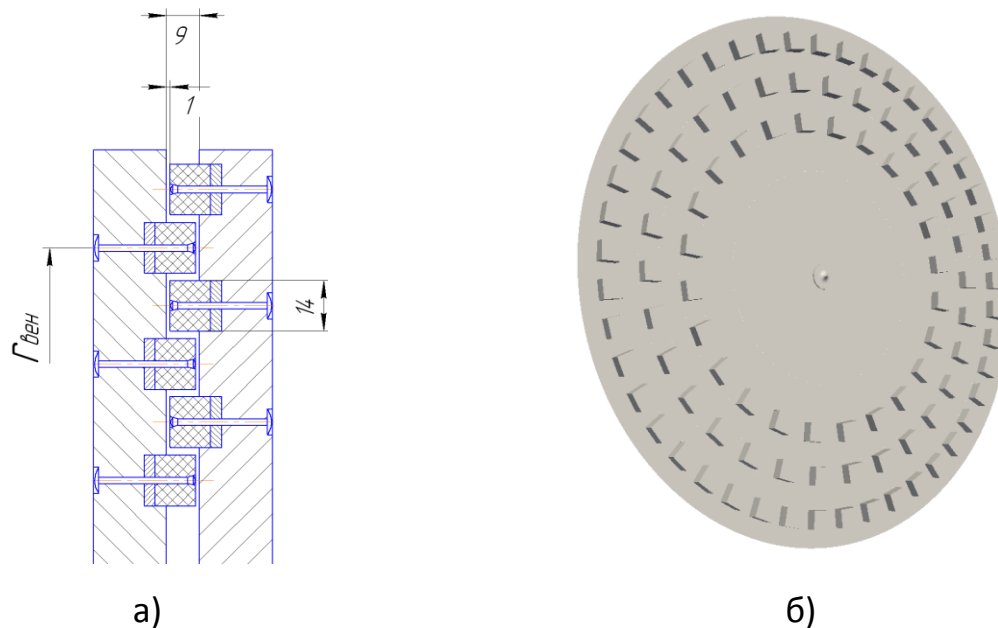
З метою забезпечення заданих реологічних властивостей та необхідної стабільності для виготовлення композиційного палива використовують сучасні високоефективні пристрої – дезінтегратори, вібротлини, апарати вихрового шару, проточні млини-активатори, кавітаційні пристрої та ін. [5, 54, 55]. Під час роботи таких апаратів відзначається інтенсивний механічний вплив на частки дисперсної фази, ефективна турбулізація і пульсації рідини, які виникають за рахунок

періодичної зміни прохідного перерізу потоку [56]. Таким чином існує можливість створення штучних твердих (ШТКП) і рідких (ШРКП) композиційних палив на базі дешевих торфів, вугілля і мазуту. При цьому в якості базових складових можуть використовуватись рядовий торф будь-якої якості, вугілля і продукти його збагачення, різноманітні некондиційні вуглеводні та ін. При цьому пристрої для виготовлення композиційного палива повинні забезпечувати високий рівень питомої теплоти згоряння, стабільності та задовільні реологічні властивості отримуваної паливної суміші.

В роботі [1] запропоновано застосування гідрокавітаційної активації для інтенсифікації фізико-хімічних процесів при виробництві композиційних палив. Даний метод полягає в тому, що потік рідких вуглеводнів разом з водою піддають попередній гомогенізації та диспергуванню в роторно-пульсаційному апараті (РПА), а потім ультрадиспергуванню та впливу кавітаційних полів у РПА та гідровихровому перетворювачі (ГВП). На кавітаційних режимах відбувається розрив суцільності середовища, утворення кавітаційних каверн з подальшим колапсом парових пухирців. При цьому в кавітаційних зонах відбуваються процеси крекінгу вуглеводнів та часткова дисоціація води на іони H^+ і OH^- , що сприяє гідрогенізації і гідролізу вуглеводнів, та як наслідок, зміні їх властивостей. Особливо важливим є рівень попереднього диспергування та гомогенізації. Ефективність даного методу підтверджена при експериментальних дослідженнях збільшення кількості легких фракцій у складі важких вуглеводнів, а також створення композиційних палив з додаванням в якості водної фази фенольних стічних вод. Однак ефективність існуючих пристроїв не забезпечувала виконання поставлених в даній дисертаційній роботі завдань, тому для ефективного забезпечення утилізації промислових відходів у складі композиційних палив необхідне збільшення інтенсивності кавітаційного впливу в РПА при виготовленні паливної суміші.

З метою підвищення інтенсивності кавітаційного впливу при створенні композиційного палива проведено вдосконалення конструкції робочих органів гідрокавітаційного пристрою (ГКП). В якості прототипу для подальшої

модернізації обрано двороторний гідрокавітаційний пристрій, створений у відділі нетрадиційних енерготехнологій Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. Даний об'єкт досліджень має триступеневу проточну частину (шість вінців), кожний ступінь якої складено з робочих елементів ротаційного та контр-ротаційного робочих коліс, меридіональний переріз й просторовий вигляд яких наведено на рис. 2.12.



а – меридіональний переріз; б – просторовий вигляд нижнього РК

Рисунок 2.12 – Проточна частина гідрокавітаційного пристрою

Робочий орган в кожному вінці має форму паралелепіпеду з шириною та довжиною 14 мм, а також висотою 8 мм. Кількість робочих органів в першому та другому вінцях дорівнює 24 шт., в третьому та четвертому – 30 шт., в п'ятому та шостому – 45 шт. Радіуси розташування вісі симетрії $r_{\text{вен}}$ робочих органів в 1-6 венці дорівнюють 104, 120, 136, 152, 168 та 184 мм відповідно. Радіальний зазор між сусідніми робочими органами дорівнює 1 мм, так само, як і осьовий зазор між верхівкою робочого органу й протилежним робочим колесом.

Розглянуто режим роботи агрегату, коли 1-й, 3-й та 5-й вінці обертаються навколо вісі x з частотою 3000 хв^{-1} , а 2-й, 4-й та 6-й вінці – з частотою 3000 хв^{-1} .

Враховуючи кратність кількості робочих органів в ступенях, попереднє дослідження виконано окремо для кожного ступеня. Розрахункова область при

цьому складається з одного каналу ротаційного колеса й одного каналу контр-ротаційного. Вхідна та вихідна границі віддалені на відстань 28 мм від робочих органів РПА.

Оскільки течія у проточній частині гідрокавітаційного пристрою має складну просторову структуру, попереднє дослідження роботи агрегату можливо виконувати в режимах вентилятора для малих чисел Маха та гідравлічного насосу, використовуючи при цьому стисливе повітря та нестисливу рідину як робочі тіла.

Для моделювання течій у проточній частині гідрокавітаційного пристрою використано програмний комплекс IPMFlow, який є безпосереднім розвитком відомих та апробованих комплексів прикладних програм обчислювальної газогідродинаміки FlowER та FlowER-U [57].

Дискретизацію розрахункової області виконано з використанням трьох рівнів неструктурованої різницевої сітки. Кількість комірок сітки 3-го рівня для одного каналу ротаційного чи контр-ротаційного колеса незалежно від досліджуваного ступеня дорівнює 811 тис. комірок. До поверхні стінки виконано згущення комірок сітки. На рис. 2.13 наведено типовий схематичний вигляд різницевої сітки при дослідженні течії рідини в ступені.

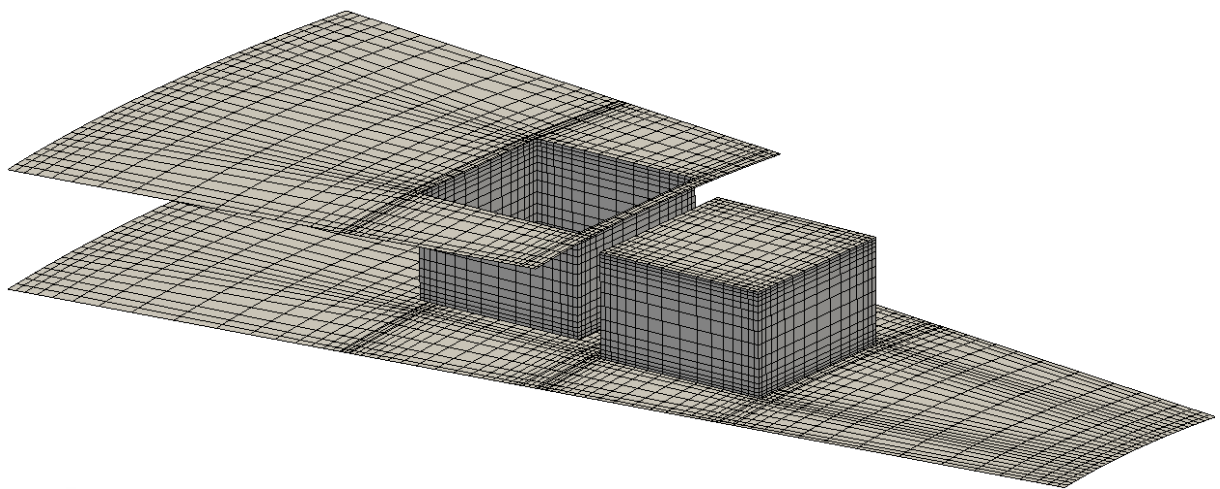
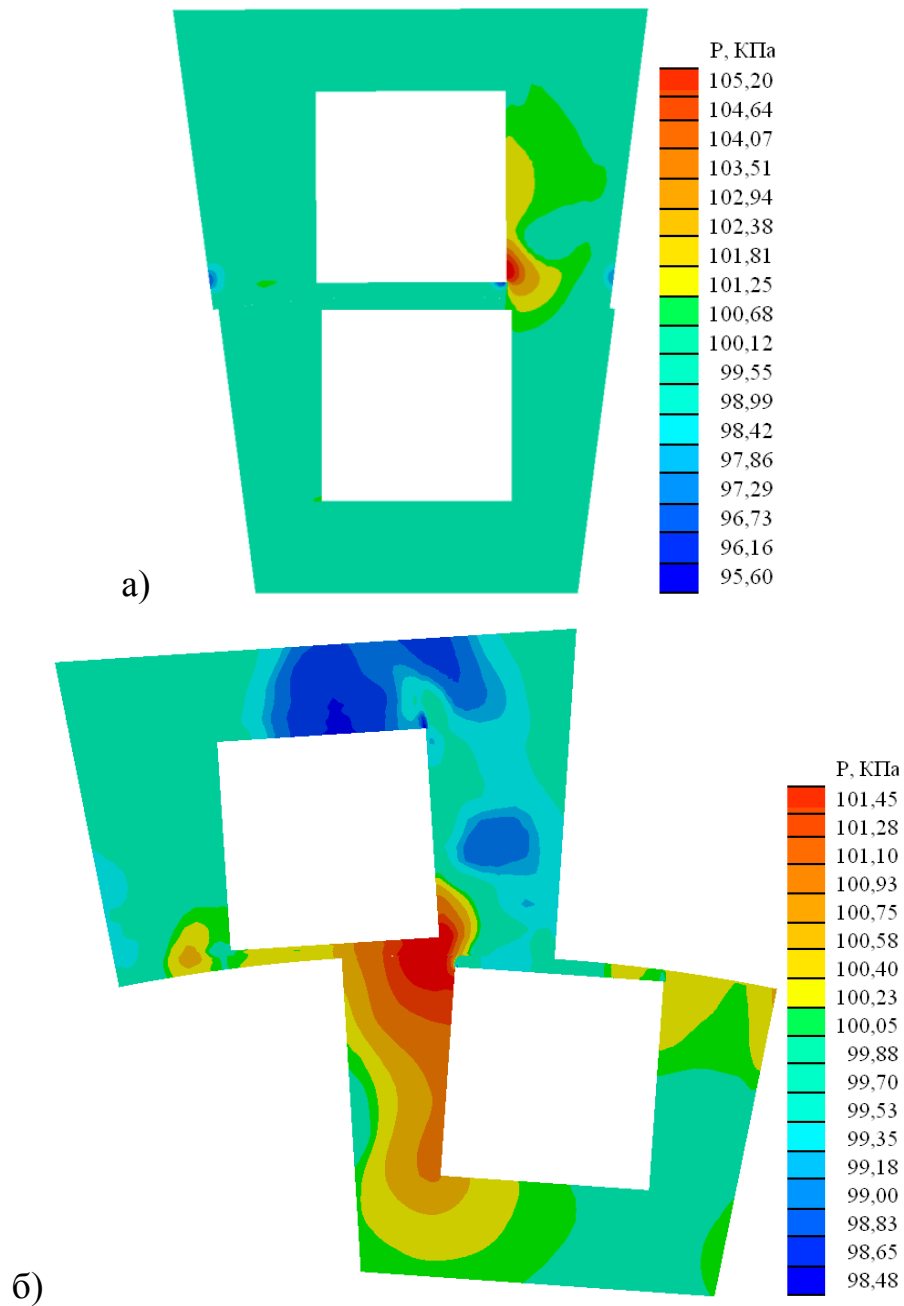


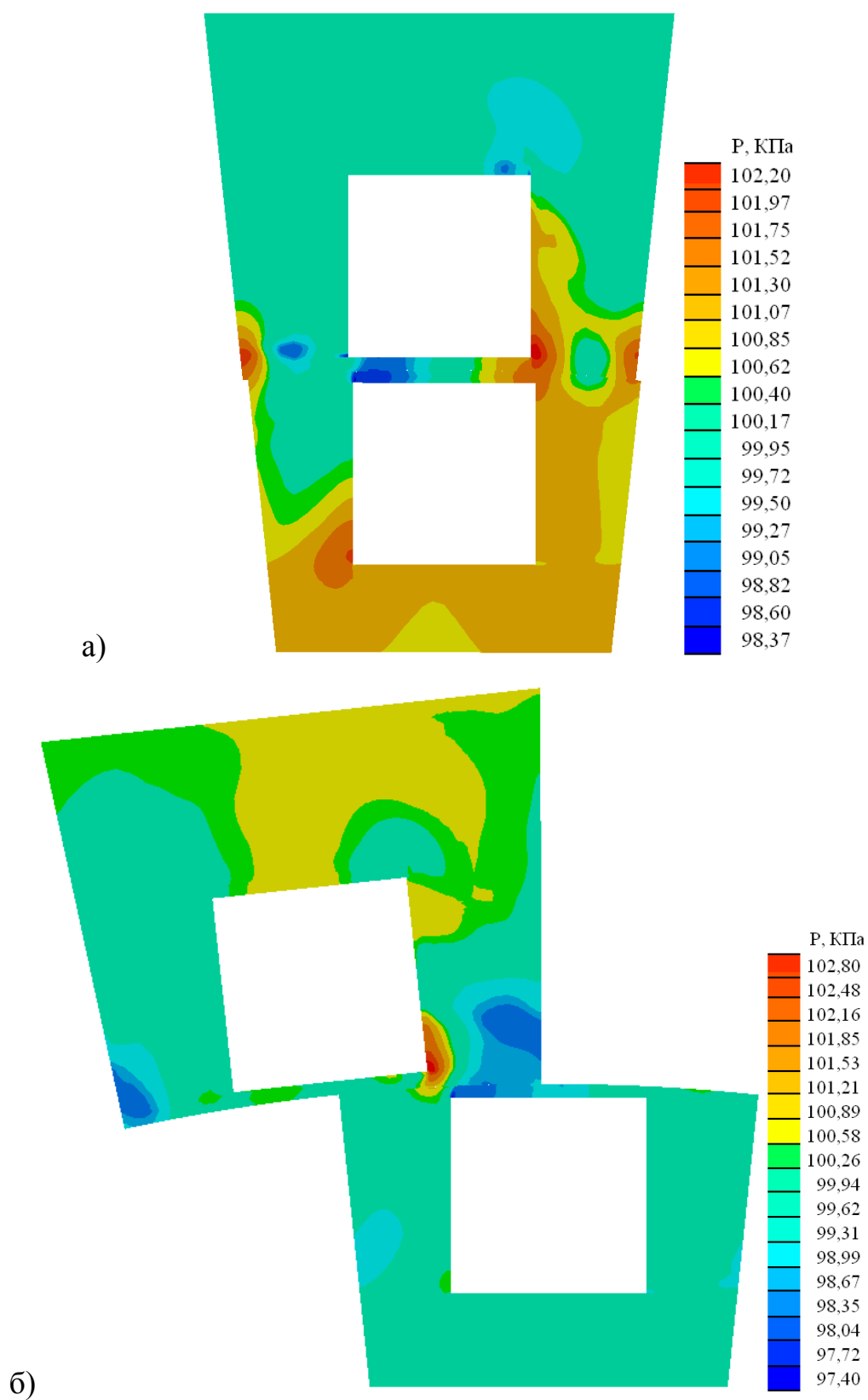
Рисунок 2.13— Розрахункова область при дослідженні одного ступеня й схематичний вигляд різницевої сітки

На рис. 2.14 -2.16 наведено ізолінії статичного тиску, а на рис. 2.17-2.19 – ізолінії абсолютної швидкості, що відповідають двом положенням взаємного розташування вінців ротаційного та контр-ротаційного коліс.



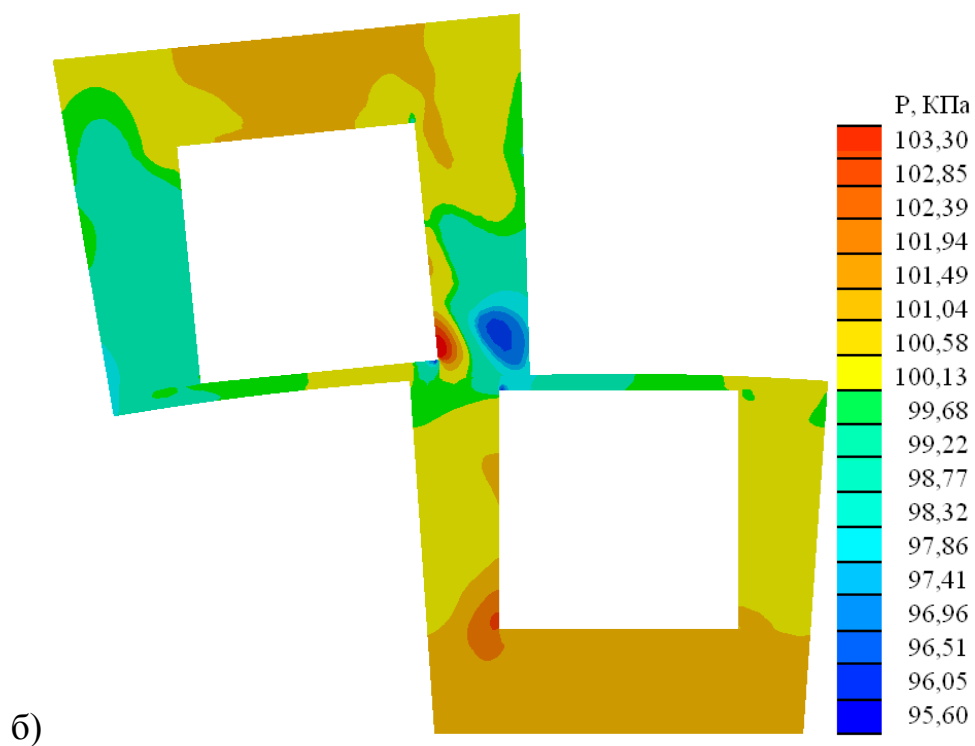
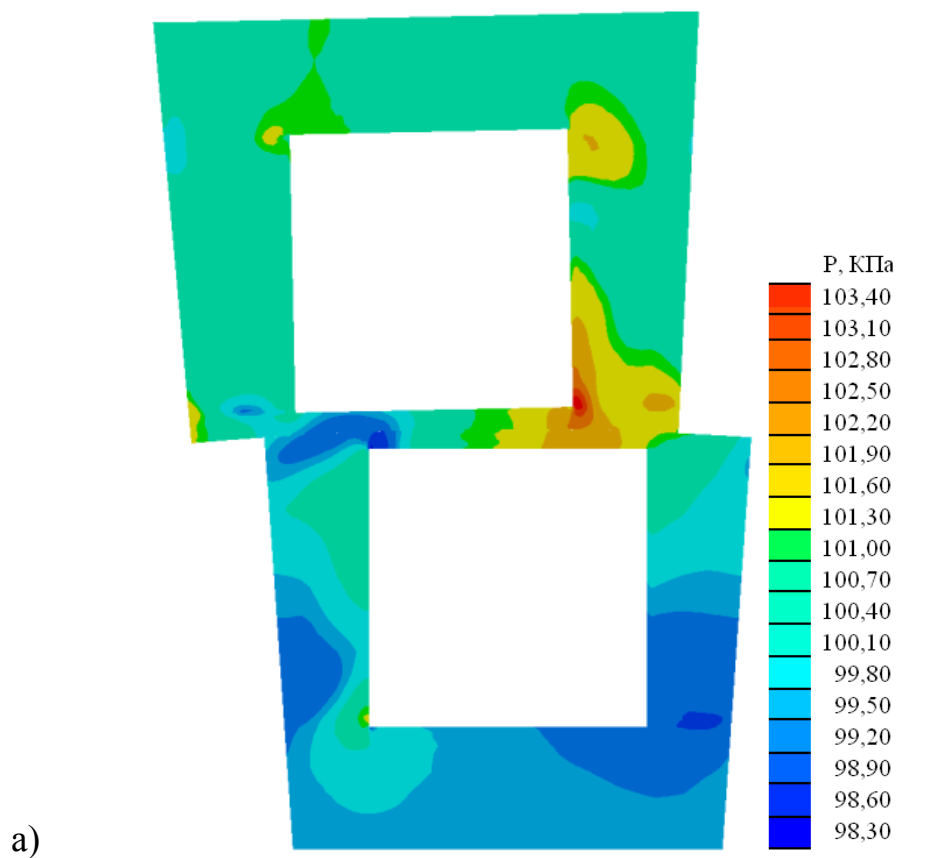
а – положення співпадання робочих органів; б– положення закриття каналу робочого колеса

Рисунок 2.14 – Ізолінії статичного тиску в першому ступені



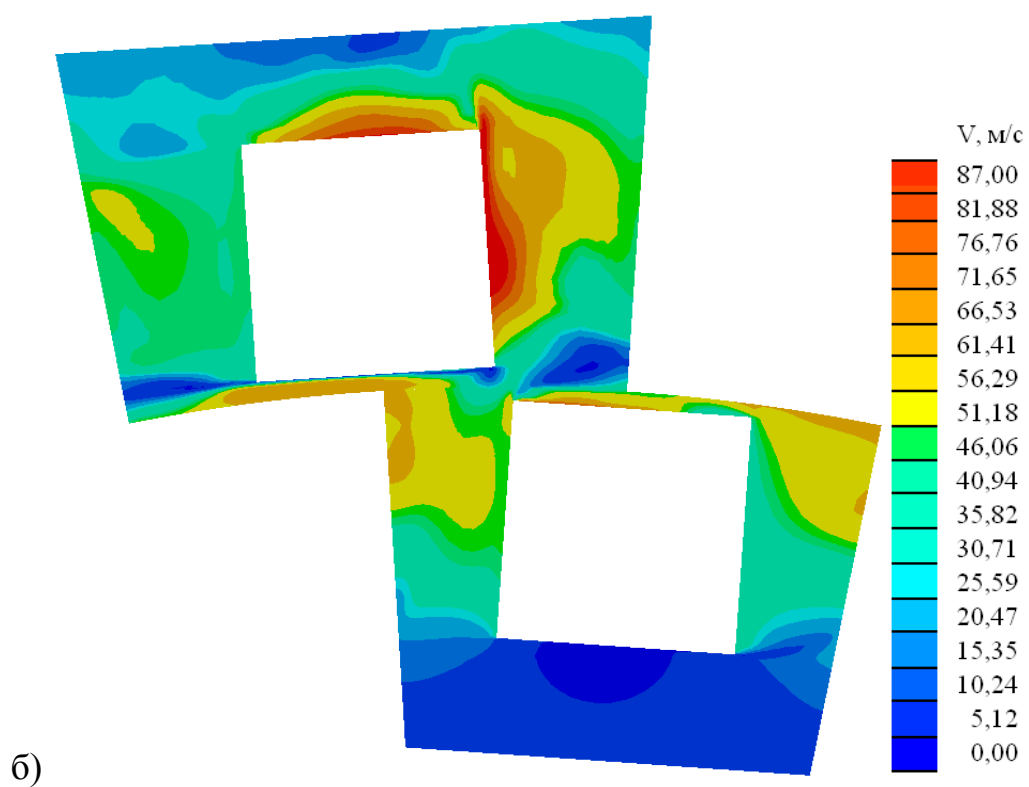
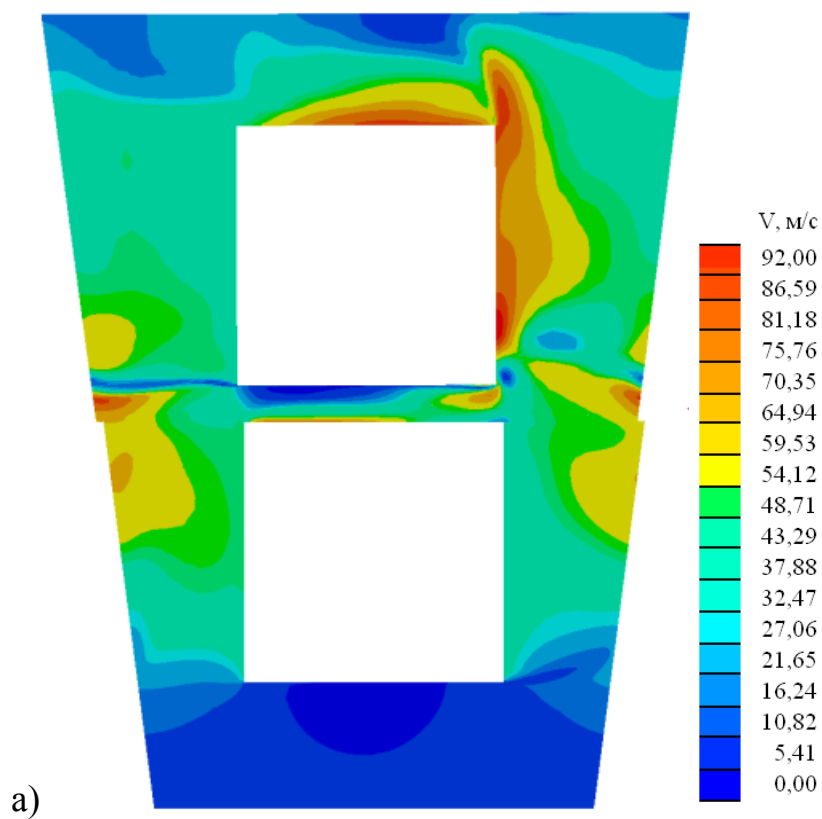
а – положення співпадання робочих органів; б– положення закриття каналу робочого колеса

Рисунок 2.15 – Ізолінії статичного тиску в другому ступені



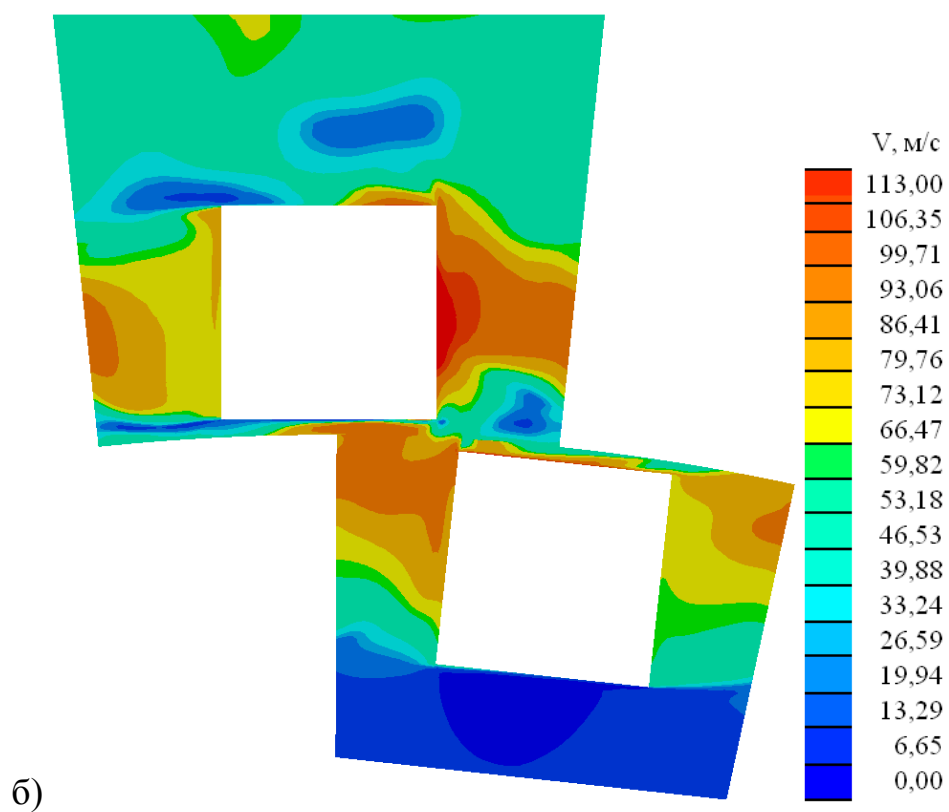
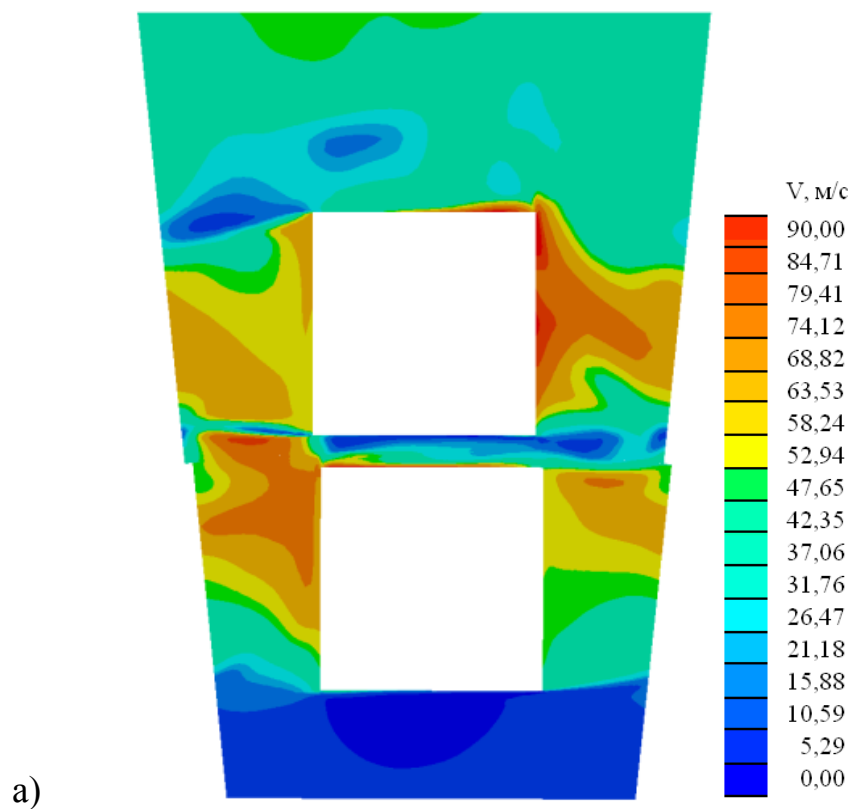
а – положення співпадання робочих органів; б– положення закриття каналу робочого колеса

Рисунок 2.16 – Ізолінії статичного тиску в третьому ступені



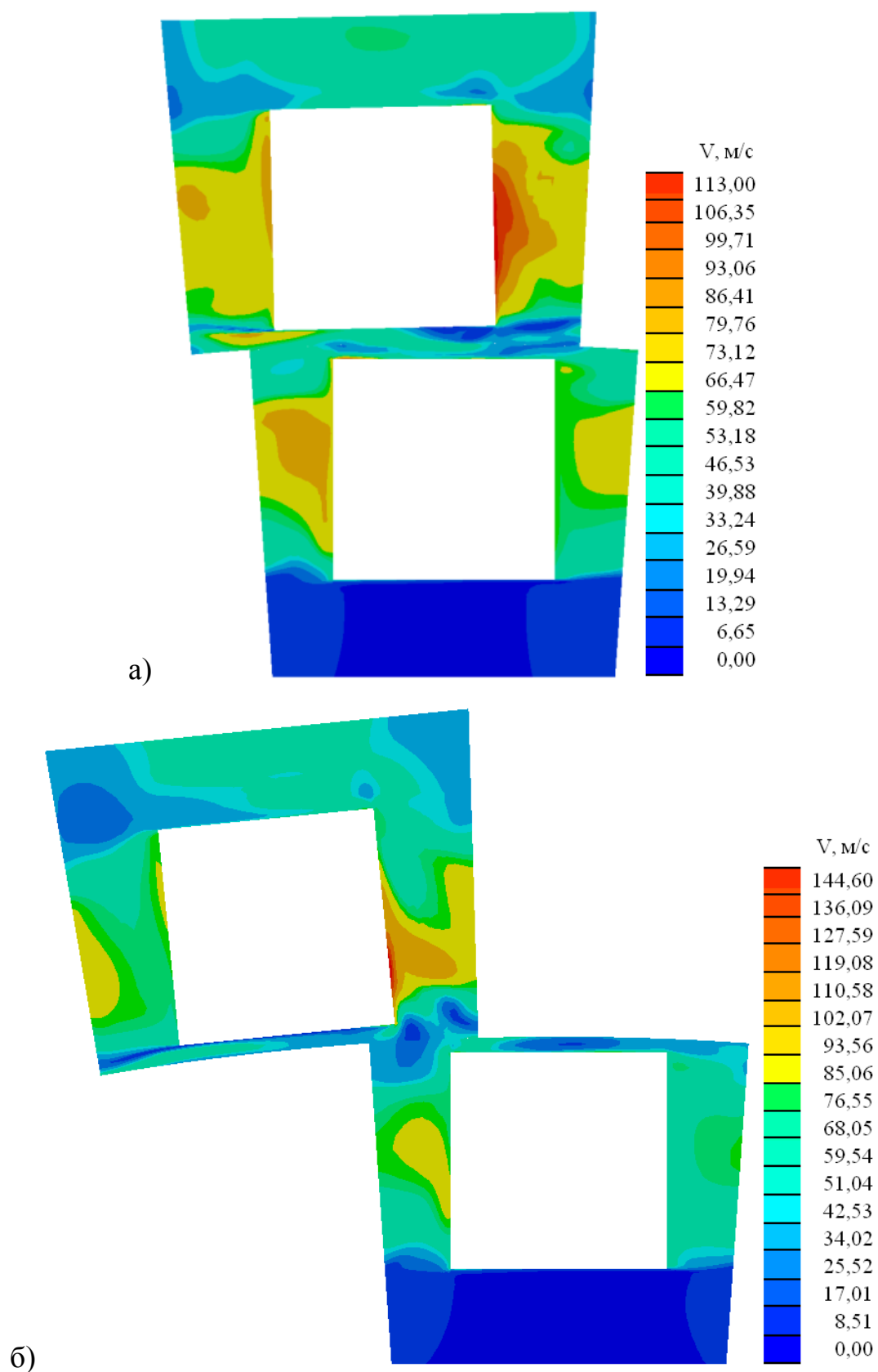
а – положення співпадання робочих органів; б – положення закриття каналу робочого колеса

Рисунок 2.17 – Ізолінії абсолютної швидкості в першому ступені



а – положення співпадання робочих органів; б – положення закриття каналу робочого колеса

Рисунок 2.18 – Ізолінії абсолютної швидкості в другому ступені



а – положення співпадання робочих органів; б – положення закриття каналу робочого колеса

Рисунок 2.19 – Ізолінії абсолютної швидкості в третьому ступені

Згідно з результатами, що наведені на рис. 2.14-2.19, розподіл тиску й швидкості є нерівномірним, а також таким, що характерний вихровому характеру потоку. Найбільше збільшення статичного тиску незалежно від ступеня й моменту взаємного розташування коліс спостерігається біля передньої кромки контр-ротаційного робочого колеса, що обумовлено додатковою протидією окружної складової потоку, яку він отримує після першого колеса. Для всіх режимів з ізольованою абсолютної швидкості впливає наявність розвиненого кромкового сліду за вихідною кромкою контр-ротаційного робочого колеса.

