

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ВА «ИЛМИЙ-  
ТЕХНИКА МАРКАЗИ» МАЪСУЛЯТИ ЧЕКЛАНГАН ЖАМИЯТ  
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.27.06.2017.Т.03.03 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**БАБАХОДЖАЕВ РАХИМЖАН ПАЧЕХАНОВИЧ**

**ГИДРОДИНАМИК ЖАРАЁНЛАРНИ ЖАДАЛЛАШТИРИШ  
АСОСИДА ИССИҚЛИК ЭНЕРГЕТИКАСИ ҚУРИЛМАЛАРИНИНГ  
ЭНЕРГЕТИК САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ УСУЛЛАРИ**

**05.05.04 – Саноат иссиқлик энергетикаси**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2018**

**Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации**

**Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract**

**Бабаходжаев Рахимжан Пачеханович**

Гидродинамик жараёнларни жадаллаштириш асосида  
иссиқлик энергетикаси қурилмаларининг энергетик  
самарадорлигини ошириш усуллари.....3

**Бабаходжаев Рахимжан Пачеханович**

Методы повышения энергоэффективности теплоэнергетических  
установок на основе интенсификации гидродинамических процессов.....29

**Babakhodjaev Rakhimjan Pachehanovich**

Methods for increasing the energy efficiency of thermal power plants  
on the basis of intensification of hydrodynamic processes.....55

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works.....59

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ВА  
«ИЛМИЙ-ТЕХНИКА МАРКАЗИ» МАЪСУЛЯТИ ЧЕКЛАНГАН  
ЖАМИЯТ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.27.06.2017.Т.03.03 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**БАБАХОДЖАЕВ РАХИМЖАН ПАЧЕХАНОВИЧ**

**ГИДРОДИНАМИК ЖАРАЁНЛАРНИ ЖАДАЛЛАШТИРИШ АСОСИДА  
ИССИҚЛИК ЭНЕРГЕТИКАСИ ҚУРИЛМАЛАРИНИНГ ЭНЕРГЕТИК  
САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ УСУЛЛАРИ**

**05.05.04 – Саноат иссиқлик энергетикаси**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2018**

**Техника фанлари бўйича фан доктори (DSc) диссертация мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.3.DSc/T153 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасига ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) ва “ZiyoNet” Ахборот-таълим порталига ([www.ziyounet.uz](http://www.ziyounet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий маслаҳатчи:**

**Муҳиддинов Джалалиддин Носирович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Алияров Бирлесбек Каниевич**  
техника фанлари доктори, профессор, академик  
(Қозғистон Республикаси)

**Мирзаев Шавкат Мустақимович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Аббасов Ёрқин Содикович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:**

**«Иссиқликэлектрлойиха» АЖ**

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети ва “Илмий-техника маркази” МЧЖ ҳузуридаги DSc.27.06.2017.T.03.03 рақамли илмий кенгашнинг 2018 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўчаси, 2, \_\_\_\_\_ хона. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин ( \_\_ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўчаси, 2. Тел./факс: (99871)227-03-41.

Диссертация автореферати 2018 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ да тарқатилди.

(2018 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси)

**К.Р. Аллаев**

Илмий даражалар берувчи илмий  
кенгаш раиси,  
т.ф.д., профессор, академик

**О.Х. Ишназаров**

Илмий даражалар берувчи илмий  
кенгаш котиби,  
т.ф.д., к.и.х.

**Ш.И. Клычев**

Илмий кенгаш ҳузуридаги илмий  
даражалар берувчи илмий семинар,  
раиси муовини, т.ф.д., профессор.