Слід простягається більш ніж на середину каналу, перешкоджаючи формуванню основної течії. Наближення до положення закриття каналу робочого колеса сприяє збільшенню розмірів течії. Найбільш значне прискорення потоку спостерігається на робочій частині контр-ротаційного колеса.

Згідно з наведеними результатами еволюції розподілу статичного тиску в радіальному зазорі першого, другого та третього ступеня, що відповідає чотирьом моментам часу на періоді пульсацій газодинамічних характеристик, визначено, що найбільш суттєві пульсації спостерігаються в околах точок передньої та задньої кромки робочого органу контр-ротаційного колеса. Для досліджуваного режиму амплітуда пульсацій досягає значення 3-3.5 КПа.

2.2.2 Вдосконалення конструкції робочих органів гідрокавітаційного пристрою

З метою підвищення інтенсивності кавітаційного впливу на оброблюване середовище при виготовленні композиційного палива конструкцію камери обробки ГКП, описаного в пункті 2.2.1, запропоновано виконати конусоподібної форми з нахилом поверхонь дисків робочих органів. Це дає змогу значно підвищити у конусному зазорі гідродинамічний натиск і окружну швидкість оброблюваного потоку, а також збільшити в'язкісне тертя, ударно-здвигові та зтираючі навантаження від ударних елементів збільшених розмірів, що може

значно підвищити виникнення пульсацій тиску та локальних зон тисків нижче насичення парів, що є передумовою для виникнення кавітаційних процесів.

З метою визначення ефективності запропонованої конструкції робочих органів ГКП проведено CFD 3-вимірне моделювання процесів виготовлення композиційного палива з використанням програмного комплексу OpenFOAM 4.1. Алгоритм проведеного чисельного моделювання представлена на рис. 2.20.

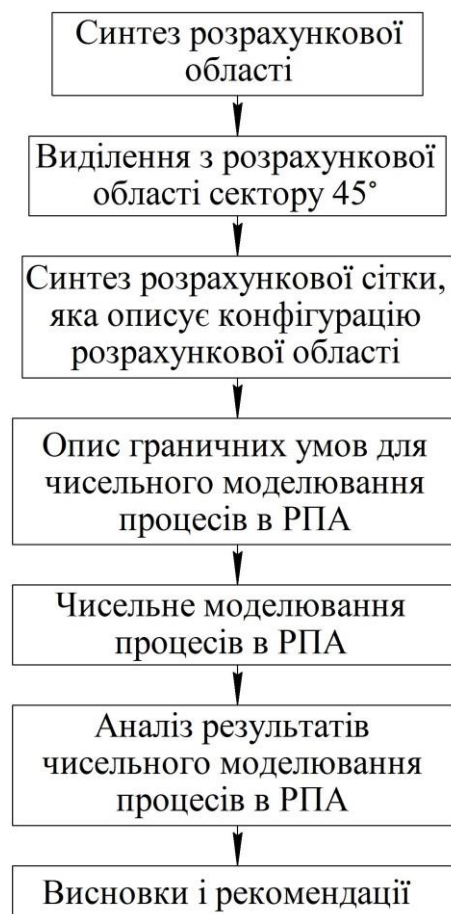


Рисунок 2.20 – Алгоритм чисельного моделювання процесів в РПА

Чисельне моделювання процесів гідрокавітаційної обробки рідини в ГКП розглядається в тривимірній нестационарній постановці в циліндричних координатах. Для зменшення розмірності вирішуваної задачі розглянуто розрахункову область ГКП у вигляді сектору з кутом 45° . Загальний вигляд розрахункової області і схема опису граничних умов показані на рис. 2.21.

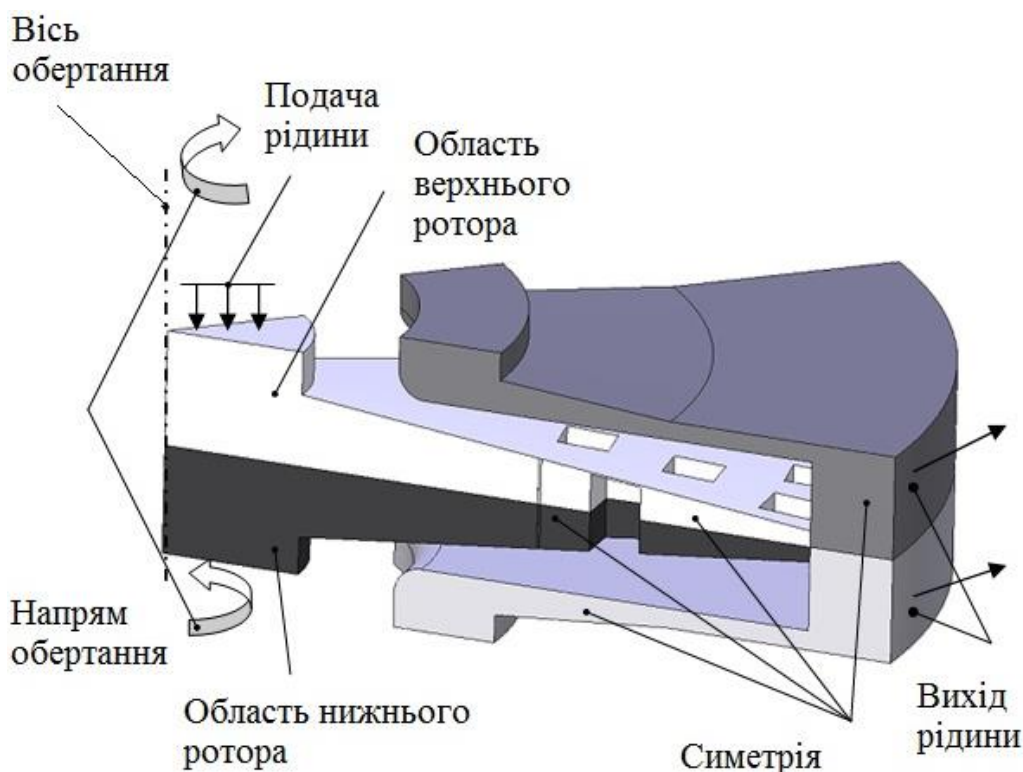


Рисунок 2.21 – Схема опису граничних умов розрахункової області гідрокавітаційного пристрою

Для представленої розрахункової області (рис. 2.21) згенерована розрахункова сітка, яка описує складну зовнішню і внутрішню геометрію проточної частини ГКП. На ділянках, які обмежують сектор 45° , задано тип граничних умов – симетрія, напрям обертання і кутова швидкість, а розміщення осі обертання роторів описано координатами. Для урахування турбулентних течій рідини на загальну гідродинамічну картину течії в камері обробки ГКП використана RANS-модель (стандартна к-ε модель турбулентності), яка дозволяє враховувати процеси фазового переходу оброблюваного середовища. Також при моделюванні врахована шорсткість стінок, обмежуючих проточну частину ГКП. В якості оброблюваного середовища прийнято мазут М 40.

Розподілення розрахункової швидкості течії оброблюваної рідини в горизонтальному перерізі показані на рис. 2.22.

За результатами моделювання (рис. 2.22) миттєві значення швидкості потоку досягають 100 м/с поблизу стінок ударних елементів зустрічно обертових роторів

(рис. 2.22 а). Також розрахункова швидкість потоку локально досягає значень 100 м/с на периферійній частині розрахункової області (рис. 2.22 б).

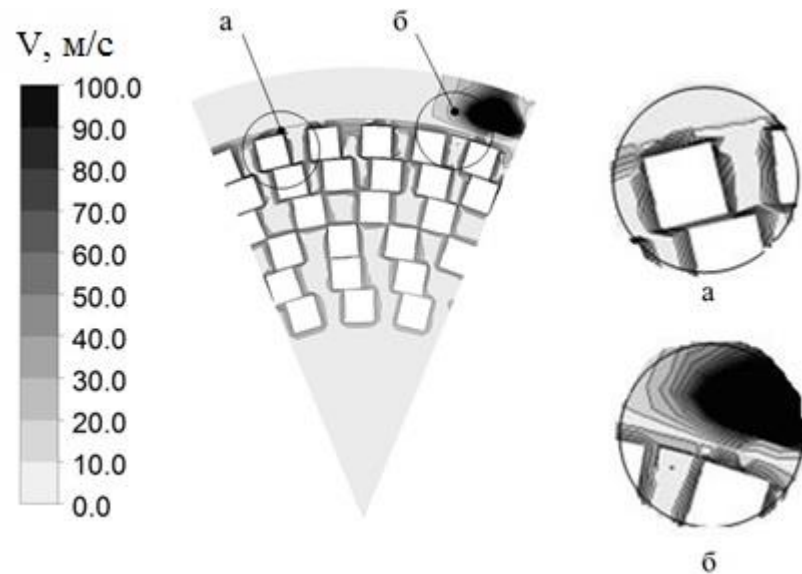


Рисунок 2.22 – Розподілення розрахункової швидкості течії оброблюваної рідини в горизонтальному перерізі камери обробки ГКП

Розподілення розрахункової швидкості потоку оброблюваної рідини в вертикальному перерізі проточної частини камери обробки ГКП показано на рис. 2.23.



Рисунок 2.23 – Розподілення розрахункової швидкості течії оброблюваної рідини в вертикальному перерізі камери обробки ГКП

Згідно з результатами моделювання (рис. 2.23) найбільші градієнти швидкості оброблюваного потоку в проточній частині ГКП знаходяться в області зустрічно рухомих ударних елементів. Максимальні значення миттєвої швидкості потоку (до 100 м/с) знаходяться в зазорі між ударними елементами на периферії зустрічно обертових роторів. Вздовж камери обробки швидкість потоку змінюється від 10 до 25 м/с.

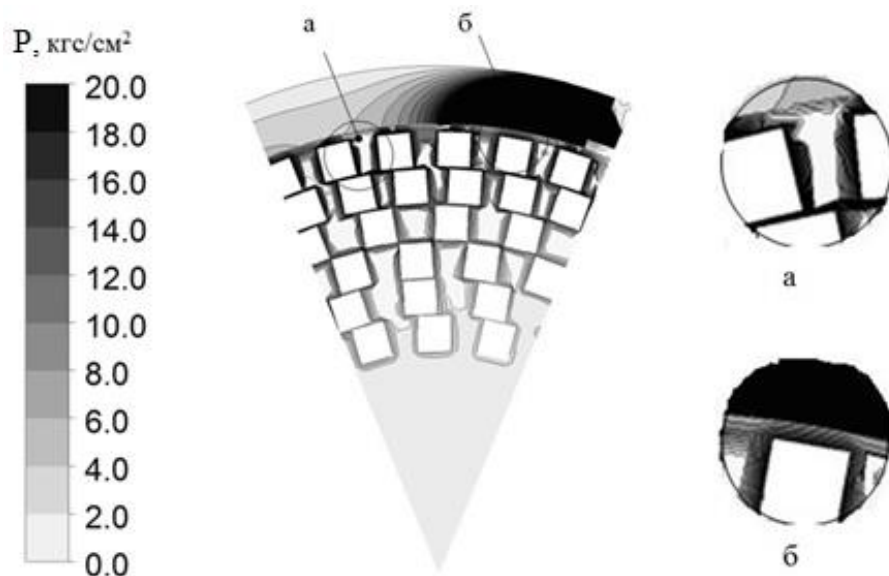


Рисунок 2.24 – Розподілення тиску потоку оброблюваної рідини в горизонтальному перерізі проточної частини ГКП

На рис. 2.24 представлені епюри розподілення тиску потоку оброблюваної рідини в горизонтальному перерізі проточної частини ГКП. Згідно з даними результатами моделювання, в процесі роботи ГКП тиск рідини в зазорі між ударними елементами зустрічно обертових роторів змінюється від 5 до 20 kgf/cm^2 , тобто виникають значні пульсації тиску з амплітудою 15 kgf/cm^2 . Даний показник пульсацій оброблюваного потоку рідини значно вище, ніж у прототипа (пункт 2.2.1), таким чином є передумови до підвищення інтенсивності кавітаційних процесів. Максимальні значення тиску потоку знаходяться в периферійній частині камери обробки, і за рахунок вдосконаленої конструкції ГКП з конічною формою зазору проточної частини кавітаційні ефекти підсилюються. При порівнянні

отриманих результатів моделювання з'ясовано, що максимальні пульсації тиску виникають в областях різкої зміни швидкості оброблюваного потоку.

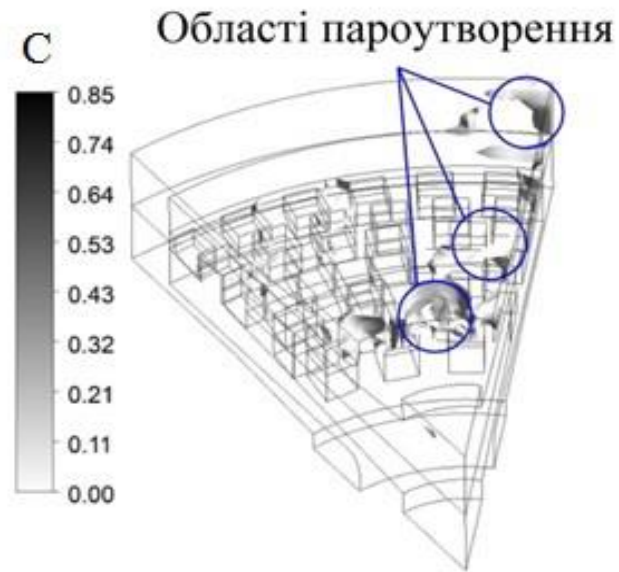


Рисунок 2.25 – Розподілення областей пароутворення в проточній частині ГКП

На рис. 2.25 показано розподілення областей пароутворення в проточній частині ГКП. Згідно з даними результатами моделювання, пароутворення відбувається в областях інтенсивних пульсацій тиску і високих швидкостей оброблюваного потоку рідини. Таким чином, можна зробити висновок, що в даних областях розвивається інтенсивна парова кавітація, виникнення якої є передумовою для отримання високоякісного композиційного палива з високим вмістом водної фази.

2.2.3 Фізичне моделювання процесів створення композиційного палива з використанням розробленого гідрокавітаційного пристрою

За результатами чисельного моделювання, показаного в пункті 2.2.2, було створено дослідний зразок двороторного гідрокавітаційного пристрою з робочими органами вдосконаленої конструкції, принципова схема якого показана на рис. 2.26.

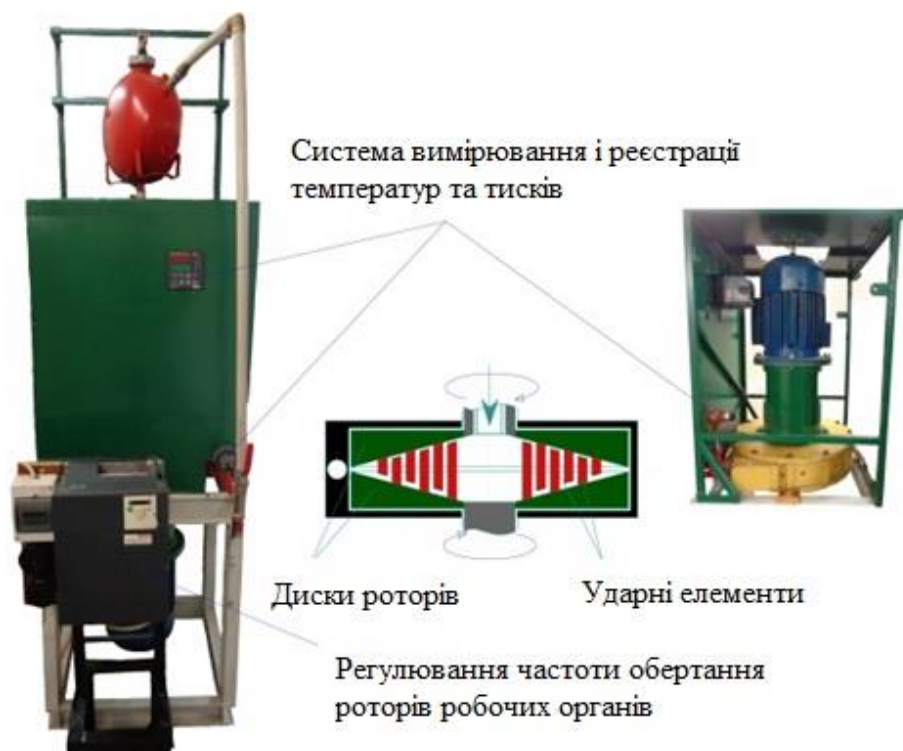


Рисунок 2.26 – Принципова схема двороторного гідрокавітаційного пристрою

Як показано на рис. 2.26, на звернених одна до одної поверхнях дисків роторів по концентричним окружностям встановлено ударні елементи, які в умовах зустрічного обертання роторів забезпечують інтенсивний ударно-зсувний вплив на рухомий під дією відцентрових сил в радіальному напрямленні потік рідини. Подача рідини здійснюється через порожнистий вал верхнього ротора, вихід обробленої рідини здійснюється через тангенційно закріплений патрубкок.

З метою можливості зміни режимів гідрокавітаційної обробки в широкому діапазоні ГКП обладнано системою регулювання частоти обертання роторів з використанням векторних перетворювачів частоти електричного току. Для визначення термобарометричних показників процесу створення композиційного палива даний пристрій обладнано системою вимірювання і реєстрації температури та тиску.

З метою порівняння ефективності роботи прототипу та модернізованого гідрокавітаційного пристрою проведено фізичне моделювання гідрокавітаційної активації композиційного палива на основі танкерних нафтозмівів. Порівняння

реологічних властивостей композиційного палива після гідрокавітаційної активації на прототипі та модернізованому гідрокавітаційному пристрої показані на рис. 2.27.

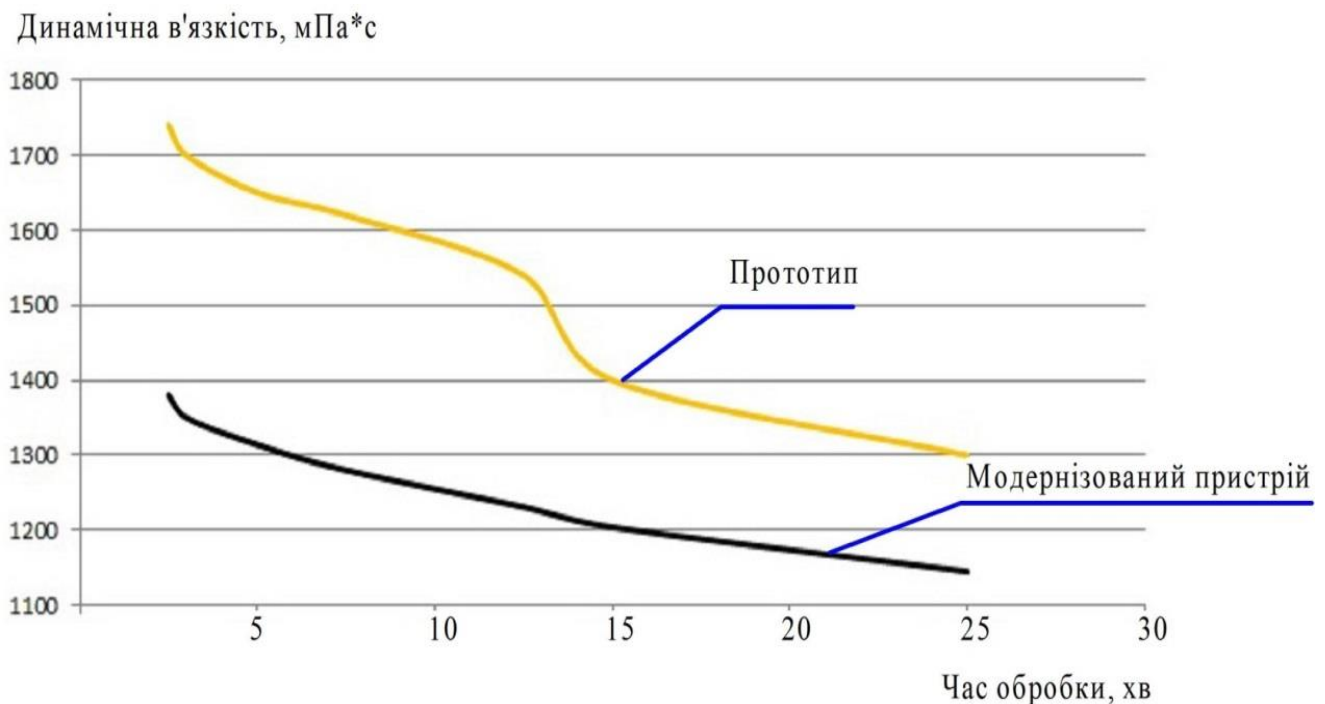


Рисунок 2.27 – Порівняння реологічних властивостей композиційного палива після гідрокавітаційної активації на прототипі та модернізованому ГКП

Згідно з результатами, показаними на рис. 2.27, в'язкість композиційного палива після обробки на модернізованому пристрої значно нижче, що свідчить про покращені споживчі властивості отримуваної паливної суміші у порівнянні з використанням прототипу.

Новий тип гідрокавітаційного пристрою для обробки рідин захищено авторським правом на винахід [58]. Застосування даного ГКП дозволяє отримувати паливні композиції з заданими теплофізичними та високими споживчими властивостями з вмістом водної фази до 50 % [59, 60]. Дослідний зразок ГКП (рис. 2.26) використано для подальших експериментальних досліджень при створенні та гідрокавітаційній обробці композиційних палив.

2.3 Розробка конструкції пальникового пристрою для спалювання композиційних палив з високим вмістом водної фази

2.3.1 Загальні відомості про горіння палива

Як зазначено в роботі [61], основу горіння складають самоприскорюємі реакції окиснення горючих речовин палива, в результаті яких вихідні речовини (пальне і окиснювач) перетворюються в продукти згоряння, тобто в нові речовини з іншими фізичними та хімічними властивостями. Характерною ознакою горіння є швидкоплинний процес, який супроводжується інтенсивним виділенням теплоти і різким підвищенням температури. Для протікання хімічної реакції між горючими речовинами палива і окиснювачем, насамперед, необхідно забезпечити фізичний контакт між молекулами взаємодіючих речовин і довести молекули до такого стану, при якому стають можливими хімічні реакції між ними. Фізичний контакт здійснюється в процесі утворення пальної суміші, хімічні реакції – при займанні.

Таким чином, горіння – це складний фізико-хімічний процес, який включає в себе ряд послідовно та паралельно протікаючих фізичних і хімічних стадій.

Відрізняють повне горіння, тобто без втрат теплоти, і неповне – з тепловими втратами. При повному горінні всі горючі речовини палива приймають участь в окиснювальних процесах, при цьому утворюються тільки оксиди – CO_2 , SO_2 , H_2O . Реальне горіння, як правило, є неповним з наявністю механічної і хімічної неповноти згоряння.

Механічна неповнота згоряння характеризується наявністю горючих часток пального, які не приймають участі в процесі горіння, наприклад при виносі дрібних фракцій вугілля потоком газів або осідання і видалення разом з золою крупних вугільних часток.

Хімічна неповнота згоряння присутня при наявності хімічно неповного окиснення вуглеводневих речовин з утворенням оксиду вуглецю CO , а також у випадку, коли частина горючих газоподібних речовин, які утворились при випаровуванні і термічному розкладанні рідкого або твердого палива (CO , H_2 , CH_4 та ін.), покидає топку до завершення окиснювальних процесів.

В роботі [62] наведено численні результати фундаментальних експериментальних досліджень по впливу початкової температури, тиску і концентрацій пального і окиснювача на швидкість горіння, а також залежності швидкості горіння від адіабатичної температури полум'я. Результати цих даних проаналізовано та узагальнено в роботі [63].

Найпростіша теоретична модель і наближена формула для розрахунку швидкості горіння вперше запропоновані Зельдовичем та Франк-Каменецьким [64]. Більш складні інтегральні моделі показані в роботах [65-67].

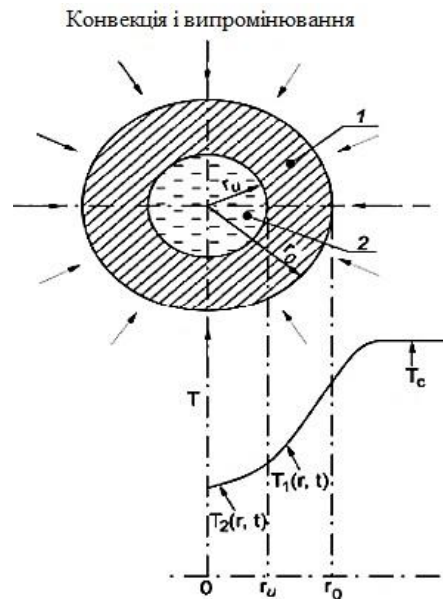
2.3.2 Процес горіння рідких видів композиційних палив

Композиційне паливо отримують шляхом змішування декількох видів палива або палива з іншими горючими та негорючими компонентами. До рідких видів композиційних палив відносяться паливні емульсії та суспензії. Оскільки до складу даних енергоресурсів можуть входити негорючі компоненти у різних масових співвідношеннях, процес горіння композиційної паливної суміші значно відрізняється від горіння вуглеводнів чи вугілля.

На даний час більшість особливостей загоряння, механізми горіння водовугільного палива [68-70] та органоводовугільного палива [71-74], основні закономірності тепломасопереносу та фазових перетворень, пояснені та вивчені з використанням теоретичних і експериментальних даних. Особливостями процесів запалювання та горіння паливних суспензій на відміну від спалювання вугілля в пилевидному (твердому) стані [69, 75] є необхідність прогріву та випаровування краплі, протікання низькотемпературної активації реакційної поверхні краплі палива, а також горіння палива за рахунок хімічної реакції мікрочасток вугілля з парами води і кисню для ВВП [76] та продуктами випарювання горючої рідини для ОВВП [28, 77].

В [78, 79] представлені результати чисельних досліджень основних закономірностей процесів тепломасопереносу при запалюванні частки ВВП з урахуванням спільного протікання термохімічних взаємодій парів води та

вуглецю коксу. Розроблена модель запалювання водовугільної частки в конвективному підведенні тепла показана на рис. 2.28.



1 – зона сухого вуглецевого залишку, 2 – зона вихідного вологого палива

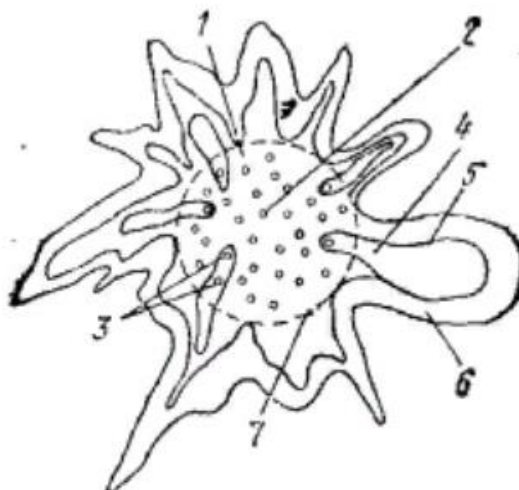
Рисунок 2.28 – Частка ВВП в потоці високотемпературного газового середовища

Встановлено, що теплові ефекти випаровування вологи з подальшою фільтрацією через пористу структуру і термічним розкладанням твердої частки палива в умовах радіаційно-конвективного теплообміну суттєво уповільнюють процеси запалювання ВВП. Отримані часові характеристики дозволили зробити висновок про два режими займання палива: низькотемпературний, під час якого залежність теплофізичних властивостей вугілля від температури має несуттєвий вплив на час затримки займання; високотемпературний, під час якого такий вплив суттєвий.

Спалювання водомазутних емульсій (ВМЕ) здійснюється факельним способом [76] шляхом розпилювання підігрітої пальної суміші в топочний простір енергоустановки. При однаковій витраті мазута (для забезпечення заданої теплопродуктивності) застосування водомазутної емульсії з вмістом деякої кількості води призводить до підвищення питомої кількості утворених при розпилюванні палива крапель в одиниці об'єму топочного простору і, як наслідок,

– до збільшення питомої поверхні реагування (тобто до підвищення сумарної швидкості вигорання палива).

Введення в об'єм крапель мазуту дрібних крапель води (1-30 мкм), внаслідок більшої різниці температур випаровування води і вуглеводню, призводить при нагріванні краплі палива до перегріву води, підвищенні тиску всередині паливної краплі, прориванні пари крізь шар вуглеводню, захоплення частки поверхневої плівки і викривленню в зв'язку з цим зовнішньої поверхні краплі емульсії. Цей процес називається явищем мікровибуху. Викривлення поверхні краплі настільки сильне, що значно збільшує питому поверхню реагування палива і, як наслідок, збільшує сумарну швидкість його вигорання. Схема мікровибуху краплі водомазутної емульсії при спалюванні показана на рис. 2.29.



1- крапля емульсії; 2-включення води в краплі емульсії; 3-перегріті краплі води; 4- мікровибух; 5- зміна поверхні краплі; 6- горіння парів мазуту навколо краплі; 7- початкова поверхня краплі емульсії

Рисунок 2.29 – Схема мікровибуху при випаровуванні краплі водомазутної емульсії

Наявність в краплі палива води, на нагрів та перегрів якої витрачається певна кількість теплоти, сприяє виникненню поля температур всередині краплі палива від центру до її периферії, що гальмує прогрівання внутрішніх областей краплі і сприяє стримуванню процесів піролізу та коксування мазуту (тобто зменшенню

утворення твердих вуглецевих сполук – сажі та коксу, які супроводжують ці процеси).

Вода, яка випаровується з краплі палива, дифундує спочатку в парову зону продуктів розкладання мазуту, яка розташована навколо поверхні краплі, і далі через зону горіння – навколишнє середовище краплі. У зв'язку з цим підвищена концентрація водяних парів в зоні горіння сприяє більш повному згорянню оксиду вуглецю та вуглеводневих газів, знижує температуру на поверхні зони горіння і факелу в цілому, що призводить до зменшення утворення шкідливих викидів. Таким чином, введення води в мазут з утворенням водомазутної емульсії підвищує швидкість горіння цього палива, зменшує утворення сажі, оксидів азоту і їх викиди з продуктами згорання, покращує умови експлуатації енергетичного обладнання.

2.3.3 Чисельне моделювання процесів горіння композиційного палива в пальниковому пристрої

Оскільки велика кількість вологовміщуючих компонентів у складі композиційного палива ускладнює не тільки процес його створення, а й значно впливає на процес спалювання, при розробці та проектуванні конструкції пальникового пристрою необхідно враховувати особливості згорання такого виду енергоресурсу. При малих значеннях теплової напруженості топочного простору при потраплянні крапель водомазутної емульсії з високим вмістом вологи можливе зниження температури факелу та підвищення втрати теплоти від хімічної і механічної неповноти згорання палива. Тому при розробці пальникового пристрою з метою забезпечення якісного спалювання композиційних палив з високим вмістом водної фази необхідне забезпечення заданого рівня теплонапруженості камери згорання.

З урахуванням даних факторів проведено CFD 3-вимірне моделювання процесів горіння композиційного палива з використанням програмного комплексу для чисельного моделювання OpenFOAM 4.1.

З урахуванням всіх конструктивних особливостей та робочих параметрів гідровихрової форсунки (пункт 2.1.2) виконано синтез розрахункової області пального пристрою, яка містить проточну частину пальника, вузол встановлення паливної форсунки, жарову трубу і ділянки підведення вторинного повітря. Далі з використанням сіткових генераторів була згенерована розрахункова сітка, що описує конфігурацію проточної частини пальника (рис. 2.30). Розрахункова сітка проточної частини складається з 799361 вузла та 4152270 розрахункових комірок.

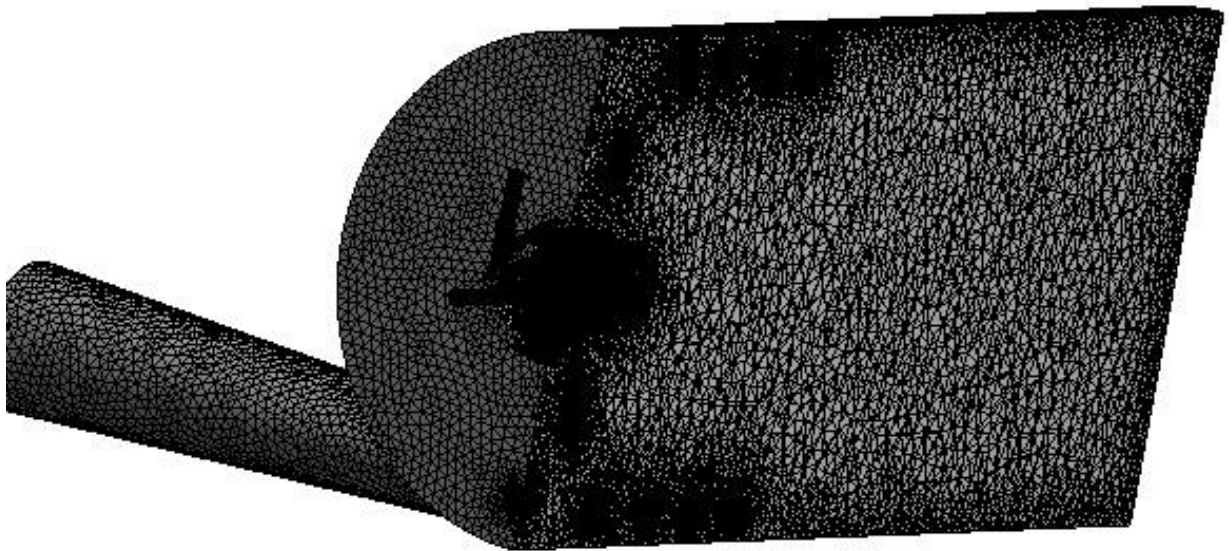


Рисунок 2.30 – Розрахункова сітка проточної частини пального пристрою

Для визначення ефективної конструкції пального пристрою при проведенні моделювання вносились конструктивні корективи: геометричні розміри і кут розкриття жарової труби, кількість і розміри отворів для подачі вторинного повітря в зону факелу, геометричні розміри камери згоряння, місце розташування форсунки та ін. Результати чисельного моделювання показані на рис. 2.31-2.33.

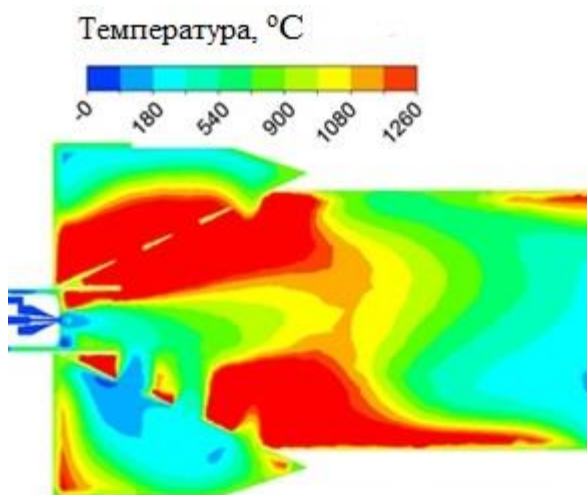


Рисунок 2.31 – Розподілення температур при горінні композиційного палива

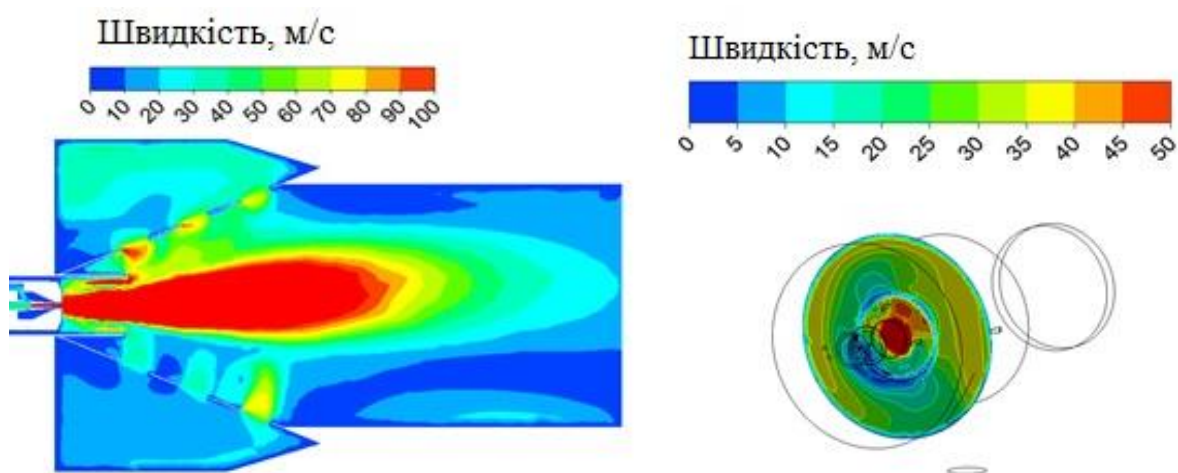


Рисунок 2.32 – Розподілення швидкостей при горінні композиційного палива

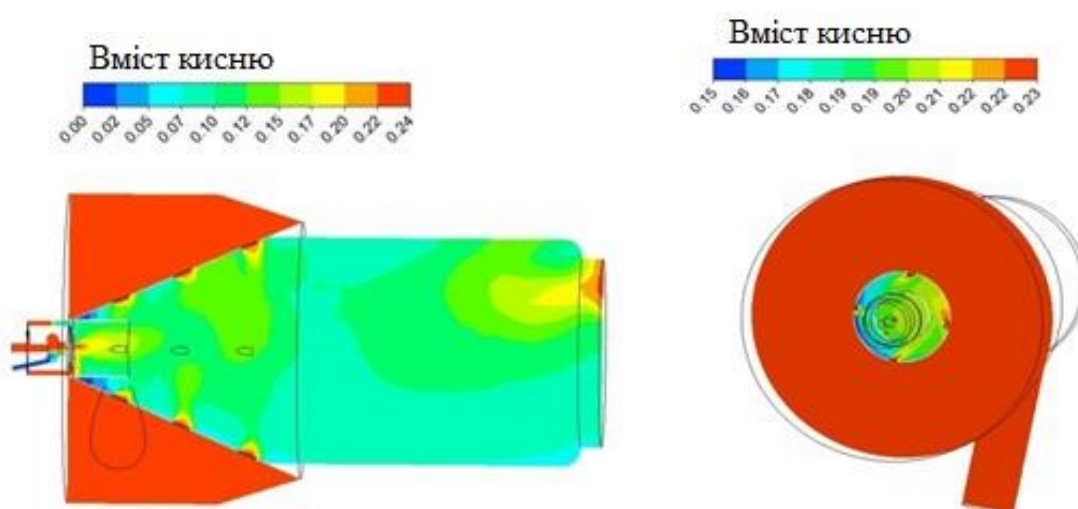


Рисунок 2.33 – Розподілення масової долі кисню при горінні композиційного палива

Згідно з результатами, показаними на рис. 2.31-2.33, в пальниковому пристрої теплонапруженість становить від 600 до 1200 °С, що є достатнім для спалювання композиційних палив з високим вмістом вологи. Також за даними результатами можна зробити висновок, що в пальниковому пристрої даного типу відбувається якісне змішування паливних крапель з окиснювачем і повне згоряння композиційного палива.

2.3.4 Фізичне моделювання процесів горіння композиційного палива в пальниковому пристрої

При проведенні чисельного моделювання (пункт 2.3.3) процесів спалювання композиційного палива конструктивне виконання пальникового пристрою коригувалось з метою визначення ефективної конструкції даного агрегату. За результатами чисельного моделювання розроблено конструкцію пальникового пристрою для спалювання композиційного палива з високим вмістом водної фази, принципова схема якого показана на рис. 2.34.

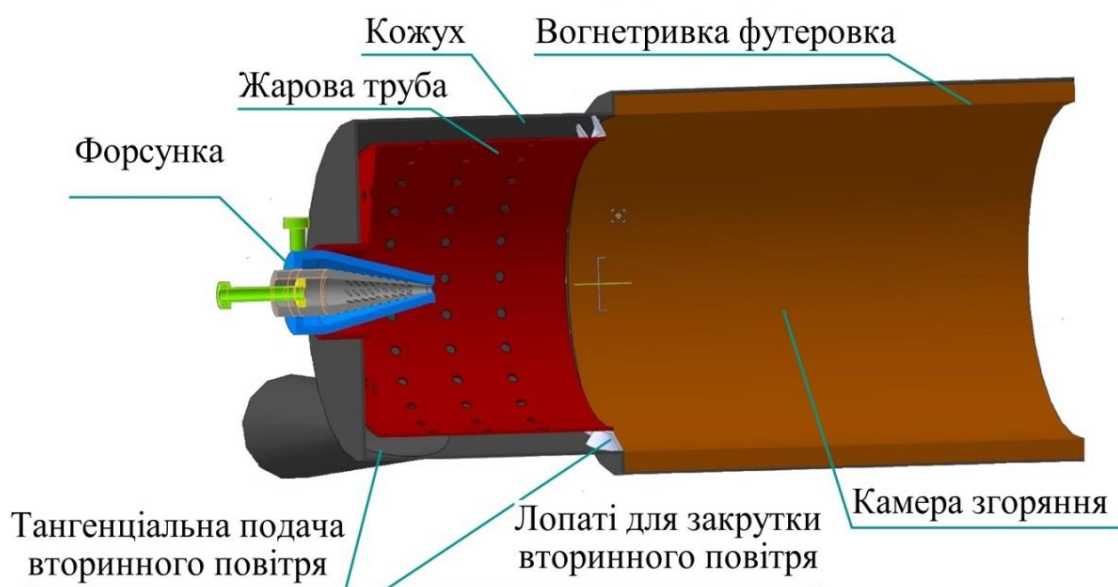


Рисунок 2.34 – Принципова схема пальникового пристрою для спалювання композиційного палива з високим вмістом водної фази

Для якісного сумішоутворення паливоповітряної суміші, стабілізації процесів горіння і забезпечення необхідного ступеню вигорання спалюваного палива в пальниковому пристрої (рис. 2.34) встановлено жарову трубу, в якій відбувається змішування розпилюваного палива і первинної суміші з вторинним повітрям. Отвори для підводу вторинного повітря до факелу в жаровій трубі виконані з відбортками для підвищення глибини проникнення окиснювача в потік розпилюваного палива. Подача вторинного повітря відбувається тангенційно для закрутки потоку первинної суміші і в результаті відцентрового ефекту більш якісного перемішування паливних крапель з окиснювачем, а також для збільшення часу перебування паливних крапель в зоні високих температур. Перед камерою згоряння встановлені лопаті для додаткової закрутки газової суміші на виході з жарової труби.

Для забезпечення необхідного рівня теплонапруженості топочного простору стінки камери згоряння футеровані керамічним вогнетривким матеріалом, що дозволило знизити теплові втрати і забезпечити необхідний температурний рівень при спалюванні композиційних палив з високим вмістом водної фази.

З метою визначення ефективності розробленого пальникового пристрою проведено фізичне моделювання процесів спалювання композиційного палива з високим вмістом водної фази (рис. 2.35).



Рисунок 2.35 – Фізичне моделювання процесів спалювання композиційного палива з високим вмістом водної фази

При проведенні фізичного моделювання процесів спалювання в якості енергоресурсу використане композиційне паливо на основі танкерних нафтозмивів з різним вмістом водної фази. Основними показниками ефективності роботи пальникового пристрою були температура факелу та коефіцієнт надлишку повітря, оскільки за даними параметрами можна визначити можливість використання методу вогневої утилізації для промислових відходів з визначеним хімічним складом. Зміна температури факелу та коефіцієнту надлишку повітря в залежності від компонентного співвідношення композиційного палива показана в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Показники процесу спалювання композиційного палива

Вид палива	Температура факелу, °С	Коефіцієнт надлишку повітря
КП (20 % водної фази)	1213	1,24
КП (30 % водної фази)	1184	1,31
КП (40 % водної фази)	1104	1,39
КП (50 % водної фази)	1032	1,42
КП (60 % водної фази)	867	1,51

Згідно з даними, показаними в табл. 2.1, застосування пальникового пристрою запропонованої конструкції є ефективним при спалюванні композиційних палив з додаванням промислових відходів з вмістом водної фази до 50 %, оскільки при вогневій утилізації екологічно небезпечних стоків при температурі горіння нижче 1000 °С деструкція деяких речовин (наприклад, органічні аміни) може не відбуватись. Також слід зазначити, що при вмісті водної фази у складі композиційного палива 70 % і вище відбувається поступове зниження теплонапруженості камери згоряння, в результаті чого температура факелу знижується і полум'я згасає.

Згідно з результатами фізичного моделювання та з урахуванням всіх конструктивних особливостей, на базі гідровихрової форсунки (пункт 2.1.3)

створено дослідний зразок пальникового пристрою для спалювання композиційних палив з високим вмістом водної фази, який показано на рис. 2.36.



Рисунок 2.36 – Дослідний зразок пальникового пристрою для спалювання композиційних палив, встановлений на паровому котлі

Дослідний зразок пальникового пристрою (рис. 2.36) використано в подальших експериментальних дослідженнях процесів спалювання композиційного палива. Застосування даного пальникового пристрою дозволяє здійснювати високоякісне спалювання композиційного палива з високим вмістом водної фази до 60 % [80-82].

2.4 Висновки за розділом 2

Проведено математичне моделювання течій в'язкої рідини в плоских та осесиметричних каналах з використанням структурного методу R-функцій. За результатами моделювання вдосконалено конструкцію проточної частини та створено дослідний зразок гідрокавітаційної форсунки для розпилювання при спалюванні композиційних паливних емульсій з застосуванням гідрокавітаційної активації [42, 59, 60].

З застосуванням методів чисельного моделювання в'язкої нестисливої рідини розроблено принципово нову конструкцію та створено дослідний зразок

гідровихрової форсунки з підвищеним експлуатаційним ресурсом. Застосування даної форсунки дає змогу здійснювати розпилювання при спалюванні високов'язкого композиційного палива з вмістом твердої фази до 72 %.

Проведено чисельне й фізичне моделювання процесів створення композиційних палив з використанням гідрокавітаційної активації, за результатами якого розроблено конструкцію та створено дослідний зразок гідрокавітаційного пристрою [58], який відрізняється від аналогів значно більшою інтенсивністю гідрокавітаційної обробки. Застосування даного пристрою дає змогу створювати композиційні палива з вмістом водної фази до 50 % з заданими теплофізичними характеристиками, покращеними реологічними та споживчими властивостями.

Проведено чисельне й фізичне моделювання процесів спалювання композиційних палив, за результатами якого розроблено конструкцію та створено дослідний зразок пальникового пристрою на базі гідровихрової форсунки, застосування якого дозволяє здійснювати високоякісне спалювання композиційного палива з високим вмістом водної фази до 60 % [80-82].

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ ГІДРОКАВІТАЦІЙНОЇ АКТИВАЦІЇ НА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПАЛИВ

3.1 Методологія визначення впливу гідрокавітаційної активації на теплофізичні, фізико-хімічні характеристики створюваних композиційних палив та енергоекологічні показники їх спалювання

Як зазначено в підрозділі 1.3, основними критеріями оцінки якості композиційного палива є рівень питомої теплоти згоряння, в'язкість, стабільність, зольність, екологічні показники процесу спалювання та ККД енергоустановки. Згідно з роботою [83], необхідність розробки методології проведення експериментальних досліджень виникає, коли вплив на кінцевий результат має чисельна кількість факторів, оскільки перевірити дослідним шляхом всі можливі сполучення таких чинників практично неможливо через величезну кількість даних поєднань. З метою визначення ефективності застосування ГКА при створенні та спалюванні композиційних палив, виникає необхідність розробки методології визначення впливу різних факторів (фізико-хімічні властивості та масове співвідношення вихідних паливних компонентів, розміри та форми твердих часток та водних крапель, режими гідрокавітаційного впливу, конструкційні особливості пристроїв для розпилювання при спалюванні та ін.) на фізико-хімічні, реологічні, теплофізичні характеристики створюваних паливних сумішей та енергоекологічні показники їх спалювання. Використання такої методології дасть змогу визначати вплив окремих факторів на вищезазначені властивості створюваних паливних сумішей, що дозволить отримувати композиційні палива із заздалегідь заданими споживчими та енергоекологічними показниками.

Розроблено методологію визначення впливу гідрокавітаційної активації на теплофізичні, фізико-хімічні характеристики створюваних композиційних палив та енергоекологічні показники їх спалювання. Застосування даної методології

дозволяє виявляти вплив певних факторів на споживчі та енергоекологічні властивості досліджуваних паливних сумішей безпосередньо в ході експериментальних досліджень. Головною особливістю даної методології є можливість проведення комплексних досліджень впливу гідрокавітаційної активації з можливістю зміни в широкому діапазоні окремих певних параметрів, які можуть впливати на властивості паливних сумішей, безпосередньо в процесі створення та спалювання штучних рідких композиційних палив.

Головним показником будь-якого палива є питома теплота згоряння, оскільки вона визначає енергетичні показники роботи теплогенеруючої установки. Всі види палива порівнюють між собою в першу чергу за цим показником. Кількість отриманої теплової енергії при спалюванні одиниці маси (об'єму) певного енергоресурсу дає змогу порівнювати ефективність використання даного типу палива з іншими, а також визначати економічну доцільність застосування такого пального в процесі одержання тепла. Питома теплота згоряння палива може визначатись експериментальним або розрахунковим способами. Розрахувати питому теплоту згоряння можна за допомогою емпіричної формули Менделєєва. Але у випадку використання композиційного палива теоретичні методи дають дуже велику похибку, оскільки необхідно не тільки знати точний елементний склад палива, але й враховувати вплив деяких хімічних компонентів на процеси горіння та протікання фізико-хімічних реакцій при визначенні питомої теплоти згоряння багатофазних паливних сумішей.

При експериментальному визначенні питомої теплоти згоряння зазвичай визначена маса палива спалюється в калориметричній бомбі для вимірювання сумарної теплоти, яка виділяється при згорянні. Оскільки при створенні багатофазних композиційних палив з застосуванням гідрокавітаційної активації за рахунок інтенсифікації фізико-хімічних процесів, таких як гідроліз, гідрогенізація, гідрокрекінг, можливе утворення нових паливних компонентів, в результаті даного впливу може змінюватись рівень питомої теплоти згоряння отриманого енергоресурсу. Запропоновано формулу розрахунку збільшення

питомої теплоти згоряння композиційного палива, одержаного з використанням ГКА (3.1), у порівнянні з теплотою згоряння використовуваного у складі паливної суміші вуглеводню

$$K_{\text{пр}} = 100 - \frac{Q_{\text{м}}}{Q_{\text{кп}}} \cdot M_{\text{м}}, \quad (3.1)$$

де $Q_{\text{м}}$ – теплотворна здатність вихідного вуглеводню, який входить до складу одержуваного композиційного палива, МДж/кг;

$Q_{\text{кп}}$ – теплотворна здатність композиційного палива, МДж/кг;

$M_{\text{м}}$ – відсотковий масовий вміст вихідного вуглеводню у складі композиційного палива, %.

Наприклад, у випадку композиційного палива з вмістом 70 % вуглеводню та 30 % водної фази, якщо $Q_{\text{м}} = 42$ МДж/кг, а $Q_{\text{кп}} = 36$ МДж/кг, то $K_{\text{пр}} = 100 - \frac{42}{36} \cdot 70 = 18,33$ %.

Використання даної формули дозволяє визначити відсоткове збільшення питомої теплоти згоряння композиційного палива при його створенні з використанням ГКА, у порівнянні з теоретичним значенням теплоти згоряння, яка може бути розрахована шляхом підсумовування теплотворної здатності всіх горючих компонентів згідно з їх масовим вмістом у складі паливної суміші. Також результати розрахунку даного коефіцієнту дають змогу визначення попередньої оцінки можливості збільшення отримуваної теплової енергії при використанні даного виду енергоресурсу.

В запропонованій методиці паралельно з калориметричними дослідженнями можливе визначення енергетичної ефективності використовуваного палива за рахунок вимірювання теплопродуктивності паливоспоживчого обладнання, зокрема, визначення показників генерованого пару або нагрітої води при спалюванні паливних ресурсів в паровому чи водогрійному котлах. Таке визначення може показувати не тільки кількість отримуваної теплової енергії при застосуванні даного виду палива, але й визначити ефективність процесу горіння у разі значної різниці між теоретичними і експериментальними енергетичними показниками.

Запропоновано формулу розрахунку енергетичної ефективності застосування композиційного палива (16) в якості енергоресурсу для парового котла

$$K_{ee} = 100 - \frac{b_T}{b_M} * M_M, \quad (3.2)$$

де b_T – питома витрата композиційного палива на 1 т пару, кг/т;

b_M – питома витрата вихідного вуглеводню на 1 т пару, кг/т;

M_M – відсотковий масовий вміст вихідного вуглеводню у складі композиційного палива, %.

Наприклад, у випадку композиційного палива з вмістом 70 % вуглеводню та 30 % водної фази, якщо $b_M = 80$ кг/т пару, а $b_T = 106$ кг/т пару, то $K_{ee} = 100 - \frac{106}{80} \cdot 70 = 7,25$ %.

Використання даної формули дозволяє визначити збільшення кількості отриманої теплової енергії при застосуванні в якості енергоресурсу композиційного палива у порівнянні з можливим отриманням тепла при спалюванні використаної у складі паливної суміші кількості вихідного вуглеводню.

Одним з головних показників якості рідкого палива є в'язкість – властивість рідини чинити опір переміщенню її часток від дії зовнішніх сил. Розрізняють динамічну і кінематичну в'язкість. Динамічна в'язкість – міра внутрішнього тертя, яка дорівнює відношенню тангенційного напруження до градієнту швидкості зсуву при ламінарній течії рідини. Кінематична в'язкість – відношення динамічної в'язкості до густини рідини, є зворотною величиною динамічній в'язкості. В'язкість рідини експериментально визначають за допомогою спеціального вимірювального пристрою – віскозиметра.

В'язкість використовуваного палива значною мірою впливає на можливість перекачування і трубопровідного транспортування, а також організацію якісного розпилювання при спалюванні.

При виробництві емульсій, їх в'язкість за рахунок фізико-хімічної взаємодії компонентів суміші значно підвищується в порівнянні з вихідними рідинами. Враховуючи те, що композиційне паливо на вуглеводневій основі з додаванням

водної фази - це також емульсія (суспензія, в разі наявності твердої фази), то значне збільшення його в'язкості може суттєво ускладнити або зовсім унеможливити використання даного виду енергоресурсу при отриманні теплової енергії, оскільки при застосуванні стандартних типів форсунок для розпилювання утворюються паливні краплі значних розмірів, що погіршує змішування диспергованої рідини з окиснювачем та знижує якість процесу утворення паливо-повітряної суміші.

При проведенні гідрокавітаційної активації паливних компонентів [1] інтенсифікується протікання хімічних реакцій, таких як гідроліз, гідрогенізація, гідрокрекінг, завдяки чому можна досягти покращення споживчих властивостей композиційних палив. Оскільки в даній паливній суміші присутня водна фаза, при утворенні кумулятивних струменів під час гідрокавітаційної активації молекули води переходять у збуджений стан з розщепленням на H^+ і гідроксильну групу OH^- , а температура і тиск в зонах схлопування кавітаційних бульбашок забезпечують протікання описаних хімічних реакцій. Таким чином, в'язкість отримуваних паливних сумішей значною мірою залежить від інтенсивності гідрокавітаційної обробки.

В розробленій методиці запропоновано визначати ефективність гідрокавітаційної обробки при створенні композиційних палив шляхом визначення зміни однієї з найважливіших споживчих властивостей – в'язкості. Для визначення впливу ГКА на реологічні властивості отримуваних паливних сумішей в процесі створення, передполум'яної підготовки та спалювання композиційних палив в широкому діапазоні змінювалися режими роботи гідрокавітаційного обладнання, а далі проводилось вимірювання динамічної в'язкості за допомогою віскозиметра Brookfield LV-DV E. З використанням отриманих залежностей зміни в'язкості можна визначити ефективні режими роботи гідрокавітаційного обладнання при створенні та спалюванні композиційного палива.

Стабільність паливної багатофазної суміші в умовах зберігання та споживання також є однією з важливих характеристик композиційного палива.

Під стабільністю палива розуміють його здатність зберігати властивості в допустимих межах для визначених експлуатаційних умов. Умовно розрізняють фізичну і хімічну стабільність палива. Фізична стабільність – здатність палива зберігати свій фракційний склад та однорідність. Хімічна стабільність – здатність палива зберігати свій хімічний склад. Під стабільністю композиційних паливних сумішей розуміють здатність палива протистояти утворенню осаду, фракційному чи фазовому розділенню та розшаруванню при зберіганні і використанні (що пов'язано з його перекачуванням та нагріванням). Дана паливна характеристика є важливою тому, що при зберіганні, транспортуванні або використанні в якості енергоресурсу неякісної паливної суміші можливе її розшарування з виділенням окремих компонентів, що може привести до несправностей перекачувальних агрегатів, засмічень паливоподаючого тракту, утворення водяних лінз та зриву факелу в пальниковому пристрої енергетичного обладнання.

На стабільність композиційних палив значний вплив можуть мати компонентний склад та масове співвідношення, фізико-хімічні властивості дисперсійного середовища та дисперсної фази, розмір та форма часток твердої фракції [84], розмір крапель водної фази, інтенсивність гідрокавітаційної обробки та ін. При здійсненні гідрокавітаційної обробки фізико-хімічні властивості паливних компонентів можуть значно змінюватись, оскільки при схлопуванні кавітаційних бульбашок виникають локальні зони значного підвищення температур та тисків, які супроводжуються гідравлічними ударами. Це призводить до інтенсифікації протікання хімічних реакцій [42], таких як гідроліз, гідрогенізація, гідрокрекінг, додаткового подрібнення твердих паливних часток в рідкому середовищі та їх кавітаційної активації, а також додаткової гомогенізації суміші. Тому інтенсивність гідрокавітаційної активації розглядається як один з головних чинників, який значно впливає не тільки на енергетичні показники якості палив, а також на стабільність отримуваних паливних сумішей.

Згідно з розробленою методологією, на експериментальному обладнанні повинна бути передбачена можливість проведення досліджень процесів гідрокавітаційної обробки в широкому діапазоні зміни технологічних режимів і

параметрів створення паливних емульсій та суспензій, що може бути здійснено з використанням спеціальних кранів, засувов, дроселів, а також варіювання швидкостей обертання роторів ГКП. Тому якість гідрокавітаційної активації також оцінюється показниками стабільності створених композиційних палив.

Основним енергетичним показником використання композиційного палива є коефіцієнт корисної дії (ККД) енергоустановки, на якій відбувається спалювання паливної суміші. ККД енергоустановки – відношення величини корисної енергії, яка отримана на виході, до величини підведеної енергії. Даний показник в значній мірі може змінюватися як від компонентного складу використовуваного палива, так і від якості організації процесу горіння, тому особливу увагу необхідно приділяти якості пального та методів його спалювання. Виходячи з цього, при використанні в якості енергоресурсу штучних рідких композиційних палив з метою забезпечення високого ККД енергоустановки необхідне визначення ефективних режимів гідрокавітаційної активації при створенні, а також необхідних параметрів роботи гідровихрової форсунки та пальникового пристрою при спалюванні паливних сумішей.

Не менш важливим показником процесу спалювання композиційного палива є відповідність складу димових газів сучасним діючим екологічним нормативам та вимогам. На екологічні показники процесу спалювання в першу чергу впливають якість композиційного палива та режими роботи гідровихрової форсунки і пальникового пристрою. При використанні запропонованої методики визначення впливу ГКА на показники процесу створення та спалювання композиційного палива можливе встановлення окремих чинників, які впливають на склад димових газів при горінні використовуваної паливної суміші.

Структура алгоритму визначення ефективності застосування гідрокавітаційної активації при створенні композиційного палива показана на рис. 3.1.

Як показано на схемі рис. 3.1, на першому етапі проводиться визначення фізико-хімічних властивостей паливних компонентів – вуглеводневої сировини та рідини, яка додаватиметься в якості водної фази. В залежності від фізико-хімічних

властивостей цих компонентів встановлюються можливі їх масові співвідношення у складі паливної суміші, а також необхідність додавання та вид хімічних домішок, таких як пластифікатори, емульгатори, стабілізатори та ін.