## КИРИШ (докторлик (DSc) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг зарурати ва долзарблиги.** Жаҳонда иссиқлик энергетик қурилмаларида гидродинамик жараёнларни жадаллаштириш, конструктив элементларини такомиллаштириш ва бир нечта иссиқлик жараёнларини битта қурилмада амалга ошириш орқали самарадор технологиялар яратилмоқда. Шу жиҳатдан ривожланган мамлакатларнинг миллий энергетик дастурларида «гидродинамик жараёнларни жадаллаштириш орқали энергия ресурслар истеъмолига бўлган эҳтиёжни 20-25 фоизга қоплаш вазифаси белгиланган»<sup>1</sup>. Бу борада, жумладан паст сифатли қаттиқ ёқилғини қайнаш қатламида ёқишни жадаллаштириш ва иссиқлик алмашинув жараён ҳамда қурилмаларнинг техник ва технологик жиҳатдан такомиллаштирилган конструкцияларини ишлаб чиқиш ҳамда улардан самарали фойдаланишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда иссиқлик энергетика жараёнлари ва қурилмалари энергия самарадорлигини оширувчи мукамал аниқланган режим, технологик ва конструктив параметрлар, гидродинамик ва иссиқлик жараёнларининг узлуксизлигини таъминловчи назоратлаш ва бошқариш схемаларини ишлаб чиқишда зарур бўладиган техник тавсифларни яратишга қаратилган тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу соҳада, жумладан узлуксиз жараёнларни таъминловчи иссиқлик элтувчи оқимининг критик тезлик қийматлари, гидравлик қаршилиқлар ва қаттиқ заррачалар концентрациясининг йўналиш бўйича конструктив параметрларга нисбатан ўзгариши ҳамда уларнинг математик моделлари, ҳисоблаш усулларини такомиллаштириш ва иссиқлик элтувчи оқимини турбулизацияловчи элементларни ўзгартириш асосида қувурларнинг замонавий конструкцияларини ишлаб чиқиш муҳим тадқиқотлардан бири ҳисобланади. Шу билан бирга паст сифатли кўмирни қайнаш қатламида ёқиш ва кўп функцияли ўтхона жиҳозининг такомиллаштирилган конструкцияси асосида технологиялар яратиш, иссиқлик элтувчи оқимини турбулизациялаш туфайли иссиқлик алмашиниш жараёнларини жадаллаштириш зарур ҳисобланмоқда.

Республикамызда иссиқлик энергетикаси ва иссиқликлик ишлатувчи қурилмаларни илмий изланиш натижалари асосида уларнинг конструкцияларини такомиллаштириш ва кенг жорий қилиш чора-тадбирлари амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «...иқтисодиётнинг энергия ва ресурс сиғимдорлигини камайтириш, ишлаб чиқаришга энергия тежовчи технологияларни кенг тадбиқ этиш, ишлаб чиқариш унумдорлигини ошириш...»<sup>2</sup> вазифалари белгиланган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан ёқилғи ва энергиядан

<sup>1</sup> <https://www.worldenergy.org>; <http://www.energyefficiencycentre.org>; Sompol Skullong, Pongjet Promvonge, Nuthvipa Jayranaiwachira, Chinaruk Thianpong Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts // Chemical Engineering and Processing 109 (2016) 164–177. Journal home page : [www.elsevier.com/locate/cep](http://www.elsevier.com/locate/cep)

<sup>2</sup> Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947- сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармони.

фойдаланишнинг замонавий самарадор технологиялар ва қурилмаларни ишлаб чиқиш ҳамда уларнинг солиштирма кўрсаткичларини пасайтириш муҳим вазифалардан бири деб ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 26 майдаги ПҚ-3012-сон «2017-2021 йилларда ижтимоий соҳа ва саноат соҳаларида энергия самарадорлигини ошириш, қайта тикланувчи энергия манбаларини қўллашни янада кенгайтириш чора тадбирлари тўғрисида»ги, 2017 йил 23 августдаги ПҚ-3238-сон «Замонавий энергия самарадор ва энергия тежовчи технологияларни тадбиқ этишни ривожлантириш чора тадбирлари тўғрисида»ги, 2017 йил 8 ноябрдаги ПҚ-3379-сон «Энергия ресурсларидан оқилона фойдаланишни таъминлаш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорларини ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологияларни ривожлантиришнинг II. «Энергетика, энергия-ресурс тежамкорлиги» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи<sup>3</sup>.**