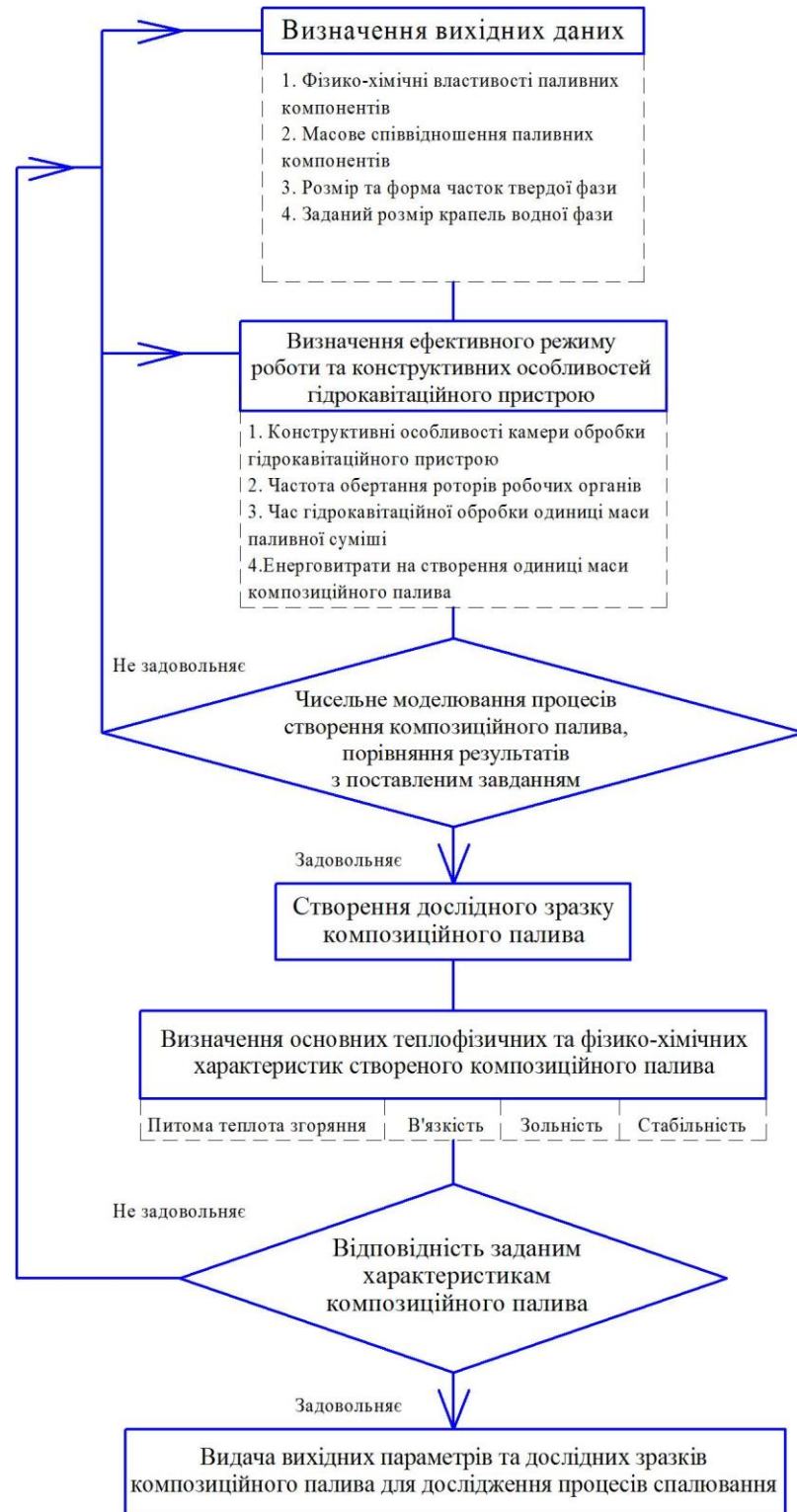


Рисунок 3.1 –Алгоритм визначення ефективності застосування гідрокавітаційної активації при створенні композиційного палива

При наявності необхідної інформації щодо властивостей паливних компонентів визначається їх масове співвідношення у складі композиційного палива в залежності від поставленої мети – отримання додаткової теплової енергії та утилізація значної кількості рідких або вологовмісних промислових відходів при спалюванні даного виду енергоресурсу.

Одним з важливих етапів визначення вихідних даних є встановлення кількості, розміру та форми твердих часток у разі їх наявності в рідині, що додається до складу композиційного палива, оскільки даний показник в значній мірі впливає на вибір режимів роботи і конструктивного виконання гідрокавітаційного пристрою для забезпечення якісного подрібнення та запобігання абразивного зношування поверхонь робочих органів. Також наявність твердої фази в значній мірі впливає на стабільність отриманого композиційного палива, тому з метою забезпечення необхідних споживчих властивостей отримуваної паливної суміші необхідно враховувати властивості даних паливних компонентів.

Одним з важливих показників вихідних даних для створення якісного композиційного палива є заданий розмір крапель водної фази. Даний показник в значній мірі залежить від фізико-хімічних властивостей вихідних паливних компонентів і значно впливає на гомогенність та стабільність створюваного композиційного палива. При застосуванні в якості вуглеводневої сировини легких моторних палив (наприклад, дизпалива) максимальний розмір крапель водної фази не може бути більше 5-10 мкм, оскільки при більших розмірах крапель дисперсної фази значно знижується стабільність та гомогенність паливної суміші. В разі використання в якості вуглеводневої основи композиційного палива важких вуглеводнів (наприклад, мазут, бітум, нафтозмиви, кубові залишки та ін.) допускається максимальний розмір дисперсної фази 50-100 мкм в залежності від фізико-хімічних властивостей вуглеводневої сировини. При цьому слід враховувати необхідність забезпечення високої гомогенності отримуваної суміші, яка необхідна для забезпечення вогневого знешкодження шкідливих речовин, які містяться у складі промислових відходів, що додаються до композиційного

палива, а також забезпечення якісного процесу горіння даного виду енергоресурсу. Також слід враховувати мінімальний розмір дисперсної фази, оскільки при потраплянні паливних крапель в топочний простір під час закипання водних часток необхідно, щоб водяний пар мав достатньо енергії для розривання поверхневої плівки адсорбційно-сольвантного вуглеводневого шару, який відрізняється високою міцністю. Дане явище призводить до додаткового диспергування паливної краплі, підвищення повноти вигорання палива та зниження кількості шкідливих викидів в атмосферу в димових газах.

Після встановлення всіх необхідних вихідних даних для створення штучного рідкого композиційного палива проводиться визначення ефективного режиму роботи та конструктивних особливостей гідрокавітаційного пристрою. В залежності від складу паливної композиції та наявності твердої фази визначаються конструктивні особливості камери обробки гідрокавітаційного пристрою (наприклад, технологічні зазори між ударними елементами, застосування абразивно стійких матеріалів, розмір роторів робочих органів та ін.) з метою забезпечення отримання паливної суміші з заданими теплофізичними та споживчими властивостями. В залежності від визначеного конструктивного виконання гідрокавітаційного пристрою визначається необхідна частота обертання роторів робочих органів з метою забезпечення необхідної окружної швидкості потоку оброблюваної суміші. Даний показник значно впливає на інтенсивність виникнення кавітаційних процесів, що є однією з головних умов отримання якісної паливної суміші. Виходячи з визначених необхідних режимних параметрів роботи ГКП встановлюється необхідний час гідрокавітаційної обробки одиниці маси паливної суміші з метою досягнення заданих теплофізичних та споживчих властивостей. Після встановлення всіх параметрів роботи ГКП визначаються енерговитрати на створення одиниці маси композиційного палива. Даний показник є суттєвим, оскільки визначає економічну доцільність застосування даного виду енергоресурсу та кількість витрат на виробництво композиційного палива.

Після визначення ефективного режиму роботи та конструктивних особливостей ГКП проводиться чисельне моделювання процесів створення композиційного палива з використанням програмних комплексів для обчислень задач гідродинаміки в'язких рідин. За результатами даного моделювання визначається інтенсивність виникнення кавітаційних процесів та ефективність гідрокавітаційної обробки отримуваної паливної суміші. У випадку, якщо результати чисельного моделювання не задовольняють поставлені завдання, проводиться повторне коригування вихідних даних (наприклад, зміна масового співвідношення паливних компонентів або додавання хімічних реагентів) та зміна режимних або конструкційних характеристик ГКП до моменту досягнення необхідного результату розрахунків. Якщо результати чисельного моделювання задовольняють поставлені завдання, проводиться створення дослідного зразку композиційного палива.

Отримання дослідного зразку паливної суміші необхідне для визначення основних теплофізичних та фізико-хімічних характеристик створюваного композиційного палива, головними з яких є питома теплота згорання, в'язкість, зольність та стабільність. Після визначення даних показників встановлюється відповідність заданим характеристикам отримуваних композиційних палив. У випадку, якщо результати експериментального дослідження процесів створення дослідного зразку паливної суміші не задовольняють поставлені завдання, проводиться повторне коригування вихідних даних та зміна режимних або конструкційних характеристик ГКП до моменту досягнення необхідних властивостей композиційного палива. Якщо результати даного експериментального дослідження задовольняють поставлені завдання, проводиться видача вихідних параметрів та дослідних зразків композиційного палива для дослідження процесів спалювання з метою встановлення енергоекологічних показників застосування даного виду енергоресурсу.

Етап створення дослідного зразку композиційного палива є дуже важливим не тільки через можливість експериментального визначення властивостей отримуваної паливної суміші, оскільки згідно з даними експерименту

проводиться верифікація виконаного чисельного моделювання й існує можливість введення коригуючих коефіцієнтів для наближення математичної моделі, яка закладена у використовуваному програмному комплексі, до реальних фізичних умов.

Після проведення визначення ефективності застосування гідрокавітаційної активації при створенні композиційного палива необхідне проведення експериментальних досліджень процесів спалювання створеної паливної суміші з метою визначення енергоекологічних показників застосування даного виду енергоресурсу. Алгоритм проведення визначення технічних засобів та технологічних параметрів забезпечення ефективності процесів спалювання композиційного палива показано на рис. 3.2. Вихідними даними для проведення даних досліджень є теплофізичні та фізико-хімічні характеристики створеного композиційного палива.

Згідно з характеристиками досліджуваного композиційного палива проводиться визначення необхідного конструктивного виконання гідровихрової форсунки для розпилювання при спалюванні, а саме:

- 1) Необхідна форма проточної частини – для забезпечення ефективного диспергування даного виду палива;
- 2) Розмір прохідних перерізів – для забезпечення необхідних витратних характеристик використовуваного пристрою та запобігання засмічення в разі наявності твердої фази;
- 3) Конструктивні особливості деталей розпилюючого пристрою – для забезпечення необхідного куту розкриття та довжини факелу.

Основними показниками композиційного палива, які використовуються на даному етапі, є в'язкість, наявність та розмір твердої фази, а також адгезійні властивості паливної суміші, оскільки даний показник визначає фізичну взаємодію розпилюваної рідини з твердою поверхнею деталей гідровихрової форсунки.



Рисунок 3.2 – Алгоритм визначення технічних засобів та технологічних параметрів забезпечення ефективності процесів спалювання композиційного палива

Після встановлення необхідного конструктивного виконання проводиться визначення ефективного режиму роботи гідровихрової форсунки. На даному етапі визначається:

- 1) тиск та витрата палива – для забезпечення необхідних витратних характеристик та заданої форми факелу;
- 2) тиск та витрата розпилюючого повітря – для забезпечення якісного сумішеутворення первинної паливоповітряної суміші;
- 3) налаштування геометричного розташування деталей форсунки – для забезпечення якісного диспергування композиційного палива.

При визначених конструктивних та режимних характеристиках гідровихрової форсунки проводиться чисельне моделювання процесів розпилювання досліджуваної паливної суміші за допомогою даного пристрою. У випадку, якщо результати чисельного моделювання не задовольняють поставлені завдання, проводиться повторне визначення конструктивного виконання та ефективного режиму роботи гідровихрової форсунки до моменту досягнення необхідного результату розрахунків. Якщо результати чисельного моделювання задовольняють поставлені завдання, проводиться фізичне моделювання процесів розпилювання паливної суміші, за результатами якого можлива верифікація розрахунків згідно з експериментальними даними, а також уточнення математичної моделі використовуваного програмного комплексу шляхом введення коригуючих коефіцієнтів. При невідповідності отриманих результатів поставленим завданням весь цикл вищезазначених етапів повторюється. При отриманні необхідних результатів фізичного моделювання процесів розпилювання проводиться визначення конструктивного виконання та ефективного режиму роботи пальникового пристрою, під час якого встановлюються:

- 1) спосіб подачі вторинного повітря – для забезпечення необхідного часу знаходження паливних крапель в топочному просторі;
- 2) рівень теплонапруженості камери згоряння – для забезпечення повноти вигорання паливних крапель з високим вмістом вологи;

3) забезпечення якісного змішування палива з окиснювачем – шляхом використання жарової труби необхідного конструктивного виконання з метою забезпечення повноти згоряння використовуваного палива та зниження шкідливих викидів в атмосферу з димовими газами.

При встановленому конструктивному виконанню проводиться визначення ефективного режиму роботи пальникового пристрою, під час якого встановлюють:

1) тепловий режим – для забезпечення необхідної кількості тепла на потреби енергоустановки;

2) коефіцієнт надлишку повітря – для досягнення високих показників ККД енергетичного обладнання та зниження кількості шкідливих викидів в атмосферу;

3) швидкість подачі вторинного повітря – для забезпечення якісного паливоповітряного сумішеутворення та запобігання зміни напрямку факелу у випадках надмірної швидкості подачі;

4) температура факелу – для забезпечення утилізації шкідливих речовин у складі паливних компонентів та зменшення кількості утворення шкідливих речовин в димових газах;

5) використання палива підсвічування – у випадках, коли необхідне застосування додаткового джерела енергії для забезпечення якісного процесу горіння.

Після визначення ефективного режиму роботи пальникового пристрою проводиться чисельне моделювання процесів горіння композиційного палива, за результатами якого визначається ефективність організації процесу спалювання використовуваного енергоресурсу. У випадку, коли результати чисельного моделювання не відповідають поставленим завданням, проводиться повторне визначення конструктивного виконання та ефективного режиму роботи пальникового пристрою до моменту досягнення необхідних результатів розрахунку. Якщо результати чисельного моделювання задовольняють поставлені завдання, проводиться фізичне моделювання процесів горіння створеного

композиційного палива. У випадку, коли експериментальним шляхом результати чисельного моделювання не підтвердились, цикл визначення конструкційних та режимних параметрів пальникового пристрою повторюється до моменту отримання задовільних показників процесів спалювання даного виду енергоресурсу. Також на даному етапі проводиться верифікація розрахунків згідно експериментальних даних з уточненням математичної моделі використовуваного програмного комплексу шляхом введення коригуючих коефіцієнтів. При одержанні необхідних результатів фізичного моделювання процесів горіння проводиться експериментальне визначення енергоекологічних показників процесу спалювання та ККД енергоустановки. З урахуванням всіх особливостей організації процесу спалювання та поставлених вимог за результатами експериментальних досліджень проводиться видача рекомендацій та розробка технологічного регламенту технології створення і спалювання композиційного палива.

Таким чином, застосування розробленої методології дозволяє визначати вплив фізико-хімічних властивостей та масового співвідношення паливних компонентів, конструктивних особливостей та режиму роботи гідрокавітаційного пристрою, на теплофізичні та споживчі властивості створюваних композиційних палив, а також вплив конструктивного виконання і режиму роботи гідровихрової форсунки та пальникового пристрою на енергоекологічні показники процесів спалювання досліджуваних паливних сумішей. Використання даної методології дозволяє відпрацьовувати ефективні режими роботи обладнання для створення та спалювання штучних рідких композиційних палив, а також розробляти технологічні регламенти промислового впровадження технологій виробництва та споживання рідких паливних сумішей в якості енергоресурсу для отримання теплової та електричної енергії.

3.2 Розробка комплексу для проведення експериментальних досліджень впливу ГКА на фізико-хімічні характеристики створюваних композиційних палив та енергоекологічні показники їх спалювання

З метою застосування методології визначення впливу гідрокавітаційної активації на теплофізичні, фізико-хімічні характеристики створюваних композиційних палив та енергоекологічні показники їх спалювання розроблено комплекс [84-86] для експериментальних досліджень, принципова схема якого показана на рис. 3.3.

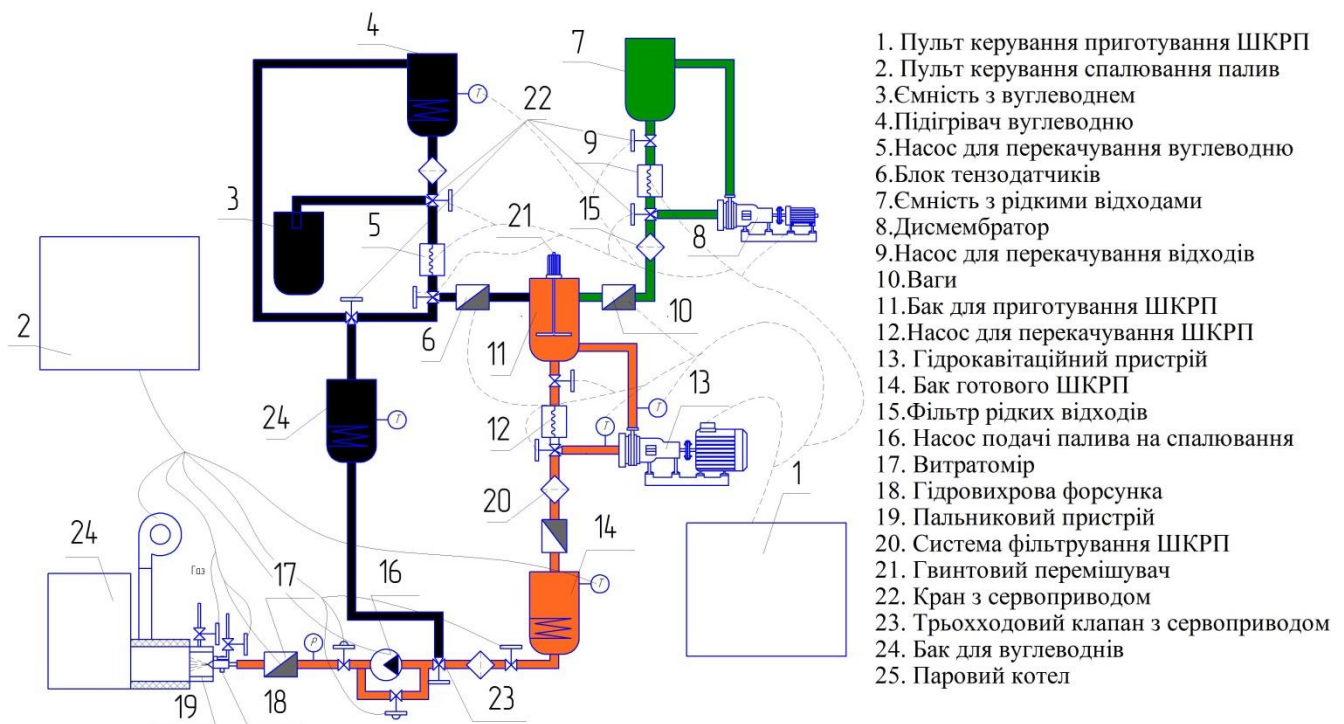


Рисунок 3.3 – Принципова схема комплексу для проведення експериментальних досліджень впливу ГКА на теплофізичні, фізико-хімічні характеристики створюваних композиційних палив та енергоекологічні показники їх спалювання

Комплекс для проведення експериментальних досліджень (рис. 3.3) складається з трьох основних модулів:

– модуль підготовки паливних компонентів (елементи 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 22);

- модуль проведення гідрокавітаційної активації композиційного палива (елементи 1, 11, 12, 13, 20,21,22);

- модуль спалювання й вимірювання енергоекологічних характеристик композиційного палива (елементи 2, 14, 16, 17, 18, 19, 23, 24).

Основними елементами даного комплексу для реалізації ГКА при створенні та спалюванні композиційного палива є гідрокавітаційний пристрій 13, гідровихрова форсунка 18 та пальниковий пристрій 19. Як інші елементи комплексу можуть бути використані стандартні існуючі пристрої і агрегати.

Модуль підготовки паливних компонентів включає в себе систему підігріву вихідних вуглеводнів до необхідної температури, систему попередньої підготовки водної фази, систему перекачування й вимірювання витрати компонентів для приготування паливної композиції.

Попередньо підігрітий до рідкого стану вуглеводень з ємності 3 за допомогою насосу 5 повинен перекачуватись до підігрівача вуглеводнів 4, в якому підігрівається до необхідної температури (наприклад, 90 °С) з метою запобігання застигання в трубопроводах систем, і далі в необхідній кількості подаватись в бак для приготування композиційного палива 11. Попередня підготовка рідких промислових відходів повинна здійснюватись шляхом постійного перекачування насосом 9 та обробки за допомогою дисмембратора 8, в якому відбувається подрібнення великих часток в разі наявності твердої фази та відділення волокнистих домішок з метою запобігання засмічень гідровихрової форсунки 18 при спалюванні композиційного палива, а також гомогенізація рідини з метою забезпечення однорідності паливної суміші. Далі, оброблені рідкі або вологовмісні промислові відходи в необхідній кількості закачуються в бак для приготування композиційного палива 11. Необхідна витрата паливних компонентів повинна контролюватись витратоміром 6, який відображатиме фактичну масу закачуваної сировини. Необхідний температурний рівень вуглеводнів повинен контролюватись та відображатись за допомогою датчиків температури та програмованого реле, яке в автоматичному режимі вмикатиме та вимикатиме підігрів вуглеводневої сировини при необхідності.

Модуль проведення гідрокавітаційної активації складається з системи змішування паливних компонентів, гідрокавітаційного пристрою для проведення ГКА, системи перекачування й фільтрації створеного палива для подальшого спалювання в промисловому котлоагрегаті, системи вимірювання температурних та енергетичних характеристик процесу створення паливної суміші.

Після закачування підігрітого вуглеводню до баку для приготування композиційного палива перед змішуванням з рідкими промисловими відходами необхідно організувати циркуляцію в системі трубопроводів для рівномірного перемішування паливних компонентів у всьому об'ємі. Саме насос 12 і гідрокавітаційний пристрій 13 на середній швидкості обертання ротору забезпечуватимуть гомогенізацію суміші паливних компонентів. Регулювання частоти обертання ротору гідрокавітаційного пристрою повинне здійснюватись за допомогою перетворювача частоти з метою забезпечення широкого діапазону регулювання режимів роботи даного агрегату. При наявності циркуляції розпочинається закачування водної фази до баку для приготування композиційного палива 11. При цьому підігрітий вуглеводень повинен постійно перемішуватись з водною фазою у гідрокавітаційному пристрої для забезпечення гомогенності багатофазної суміші. Для додаткового перемішування компонентів в бак для приготування композиційного палива необхідно встановити електричний гвинтовий перемішувач 21, гвинт якого під час додавання водної фази до вуглеводню буде обертатись зі швидкістю 500–1500 об/хв.

Після змішування та попередньої гомогенізації вихідних компонентів проводиться гідрокавітаційна активація одержаної суміші з метою створення композиційного палива з високоякісними реологічними й енергоекологічними властивостями. Для цього змінюється режим роботи гідрокавітаційного пристрою – збільшується частота обертання ротору до необхідних окружних швидкостей руху ударних елементів. Гідрокавітаційна обробка проводиться до досягнення необхідних властивостей паливної суміші, час та режими обробки можуть бути визначені експериментальним шляхом з урахуванням фізико-хімічних властивостей та масового співвідношення паливних компонентів. Температурний

рівень паливної суміші під час ГКА повинен контролюватись та відображатись за допомогою датчиків температури та пристрою для відображення і реєстрації даних характеристик процесу створення композиційного палива. Для визначення питомих енергетичних витрат на створення одиниці маси композиційного палива необхідно встановити пристрої для вимірювання електричної потужності та лічильник спожитої електроенергії.

Після проведення гідрокавітаційної активації паливна суміш перекачується до баку готового композиційного палива 14 через систему сітчастих фільтрів 20 з метою відділення залишків крупних та волокнистих домішок рідких промислових відходів для забезпечення подальшої безперебійної роботи гідровихрової форсунки 18 та пальникового пристрою 19. Цей бак повинен бути обладнаний системою автоматичного підтримання заданої температури композиційного палива для запобігання застиганню паливної суміші та збільшенню показників її в'язкості.

Системи модулів підготовки паливних компонентів і проведення гідрокавітаційної активації композиційного палива повинні дистанційно керуватись за допомогою пульта управління 1, на якому встановлюються електронні керуючі органи вузлів та агрегатів для організації процесу створення паливної суміші. Також на даному пульті необхідно встановити персональний комп'ютер (ПК) для відображення, управління та безперебійної реєстрації параметрів процесу створення композиційного палива, які повинні здійснюватись за допомогою SCADA-системи диспетчерського управління і збору даних. Така система забезпечуватиме можливість керування роботою всіх агрегатів вищезазначених модулів (в тому числі й кранів з сервоприводами 22), зчитувати та реєструвати параметри й показники процесу підготовки паливних компонентів та створення композиційного палива.

Модуль спалювання й вимірювання енергоекологічних характеристик повинен включати в себе наступні системи:

- пальниковий пристрій з гідровихровою форсункою;

- систему підігріву й подачі вуглеводню – для спалювання з метою визначення показників процесу горіння вихідної вуглеводневої сировини, та в разі проведення промислових досліджень, виведення парового котла на номінальний режим роботи;

- системи підігріву й подачі композиційного палива для спалювання;
- систему вимірювання термобарометричних й витратних характеристик;
- систему вимірювання енергоекологічних характеристик процесу згоряння досліджуваного палива.

Попередньо підігрітий до рідкого стану вихідний вуглеводень закачуватиметься до баку для вуглеводнів 24, який необхідно обладнати системою автоматичного підігріву та термостабілізації палива у заданому діапазоні. Вуглеводневе паливо за допомогою насосу 16 подаватиметься на пальниковий пристрій 19 для спалювання вихідної вуглеводневої сировини для виведення на робочі температурні режими. Також дана система застосовуватиметься для вимірювання питомої кількості вихідного вуглеводню, необхідної на виробництво 1 т пари під час промислових пілотних випробувань. Ці результати потрібні для подальшого визначення енергетичної ефективності використання створеного композиційного палива на основі даного виду некондиційної вуглеводневої сировини.

Після виходу пальникового пристрою на номінальний режим роботи здійснюється подача композиційного палива для дослідження енергоекологічних характеристик процесу згоряння. Для забезпечення безперебійної роботи пальникового пристрою при зміні виду спалюваного палива повинен використовуватись трьохходовий клапан 23 з сервоприводом повільного руху, який перемикається з одного виду енергоресурсу на інший на протязі 90 секунд. Це забезпечує зміну енергоресурсу без зриву факелу та зупинки роботи пальникового пристрою.

Для автоматичного дистанційного запуску пальниковий пристрій 19 повинен бути обладнаним системою розпалювання за допомогою природного газу. Для визначення ефективного режиму роботи пристрою, керування робочими

параметрами пального пристрою повинно здійснюватись шляхом регулювання подачі палива та вторинного повітря. Витратні показники процесу спалювання досліджуваного виду палива необхідно контролювати за допомогою балочних тензодатчиків або витратоміру, які мають можливість відображення миттєвої та сумарної витрат кожного з використаних видів енергоресурсу.

Вимірювання складу димових газів при спалюванні досліджуваного палива повинне здійснюватись за допомогою сертифікованого газоаналітичного обладнання з метою визначення екологічних показників процесу горіння та швидкого регулювання роботи пального пристрою у разі необхідності.

При проведенні промислових пілотних досліджень енергетичні показники процесу горіння спалюваного палива повинні досліджуватися шляхом вимірювання параметрів отримуваної пари за допомогою вихрового витратоміру, який необхідно встановлювати на вихідному паропроводі парового котла.

Системи модулю спалювання й вимірювання енергоекологічних характеристик повинні дистанційно керуватись за допомогою пульта управління 2, на якому необхідно встановити електронні керуючі органи й вимірювальні пристрої для регулювання режиму роботи вузлів і дослідження процесу горіння палива. Також даний пульт необхідно обладнати персональним комп'ютером для відображення, управління та безперебійної реєстрації параметрів і енергоекологічних показників процесу спалювання досліджуваного палива, які здійснюватимуться за допомогою SCADA - системи диспетчерського управління і збору даних.

3.3 Мобільний експериментальний енерготехнологічний комплекс та алгоритм проведення досліджень впливу гідрокавітаційної активації на теплові, гідродинамічні, фізико-хімічні, енергетичні та екологічні показники процесів створення та спалювання композиційних палив

Для проведення експериментальних досліджень, згідно розроблених принципової схеми (рис. 3.3) та методології визначення впливу гідрокавітаційної

активації на показники процесів створення та спалювання композиційних палив, створено мобільний дослідницький комплекс, який показано на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Мобільний експериментальний енерготехнологічний комплекс для проведення досліджень процесів створення та спалювання композиційних палив

Мобільний енерготехнологічний комплекс виконано на одній платформі (рис. 3.4 зліва) для можливості транспортування на промислові або теплоенергетичні підприємства для проведення пілотних промислових випробувань технологій створення та спалювання композиційного палива у виробничих умовах. Виробнича потужність даного комплексу становить 350-500 кг/год композиційного палива в залежності від компонентного складу паливної суміші. Всі пристрої і агрегати приводяться в дію за допомогою електродвигунів потужністю 1,5-22 кВт та сервоприводів потужністю 50 Вт. Для забезпечення роботи комплексу необхідна електромережа 43 А, енергоспоживання становить 25-40 кВт/год в залежності від заданої виробничої потужності. Маса комплексу – 1700 кг.

Всі пристрої та агрегати комплексу керуються за допомогою пультів управління (рис. 3.4 праворуч). На даних пультах встановлено системи керування модулями комплексу та реєстрації вимірюваних параметрів.

Для створення паливної суміші з застосуванням гідрокавітаційної активації використовуються модулі підготовки паливних компонентів та проведення гідрокавітаційної активації композиційного палива.

Нижче за текстом наведено технічні особливості створеного енерготехнологічного комплексу та алгоритм проведення досліджень впливу ГКА на процеси створення та спалювання композиційного палива на основі вуглеводнів та рідких або вологовмісних промислових відходів.

На початку роботи вихідні паливні компоненти знаходяться в ємностях, які транспортують до місця проведення досліджень. Вуглеводневу сировину необхідно підігріти до такої температури, щоб існувала можливість її перекачування за допомогою насосу. Після цього вуглеводень закачується до підігрівача вуглеводню, де нагрівається необхідної температури. У випадку застосування важких вуглеводнів дана сировина нагрівається до 90 °С, а при використанні легких моторних палив попередній підігрів не застосовується. Після досягнення заданої температури вихідна вуглеводнева сировина закачується в необхідній для проведення циклу досліджень кількості до баку для приготування композиційного палива. Кількість закачаних вуглеводнів вимірюється за допомогою блоку балочних тензодатчиків SQB-200 (рис. 3.5) та відображається за допомогою вагового терміналу KB-4 (рис. 3.6), який встановлено на пульті управління процесами приготування композиційного палива.



Рисунок 3.5 – Балочний тензодатчик SQB-200



Рисунок 3.6 – Ваговий термінал KB-4

Після закачування в необхідній кількості підігрітих до заданої температури вуглеводнів перед додаванням рідких промислових відходів організовується циркуляція рідини в системі трубопроводів модулю гідрокавітаційної активації композиційного палива для забезпечення рівномірного перемішування паливних компонентів у всьому об'ємі та попередньої гомогенізації паливної суміші. Для цього вуглеводень за допомогою гвинтового насоса через ввімкнений на середніх обертах (2000 об/хв) гідрокавітаційний пристрій перекачується по замкненому контуру. Після цього здійснюється закачування рідких промислових відходів через фільтр з фільтрувальною здатністю 500 мкм до баку для приготування композиційного палива. При додаванні рідких або вологвмісних промислових відходів до вуглеводнів здійснюється попереднє перемішування компонентів електричним гвинтовим змішувачем, гвинт якого обертається зі швидкістю 1200 об/хв. Додаткове змішування паливних компонентів здійснюється за допомогою обертаючихся робочих органів ГКП.

При закачуванні паливних компонентів до баку для приготування композиційного палива рекомендована температура вуглеводневої сировини становить 90 °С (визначено експериментально), рідкі промислові відходи додатково не підігріваються. Так, після змішування паливних компонентів при вмісті водної фази 50 % мас. температура суміші становить 45-48 °С.

Після змішування паливних компонентів проводиться гідрокавітаційна активація з метою створення композиційного палива з високоякісними реологічними й енергоекологічними властивостями. При проведенні гідрокавітаційної активації паливних компонентів інтенсифікується протікання хімічних реакцій, таких як гідроліз, гідрогенізація, гідрокрекінг, завдяки чому можна досягти покращення споживчих властивостей композиційних палив.

Для здійснення ГКА паливних компонентів змінюється режим роботи гідрокавітаційного пристрою шляхом збільшення частоти обертання робочих органів до максимально можливої (5200 об/хв) за допомогою перетворювачів частоти «ОВЕН» ПЧВ 205-22К-В з метою керування окружної швидкості руху ударних елементів роторів для підвищення рівня гідрокавітаційного впливу на паливну суміш. Визначено, що при цьому насосна характеристика гідрокавітаційного пристрою максимально зростає, що призводить до утворення зони розрідження на вході в даний агрегат, інтенсифікації виникнення пульсацій потоку в камері обробки і збільшення гідрокавітаційного впливу на оброблюване середовище.

При здійсненні гідрокавітаційної активації температура паливної суміші поступово підвищується за рахунок наявності значних ударних та гідродинамічних навантажень, а також сил тертя між оброблюваним потоком та ударними елементами робочих органів. Визначено, що ефективна гідрокавітаційна активація паливної суміші досягається при температурах 97-98 °С (за умови недопущення кипіння водної фази при атмосферному тиску). Необхідний час обробки при цьому залежить від фізико-хімічних властивостей та масового співвідношення паливних компонентів, а також швидкості обертання роторів робочих органів гідрокавітаційного пристрою, і визначається експериментальним шляхом в залежності від заданих споживчих та енергетичних властивостей отриманого композиційного палива.

Енергетичні витрати на приготування композиційного палива вимірюються, відображаються та реєструються за допомогою аналізатору параметрів мережі Diris–А 20. Застосування даного пристрою дозволяє здійснювати вимірювання і

моніторинг робочих характеристик розподілення та кількості споживання електроенергії. Так, при виробництві 1 т композиційного палива на основі некондиційних вуглеводнів з додаванням рідких та вологовмісних промислових відходів витрати електроенергії становлять 86–98 кВт·год і залежать від компонентного співвідношення складових та їх вихідних фізико-хімічних властивостей.

Після проведення гідрокавітаційної активації паливна суміш перекачується до баку готового композиційного палива через систему сітчастих фільтрів з фільтруючою здатністю 500 мкм з метою відділення залишків твердих домішок та утворених конгломератів для забезпечення подальшої безперебійної роботи системи подачі палива та пальникового пристрою.

Системи модулів підготовки паливних компонентів і гідрокавітаційної активації композиційного палива керуються з пульту управління (рис. 3.7), на якому встановлено електронні керуючі органи всіх вузлів та агрегатів даних модулів для організації процесу приготування паливної суміші. Також на даному пульті встановлено ПК для відображення, управління (в т.ч. й сенсорного) та безперебійної реєстрації параметрів процесу створення композиційного палива, які здійснюються за допомогою SCADA-системи диспетчерського управління і збору даних MasterScada 3.9 (RT32 ReleaseMax). Дана система дозволяє керувати роботою всіх агрегатів вищезазначених модулів (в тому числі й кранів з сервоприводами), зчитувати та реєструвати параметри й показники процесу підготовки паливних компонентів та створення композиційного палива.

Для визначення енергоекологічних показників процесу горіння вихідного вуглеводню та композиційного палива, створеного на його основі, а також техніко-економічної доцільності промислового застосування методу гідрокавітаційної активації, проводяться дослідження процесів спалювання даних видів енергоресурсів. Дані дослідження проводяться з використанням модулю спалювання й вимірювання енергоекологічних характеристик експериментального енерготехнологічного комплексу. Для коректного порівняння результатів досліджень вихідний вуглеводень та композиційне паливо

на його основі повинні спалюватись в однакових умовах (тепловому режимі пального пристрою). Дослідження процесів спалювання вихідного вуглеводню та композиційного палива проводяться з застосуванням розроблених гідровихрової форсунки (пункт 2.1.3) та пального пристрою (пункт 2.3.4).



Рисунок 3.7 – Пульт керування процесами виробництва композиційного палива

Для автоматичного дистанційного запуску пального пристрій обладнано системою автоматичного розпалювання за допомогою природного газу. Зміна режиму роботи пального пристрою здійснюється шляхом зміни тиску і витрати палива, а також швидкості подачі та витрати вторинного повітря. Зміна тиску і витрати палива здійснюється за допомогою регулювання режиму роботи насосу з використанням перетворювача частоти «ОВЕН» ПЧВ 203-5К5-В та зміни площі прохідного перерізу регулюючого крана з сервоприводом. Регулювання подачі вторинного повітря для забезпечення необхідного складу паливоповітряної суміші здійснюється шляхом зміни режиму роботи повітрорудки равликового типу за допомогою перетворювача частоти «Schneider» Altivar 312. Системи пального пристрою показано на рис. 3.8.

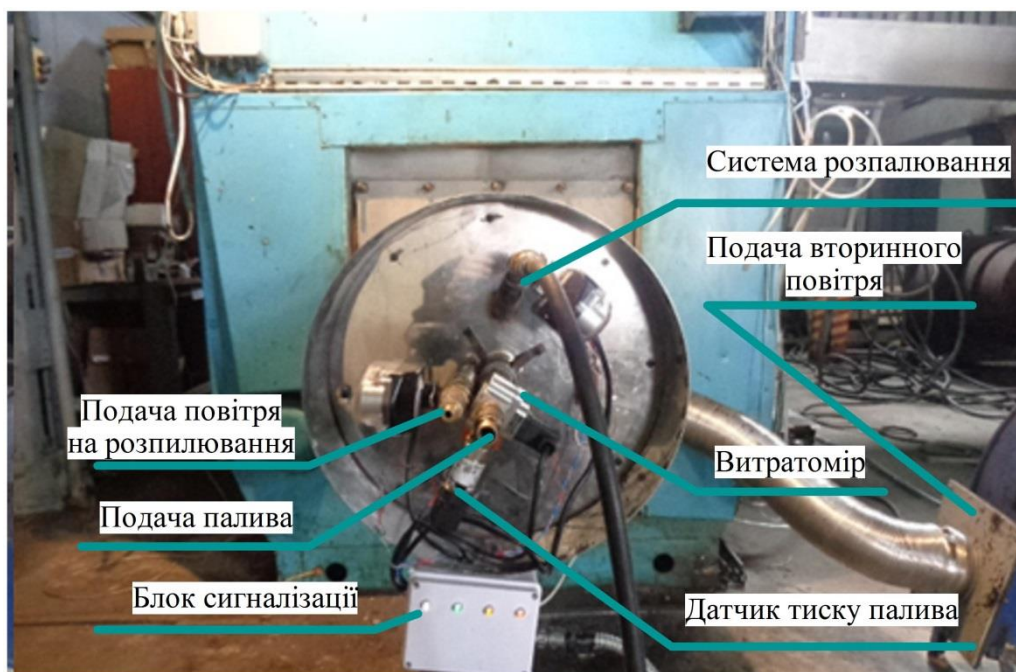


Рисунок 3.8 – Системи пального пристрою

Витратні показники процесу спалювання досліджуваного виду палива контролюються за допомогою балочних тензодатчиків SQB-200, вагового терміналу KB-4 та витратоміру «Дарконт» ЕМ-008, які відображають миттєву та сумарну витрату використовуваного енергоресурсу.

Для розігріву й виведення на номінальний робочий режим роботи пального пристрою попередньо підігрітий до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ вуглеводень за допомогою насоса подається на паливний пристрій для спалювання. При цьому на протязі перших декількох хвилин витрата пального складає лише $0,2\text{--}0,3\text{ кг/хв}$, що зумовлено необхідністю розігріву камери згоряння пального пристрою. При підвищенні температури факела, яка вимірюється за допомогою термопари ТПП, витрата пального поступово підвищується і на режимі розігріву становить $0,78\text{--}0,8\text{ кг/хв}$.

При визначенні енергоекологічних характеристик процесу горіння композиційного палива після виходу на номінальний режим роботи пального пристрою триходовий клапан с сервоприводом перемикається в положення подачі паливної суміші з баку готового композиційного палива. Оскільки час перемикання даного клапана становить 90 секунд, зміна режиму роботи

відбувається поступово без зриву факелу та зупинки роботи пального пристрою. При повному переході роботи пального пристрою на композиційне паливо відбувається збільшення витрати пального з 0,8 кг/хв до 1,0-1,4 кг/хв в залежності від складу паливної суміші для підтримання постійного теплового режиму теплогенеруючого обладнання під час експериментальних досліджень.

Вимірювання складу димових газів при спалюванні досліджуваного палива здійснюється за допомогою газоаналізатора «ОКСИ» 5М-5 НД – CO_2 з метою визначення екологічних показників процесу горіння та регулювання роботи пального пристрою.

В умовах промислових випробувань з застосуванням парового котла енергетичні показники процесу горіння спалюваного палива можуть досліджуватися шляхом вимірювання параметрів отриманого пару за допомогою вихрового витратоміру «Ирга-РВ». Підтримка заданого рівня тиску в паровому котлі в цьому випадку здійснюється за допомогою автоматичного парового клапана «LDV» RV-ANT40. Вихровий витратомір пару «Ирга-РВ» та автоматичний паровий клапан «LDV» RV-ANT40, які встановлено на вихідному паропроводі парового котла, показано на рис. 3.9.



Рисунок 3.9 – Вихровий витратомір «Ирга-РВ» та автоматичний паровий клапан «LDV» RV-ANT40, встановлені на вихідному паропроводі парового котла

Системи модулю спалювання й вимірювання енергоекологічних характеристик керуються з пульта управління (рис. 3.10), на якому встановлено електронні керуючі органи й вимірювальні пристрої для регулювання й дослідження процесу горіння використовуваного палива. Також на даному пульті встановлено ПК для відображення у цифровому й графічному вигляді, управління та безперебійної реєстрації параметрів і енергоекологічних показників процесу спалювання досліджуваного палива, які здійснюються за допомогою SCADA-системи диспетчерського управління і збору даних MasterScada 3.9 (RT32 ReleaseMax). Дана система дозволяє керувати роботою всіх агрегатів даного модулю енерготехнологічного комплексу (в тому числі й кранів з сервоприводами), зчитувати, відображати та реєструвати параметри процесу горіння і енергоекологічні показники. За допомогою постійного відображення поточних параметрів спалювання палива та складу димових газів існує можливість регулювання якості процесу горіння і вибору ефективних режимів роботи пального пристрою.



Рисунок 3.10 – Пульт керування процесами спалювання досліджуваного палива

Використання мобільного експериментального енерготехнологічного комплексу при проведенні досліджень дає можливість вимірювати такі показники процесів створення та спалювання композиційних палив:

- Витрата палива загальна, кг;
- Витрата палива миттєва, кг/хв;
- Температура вуглеводневої сировини, °C;
- Температура композиційного палива, °C;
- Тиск спалюваного палива, кгс/см²;
- Залишок композиційного палива, кг;
- Залишок вуглеводневої сировини, кг;
- Температура факелу, °C;
- Коефіцієнт надлишку повітря α ;
- Температура димових газів, °C;
- Склад димових газів (CO, CO₂, NO, NO₂; NO_x; SO_x);
- Розрахунковий ККД енергоустановки;
- Енерговитрати на створення композиційного палива, кВт*год/т палива.

При проведенні промислових досліджень процесів створення та спалювання композиційного палива з використанням парового котла та вихрового витратоміру пари додатково вимірюються:

- Тиск пари, кгс/см²;
- Витрата пари об'ємна, м³/хв;
- Витрата пари масова, кг/хв;
- Температура пари, °C;
- Розрахунок виробленої теплової енергії, МДж;
- Розрахунок витрати вуглеводневої сировини на виробництво пари, кг/т;
- Розрахунок витрати композиційного палива на виробництво пари, кг/т.

Використання даного комплексу з застосуванням методології визначення впливу ГКА на теплофізичні, фізико-хімічні та енергоекологічні показники процесу створення та спалювання композиційного палива, дозволяє визначати необхідні масові співвідношення паливних компонентів в залежності від їх

вихідних фізико-хімічних властивостей, ефективні режими роботи гідрокавітаційного та пальникового пристроїв і гідровихрової форсунки, відпрацьовувати технологічні регламенти виробництва та споживання паливної суміші в промислових умовах безпосередньо на енергетичних об'єктах, визначати основні характеристики енергоефективності та екологічності створених технологій, надавати рекомендації щодо їх промислового впровадження.

3.4 Висновки за розділом 3

Розроблено методологію визначення впливу гідрокавітаційної активації на теплофізичні, фізико-хімічні, реологічні та енергоекологічні показники процесів створення та спалювання композиційного палива. Застосування даної методології дозволяє визначати доцільне компонентне співвідношення паливної суміші, ефективний режим роботи гідрокавітаційного пристрою, необхідні конструктивні виконання і режими роботи гідровихрової форсунки та пальникового пристрою з метою отримання високих показників теплофізичних, фізико-хімічних та енергоекологічних властивостей при створенні та спалюванні композиційного палива.

З використанням розробленої методології визначення впливу гідрокавітаційної активації на теплофізичні, фізико-хімічні та енергоекологічні показники процесу створення та спалювання композиційного палива розроблено принципову схему енерготехнологічного комплексу для проведення експериментальних досліджень, яка показала можливість комплексного визначення факторів, які в значній мірі впливають на споживчі властивості створюваних паливних сумішей та екологічні показники процесу їх горіння [80, 81, 82].

Створено мобільний експериментальний енерготехнологічний комплекс для проведення досліджень впливу гідрокавітаційної активації на теплові, гідродинамічні, фізико-хімічні, енергетичні та екологічні показники процесів створення та спалювання композиційних палив. Використання даного комплексу

з застосуванням методики визначення впливу ГКА на теплофізичні, фізико-хімічні та енергоекологічні показники процесу створення та спалювання композиційного палива, дозволяє визначати необхідні масові співвідношення паливних компонентів в залежності від їх фізико-хімічних властивостей, ефективні режими роботи ГКП, пальникового пристрою і гідровихрової форсунки, відпрацьовувати технологічні регламенти виробництва та споживання паливної суміші в промислових умовах безпосередньо на енергетичних об'єктах, визначати основні характеристики енергоефективності і екологічності створених технологій та надавати рекомендації щодо їх промислового впровадження [84, 85, 86].

4 ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОКАВІТАЦІЙНОЇ АКТИВАЦІЇ ПРИ СТВОРЕННІ ТА СПАЛЮВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПАЛИВ

4.1 Експериментальні дослідження процесів створення та спалювання композиційного палива на основі некондиційних вуглеводнів та мулових осадів очисних споруд із застосуванням гідрокавітаційної активації

На сьогоднішній день в Україні достатньо гостро стоїть проблема пошуку альтернативних джерел енергії. Одним з таких джерел можуть бути надлишкові мулові осади комунальних очисних споруд. Даний вид стоків є відходом від процесу очистки комунальних стічних вод міст. На теперішній час цей мул згущується у відстійниках другого порядку, а потім відбирається та відвозиться або відкачується на спеціальні мулові майданчики, де під дією природніх факторів (життєдіяльність мікроорганізмів, атмосферне повітря, сонячне проміння і т. ін.) поступово розкладається. Це є значною екологічною проблемою, оскільки дані відходи значною мірою забруднюють ґрунти, підземні води, атмосферне повітря, а також займають значні за площею території. Наприклад, у м. Харкові середня добова кількість таких надлишкових мулових осадів становить 5000 – 6000 м³, вологість даних відходів становить 96 – 98%. Зазвичай цей муловий осад неможливо використовувати в якості органічного добрива, оскільки він містить у своєму складі токсичні хімічні, органічні та мінеральні речовини.

При ефективному очищенні міських стічних вод утворюється велика кількість мулових осадів. Згідно з роботою [87], в країнах, які частково або повністю знаходяться на території водозбору Балтійського моря, щорічно утворюється 3,5 млн. т сухої речовини мулових осадів, і за прогнозами до 2020 р. ця кількість збільшиться майже до 4 млн. т. Управління муловими осадами стічних вод є невід’ємною частиною роботи будь-яких сучасних очисних споруд водовідведення. Осад, що утворюється на очисних спорудах, можна повторно використовувати, наприклад, для виробництва енергії, як добриво і навіть для утилізації біогенних елементів.

Навіть найсучасніші очисні споруди стикаються з певними труднощами при утилізації мулових осадів. Проблеми варіюються від відсутності техніки та реагентів для зневоднення або ущільнення осаду до неможливості його використання на сільськогосподарських угіддях через наявність важких металів та інших екологічно небезпечних речовин. Стратегія обробки осаду формується в залежності від місця розташування очисних споруд, транспортних витрат, якості вихідних стоків, використовуваної технології видалення біогенних елементів, законодавчо-нормативних обмежень щодо утилізації осаду, наявності кондиціонуючих реагентів і цін на них, можливості передачі обробленого осаду підрядним організаціям та інших чинників. Принципова схема типових очисних споруд показана на рис. 4.1.

У практичному і технічному відношенні існують такі проблеми обробки осаду:

- необхідність стабілізації, так як осад не є інертним і може мати неприємний запах;
- зменшення вологості і обсягу осаду до мінімуму;
- використання енергетичного потенціалу осаду, якщо економічно доцільно;
- скорочення кількості шкідливих мікроорганізмів у разі взаємодії осаду з людьми, тваринами або рослинами;
- витяг фосфору для використання в сільському господарстві.

Сушка осаду з його подальшим спалюванням широко застосовується лише в Німеччині та в меншій мірі в Польщі і Швеції. Однак даний спосіб утилізації мулових осадів потребує значних капіталовкладень та витрат вартісних вуглеводнів для організації процесів сушки і спалювання даного виду відходів методом інсинерації [88], а також значних витрат електроенергії при утилізації даних відходів плазмовими методами.

На сучасних очисних спорудах країн ЄС для управління муловими осадами застосовуються такі технологічні операції:

- ущільнення мулового осаду;
- стабілізація осаду;

- зневоднення осаду;
- знезараження осаду;
- сушка осаду;
- спалювання осаду;
- утилізація осаду стічних вод.

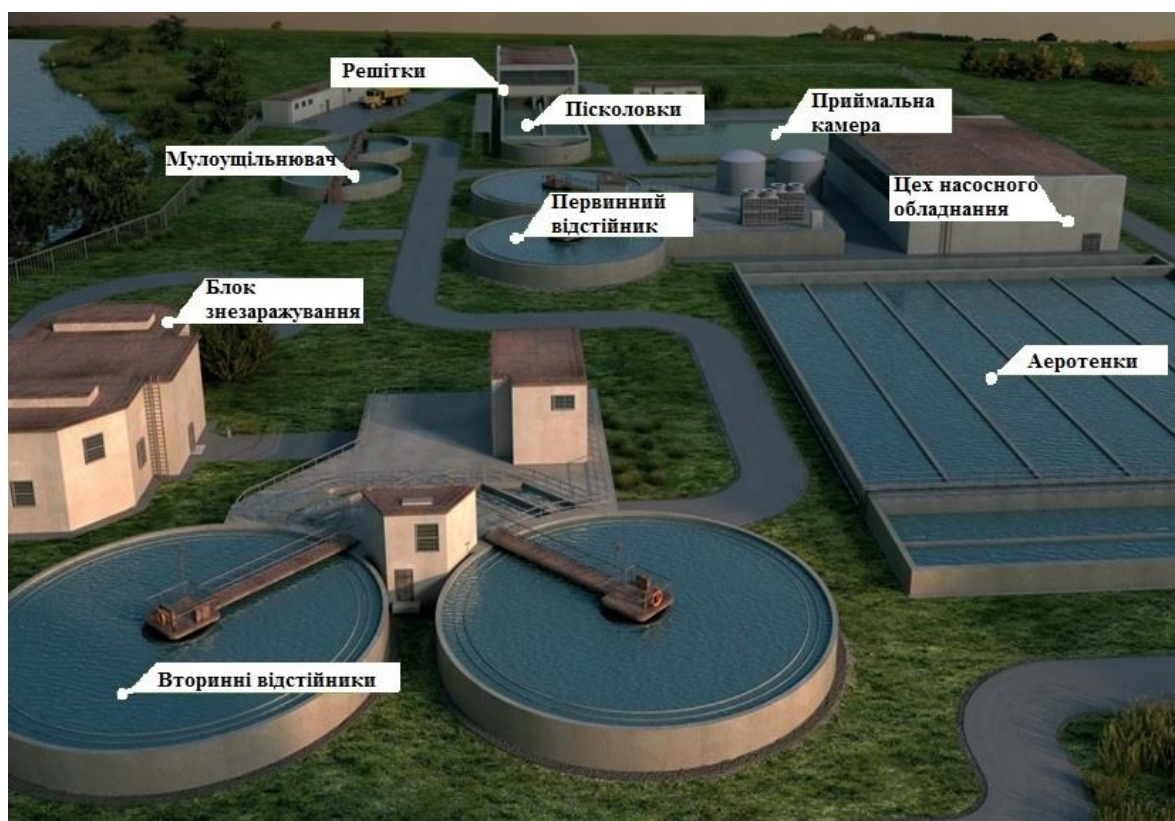


Рисунок 4.1 – Принципова схема комунальних очисних споруд

В залежності від типу та проектного виконання на деяких очисних спорудах окремі технологічні операції управління муловими осадами можуть не застосовуватись.

В ІПМаш НАН України створено науково-практичні основи застосування гідрокавітаційної активації рідких вуглеводнів з метою створення композиційних палив, до складу яких можуть входити некондиційні вуглеводні, у тому числі застарілий мазут, танкерні змиви, кубові залишки, вугілля, біомаса, промислові стоки та ін. Такий підхід дозволяє більш раціонально використовувати вуглеводневу

сировину та вирішувати відразу дві проблеми – отримувати додаткову енергію та утилізувати й знешкоджувати відходи.

Запропоновано здійснювати утилізацію мулових осадів очисних споруд вогневим методом у складі композиційних палив при виробництві теплової енергії. Створення таких композиційних палив з застосуванням гідрокавітаційної активації дає змогу отримувати високоякісні паливні суміші з заданими теплофізичними та споживчими властивостями.

Проведено експериментальні дослідження [80-82] процесів створення та спалювання композиційних палив на основі кубових залишків нафтопереробки та мулових осадів очисних споруд. Дані дослідження проведено з використанням мобільного експериментального енерготехнологічного комплексу (пункт 3.3.3).

В якості вуглеводневої сировини композиційного палива використано кубові залишки прямогонної нафтопереробки, фізико-хімічні характеристики якого наведено в табл. 4.1. В якості водовмісної паливної складової використовувався муловий осад очисних споруд з вторинного відстійника (схема рис. 4.1), наданий КП «Рівнеоблводоканал». Фізико-хімічні характеристики мулових осадів наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.1 – Фізико-хімічні характеристики кубових залишків прямогонної нафтопереробки

Вид вуглеводню	Вологість, %	Зольність, %	Вміст сірки, %	Питома теплотворна здатність, МДж/кг	В'язкість, мПа·с
Кубові залишки	0,71	0,09	0,84	44,0	26

Для створення паливних сумішей на основі кубових залишків та мулових осадів з застосуванням методу гідрокавітаційної активації використано модуль підготовки паливних компонентів та створення композиційного палива експериментального технологічного комплексу (рис. 3.4).

Таблиця 4.2 – Фізико-хімічні характеристики мулових осадів очисних споруд з вторинного відстійника

Компонент	Масова частка, %
Вільна волога	94,0
Зв'язана волога	0,67
Органічні речовини	2,47
Зола (неорганічний залишок)	2,86

Для оцінки ефективності режимних характеристик роботи кавітаційного обладнання при створенні композиційного палива проведено дослідження залежності питомої теплотворної здатності ШКРП від режиму гідрокавітаційної активації. Основними параметрами, які визначають режими обробки палива на гідрокавітаційному пристрої, є швидкість обертання ротора та час обробки палива. В залежності від швидкості обертання ротору, час обробки був різний (чим швидкість була більшою, час зменшувався). Суміш оброблялася до $t = 98\text{ }^{\circ}\text{C}$. Було досліджено 22 режими, у яких окружна швидкість руху ударних елементів робочих органів задавалася від 30 до 75 м/с.

В результаті обробки експериментальних даних за методом найменших квадратів побудовано регресійну математичну модель залежності теплотворної здатності композиційного палива від швидкості обертання робочих органів гідрокавітаційного обладнання при співвідношенні паливних компонентів 1:1 мас.

$$f(x) = -1.8865 \cdot 10^{-8} x^6 + 6.2315 \cdot 10^{-6} x^5 - 8.4139 \cdot 10^{-4} x^4 + 5.9233 \cdot 10^{-2} x^3 - 2.2856 \cdot 10^0 x^2 + 4.5817 \cdot 10^1 x^5 - 3.5044 \cdot 10^2 \quad (4.1)$$

Залежність теплотворної здатності композиційного палива від окружної швидкості руху ударних елементів робочих органів гідрокавітаційного пристрою представлена на рис. 4.2.

Графік (рис. 4.2) побудованої математичної моделі є монотонним, проте суттєво не лінійним: на режимах 30 – 40 м/с спостерігається незначне зростання питомої теплоти згоряння палива; на режимах 40 – 65 м/с – збільшення питомої

теплоти згоряння є суттєвим і близьким до лінійної залежності; після 65 м/с зростання питомої теплоти згоряння практично не відбувається.

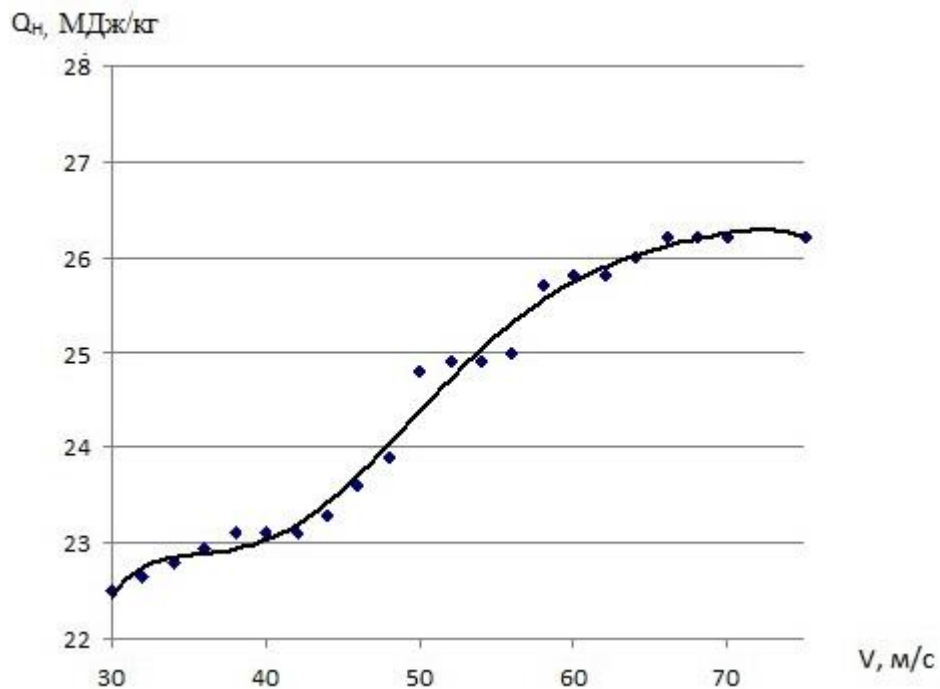


Рисунок 4.2 – Залежність питомої теплоти згоряння композиційного палива від окружної швидкості руху ударних елементів робочих органів гідрокавітаційного пристрою

Збільшення питомої теплоти згоряння композиційного палива у порівнянні з попередньо емульгованою паливною сумішшю пояснюється тим, що при підвищенні гідрокавітаційного впливу відбувається інтенсифікація фізико-хімічних процесів в емульсії типу «вуглеводень-вода», таких як гідроліз, гідрогенізація, гідрокрекінг, під час яких утворюються нові кисеньвмісні вуглеводневі сполуки (рис. 4.3), що підтверджено спектральними дослідженнями компонентного складу отриманого ШКРП з використанням спектрографу Spectrum one. При отриманні спектрального аналізу для спалювання проби досліджуваної паливної суміші використовувався бромід калію.

При гідрокавітаційній активації паливної суміші зв'язана волога та органічні речовини входять до складу утворюваних вуглеводневих сполук. Використання

залежності зміни питомої теплоти згоряння композиційного палива [42, 59, 60] від окружної швидкості руху ударних елементів робочих органів ГКП дозволяє визначити ефективні режими роботи гідрокавітаційного обладнання при створенні та спалюванні даного виду енергоресурсу. Подальші експериментальні дослідження проводились на режимі роботи гідрокавітаційного пристрою з окружною швидкістю руху ударних елементів робочих органів 70 м/с.

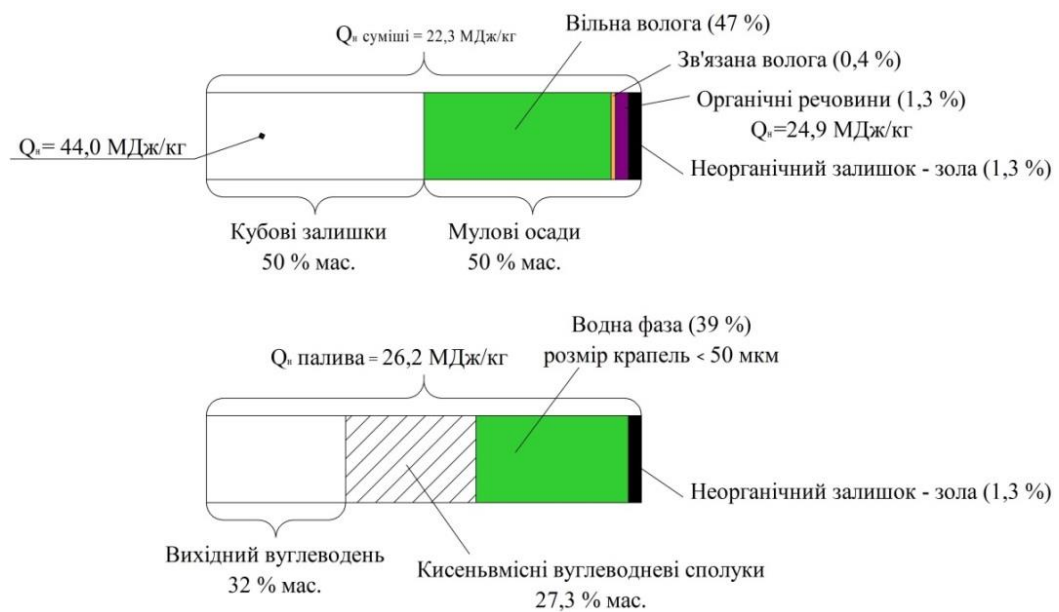


Рисунок 4.3 – Схема утворення нових вуглеводневих сполук після попереднього емульгування та гідрокавітаційної активації композиційного палива

Для визначення впливу вмісту мулових осадів у складі композиційного палива створення паливної суміші здійснювалось у різних компонентних співвідношеннях. Фізико-хімічні характеристики композиційних палив наведено в табл. 4.3. Згідно з даними табл. 4.3, збільшення питомої теплоти згоряння композиційного палива у відношенні до теплотворної здатності використаної кількості вихідного вуглеводню за формулою (3.1) становить до 16 % в залежності від компонентного співвідношення. Також слід зазначити, що кінематична в'язкість отримуваних композиційних палив значно вище від в'язкості вихідного вуглеводню, що пояснюється утворенням адсорбційно-сольвантного шару [81] на межі розділення фаз краплі водопаливної суспензії.

Мікрофотографії крапель палива з різними компонентними складами з 56-кратним збільшенням наведено на рис. 4.4-4.6.