Паст навли қаттиқ ёқилғиларни ёқиш ва қувурли иссиқлик алмашинув қурилмаларида иссиқликни узатиш бўйича энергия ҳамда ресурс тежовчи технологияларини, улардаги қурилмаларининг такомиллаштирилган янги конструкцияларини яратишга йўналтирилган тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи олий таълим муассасалари ва илмий марказларида, жумладан Technical University Drezden, Technical University Shtuttgart (Германия), Technical University Toyohashi, Technical University Nagoya (Япония), Москва энергетика институти – Миллий тадқиқот университети, Урал Федерал техника университети, Бутунроссия иссиқлик техникаси институти, Фанлар Академияси Сибирь бўлими иссиқлик физикаси илмий текшириш институти (Россия), Кўмир технологиялари илмий текшириш институти, Иссиқлик физикаси илмий текшириш институти (Украина) ларда кенг камровли илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Қаттиқ ёқилғи ёқиш мосламаларининг янги конструкцияларини яратиш ва иссиқлик алмашинув қурилмаларида иссиқлик элтувчи оқимини турбулизациялаш бўйича жаҳонда олиб борилаётган илмий тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан қуйидаги илмий натижалар олинган: гидродинамик ва иссиқлик алмашинув жараёнларини жадаллаштирувчи мосламаларнинг янги конструкциялари ишлаб чиқилган ва режим кўрсаткичлари асосида такомиллаштирилган, бажарилган ҳисобий-назарий ва экспериментал тадқиқотлар натижасида қаттиқ ёқилғини (кўмир ва пеллет)

---

<sup>3</sup> Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи: <http://www.iea-coal.org>; <http://www.energyefficiencycentre.org>; <https://en.euroacad.eu>; Market report series. - International Energy Agency Publications. - France, 2017. - 143 p.

муаллақ ҳолатдаги қатламда ёқишни ҳисоблаш усуллари ишлаб чиқилган (Technical University Drezden, Technical University Shtuttgart, Германия); каттик ёқилғини самарали ёқиш мосламалари ишлаб чиқилган (Урал Федерал техника университети, Бутунроссия иссиқлик техникаси институти, Фанлар Академияси Сибирь филиали иссиқлик физикаси илмий текшириш институти, Россия, Кўмир технологиялари илмий текшириш институти, Украина); иссиқлик алмашинув аппаратларида гидродинамика ва иссиқлик алмашиниш жараёнлари уларнинг асосий кўрсаткичлари орқали оптималлаштирилган ҳамда мазкур қурилмаларнинг наъмунавий нусхалари яратилган (Москва энергетика институти – Миллий тадқиқот университети, Россия, Technical University Toyohashi, Technical University Nagoya, Япония, Иссиқлик физикаси илмий текшириш институти, Украина).