Таблиця 4.3 – Фізико-хімічні характеристики композиційних палив

	Вологість, %	Зольність, %	Питома теплота згоряння, МДж/кг	Динамічна в'язкість, мПа·с	К _{пр} , %
Кубові залишки	0,58	0,08	44,0	26	—
КП (30 % мулові осади)	22,12	0,88	31,8	318	3,15
КП (35 % мулові осади)	29,80	1,11	30,5	427	6,23
КП (40 % мулові осади)	31,21	1,44	29,4	519	10,20
КП (45 % мулові осади)	37,76	1,47	27,8	612	12,95
КП (50 % мулові осади)	40,46	1,86	26,2	639	16,03

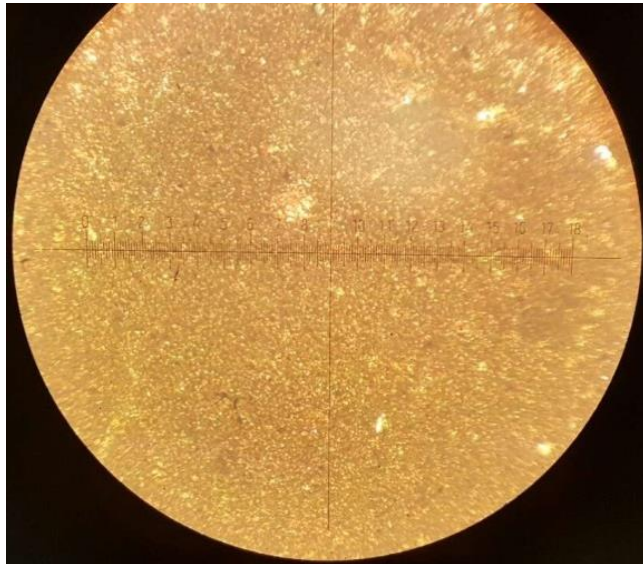


Рисунок 4.4 – Крапля композиційного палива (30 % мулових осадів) з 56-кратним збільшенням

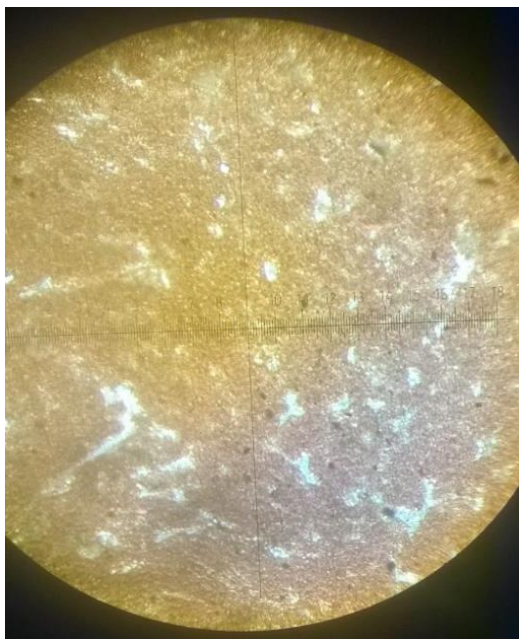


Рисунок 4.5 – Крапля композиційного палива (40 % мулових осадів) з 56-кратним збільшенням

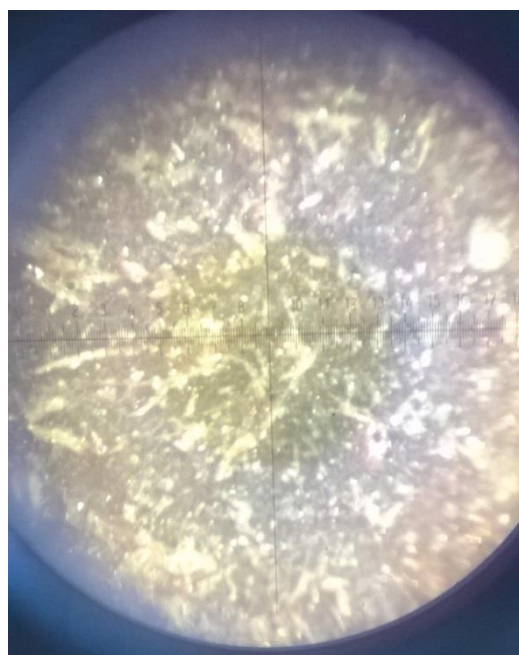


Рисунок 4.6 – Крапля композиційного палива (50 % мулових осадів) з 56-кратним збільшенням

Згідно з зображеннями, наведеними на рис. 4.4-4.6, при збільшенні вмісту водної фази у складі композиційного палива збільшується розмір крапель води в паливній суміші. Однак в жодній з проб паливної композиції розмір дисперсної

фази не перевищує 50 мкм, що свідчить про високу гомогенність отриманого композиційного палива при застосуванні гідрокавітаційної активації. Гомогенність паливної суміші необхідна для забезпечення необхідної стабільності створюваного ШКРП, вогневого знешкодження шкідливих речовин, які містяться у складі промислових відходів, що додаються до композиційного палива, а також забезпечення якісного процесу горіння даного виду енергоресурсу.

Проведено промислові випробування методології гідрокавітаційної активації з метою визначення техніко-економічних та енергоекологічних показників процесу горіння вихідного вуглеводню (кубові залишки) і композиційного палива, створеного на його основі, з додаванням мулових осадів очисних споруд. Дані випробування проведено на базі сертифікованої випробувальної лабораторії ТОВ МВВФ «Енергетик» з використанням енерготехнологічного комплексу (рис. 3.4) та парового газомазутного котла Е-1,0-0,9Г-3(Е) продуктивністю 1т пари на годину.

Експериментальні дослідження процесів спалювання композиційного палива показали неможливість застосування штатного пальникового пристрою ГГМБ-1 з форсункою Р-200, які встановлюються на парових котлах даного типу, оскільки через високу в'язкість та наявність твердих включень відбувались засмічення даних вузлів, зрив факелу та припинення роботи енергоустановки. Тому для проведення промислових досліджень застосовано розроблені гідровихрову форсунку (пункт 2.1.3) та пальниковий пристрій (пункт 2.3.4), які забезпечили ультрадисперсне розпилювання та якісне спалювання створених високов'язких композиційних палив з наявністю твердої фази.

Визначення енергетичних показників процесу спалювання палива проводилося за допомогою вихрового витратоміру пару «ІРГА», який встановлено на вихідному паропроводі котла (рис. 3.9). Результати теплотехнічних досліджень процесу спалювання композиційного палива показані в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати теплотехнічних досліджень процесу спалювання композиційного палива

Паливо	Т газу, °С	Р пару, МПа	ККД котла, %	Витрата палива на 1 т пару, кг	К _{ее} , %
Кубові залишки	302, 4	0,4	81,8	80	-
КП (30 % мулові осади)	293,2	0,4	83,2	108	5,5
КП (35 % мулові осади)	291,8	0,4	84,6	115	6,6
КП (40 % мулові осади)	291,4	0,4	85,0	124	7,0
КП (45 % мулові осади)	289,5	0,4	85,8	133	8,6
КП (50 % мулові осади)	286,6	0,4	86,0	145	9,4

Аналіз теплотехнічних досліджень процесу спалювання показав, що при використанні композиційного палива в якості енергоресурсу згідно запропонованої формули (3.2) економія вуглеводневої сировини може досягати до 10 %. Експериментальні дослідження показали, що додавання до складу композиційного палива мулових осадів у кількості більше 50 % мас. значно погіршує якість процесу горіння, тоді як збільшення кількості даних відходів більше 65 % мас. потребує застосування палива підсвічування для підтримання стабільності горіння, що є економічно недоцільним.

Для визначення складу димових газів при спалюванні досліджуваного палива з метою встановлення відповідності використання даного енергоресурсу сучасним екологічним вимогам [89] використовувався газоаналізатор «ОКСИ» 5М-5НД СО₂, показання якого відображались в онлайн-режимі та реєструвались на пульті керування процесами спалювання (рис. 3.10). Відображення показань газоаналізатора в онлайн-режимі на даному пульті дозволяли регулювати режим роботи пальникового пристрою шляхом коригування подачі паливної суміші та вторинного повітря для підтримання постійного оптимального коефіцієнту α (коефіцієнт надлишку повітря) і температурних показників процесу горіння.

Порівняння результатів газового аналізу з діючими екологічними нормативами [89] гранично допустимих концентрацій (ГДК) шкідливих речовин при спалюванні досліджуваних палив наведено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5–Результати газового аналізу димових газів при спалюванні досліджуваних композиційних палив і вихідного вуглеводню

Паливо	α	CO, ppm	CO ₂ , %	O ₂ , %	NO, ppm	NO _x , ppm	SO ₂ , ppm
Кубові залишки	1,31	12	11,2	4,2	119	119	177
Композиційне паливо (30 % мулові осади)	1,36	20	10,8	4,7	123	123	171
Композиційне паливо (35 % мулові осади)	1,42	32	10,5	5,1	121	121	155
Композиційне паливо (40 % мулові осади)	1,43	41	9,8	5,8	114	114	168
Композиційне паливо (45 % мулові осади)	1,45	28	10,4	5,2	126	126	149
Композиційне паливо (50 % мулові осади)	1,47	52	9,6	6,4	134	134	156
Норматив ГДК[89]	-	250	-	-	500	500	250

Згідно з результатами, наведеними у табл. 4.5, застосування композиційного палива на основі кубових залишків нафтопереробки та мулових осадів очисних споруд в якості енергоресурсу відповідає сучасним екологічним вимогам. Таким чином, застосування даного виду палива в якості енергоресурсу вирішує не тільки енергетичну задачу виробництва більш дешевої теплової чи електричної енергії, а й екологічну проблему утилізації промислових відходів з метою зниження навантаження на навколишнє середовище.

4.2 Експериментальні дослідження процесів створення та спалювання водовугільного палива із застосуванням гідрокавітаційної активації

Як зазначено в роботі [76], застосування водовугільних суспензій в якості енергоресурсу замість твердого палива дозволяє не тільки значно поліпшити умови експлуатації котла або печі, але й значно знизити втрати палива при його транспортуванні, зберіганні й підготовці, а також знизити вартість виробництва

теплової й електричної енергії за рахунок ліквідації системи паливоприготування, включаючи сушку і розмелення на теплових станціях. Водовугільні суспензії на базі вугілля з малим вмістом золи дозволяють використовувати їх в топочних пристроях теплогенераторів, які призначені для роботи на мазуті, практично без реконструкції, що вже знайшло поширення в деяких країнах світу у зв'язку зі зростанням вартості традиційних видів вуглеводнів.

Не менш актуальним завданням є необхідність утилізації екологічно небезпечних промислових відходів, вирішення якої вимагає значних капіталовкладень. Зокрема, деякі види відходів вуглевидобувних, вуглезбагачувальних, коксохімічних та інших промислових підприємств можуть бути утилізовані лише вогневим методом, що також вимагає значних капітальних витрат. Тому поява нових більш дешевих в порівнянні з традиційними видів композиційних палив, до складу яких входять нетоварні компоненти або відходи виробництв, які необхідно утилізувати через негативний вплив на навколишнє середовище, є актуальним завданням. Таким чином, створення нових більш дешевих видів рідких композиційних палив на основі відходів різних виробництв може дати не тільки значний економічний ефект, а й вирішити ряд екологічних проблем.

Розробка ефективних процесів виробництва і застосування водовугільних палив (ВВП) повинна базуватися на науково обґрунтованих процесах фізичного та фізико-хімічного впливу на вихідне вугілля з урахуванням властивостей його органічної та мінеральної складових. Основними проблемами на шляху до розширеного застосування ВВП є: низькі показники стабільності основних технологічних характеристик, високі зольність та вміст сірки вихідного вугілля, низька ефективність відомих реагентів – пластифікаторів і стабілізаторів, а також відсутність науково обґрунтованих методичних рекомендацій і процесів фізико-хімічного впливу на вихідні вугільні компоненти з урахуванням їх властивостей.

Спалювання вугілля у вигляді ВВП має низку економічних, екологічних і експлуатаційних переваг в порівнянні з пилоподібним, в тому числі, шаровим спалюванням. Застосування ВВП дозволяє збільшити ефективність спалювання

вугілля, утилізувати вугільні шлами, зменшити вибухонебезпечність тонкодисперсного вугільного пилу на енергетичних котлах, знизити кількість викидів в атмосферу оксидів азоту і сірки.

Для ефективного застосування і спалювання ВВП має бути з максимально можливим вмістом твердої фази, мінімальної в'язкості і необхідної седиментаційної стійкості.

Водовугільне паливо відноситься до висококонцентрованих суспензій, оскільки воно повинно забезпечувати досить високу питому теплоту згоряння за рахунок вмісту вугільного пилу. Але максимальна концентрація вугільного пилу обмежена динамічною в'язкістю ВВП, яка в значній мірі залежить від масового вмісту вугілля в суспензії, оскільки підвищення в'язкості палива призводить до зростання енергетичних витрат при транспортуванні паливної суміші по трубопроводах і виникнення труднощів при розпилюванні під час спалювання.

З метою вирішення вищезазначених завдань проведено експериментальні дослідження [90] з метою створення рідкого водовугільного палива з низькою в'язкістю та підвищеною теплотворною здатністю.

В якості основи ВВП використано відходи вуглезбагачувального підприємства різної зольності від 10 до 60 %. Подрібнення високозольної вугільної сировини до дисперсності менше 500 мкм здійснювалось за допомогою барабанно-кульового млина. Далі подрібнене вугілля змішувалось з водою в необхідних пропорціях з додаванням пластифікатора – етиленгліколю. Потім до водовугільної суспензії в залежності від зольності вугільного компоненту додавався в необхідній кількості рідкий компонент, одержаний під час піролізної переробки без доступу повітря при температурі 420-470 °С гуми, поліетилену і пластмас з твердих побутових відходів. Цей компонент має питому теплоту згоряння 30 МДж/кг, а його використання в якості паливного компоненту замінює необхідність застосування кошовних вуглеводнів в якості палива підсвічування. Отримана суміш оброблялась з застосуванням ГКА на розробленому гідрокавітаційному пристрої (пункт 2.2.3). При здійсненні ГКА вугільний компонент додатково подрібнюється у водному середовищі, а також

відбувається кавітаційна активація часток вугілля, в ході якої вони розпадаються на окремі органічні складові, але з активною поверхнею та великою кількістю радикалів. Отримане в такий спосіб паливо є стабільним, пластичним, має високу ступінь вигорання та більш високу питому теплоту згоряння. Далі наведено відсотковий вміст вихідних компонентів для отримання колоїдного ВВП, що містить:

- дрібнодисперсний вугільний компонент - 65-70 % мас .;
- пластифікатор – 1 % мас .;
- піролізний компонент - 2-18 % мас .;
- воду - 11-32 % мас . (решта).

Включення до складу водовугільної суміші піролізного компонента в кількості 2-18 % мас. знижує в'язкість, покращує текучість і седиментаційну стійкість (більше 30 діб) одержуваного водовугільнопіролізного палива (ВВПП) за рахунок утворення адсорбційних шарів навколо частинок вугілля, просочених водою, що запобігають випаданню твердих часток суспензії в осад. Також слід зазначити, що додавання піролізного компонента до складу паливної суміші підвищує питому теплоту згоряння ВВПП і забезпечує його стабільне горіння без застосування палива підсвічування високої вартості.

Застосування в якості пластифікатора етиленгліколю дозволяє значно знизити в'язкість суспензії для забезпечення якісного розпилу палива при спалюванні і зниження енерговитрат на перекачку паливної суміші по трубопроводах, а також значно знизити температуру застигання, що дуже важливо при використанні даного виду енергоресурсу при низьких температурах.

Експериментально встановлено, що при вмісті в паливній суспензії вугілля більше 70% мас. різко зростає в'язкість, що значно погіршує якість розпилу при спалюванні і збільшує енерговитрати на перекачування палива по трубопроводах під тиском, а при вмісті вугілля менше 65% мас. значно знижується ефективність горіння і питома теплота згоряння палива.

Експериментально встановлено залежність (рис. 4.7) необхідного вмісту піролізного компонента у складі паливної суміші від зольності вихідного вугільного компонента.

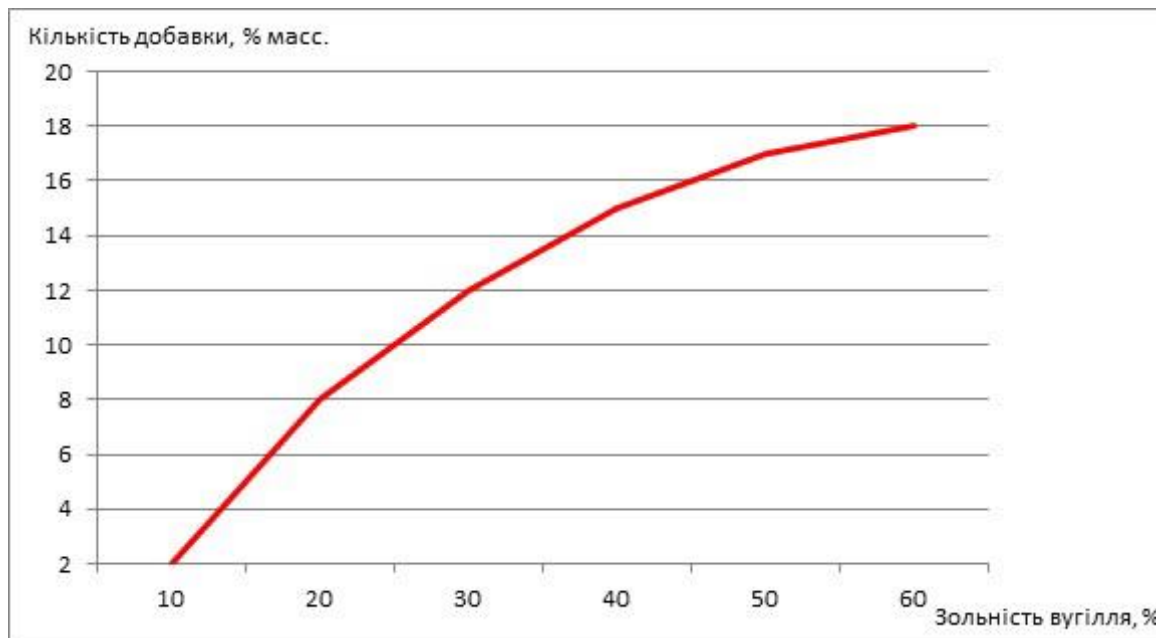


Рисунок 4.7 – Залежність необхідного вмісту піролізного компонента у складі паливної суміші від зольності вихідного вугільного компонента

Згідно з залежністю, яка показана на рис. 4.1, при використанні в паливній суспензії високозольного вугілля або відходів вуглезбагачувальних підприємств додавання піролізного компонента менше 2 % від загальної маси палива не забезпечує стійке горіння без застосування палива підсвічування, а також значно знижується седиментаційна стійкість. Додавання в паливну суспензію піролізного компонента більше 18 % від загальної маси палива недоцільно, так як даної кількості достатньо для забезпечення стійкого горіння без застосування палива підсвічування і седиментаційної стійкості більше 30 діб.

Характеристики одного з компонентних співвідношень досліджуваного ВВПП показано в табл. 4.6. Згідно з даними табл. 4.6, запропоноване ВВП з додаванням піролізного компонента має поліпшені теплофізичні та реологічні характеристики, ефективно для тривалого зберігання, транспортування, надійного запалення і спалювання, перекачування по трубопроводах під тиском.

Таблиця 4.6 – Характеристики досліджуваного ВВПП

Вміст вугільного компонента, % мас.	65
Вміст етиленгліколя, % мас.	1
Вміст піролізного компонента, % мас.	13
Вміст води, % мас.	21
Зольність вугільного компонента, %	33
Динамічна в'язкість, Па*с	1,2
Питома теплота згоряння без додавання піролізного компонента, МДж/кг	13,1
Питома теплота згоряння з піролізним компонентом, МДж/кг	17,2
Седиментаційна стійкість, діб	більше 30

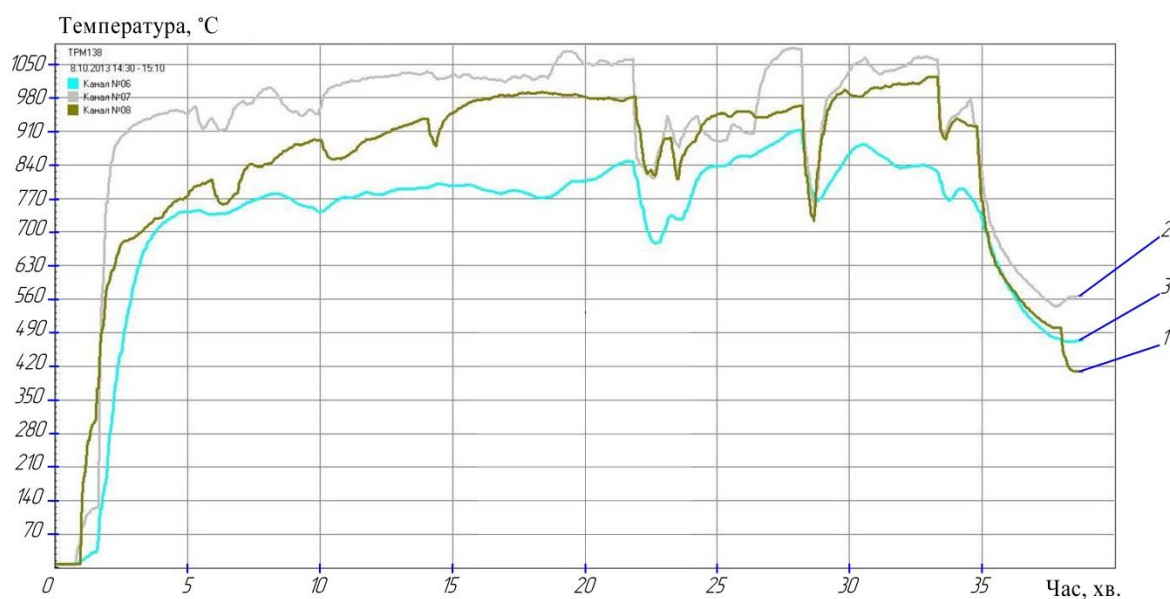
З метою дослідження процесів горіння ВВПП проведено спалювання паливної суміші, характеристики якої показано в табл. 4.6. У ході даного дослідження отримано стійке горіння паливної суміші на протязі 40 хвилин без зривів факела. При спалюванні даного виду композиційного палива проводилось вимірювання температурних показників в проточній частині пальникового пристрою в трьох зонах: зоні впорскування палива, камері згоряння та на виході з пальникового пристрою. Результати вимірювання температурних показників процесу горіння ВВПП показано на рис. 4.8. Процес горіння ВВПП показано на рис. 4.9.

Згідно результатів, показаних на рис. 4.8, температура горіння досліджуваної паливної суміші складала 950–1050 °С, що є достатнім для ефективного спалювання даного виду палива.

Запропоноване ВВПП з додаванням піролізного компонента має поліпшені теплофізичні, реологічні і енергетичні характеристики, ефективно для тривалого зберігання, трубопровідного транспортування і перекачування, надійного запалювання та спалювання.

Таким чином, розроблено спосіб виготовлення та спалювання водовугільного палива [91] з відходів вуглезбагачувальних підприємств високої зольності, яке відрізняється високими калорійністю та якістю розпилювання, що забезпечують надійне запалювання та горіння без використання палива підсвічування при

спалюванні, а також низькою в'язкістю і задовільною седиментаційною стійкістю для здійснення трубопровідного транспортування і тривалого зберігання.



1 – температура газів в зоні впорскування палива; 2 – температура газів в камері згоряння;
3 – температура газів на виході з пальникового пристрою

Рисунок 4.8 – Зміна температурних показників при спалюванні ВВП

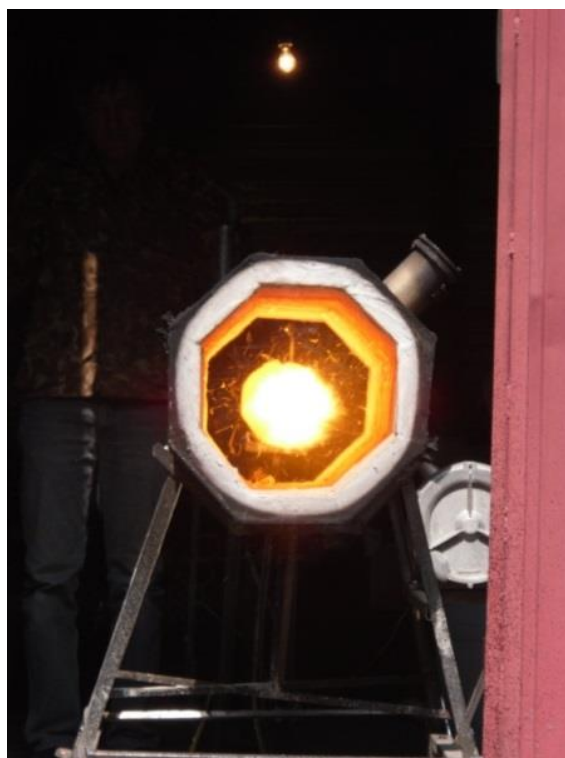


Рисунок 4.9 – Процес горіння ВВП

Запропонований склад композиційного палива із застосуванням в якості основного компонента високозольного вугілля з додаванням до складу паливної суспензії піролізного компонента, отриманого шляхом піролізної переробки відходів гуми, поліетилену і пластику, дозволяє утилізувати вогневим методом відразу кілька видів відходів, а також дозволяє виключити застосування для підвищення ефективності спалювання дорогого дефіцитного палива підсвічування. Крім того, запропоноване композиційне паливо може використовуватися теплоенергогенеруючими підприємствами без суттєвої реконструкції існуючого обладнання як альтернатива рідким і газоподібним паливам високої вартості.

4.3 Безстічна утилізація відпрацьованої рідини гідророзриву пласта нафтогазових свердловин у складі композиційного палива

Важливою задачею економіки України [92] є забезпечення енергоресурсами, в тому числі за рахунок збільшення власного видобування нафти, природного газу, вуглеводнів із сланцевих порід, ущільнених піщаників, а також освоєння ресурсів метану вугільних родовищ.

До найбільш розповсюджених технологій інтенсифікації видобування вуглеводнів, особливо важковидобувних, відноситься гідравлічний розрив пласта (ГРП). Технологія гідророзриву пласта відома досить давно і використовується для відновлення дебіту газових та нафтових свердловин. Вона полягає у закачуванні в свердловину гелеподібної суспензії з піском (проппантом) під тиском, перевищуючим величину тиску розриву пласта. Внаслідок такого впливу в пласті свердловини утворюються тріщини, через які збільшується приток вуглеводнів. Потім спеціальна хімічна речовина (дегелеватель) руйнує структуру і знижує в'язкість суспензії для гідророзриву, після чого рідку фазу відкачують на поверхню, а пісок залишається в тріщинах для запобігання їх змикання.

Відмінністю процесу видобування нетрадиційного газу полягає у застосуванні великої кількості рідини, яка використовується для гідророзриву –

до 20000 м³ [93]. До того ж у процесі видобування для підтримання дебіту свердловини операцію гідророзриву слід проводити декілька разів на рік. В результаті цього виникає ряд екологічних проблем, головною з яких є потреба в утилізації великої кількості відпрацьованої рідини гідророзриву (від 500 до 20000 м³ при обробці однієї свердловини). Відпрацьована рідина ГРП являє собою хімічно забруднену воду, яка після відкачування на поверхню зберігається в спеціальних відкритих гідроізольованих амбарах і підлягає утилізації, оскільки дана рідина, як правило, дуже мінералізована та насичена великою кількістю органічних речовин. До складу таких рідин можуть входити близько 85 токсичних речовин, деякі мають наступне призначення:

- соляна кислота – сприяє розчиненню мінералів, зокрема карбонатів;
- етиленгліколь – запобігає утворенню відкладень на внутрішніх стінках труб;
- ізопропіловий спирт, гуарова камедь та борна кислота – використовуються в якості згущувачів та речовин, що підтримують необхідний рівень в'язкості;
- глутаральдегід та диметилформамід – протидіють утворенню корозії;
- нафта в легких фракціях – використовується для зниження тертя;
- пероксодисульфат амонію – протидіє розкладанню гуарової камеді;
- хлорид калію – запобігає взаємодії рідини з ґрунтом;
- карбонат натрію або калію – використовують для підтримання кислотно-лужного балансу.

Серед наявних у відпрацьованій рідині ГРП забруднювачів найбільш екологічно небезпечними є з'єднання бору та аміни, які утворюються в результаті розкладання складових хімічних сполук. У разі руйнування гідроізоляційного покриття ці токсичні сполуки потрапляють до ґрунту та ґрунтових вод, а при їх випаровуванні з відкритих амбарів відбувається забруднення атмосферного повітря. Повторне використання відпрацьованої рідини для приготування нової суспензії ГРП неможливе через наявність значної кількості дегелевателя та зміни складу внаслідок утворення нових хімічних сполук. З метою запобігання зазначених екологічних проблем слід застосовувати безстічну технологію переробки відходів [81], які утворюються в період проведення ГРП.

Актуальність вирішення проблеми утилізації відпрацьованої рідини ГРП нафтових свердловин зумовлена тим, що в результаті проведення серії обробок кількість відходів може становити 500-700 тис. м³. Велика кількість забрудненої води накопичується і в районах інтенсивного видобутку сланцевого газу. При цьому нафтогазовидобувні компанії нерідко позбуваються від відходів шляхом їх розпилювання або випаровування з поверхні амбарів в атмосферу [94].

Іноді відпрацьовану рідину ГРП зливають на існуючі міські очисні споруди, які не призначені для очищення та знешкодження стоків даного походження. Закачування такої рідини в глибинні підземні структури також не є екологічно безпечним, оскільки відходи можуть потрапити в ґрунтові води та значно погіршити якість питної води цілого регіону.

Існує декілька методів концентрування відпрацьованих рідин ГРП з виділенням мінеральних домішок. Так, американська компанія пропонує використовувати для цього спеціальний варіант зворотного осмосу – технологію VSEP обробки концентрату вібрацією, яка сприяє спонтанному очищенню поверхні мембран від забруднень [95]. Дослідники Масачусетського технологічного інституту (США) дослідили можливість демінералізації рідини ГРП за допомогою електродіалізу [96], хоча ні цим способом, ні зворотним осмосом не можна очистити воду від органічних домішок та виділити мінеральні солі у вигляді сухих продуктів, придатних для повторного застосування.

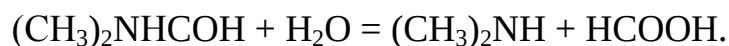
Компанія General Electric використовує для концентрування відпрацьованої рідини ГРП мембранну дистиляцію, створюючи необхідну різницю температур за допомогою теплового насоса [97]. В Масачусетському технологічному інституті розроблено метод випарювання рідини шляхом її продувки спеціальним газом-носієм при невеликій різниці температур [98]. Вищезгадані методи не дають комплексного вирішення проблеми промислових стоків даного виду.

Загальний аналіз технологій, які могли б застосовуватись для очищення відпрацьованої рідини ГРП, показано в роботі [99]. Слід зазначити, що не всі описані в даній роботі технології дозволяють хоча б частково вирішити вказану

проблему (через неможливість повного відділення від розчину та знешкодження значної кількості органічних речовин, які містяться в даних стоках).

В роботі [100] показано, що застосування гідрокавітаційної активації в процесі приготування та спалювання водопаливних сумішей дає можливість утилізувати та знешкоджувати екологічно небезпечні стоки різноманітного походження, в тому числі фенольні стічні води, вогневим методом.

Отже, жодна з існуючих технологій не забезпечувала повної безстічної утилізації відпрацьованої рідини ГРП з максимально можливим використанням отримуваних при її переробці супутніх продуктів. В Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України проведено експериментальні дослідження [101-105] з метою розробки технології безстічної утилізації відпрацьованої рідини ГРП. Відбір проб даного виду промислових стоків здійснено з амбару розвідувальної свердловини «Беляївська-400», що розташована поблизу с. Веселе Первомайського району Харківської області. Зазначена рідина мала сильний запах амінів, які утворилися при гідролізі диметилформаміду у кислотному або лужному середовищі за реакцією



Особливо прискорюють цю реакцію оксиди металів, що виступають в якості каталізаторів гідролізу.

В таблиці 4.7 наведено результати аналізу складу відібраної відпрацьованої рідини ГРП. Із усіх наявних домішок, виявлених у відпрацьованій рідині ГРП свердловини «Беляївська-400», найбільш токсичною та небезпечною речовиною є леткі аміни (діметиламін). Це речовина 2 класу небезпечності, гранично допустима концентрація у повітрі населених пунктів становить 0,005 мг/м³, у повітрі робочої зони 1 мг/м³, у воді водоймищ 0,1 мг/л. Межа сприйняття запаху 2,5 мг/м³[106].

Враховуючи результати аналізу складу відпрацьованої рідини ГРП свердловини «Беляївська-400», розглянуто 5 варіантів технологічних схем утилізації даних промислових стоків:

- 1) Пряме приготування композиційного палива з додаванням в якості водної фази відпрацьованої рідини ГРП (рис. 4.10);
- 2) Часткове концентрування відпрацьованої рідини ГРП з подальшим приготуванням композиційного палива (рис. 4.11);
- 3) 20-кратне концентрування відпрацьованої рідини ГРП зворотним осмосом, випарюванням, з подальшим приготуванням композиційного палива (рис. 4.12);
- 4) 40-кратне концентрування відпрацьованої рідини ГРП зворотним осмосом, випарюванням, з подальшим приготуванням композиційного палива (рис. 4.13);
- 5) 40-кратне концентрування відпрацьованої рідини ГРП без очищення конденсату зворотним осмосом, випарюванням, з подальшим приготуванням композиційного палива (рис. 4.14).

Таблиця 4.7 – Склад відпрацьованої рідини ГРП

Назва показника	Одиниці виміру	Значення показника
Колір	-	жовтуватий
Запах	-	сильний аміний
Каламутність	-	каламутна
pH	-	6,06
Жорсткість загальна	мг-екв/л	90,0
Лужність загальна	мг-екв/л	10,0
Кальцій	мг/л	77
Магній	мг/л	13
Fe ²⁺ у не фільтрованій пробі	мг/л	0,64
Fe ³⁺ у не фільтрованій пробі	мг/л	7,96
Fe ²⁺ у фільтрованій пробі	мг/л	0,16
Fe ³⁺ у фільтрованій пробі	мг/л	3,34
NH ₄ ⁺ включно з амінами	мг/л	30,0
Сульфати	мг/л	122,4
Хлориди	мг/л	22100
Сухий залишок	мг/л	38430
Прожарений залишок (600°C)	мг/л	36361
Втрати при прожарюванні	мг/л	2069
Окислюваність за біхроматним методом	мг/л	2400

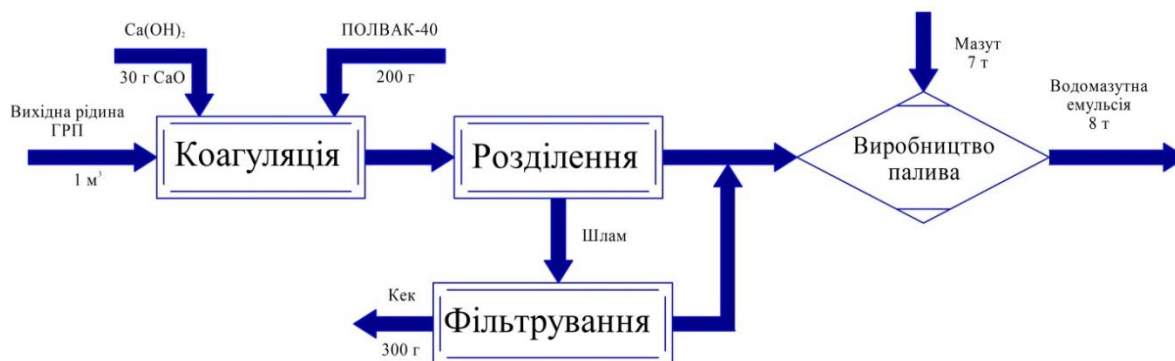


Рисунок 4.10 – Принципова схема прямого приготування композиційного палива з додаванням відпрацьованої рідини ГРП

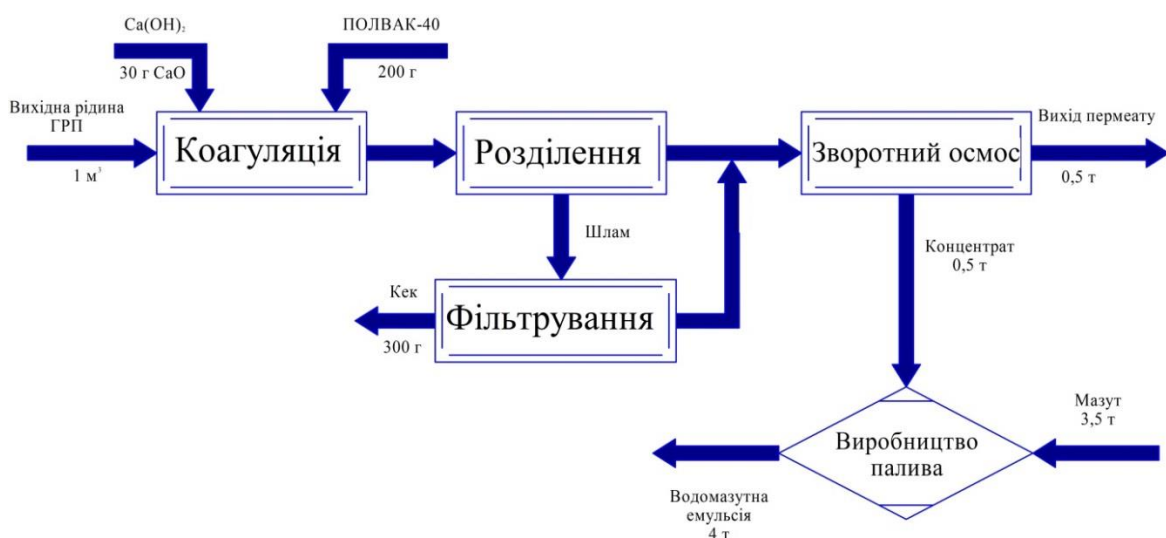


Рисунок 4.11 – Принципова схема часткового концентрування відпрацьованої рідини ГРП з подальшим приготуванням композиційного палива

В даних схемах використовуються фізико-хімічні методи очистки для отримання очищеної технічної води та супутніх речовин, придатних до повторного використання, а також концентрату відпрацьованої рідини ГРП, який з застосуванням гідрокавітаційної активації вводиться до складу композиційного палива та спалюється.

Техніко-економічні та екологічні результати проведених досліджень показали, що найбільш раціональним є процес утилізації відпрацьованої рідини ГРП, принципова схема якого показана на рис. 4.14. Дана схема включає реагентну коагуляційну очистку відпрацьованої рідини ГРП, відділення твердих

часток, концентрування очищеної рідини зворотним осмосом з подальшим 20-кратним випарюванням концентрату і кристалізації мінеральних солей. Пермеат зворотного осмосу і мінеральні солі можуть використовуватися для приготування свіжої рідини ГРП, а також в ряді інших галузей промисловості та комунального господарства. Маточний розчин кристалізації запропоновано застосовувати в якості водної фази (ВФ) при отриманні композиційного палива для спалювання в котлах промислових теплогенеруючих об'єктів.

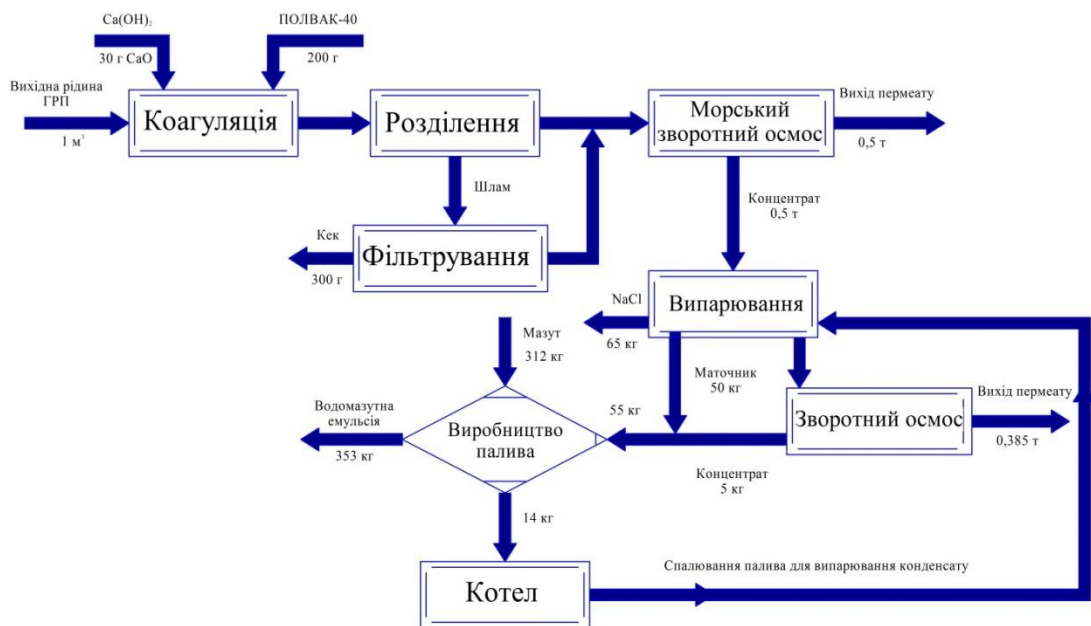


Рисунок 4.12 – Принципова схема 20-кратного концентрування відпрацьованої рідини ГРП зворотним осмосом, випарюванням, з подальшим приготуванням композиційного палива

Даний метод відрізняється тим, що заключною стадією у всіх вищезазначених схемах (рис. 4.10–4.14) процесів утилізації відпрацьованої рідини ГРП (після застосування ряду фізико-хімічних методів очистки) є приготування композиційного палива та його спалювання на промисловому теплогенеруючому обладнанні. Саме на даній стадії відбувається термодеструкція та знешкодження екологічно небезпечних сполук (в т.ч. амінів, які не підлягають виділенню та знешкодженню фізико-хімічними методами), що дозволяє зробити даний метод безстічним.

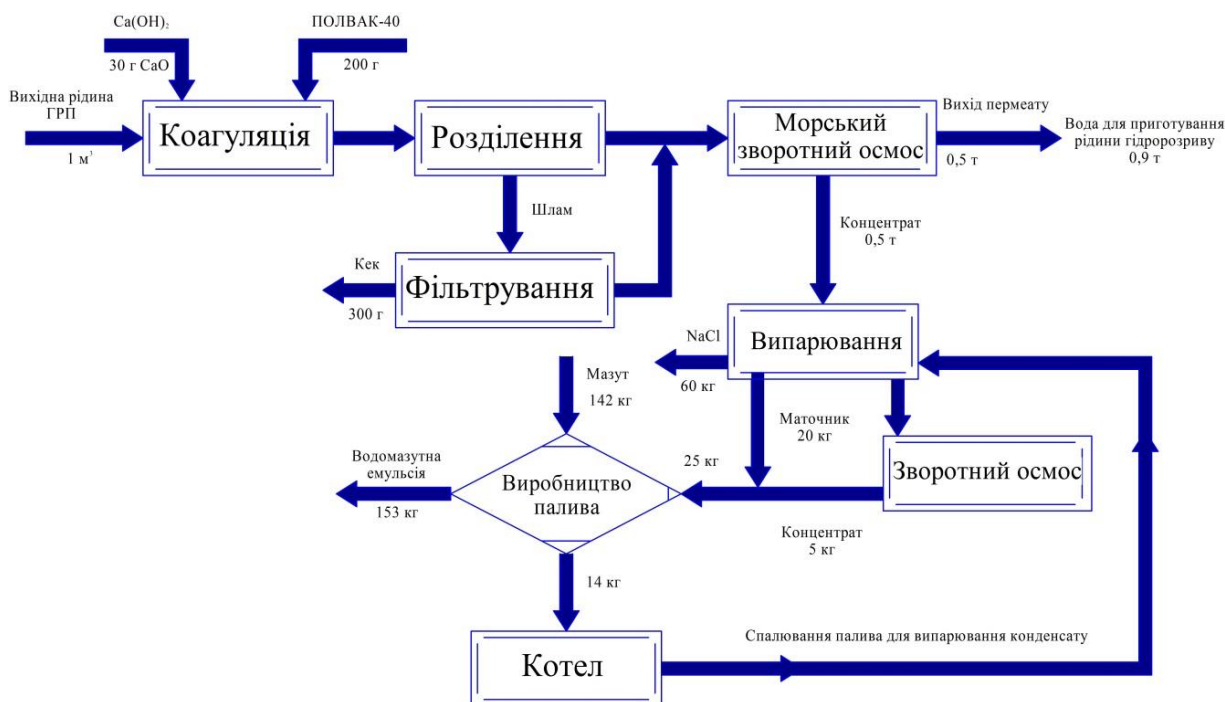


Рисунок 4.13 – Принципова схема 40-кратного концентрування відпрацьованої рідини ГРП зворотним осмосом, випарюванням, з подальшим приготуванням композиційного палива

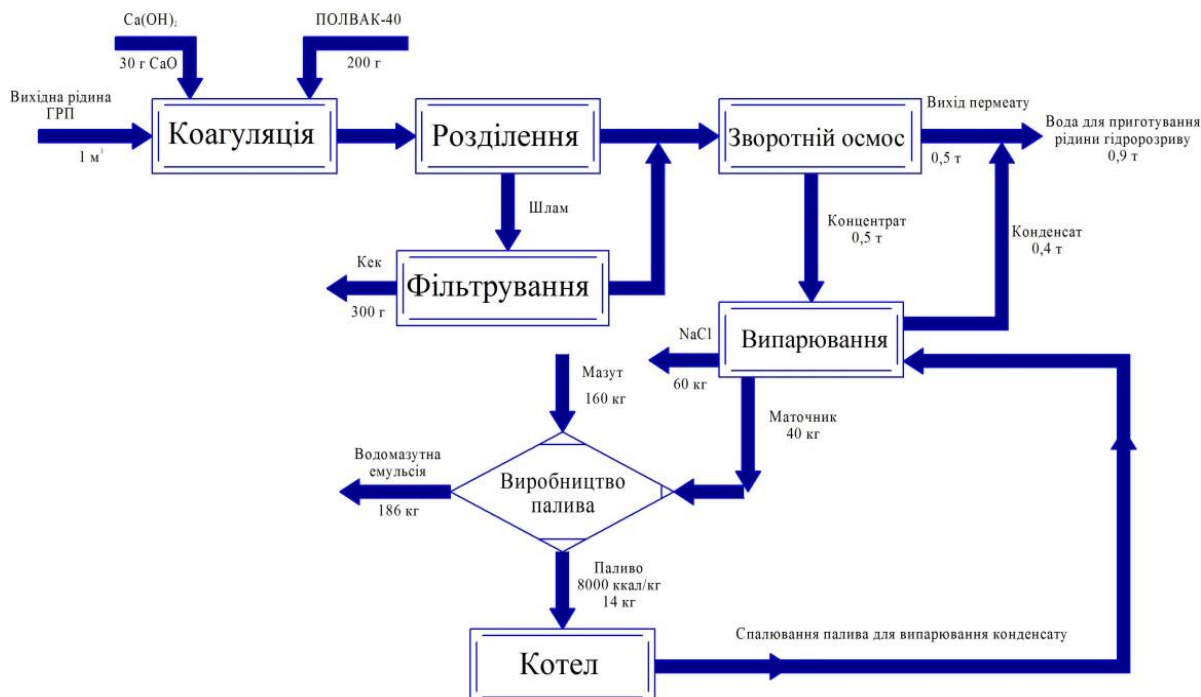


Рисунок 4.14 – Принципова схема 40-кратного концентрування відпрацьованої рідини ГРП без очищення конденсату зворотним осмосом, випарюванням, з подальшим приготуванням композиційного палива

Технологія створення композиційного палива з застосуванням в якості водної фази концентрату відпрацьованої рідини ГРП заснована на застосуванні гідрокавітаційної активації [1], який дозволяє отримувати високоякісні паливні емульсії та суспензії з заданими характеристиками.

За замовленням компанії Shell та Київського інституту нетрадиційного газу, за участю Науково-технічного концерну «ІПМаш» НАН України проведено дослідження процесів створення, підготовки та спалювання композиційних палив з використанням створеного енерготехнологічного комплексу [84], який призначено також для визначення впливу різноманітних факторів на зміну реологічних та енергоекологічних характеристик паливних емульсій та суспензій. Ключовим вузлом даного комплексу є гідрокавітаційний пристрій (пункт 2.2.3), за допомогою якого проводиться гідродинамічна кавітаційна активація компонентів з метою отримання композиційного палива з заданими споживчими властивостями. Режими ефективного функціонування ГКП визначені в роботах [7, 107].

Важливими характеристиками будь-якого композиційного палива є його стабільність (стійкість до розшарування з плином часу) та динамічна в'язкість. Саме ці властивості визначають можливість та тривалість зберігання палива, технології та методи його розпилювання і спалювання, а також умови транспортування.

Досліджувані модельні композиційні паливні матеріали виготовляли на основі дизельного пального (ДП) з додаванням відпрацьованої рідини ГРП з метою визначення впливу об'єму та концентрації ВФ на теплофізичні і реологічні характеристики отримуваної паливної суміші. Потім здійснювали гідрокавітаційну обробку всіх зразків отримуваних палив.

Як зазначено, до складу рідини ГРП входять хімічні реагенти-дегелеватели, які після обробки свердловини перетворюють гель в нев'язку систему. Тому їх залишки у відпрацьованій рідині або її концентраті руйнують структуру паливної емульсії з компонентами рідини ГРП, здійснюють деемульгуючу дію, знижують її стабільність. Тому особлива увага приділялась стійкості отримуваних паливних

емульсій до розшарування (стратифікації). Порівняння характеристик досліджуваних зразків отриманого композиційного палива наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Характеристики отриманого композиційного палива

Характеристика ВФ	Склад палива, % мас.	Період стабільності зразка	Питома теплотворна здатність, МДж/кг
Рідина ГРП, кратність концентрації: 2	95 % ДП + 5 % ВФ	12 діб	40,9
	90 % ДП + 10 % ВФ	10 діб	38,5
	85 % ДП + 15 % ВФ	6 діб	36,7
	80 % ДП + 20 % ВФ	96 годин	34,4
Рідина ГРП, кратність концентрації: 10	95 % ДП + 5 % ВФ	10 діб	40,9
	90 % ДП + 10 % ВФ	96 годин	38,6
	85 % ДП + 15 % ВФ	72 години	36,7
	80 % ДП + 20 % ВФ	48 годин	34,5
Рідина ГРП, кратність концентрації: 20	95 % ДП + 5 % ВФ	8 діб	41,0
	90 % ДП + 10 % ВФ	72 години	38,8
	85 % ДП + 15 % ВФ	48 годин	36,8
	80 % ДП + 20 % ВФ	26 годин	34,7

Згідно з даними табл. 4.8, з підвищенням кількості і концентрації доданої рідини стабільність паливних зразків зменшується (внаслідок підвищення концентрації дегелевателів).

Експериментально виявлено ще одну важливу особливість – підвищення кількості та концентрації відпрацьованої рідини ГРП призводить до зниження в'язкості паливної емульсії, в той час як у випадку застосування в якості водної фази водопровідної води в'язкість паливної суміші значно підвищується. Це пов'язано з підвищенням кількості амінів та органічних домішок, які можуть застосовуватись в якості пластифікаторів при приготуванні емульсій та суспензій. Визначення динамічної в'язкості здійснювалось за допомогою ротаційного віскозиметра BrookfieldLVDV-E. Показники динамічної в'язкості отриманих зразків композиційного палива наведено в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Динамічна в'язкість отриманих зразків композиційного палива

Склад палива, % мас.	Динамічна в'язкість, мПа·с			
	Кратність концентрації рідини ГРП: 2	Кратність концентрації рідини ГРП: 10	Кратність концентрації рідини ГРП: 20	Водопровідна вода
100% ДП+ 0% ВФ	3,5	3,5	3,5	3,5
95% ДП + 5% ВФ	3,3	3,0	2,8	7,2
90% ДП +10% ВФ	3,2	2,9	2,7	15,8
85% ДП +15% ВФ	3,1	2,8	2,6	29,4
80% ДП +20% ВФ	3,0	2,7	2,4	38,0

Згідно з даними табл. 4.9, в'язкість паливної емульсії, отриманої з додаванням концентрату відпрацьованої рідини ГРП в якості водної фази, знижується навіть у порівнянні з в'язкістю вихідного вуглеводню. Даний результат є принципово важливим, оскільки дозволяє зробити висновок про те, що використання відпрацьованих рідин ГРП при створенні композиційних палив на основі мазуту та інших важких вуглеводнів може приводити до поліпшення їх споживчих характеристик, зменшенню енерговитрат на підігрів та перекачування, підвищення якості розпилювання при спалюванні і, як наслідок, зниження хімічного та механічного недопалу. Оскільки досліджувані проби композиційного палива створено на основі дизельного пального, для підтвердження отриманих результатів зміни реологічних характеристик у випадку застосування більш важких вуглеводнів, також проведено дослідження процесів виробництва паливної суміші на основі сирої нафти. Реологічні характеристики отриманих паливних сумішей показано в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Реологічні характеристики зразків композиційного палива

Вид палива	Характеристики пробипалива			
	Динамічна в'язкість, мПа·с			Стабільність, діб
	Після гідрокавітаційної обробки	Через 3 добы	Через 7 діб	
Вихідна нафта	8300	8300	8300	—
Нафта + 20 % 10-кратного концентрату рідини ГРП	6950	7400	7450	20
Нафта + 20 % 20-кратного концентрату рідини ГРП	6650	7000	7000	14

Згідно з даними табл. 4.10, в'язкість композиційного палива на основі нафти з додаванням в якості водної фази концентрату відпрацьованої рідини ГРП знижується у порівнянні з вихідним вуглеводнем. Незначне підвищення в'язкості паливної суміші з плином часу пояснюється утворенням адсорбційно-сольвантного шару на кордоні розділу фаз водопаливної емульсії. Такі шари утворюються на протязі декількох днів, відрізняються високими показниками міцності, в'язкості, і утворюють структурно-механічні бар'єри, які захищають краплі води від злиття при зіткненнях.

Як вже зазначалося, основними екологічно небезпечними речовинами у складі відпрацьованої рідини ГРП є органічні аміни. З метою визначення ефективності вогневої утилізації даних хімічних сполук розроблено та створено систему відбору проб димових газів з подальшим барботуванням через кислотний розчин при спалюванні композиційного палива. Принципова схема даної системи показана на рис. 4.15.



Рисунок 4.15 – Принципова схема системи відбору проб димових газів при спалюванні композиційного палива

Згідно зі схемою рис. 4.15, в процесі спалювання композиційного палива димові гази відбираються через воронку і для охолодження за допомогою нагнітача прокачуються через теплообмінник, після чого барботуються

(пропускаються) через кислотний розчин. Кількість прокачаних газів вимірюється за допомогою газового лічильника ГСБ-400. При наявності в димових газах амінів останні уловлюються кислотним розчином. Склад димових газів визначався за допомогою газоаналізатора «ОКСИ» 5М-5 НД CO_2 .

З використанням методів чисельного моделювання проведено теоретичні дослідження процесів спалювання композиційного палива, які дозволили визначити ефективні режими роботи пальникового пристрою. Оскільки перспективним для промислового впровадження технології вогневої утилізації концентрату відпрацьованої рідини ГРП є використання в якості вуглеводневої сировини мазутів різних марок, проведено порівняльне чисельне моделювання процесів горіння композиційного палива, виготовленого на основі ДП та мазуту. Результати даного моделювання, які показують розподілення температур в пальниковому пристрої при спалюванні композиційного палива, показані на рис. 4.16.

Порівняння результатів чисельного моделювання (рис. 4.16) свідчить про те, що процес горіння композиційних палив на основі мазуту та ДП відрізняються незначно, різниця температур складає 60-90 °С. Це вказує на можливість використання як дизельного пального, так і мазуту в якості базового компоненту паливної емульсії, яку виробляють з додаванням концентрату відпрацьованої рідини ГРП для ефективної вогневої утилізації.

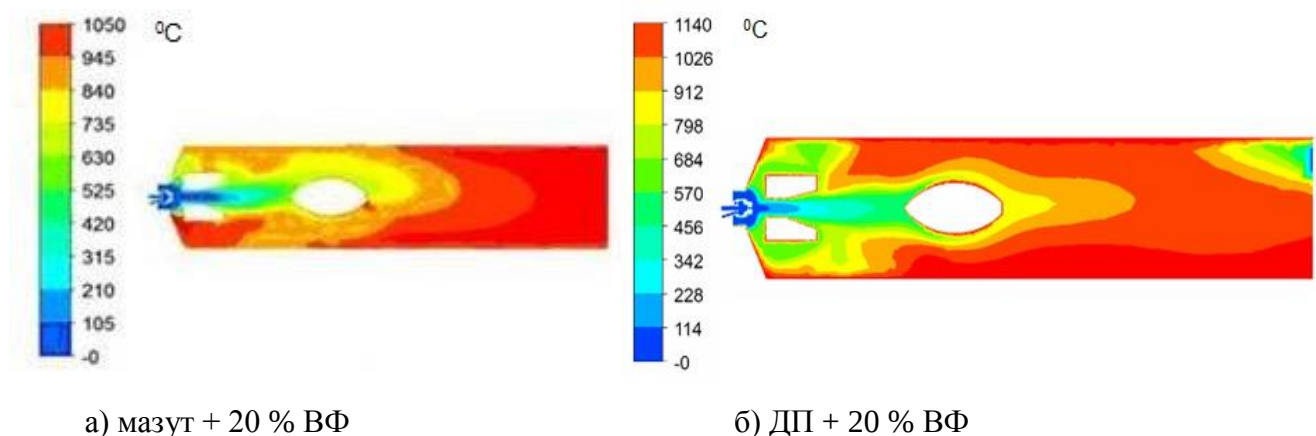


Рисунок 4.16 – Розподілення температур в пальниковому пристрої при спалюванні композиційного палива

Проведено експериментальні дослідження процесів горіння композиційного палива на основі ДП з додаванням відпрацьованої рідини ГРП, а також її 2-, 10- та 20-кратних концентратів. Процес горіння композиційного палива в пальниковому пристрої зі створеною системою відбору проб димових газів показано на рис. 4.17.

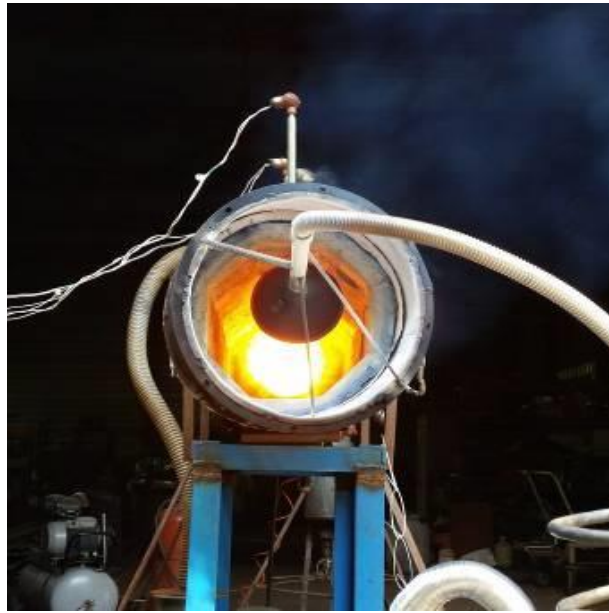


Рисунок 4.17 – Процес горіння композиційного палива

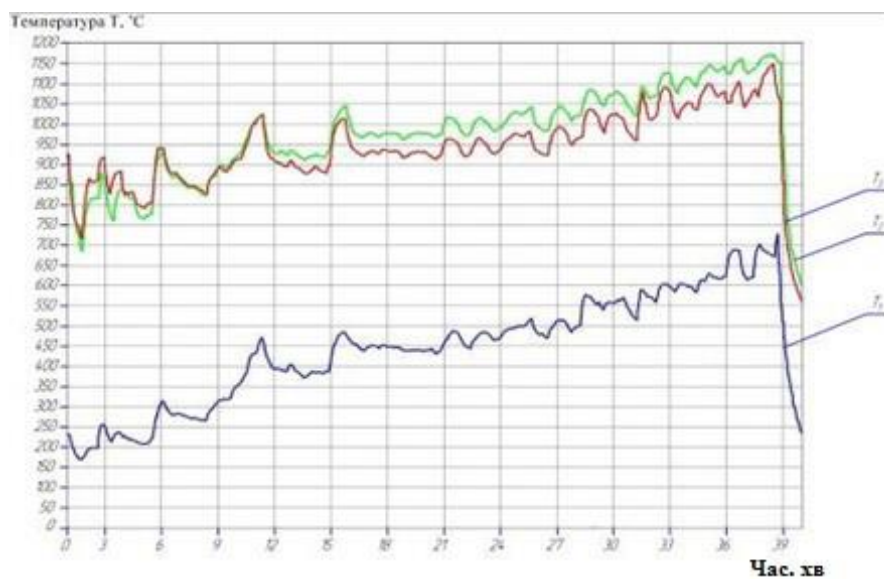


Рисунок 4.18 – Графік зміни температурних показників в пальниковому пристрої при спалюванні композиційного палива

Таблиця 4.11 – Результати газового аналізу продуктів згоряння композиційного палива

Досліджуване паливо	O ₂ , %	CO, мг/м ³	NO, мг/м ³	SO ₂ , мг/м ³	CO ₂ , %	Коеф. надлишку повітря, α	NO _x , мг/м ³	T, °C
80 % ДП + 20 % ВФ (рідина ГРП)	5,1	45	103	68	12,2	1,21	160	883,5
80 % ДТ + 20 % ВФ (2-кратний концентрат рідини ГРП)	4,2	70	109	76	12,1	1,27	168	903,5
80 % ДТ + 20 % ВФ (10-кратний концентрат рідини ГРП)	4,1	55	112	85	11,9	1,24	171	887,0
80 % ДТ + 20 % ВФ (20-кратний концентрат рідини ГРП)	4,4	60	116	100	12,4	1,26	177	898,6
Норматив ГДК [82]	–	250	–	250	–	–	500	–

Зміна температурних показників процесу горіння композиційного палива в пальниковому пристрої показана на рис. 4.18.

Згідно графіку рис. 4.18, температура горіння в зоні факелу (T₂ та T₃) становили 1050-1150 °C, що є достатнім для термічної деструкції органічних речовин, які містяться у відпрацьованій рідині ГРП. Температура в зоні впорскування палива (T₁) становила 450-550 °C. Дослідження процесів горіння тривало 40 хвилин. Результати аналізу складу димових газів показано в табл. 4.11.

Газовий аналіз продуктів згоряння (табл. 4.11) при спалюванні досліджуваного композиційного палива показав повну відповідність діючим екологічним вимогам [89], а також повне вогневе знешкодження амінів у всіх зразках паливних емульсій. Таким чином, доведено можливість ефективної вогневої утилізації шкідливих речовин, що містяться у складі відпрацьованої рідини ГРП.

4.4 Висновки за розділом 4

Експериментально досліджено ефективність використання гідрокавітаційної активації під час виготовлення та спалювання композиційних палив на основі

вуглеводнів та рідких вологовмісних промислових відходів. Вперше встановлено залежність збільшення питомої теплоти згоряння композиційного палива від режиму гідрокавітаційної активації при його отриманні, що дозволяє визначати ефективні режими роботи гідрокавітаційного обладнання під час створення та спалювання цього виду енергоресурсу. Експериментально досягнуто збільшення на 16 % питомої теплоти згоряння композиційного палива на основі кубових залишків нафтопереробки з додаванням мулових осадів комунальних очисних споруд, яку одержано з використанням ГКА, в порівнянні з паливною композицією, яку одержано з цих же вихідних компонентів шляхом стандартного емульгування [42, 59, 60].

Проведено промислові випробування енергоефективності та екологічності застосування гідрокавітаційної активації при створенні та спалюванні композиційних палив на основі некондиційних вуглеводнів та мулових осадів очисних споруд, результати яких довели можливість вирішення не тільки екологічних проблем утилізації рідких та вологовмісних відходів, а й економити до 10 % вуглеводневої сировини при виробництві теплової та електричної енергії [80, 81, 82].

Проведено експериментальні дослідження процесів створення та спалювання водовугільного палива з застосуванням гідрокавітаційної активації. За результатами експериментальних досліджень розроблено спосіб виготовлення та спалювання водовугільного палива (патент України № 114935) з відходів вуглезбагачувальних підприємств, яке відрізняється високими калорійністю та якістю розпилювання, що забезпечують надійне запалювання та горіння без використання підсвічування при спалюванні, а також низькою в'язкістю і задовільною седиментаційною стійкістю для здійснення трубопровідного транспортування і тривалого зберігання [90, 91].

За замовленням компанії Shell та Київського інституту нетрадиційного газу, за участю Науково-технічного концерну «ІПМаш» НАН України проведено експериментальні дослідження процесів створення та спалювання композиційного палива з додаванням в якості водної фази концентрату

відпрацьованої рідини гідророзриву пласта нафтогазових свердловин, результати яких засвідчили можливість безстічної утилізації даного виду промислових відходів у складі спалюваних паливних сумішей. Аналіз складу димових газів при спалюванні даного виду енергоресурсу показав повну відповідність діючим екологічним вимогам та повну відсутність амінів, що свідчить про ефективність утилізації екологічно небезпечних речовин, які входять до складу відпрацьованої рідини ГРП, вогневим методом [92, 101, 102, 103, 104].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-прикладну проблему підвищення ефективності процесів створення та спалювання композиційного палива за допомогою гідрокавітаційної активації. До основних наукових і практичних результатів належать такі:

1. Вперше розроблено методологію визначення впливу гідрокавітаційної активації на теплофізичні, гідродинамічні, фізико-хімічні, енергетичні та екологічні показники процесів створення та спалювання паливних емульсій і суспензій з високим вмістом промислових вологовмісних відходів, що дозволило встановити необхідний рівень інтенсивності ГКА для отримання композиційного палива із заданими споживчими, теплофізичними та енергоекологічними властивостями.

2. Досліджено ефективність використання гідрокавітаційної активації під час створення та спалювання композиційних палив на основі вуглеводнів та рідких або вологовмісних відходів. Визначені критерії оцінки якості паливної суміші, основними з яких є рівень теплотворної здатності, реологічні властивості, стабільність одержуваних палив та ККД енергоустановки, на якій відбувається спалювання.

3. Із застосуванням методів чисельного моделювання гідродинаміки потоків в'язкої нестисливої рідини розроблено принципово нову конструкцію гідровихрової форсунки з підвищеним експлуатаційним ресурсом та здатністю розпилювати високов'язкі композиційні палива з вмістом твердої фази до 72 %, що відкриває перспективи широкого застосування таких палив в енергоустановках, а також нові конструкції гідрокавітаційного обладнання, які відрізняються від аналогів значно більшою інтенсивністю ГКА.