Жаҳонда ёқилғи ёқиш мосламалари ва иссиқлик алмашинув қурилмаларида гидродинамик ва иссиқлик алмашиниш жараёнларини жадаллаштириш бўйича қатор, жумладан, қуйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: иссиқлик элтувчи оқимининг критик тезликларини бошқариш тизими иссиқлик қувватига монанд равишда такомиллаштириш; қурилма ва жараёнларни математик моделлаш ҳамда режим параметрларининг оптимал қийматларини аниқлаш услублари асосида такомиллаштириш; қурилмаларнинг гидравлик қаршилик кўрсаткичини характерловчи параметрларни оптималлаштириш ва энергия тежамкор янги конструкцияларини яратиш; қурилмаларнинг конструктив параметрларини бошқариш ҳамда уларда ёқилғи ва энергия ресурсларидан фойдаланишнинг солиштирма сарфини камайтириш усул ва услубларини ишлаб чиқиш.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Дунё амалиётида иссиқлик энергетикаси қурилмаларининг такомиллаштирилган конструкциялари, уларни ҳисоблаш ва уларда амалга ошириладиган гидродинамик ҳамда иссиқлик жараёнларни жадаллаштириш усуллари ишлаб чиқилган. Ёқилғи ёқиш самарадорлигини ошириш хусусиятларини ўрганиш бир қатор олимлар, жумладан Рамзин Л.К., Кнорре Г.Ф., Померанцев В.В., Ахмедов Р.Б., Кутателадзе С.С., Баскаков А.П., Майстренко А.Ю., Алияров Б.К., Бухман М.А., Рыжков А.П., Бурдуков Ю.М., Мунц В.А., Григорьев К.А., Бородуля В.А., Michael Beckmann, Мессерле В.Е. ва бошқаларнинг ишларида кўриб чиқилган. Бу ишларда ёқилғи ёқиш мослама ва қурилмаларининг конструктив ва режим параметрларининг ёниш жараёнини жадаллаштиришга боғлиқлиги ўрганилган.

Қурилмаларда иссиқлик алмашиниш жараёнларининг қонуниятлар ва гидродинамик ҳолатларга боғлиқликлари ҳамда ҳисоблаш усуллари бир қатор олимлар, жумладан Кирпичев М.В., Гухман А.А., Михеев М.А., Исаченко В.П., Халатов А.А., Мигай В.К., Дрейцер Г.А., Кузьма-Кичта Ю.Г., Бродов А.Ф., Kenzo Kitamura ва бошқаларнинг ишларида кўриб чиқилган.

Иссиқлик энергетика қурилмаларида ёқилғи ва энергия ресурслардан фойдаланишнинг солиштирма кўрсаткичларини камайтириш усуллари бўйича Захидов Р.А., Мухиддинов Д.Н., Авезов Р.Р., Кремков М.В., Закиров С.Г., Шокиров А.О., Мирзаев Ш.М., Аббасов Ё.С., Исматходжаев С.К., Цоколаев

И.Б. ва бошқалар шуғулланишган. Аммо мазкур тадқиқотларда гидродинамикани фаоллаштириш ва унинг асосида иссиқлик жараёнларини янада жадаллаштириш ҳамда ёқилғи ва энергия ресурслар истеъмолнинг самарадорлигини ошириш масалалари, юқори қулли кўмир ишлатиладиган ёқиш мосламаларида турғун гидродинамиканинг таъминланиши ва жадаллаштирилган қайнаш қатламининг илмий асослари ҳамда суюқлик оқими кинетик энергияси ҳисобига тебранма ҳаракатга келтириладиган локал турбулизаторлар конструкцияларини яратиш ва шу асосда иссиқлик алмашгичларда жараёнларни жадаллаштириш масалалари етарли даражада ўрганилмаган.

**Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган олий таълим муассасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университети илмий тадқиқот ишлари режасининг П-18.47-сон «Углерод диоксиди ва бошқа зарарли маҳсулотларни самарали ушлаб қолиш билан ёқилғини экологик хавфсиз ёқиш технологиясининг комплекс иссиқлик технологик схемаси» (2004-2005), М-Р-44-сон «Паст навли кўмирларни энергетик қўллаш технологияларини такомиллаштиришнинг назарий ва амалий асосларини ишлаб чиқиш» (2008-2009), А-3-79-сон «Полидисперс материалларга иссиқлик билан ишлов бериш ва паст навли қаттиқ ёқилғиларни ёқиш учун фаол гидродинамик режимли энергия самарадор кўп функцияли қурилма» (2015-2017) ва ОТ-А3-58-сон «Иссиқлик олиш технологик схемасида тутун газларининг иссиқлигини максимал қўллаш усули билан иссиқлик энергиясини ишлаб чиқаришнинг энергетик самарадорлигини ошириш» (2017-2018) мавзуларидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** иссиқлик энергетикаси ҳамда иссиқлик ишлатувчи қурилмаларининг (ёқиш мосламаси ва қувурли иссиқлик алмашгич мисолида) паст навли қаттиқ ёқилғини жадаллаштирилган қайнаш қатламида ёқишнинг энергия самарадор янги технологиясини ишлаб чиқиш, қурилма конструкциясини такомиллаштириш орқали гидродинамик ва иссиқлик алмашиниш жараёнларини жадаллаштиришдан иборат.