4. Використання розробленого двороторного гідрокавітаційного пристрою дозволило вперше одержати зразки нових видів паливних емульсій з вмістом водної фази до 50 % з підвищеною стабільністю та поліпшеними реологічними

властивостями, що відкриває перспективи широкого застосування таких палив в енергоустановках.

5. Встановлено залежність збільшення питомої теплоти згоряння композиційного палива від режиму ГКА під час його виготовлення, що дозволяє визначати ефективні режими роботи гідрокавітаційного обладнання під час створення та спалювання цього виду енергоресурсу. Експериментально досягнуто збільшення на 16 % питомої теплоти згоряння композиційного палива на основі кубових залишків нафтопереробки з додаванням мулових осадів комунальних очисних споруд.

6. Методологію ГКА впроваджено під час створення та спалювання композиційних палив на основі некондиційних вуглеводнів та мулових осадів комунальних очисних споруд на ТОВ МВВФ «Енергетик» з використанням парового котла Е–1,0–0,9Г–3(Е). Результати промислових випробувань довели, що застосування зазначеної методології дозволяє не тільки розв’язувати екологічні проблеми утилізації рідких та вологовмісних відходів, а й економити до 10 % вуглеводневої сировини під час виробництва теплової та електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кравченко О.В. Теоретичні та методологічні основи інтенсифікації хіміко-технологічних процесів видобування та переробки вуглеводневих енергоносіїв : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : 05.17.08 / НТУ «ХПІ». Харків, 2017. 425 с.
2. Каютин О.В. Композиционное топливо – один из вариантов решения проблем ресурсосбережения // Молодёжь и наука : сборник материалов VII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию первого полета человека в космос. Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2011. С. 426-429.
3. Овчинников Ю.В., Луценко С.В. Искусственное композиционное жидкое топливо из угля и эффективность его использования // Перспективные энергосберегающие технологии и способы сжигания твердого топлива в котлах малой и средней мощности: доклад на научно-практической конференции. Кемерово: ГУ «Кузбасский центр энергосбережения», 2005.
4. Патент № 2151959, Россия, МПК F23K 5/00. Способ получения жидкого композитного топлива / Е.А. Евтушенко, В.А. Капустин, С.С. Кочкин, Г.В. Ноздренко, Ю.В. Овчинников и др.; заявл. 08.06.1999; опубл. 27.06.2000, Бюл.№ 6.
5. Овчинников Ю.В., Луценко С.В., Евтушенко Е.А. Физические процессы и механохимические эффекты в дезинтеграторах и кавитаторах при производстве ИКЖТ // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты: сборник научных трудов. Новосибирск: НГТУ, 2005. Вып. 9. С. 310.
6. Евтушенко Е.А. Разработка композитного топлива из торфа и низкорреакционных углей для использования в промышленной энергетике: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.04 / НГТУ, Новосибирск, 2003. 153 с.
7. Перспективные технологии получения и сжигания композиционных топлив на основе методов активации / О.В. Кравченко, И.Г. Суворова, И.А. Баранов,

В.А. Гоман // Комунальне господарство міст. Сер. енергоефективна техніка та технології в житлово-комунальному господарстві. Харків: Харківський національний університет імені О.М. Бекетова. 2014. Вип. 118 (1). С. 29 – 33.

8. Кравченко О.В. Нетрадиционные энерготехнологии эффективного получения и использования искусственных композитных жидких топлив / О.В. Кравченко, И.Г. Суворова, Я.В. Смирнов, С.С. Холобцев // Авиационно-космическая техника и технология. 2006. Вып. № 10(36). С. 91–97.

9. Кравченко О.В. Физико-химические преобразования углеводородных соединений с использованием новых кавитационных устройств. Авиационно-космическая техника и технология. 2007. Вып. № 1(37). С. 65–69.

10. Кравченко О.В., Суворова И.Г., Холобцев С.С. Нетрадиционные методы получения и сжигания жидких топлив // Вісник Міжнародного Слов'янського університету. 2007. Т 10, № 1. С.14–19.

11. Обоснование целесообразности использования в промышленных энергоустановках суспензионных горючих / О.В. Кравченко, Л.В. Тарасенко, А.В. Бастеев, В.В. Форфутдинов // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. Вып. № 7(43). С. 44 – 48.

12. Кравченко О.В. Новые гидрокавитационные технологии в процессах эффективного получения и использования углеводородсодержащих энергоносителей // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ», 2007. №2. С. 171–178.

13. Кравченко О.В., Суворова И.Г., Холобцев С.С. Нетрадиционные методы получения искусственных композитных жидких топлив // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология. Севастополь: СевНТУ, 2008. Вып. 87. С. 34–38.

14. Пат. 79617, Украина, МПК (2006) C10G 15/00. Способ кавитационной гидрогенизации и гидролиза углеводородов и устройство для его осуществления / Мирошниченко И.И., Мацевитый Ю.М, Мирошниченко И.И., Кравченко О.В., Тарелин А.А.; заявитель и патентодержатель Ин-т проблем машиностроения

им. А.Н. Подгорного НАН Украины. – № а 2005 00188; заявл. 10.01.2005; опубл. 10.07.07, Бюл. № 10.

15. Кравченко О.В. Получение водорода в процессах гидрокавитационной обработки воды и водосодержащих суспензий и эмульсий // Проблемы машиностроения. 2007. Т 10, № 2. С. 103–110.

16. Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. (Теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов). Часть 1. Киев: Полиграфкнига, 1997. 840 с.

17. Федоткин И.М., Гулый И.С., Боровский В.В. Интенсификация процессов смешения диспергирования гидродинамической кавитацией. Киев: Артур-А, 1998. 128 с.

18. Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитационные энергетические аппараты и установки. Киев: Артур-А, 1998. 136 с.

19. Федоткин И.М., Гулый И.С., Шаповалюк Н.И. Использование кавитации в промышленности. Киев: Артур-А, 1998. 134 с.

20. Промтов М.А., Степанов А.Ю., Алешин А.В. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата : монография. Тамбов, ТГТУ, 2015. 147 с.

21. Круть О.А. Водовугільне паливо : монографія. Національний гірничий університет. Київ: Наукова думка, 2002. 172 с.

22. Делягин Г.Н. Водоугольные суспензии – новый вид энергетического топлива // Строительство трубопроводов, 1989. № 8. С. 9-12.

23. Карлина Т.В., Башкатова И.Н. Особенности приготовления высококонцентрированной водоугольной суспензии из обогащенного угля // Методы регулирования структурно-реологических свойств и коррозионной активности высококонцентрированных дисперсных систем: Сб. науч. тр. НПО «Гидротрубопровод». М., 1987. С. 18.

24. Кондратьев А.С. Рациональное водоугольное топливо и возможные схемы его получения // Пробл. аксиоматики в гидрогазодинамике. 1996. Вып. 3. С. 63-78.
25. Рукин Э.И., Горская Т.П., Делягин Г.Н. Исследования свойств водоугольных суспензий в присутствии ПАВ // Химия твердого топлива. 1986. № 4. С. 152-158.
26. Мурко В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Институт горючих ископаемых, Москва, 1999. 48 с.
27. Островерхов В.В. Влияние поверхностно-активных веществ и других факторов на получение высококонцентрированных водоугольных суспензий с низкой вязкостью // Нефтепереработка и нефтехимия. 1988. № 35. С. 18-25.
28. Архипов В.А., Сидор А.М., Сурков В.Г. Исследование физико-химических и энергетических характеристик органоводоугольных топлив // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. Днепропетровск: Лира ЛТД, 2013. С. 39-47.
29. Макаров А.С., Олофинский Е.П., Дегтяренко Т.Д. Физико-химические основы получения высококонцентрированных водоугольных суспензий // Вестник АН УССР. 1989. №2. С.65-75.
30. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980. 360 с.
31. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М.: Химия, 1988. 256 с.
32. Самойлик В.Г. Исследование закономерностей образования коагуляционных структур в водоугольных суспензиях // Вісник Криворізького національного університету. 2013. Вип. 34. С. 114-120.
33. Архипкин О.О., Морозов А.Г. Современные подходы к использованию водоугольного топлива // Экологический вестник России. 2011. № 9. С. 20-25.

34. Результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками / Ю.А. Сенчурава, В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба, Е.М. Пузырев // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 4. С. 37-40.

35. Особенности теплофизических свойств и предпламенных процессов в комбинированных топливах на основе G-фазы / Л.В. Тарасенко, А.В. Бастеев, М.А. Цыганок, К. Юссеф, Е.Ю. Андриенко // Вестник двигателестроения. 2009. № 3. С. 88-92.

36. Лозицкий Д.Н., Соколов Б.А. Альтернативное котельное топливо: энергетическое использование биологического топлива в промышленных котельных установках // Энергослужба предприятия. 2008. №2(32). С. 42-46.

37. Бастеев А.В., Мусалам Алаа, Форфутдинов В.В. Разработка технологии и особенности рабочего процесса сжигания суспензионных горючих // Авіаційно-космічна техніка і технологія: зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». Вип. 26. Двигуни та енергоустановки. Х., 2001. С. 39-41.

38. Кервалишвили П.Д., Утямишев И.Р. Несколько новых экологически чистых технологий производства энергии // Альтернативная энергетика и экология. 2006. №1. С. 29-34.

39. Пат. на корисну модель №18922, Україна, МПК7 B01F 3/08, В 63 B59/00/ Змішувач-форсунка / І.Г.Суворова, О.В. Кравченко ; №U200606857; заявл. 19.06.2006; опубл. 15.11.06, Бюл. №11.

40. Механизм горения капель суспензионного водоугольного топлива в вихревой топке автоматизированного энергогенерирующего комплекса / Л.А. Ермакова, С.П. Мочалов, С.Н. Калашников, А.А. Пермяков // Весник КемГУ. Кемерово, 2012. Т. 2, № 4 (52). С. 164-169.

41. Шарабура Т.А. Теплотехнические показатели работы парового котла ТП-35 при работе на водоугольном топливе // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. Днепропетровск: Лири ЛТД, 2013. №5. С. 161-170.

42. Hydrocavitation activation in the technologies of production and combustion of composite fuels/ O. Kravchenko, I.Suvorova, I. Baranov, V.Goman // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. 4 /5 (88). P. 33-42.
43. Chung, T. Computational fluid dynamics. Cambridge Univ. Press, 2002. 1012 p. doi: 10.1017 / cbo9780511606205.
44. Wesseling, P. Principles of computational fluid dynamics. Berlin-Heidelberg: Springer, 2001. 644 p., doi: 10.1007 / 978-3-642-05146-3.
45. Roache, P. Computational fluid dynamics. Albuquerque, N.M.: Hermosa Publishers, United States, 1985. 434 p.
46. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. К.: Наук. думка, 1982. 552с.
47. Рвачев В.Л., Проценко В.С. Контактные задачи теории упругости для неклассических областей. К.: Наук. думка, 1977. 236 с.
48. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Том 6. М.: Физматлит, 2015. 728 с.
49. Лойцянский Л. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
50. Suvorova I. G. , Kravchenko O. V., Baranov I. A. Mathematical and computer modeling of axisymmetric flows of an incompressible viscous fluid by the method of R-functions // Journal of Mathematical Sciences. Springer US. 2012. Vol. 184, No. 2. P. 165–180.
51. Суворова И.Г., Шевченко А.Н. Автоматизация расчетов методом R-функций применительно к задачам стройиндустрии: учеб.–метод. пособие. К.: Кабинет высшего образования, 1991. 60с.
52. Рвачев В.Л., Шевченко А.Н. Проблемно-ориентированные языки и системы для инженерных расчетов. К.: Техника, 1988. 197 с.
53. Пат. на корисну модель 89291 Україна, МПК (2014.01) F23D 11/00, B01F 3/00, B01F 5/00. Форсунка-активатор / О.В. Кравченко, І.Г. Суворова, І.А. Баранов, Л.В. Тарасенко; заявник і патентоутримувач Інститут проблем

машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. – № у 2013 14346; заяв. 09.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.

54. Пат. 2312889 РФ, МПК7 С 1 С10L1/32. Способ получения композиционного топлива и установка для его осуществления / С.В. Луценко, Ю.В. Овчинников, В.Г. Андриенко (РФ). - № 2006125798/04; заявл. 19.07.2006; опубл. 20.12.2007, Бюл. № 35.

55. Пат. 2249029 РФ, WO 2005/007782A1. Кавитационное водоугольное топливо (КаВУТ), технология приготовления и технологическая линия для его осуществления / А.Д. Петраков, С.М. Радченко, О.П. Яковлев (РФ). - №2006117235/04; заявл. 19.05.2006; опубл. 10.12.2007.

56. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. М.: Медицина, 1983. 160 с.

57. Єршов С. В., Русанов А.В. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовінцевих турбомашинах “FlowER”. Свідectvo про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77. К.: Державне агентство України з авторських та суміжних прав, 1996. 2 с.

58. Пат. 113894 (Україна), МПК B01F /16 Гідрокавітаційний пристрій для обробки рідин / Кравченко О.В., Гоман В.О, Сімбірський О.В., Момот В.І.; заявник і патентоутримувач Інститут проблем машинобудування НАН України. № а 2015004466; заявл. 07.05.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6. 4 с.

59. Innovative Technologies for Utilization and Disinfection of Waste to Ensure Sustainable Development of Civilization / I.G. Suvorova, O.V. Kravchenko, I.A. Baranov, V.A. Goman // European Journal of Sustainable Development. Rome, 2018. Vol. 7, № 4. P. 423-434.

60. Innovative Technologies for Utilization and Disinfection of Waste to Ensure Sustainable Development of Civilization / O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, V. Goman // 6th International Conference on Sustainable Development, September 12-13, Rome, Italy. P. 214.

61. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч. II. Теория горения: учебное пособие. СПб.: СПбГТУРП. 2011. 84 с.

62. Модели горения углеводородов / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, В.С. Гасилов, О.А. Тучкова, Л.И. Хайруллина // Вестник Казанского технологического университета. Казань, 2014. Т.1 (22). С. 123-128.
63. Законы горения; под ред. Ю.В. Полежаева. М.:УНПЦ Энергомаш, 2006. 351 с.
64. Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.А. Теория теплового распространения пламени // Журнал физической химии. 1938. Т. 12, №1. С. 100-105.
65. Махвиладзе Г.М., Робертс Дж. П., Якуш С.Е. Огненный шар при горении выбросов углеводородного топлива. Структура и динамика подъема // Физика горения и взрыва. 1999. № 3 (Т. 35). С. 17-19.
66. Махвиладзе Г.М., Робертс Дж. П., Якуш С.Е. Огненный шар при горении выбросов углеводородного топлива. Структура и динамика подъема. Тепловое излучение // Физика горения и взрыва. 1999. № 4 (Т. 35). С. 12-23.
67. Суржиков С.Т. Тепловое излучение крупномасштабных кислородно-водородных шаров. Исследование вычислительных моделей // ТВТ. 1997. № 4 (Т. 35). С. 584-593.
68. Валиуллин Тимур Радисович. Повышение эвективности сжигания композиционного жидкого топлива на тепловых электрических станциях по условиям его зажигания: дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.14, 01.04.14 / ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский политехнический институт», Томск, 2017. 170 с.
69. Делягин, Г. Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. Москва: Наука, 1967. С. 45–55.
70. Осинцев, К. В. Исследование факельного сжигания водоугольных суспензий в топках энергетических котлов // Теплоэнергетика. 2012. № 6. С. 21-27.
71. Анализ характера горения композиционных топлив, полученных кавитационным методом / Федорова Н.И., Патраков Ю.Ф., Сурков В.Г.,

Головко А.К. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2007. № 4 (62). С. 38-41.

72. Семенова С.А., Федорова Н.И., Исмагилов З.Р. Способ повышения экологичности композиционного органоводоугольного топлива // Горение твердого топлива: сборник трудов VIII Всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2012. С.90.1-90.7.

73. Зажигание капли органоводоугольного топлива при витании в потоке разогретого воздуха / Валиуллин Т.Р., Стрижак П.А., Шевырев С.А., Богомолов А.Р. // Теплоэнергетика. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2017. С. 67-71.

74. Вершинина К.Ю., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование влияния концентрации компонентов органоводоугольного топлива на интегральные характеристики зажигания // Инженерно-физический журнал. Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2017. С. 230-240.

75. Макаров А.С., Савицкий Д.П., Егурнов А.И. Водугольное топливо на основе углей различной стадии метаморфизма // Современная наука: идеи, результаты, технологии. Днепропетровск: НПК «Триакон», 2011. С. 16-20.

76. Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермиков Б.А. Теплогенерирующие установки : учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1986. 559 с.

77. Вершинина К.Ю., Лыршиков С.Ю., Стрижак П.А. Зажигание топливных суспензий, приготовленных на основе обогащения угля и нефтепродуктов // Физика горения и взрыва. Новосибирск, 2018. № 3. С. 137-146.

78. Делягин Г. Н. Об условиях совместного протекания процессов испарения воды и выгорания капли водугольной суспензии // Сжигание высокообводненного топлива в виде водугольных суспензий. М.: Наука, 1967. С. 55–67.

79. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В., Сыродой С.В. Численное моделирование зажигания частиц водугольного топлива // Физика горения и взрыва. Новосибирск, 2015. Т. 51, № 4. С. 12-19.

80. Гоман В.А. Сжигание композиционного топлива с добавлением иловых осадков очистных сооружений // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 21-24 ноября, 2016. С. 58.

81. Гоман В.О. Вдосконалення технології виготовлення й спалювання композиційного палива на основі мазуту з додаванням мулових осадів комунальних очисних споруд // Конференція молодих вчених і спеціалістів ИПМаш НАН України: тез. доповіді. Харків, 17-20 квітня, 2018. С. 32.

82. Гоман В.О. Промислові випробування енергоефективності й екологічності технології гідрокавітаційної активації при виробництві й спалюванні композиційного палива з додаванням мулових осадів очисних споруд // Конференція молодих вчених і спеціалістів ИПМаш НАН України: тез. доповіді. Харків, 15-18 квітня, 2019. С. 28.

83. Протодьяконов М.М., Тедер Р.И.М. Методика рационального планирования экспериментов. Москва: Наука, 1970. 76 с.

84. Комплекс для проведения исследований процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив / О.В. Кравченко, И.Г. Суворова, В.А. Гоман, Е.Ю. Мусиенко, А.М. Даниленко // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. Днепропетровск: Лира ЛТД, 2013. № 5. С. 150 – 160.

85. Гоман В.А. Установка для исследования процессов получения и сжигания композиционных топлив // IX конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 5-8 ноября, 2012. С. 68.

86. Гоман В.А. Комплекс для исследований процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив // X конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 11-13 ноября, 2013. С. 44.

87. Обработка осадка сточных вод: полезный опыт и практические советы / Я.Э. Люфт, Т. Ойяйла, Л. Руоканен, О. Зинчук // Проект по городскому

сокращению эвтрофикации Комиссии по окружающей среде Союза балтийских городов. Финляндия, 2012. 125 с.

88. Насыров И.А., Маврин Г.В., Шайхиев И.Г. Проблемы утилизации иловых осадков очистных сооружений // Вестник технологического университета, Казань, 2015. Т.18, № 19. С. 257-259.

89. Про затвердження нормативів гранично допустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел: наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27 червня 2006 року № 309 / Міністерство охорони навколишнього природного середовища України. URL: <https://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06> (дата звернення: 18.04.2017).

90. Гоман В.А. Совершенствование процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 17-20 ноября, 2014. С. 49.

91. Пат. 114935 (Україна), МПК C10L 1/32 Водовугільне паливо / Кравченко О.В., Гоман В.О, Сімбірський О.В., Момот В.І.; заявник і патентоутримувач Інститут проблем машинобудування НАН України. № а 2015004460; заявл. 07.05.2015; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. 4 с.

92. Гоман В.А., Кравченко О.В. Совершенствование технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // Экология и промышленность. Харьков, 2016. №4 С. 57–64.

93. Добыча, транспортировка и потребление газа. URL: <http://vlojenie.com/princip-dobychi-slancevogo-gaza> (дата звернення 12.03.2014).

94. Сланцевый газ. Нетрадиционный и ненужный: аргументы против / С. Aitken, Н. Burley, D. Urbaniak, A. Simon, S. Wykes. // Москва, 2013. 32 с. URL: http://russian-greens.ru/sites/default/files/foee_shale_gas_ru_web_4.pdf (дата звернення 27.05.2014).

95. Грег Джонсон. Фракционная вода и обратный приток. Электронный ресурс. URL: http://www.irimex.ru/files/catalog/rubs/files/8334/frac_water_russian_pdf (дата звернения 12.03.2014).
96. Косинский А. Электродиализ – перспективный способ очистки технических вод после гидроразрыва. Электронный ресурс. URL: <http://www.fainaidea.com/archives/63534> (дата звернения 12.03.2014).
97. Способ решения проблемы загрязняющих гидроразрывов. Электронный ресурс. URL: <http://www.thinkinnovative.ru/materials/analytics/id/1662> (дата звернения 24.05.2014).
98. ЭСКО. Города и здания: электронный журнал 2013. № 3. URL: http://www.esco-ecosys.narod.ru/cities/2013_3/art91.html/ (дата звернения 24.05.2014).
99. Katharine Dahm, Michelle Chapman. Produced Water Treatment Primer: Case Studies of Treatment Applications // U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Environmental Services Division, Water Treatment Engineering and Research Group, 86-68230, PO Box 25007, Denver CO 80225-0007. August, 2014. 64 p.
100. Андриенко Е. Ю., Кравченко О.В., Суворова И.Г. Энергетические и экологические аспекты использования фенольной сточной воды в качестве компонента композиционных топлив // Современная наука. 2012. № 1 (9). С. 31–35.
101. Гоман В.А. Огневая утилизация отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 16-19 ноября, 2015. С. 36.
102. Гоман В.А., Кравченко О.В. Совершенствование технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // V Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения, защиты

окружающей природной среды: сборник трудов. Харьков, 23-24 марта, 2016. С. 148-157.

103. Гоман В.А. Кравченко О.В. Повышение эффективности технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта методами математического и физического моделирования // Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології: наука й виробництво (ГЕОФОРУМ-2016): матеріали III міжнародного геологічного форуму, Україна, Миколаївська обл., с. Коблеве, 15 – 20 серпня 2016 року. К.: УкрДГРІ, 2016. С. 68 – 75.

104. An Innovation Technology for Production and Combustion of Composite Fuels Based on Hydrocavitation Activation / O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, V. Goman // Book of abstract 11th Conference on Sustainable Development of Energy

105. Безстічна технологія утилізації відпрацьованої рідини гідророзриву / О. В. Кравченко, А. О. Тарелін, В. Г. Михайленко, І. А. Баранов // Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології: наука і виробництво : матеріали міжнар. геолог. форуму (7–12 вересня 2015 р., м. Одеса) : У 2-х т. Т. 2. Український державний геологорозвідувальний інститут (Укр. ДГРІ). К.: УкрДГРІ, 2015. С. 108–115.

106. Диметиламин (CH₃)₂NH класс опасности-2. Электронный ресурс. URL: <http://www.umc.kirov.ru/materials/ahov/dimetilamin.htm>.

107. Кравченко О. В., Суворова И. Г., Баранов И. А. Метод определения эффективности гидрокавитационной обработки в технологиях производства и сжигания композиционных топлив // Проблемы машиностроения. 2014. Т. 17, № 2. С. 58–62.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Комплекс для проведения исследований процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив / О.В. Кравченко, И.Г. Суворова, В.А. Гоман, Е.Ю. Мусиенко, А.М. Даниленко // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. Днепропетровск: Лира ЛТД, 2013. № 5. С. 150 – 160.
2. Перспективные технологии получения и сжигания композиционных топлив на основе методов активации / О.В. Кравченко, И.Г. Суворова, И.А. Баранов, В.А. Гоман // Комунальне господарство міст. Сер. енергоефективна техніка та технології в житлово-комунальному господарстві. Харків: Харківський національний університет імені О.М. Бекетова. 2014. Вип. 118 (1). С. 29 – 33.
3. Гоман В.А., Кравченко О.В. Совершенствование технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // Экология и промышленность. Харьков, 2016. № 4. С. 57 – 64.
4. Hydrocavitation activation in the technologies of production and combustion of composite fuels/ O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, V.Goman // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. 4 /5 (88). P. 33 - 42.
5. Innovative Technologies for Utilization and Disinfection of Waste to Ensure Sustainable Development of Civilization / I.G. Suvorova, O.V. Kravchenko, I.A. Baranov, V.A. Goman // European Journal of Sustainable Development. Rome, 2018. Vol. 7, № 4. P. 423-434.
6. Пат. 113894 (Україна), МПК B01F /16 Гідрокавітаційний пристрій для обробки рідин / Кравченко О.В., Гоман В.О, Сімбірський О.В., Момот В.І.; заявник і патентоутримувач Інститут проблем машинобудування НАН України. № а 2015004466; заявл. 07.05.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6. 4 с.

7. Пат. 114935 (Україна), МПК C10L 1/32 Водовугільне паливо / Кравченко О.В., Гоман В.О, Сімбірський О.В., Момот В.І.; заявник і патентотримувач Інститут проблем машинобудування НАН України. № а 2015004460; заявл. 07.05.2015; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. 4 с.

8. Гоман В.А. Установка для исследования процессов получения и сжигания композиционных топлив // IX конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 5-8 ноября, 2012. С. 68.

9. Гоман В.А. Комплекс для исследований процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив // X конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 11-13 ноября, 2013. С. 44.

10. Гоман В.А. Совершенствование процессов производства, подготовки и сжигания новых видов композиционных топлив // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 17-20 ноября, 2014. С. 49.

11. Гоман В.А. Огневая утилизация отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 16-19 ноября, 2015. С. 36.

12. Гоман В.А., Кравченко О.В. Совершенствование технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта в составе композиционных топлив // V Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения, защиты окружающей природной среды: сборник трудов. Харьков, 23-24 марта, 2016. С. 148-157.

13. Гоман В.А. Повышение эффективности технологии огневой утилизации отработанной жидкости гидроразрыва пласта методами математического и физического моделирования / В.А. Гоман, О.В. Кравченко //

Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології: наука й виробництво (ГЕОФОРУМ-2016): матеріали III міжнародного геологічного форуму, Україна, Миколаївська обл., с. Коблеве, 15 – 20 серпня 2016 року. К.: УкрДГРІ, 2016. С. 68 – 75.

14. An Innovation Technology for Production and Combustion of Composite Fuels Based on Hydrocavitation Activation / O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, V. Goman // Book of abstract 11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. Lisbon, Portugal, September 4-9, 2016. P. 67.

15. Гоман В.А. Сжигание композиционного топлива с добавлением иловых осадков очистных сооружений // Конференция молодых ученых и специалистов ИПМаш НАН Украины: тез. докладов. Харьков, 21-24 ноября, 2016. С. 58.

16. Гоман В.О. Вдосконалення технології виготовлення й спалювання композиційного палива на основі мазуту з додаванням мулових осадів комунальних очисних споруд // Конференція молодих вчених і спеціалістів ИПМаш НАН України: тез. доповіді. Харків, 17-20 квітня, 2018. С. 32.

17. Innovative Technologies for Utilization and Disinfection of Waste to Ensure Sustainable Development of Civilization / O. Kravchenko, I. Suvorova, I. Baranov, V. Goman // 6th International Conference on Sustainable Development, September 12-13, Rome, Italy. P. 214.

18. Гоман В. О. Промислові випробування енергоефективності й екологічності технології гідрокавітаційної активації при виробництві й спалюванні композиційного палива з додаванням мулових осадів очисних споруд // Конференція молодих вчених і спеціалістів ИПМаш НАН України: тез. доповіді. Харків, 15-18 квітня, 2019. С. 28.

ДОДАТОК Б

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на:

- Щорічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» в ІПМаш НАНУ, Харків, 5-8 листопада 2012 р., доповідь;
- III науково-практичній конференції «Сучасні тенденції і технології видобутку, виробництва, переробки і використання вугільних і вуглеводневих палив у промисловості та енергетиці», Алушта, 6-10 червня 2013 р., доповідь;
- Щорічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» в ІПМаш НАНУ, Харків, 11-13 листопада 2013 р., доповідь;
- Щорічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» в ІПМаш НАНУ, Харків, 17-20 листопада 2014 р., доповідь;
- Щорічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» в ІПМаш НАНУ, Харків, 16-19 листопада 2015 р., доповідь;
- V міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених та спеціалістів «Інноваційні шляхи модернізації базових галузей промисловості, енерго- і ресурсозбереження, охорона навколишнього природного середовища» Харків, 23-24 березня 2016 р., доповідь;
- III міжнародному геологічному форумі «Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології: наука й виробництво». с. Коблеве, 15-20 серпня 2016 р., доповідь;
- XI конференції сталого розвитку систем енергетики, водних систем та довкілля, Лісабон, 4-9 вересня 2016 р., доповідь;
- Щорічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» в ІПМаш НАНУ, Харків, 21-24 листопада 2016 р., доповідь;
- Щорічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» в ІПМаш НАНУ, Харків, 17-20 квітня 2018 р., доповідь;

– VI Міжнародній конференції сталого розвитку, Рим, 12-13 вересня 2018 р., доповідь;

– Щорічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» в ІПМаш НАНУ, Харків, 15-18 квітня 2019 р., доповідь.

ДОДАТОК В



ТОВ «МВВФ «ЕНЕРГЕТИК»
вул. Соборна, 3
Монастирище, Україна, 19100
04746 25770, 04746 25771
kotel@energetik.com.ua
www.energetik.com.ua

LIMITED LIABILITY «MONASTYRISHCE INDUSTRI-
AL INTRODUCTION FIRM «ENERGETIK»
3, Soborna, Monastyrishce, Ukraine, 19100
04746 25770, 04746 25771
kotel@energetik.com.ua
www.energetik.com.ua

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

З 16 квітня по 28 червня 2018 року за фінансової та техніко-організаційної участі ФОП «Кічук Анатолій Іванович» у випробувальній лабораторії ТОВ МВВФ «Енергетик» (сmt. Цибулів) на паровому котлі Е—1,0—0,9Г—3(Е) проведені промислові пілотні дослідження процесів виготовлення і спалювання композиційного палива на основі мазуту з додаванням відходів комунальних очисних споруд. Розроблений в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України промисловий дослідницький енерготехнологічний комплекс (розробники – Кравченко О.В., Гоман В.О., Сімбірський О.В.) забезпечив високоякісне виготовлення та спалювання композиційного палива.

З метою визначення енергоекологічних характеристик композиційного палива в порівнянні з вихідним вуглеводнем було застосовано витратомір вихровий «Ирга-РВ» для вимірювання теплофізичних параметрів виробленого пару та газоаналізатор «ОКСИ»–5М-5НД СО2 для вимірювання складу димових газів.

Перший заступник директора



В.А.Смагін

ДОДАТОК Г



УКРАЇНА
ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«Монастирищенська виробничо –
впроваджувальна фірма «ЕНЕРГЕТИК»

19100 Черкаська обл., Монастирищенський р-н., м. Монастирище, вул. Соборна, буд.3.
тел./факс (04746) 2-57-72, тел. (04746)2-57-70;2-57-71.
Сайт: www.energetik.ua , E-mail: kotel@energetik.com.ua
Код 31100615. Р/р 26003702771923 АТ «Райффайзен Банк Аваль»
МФО 380805.
Свідоцтво № 32411362. Інд.податковий № 311006123201

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

З 10 по 29 жовтня 2016 року в дослідницькій лабораторії ТОВ МВВФ "Енергетик" (м. Монастирище) на паровому котлі Е-1,0-0,9Г-3 (Е) проведені пілотні дослідження процесів спалювання композиційного палива на основі мазуту з додаванням відходів комунальних очисних споруд. Розроблений в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України пальниковий пристрій, основним робочим елементом якого є гідрокавітаційна форсунка (Розробники – Кравченко О.В., Гоман В.О., Баранов І.А.), забезпечив високоякісне диспергування високов'язких композиційних палив з наявністю твердих часток, якісне змішування крапель цих палив з окислювачем, відповідність процесу спалювання композиційного палива сучасним вимогам.

Треба відмітити, під час іспитів ні один з пальникових пристроїв, в т. ч. й закордонного виробництва, окрім розробленого в ІПМаш НАН України, не забезпечив якісного розпилювання та спалювання даного виду рідкого палива.

Застосування даного пальникового пристрою відкриває перспективу використання нових видів композиційних палив з додаванням відходів різноманітного походження, що вирішує енергетичну задачу отримання більш дешевої теплової енергії і екологічну проблему утилізації відходів водночас.

Гол. конструктор ТОВ МВВФ "Енергетик"

С.В. Дігтярук