**Тадқиқот вазифалари:**

қаттиқ ёқилғи ёқиш ва иссиқлик алмашинув қурилмаларида гидродинамик ҳамда иссиқлик жараёнларини жадаллаштириш орқали уларнинг энергетик кўрсаткичларини аниқлаш;

паст навли қаттиқ ёқилғини ёқиш учун классик фавворали ва қайнаш қатламлар тамойиллари асосида янги жадаллаштирилган қайнаш қатламини яратиш;

паст навли қаттиқ ёқилғини ёқиш ва йўлдош кўшилмаларни сепарация қилиш учун кўп функцияли ёқиш мосламасининг конструкциясини яратиш;

жадаллаштирилган қайнаш қатламли ёқиш мосламасида кечадиган гидродинамик жараёнларнинг математик моделини яратиш;

иссиқлик элтувчи оқим кинетик энергияси ҳисобига тебранадиган локал турбулизаторнинг янги конструкцияларини ишлаб чиқиш;

локал турбулизаторли иссиқлик алмашинув қувурларида гидродинамик ва иссиқлик жараёнларни жадаллаштириш усулини ишлаб чиқиш;

гидродинамик ва иссиқлик жараёнларини жадаллаштиришни экспериментал тадқиқот қилиш учун ёқиш мосламаси ва локал турбулизатор билан қувурли иссиқлик алмашгичнинг тажриба намунасини яратиш;

иссиқлик энергетикаси жиҳозлари ва ишлаб чиқариш корхоналарининг иссиқлик ишлатувчи қурилмаларини ишлатишнинг энергия самарадор технологик схемаларини ишлаб чиқиш ва уларнинг энергетик самарадорлигини баҳолаш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида ёқилғи тайёрлаш, қаттиқ ёқилғини ёқиш ва қулни ушлаш тизимлари ҳамда иссиқлик электр станцияларининг иссиқлик алмашинув аппаратлари ва иссиқлик ишлатувчи саноат қурилмалари ва уларнинг параметрлари олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** иссиқлик энергетикаси қурилмаларида кечадиган гидродинамик ва иссиқлик жараёнларни жадаллаштириш усулларининг тамойиллари ва қонуниятларини ташкил этади.

**Тадқиқотлар усуллари.** Тадқиқот жараёнида математик моделлаш назарияси, гидродинамик ва иссиқлик жараёнларнинг физик модели, термодинамика ва иссиқлик техникасининг ҳисоблаш усуллари, гидродинамика ва иссиқлик жараёнларини тадқиқот қилишнинг сонли ва физик ҳамда олинган натижаларга ишлов бериш усулларидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

циркуляция қайнаш қатлами тамойилларидан фарқ қилувчи, шу билан бирга классик қайнаш ва фавворали қатламлар тамойилларига асосланган жадаллаштирилган қайнаш қатламининг физик моҳияти гидродинамик қонуниятлар асосида аниқланган;

юқори қулли кўмирни ёқиш учун классик фавворали ва қайнаш қатламлар тамойиллари асосида яратилган янги жадаллаштирилган қайнаш қатламли кўп функцияли ўтхона жиҳозининг такомиллаштирилган конструкцияси ва энергия самарадор технологияси ишлаб чиқилган;

жадаллаштирилган қайнаш қатламининг газ ва қаттиқ заррачалар тезлиги, қаттиқ заррачаларининг концентрацияси, ишчи камеранинг геометрик параметрларига нисбатан қаттиқ заррачалар-газ аралашмаси босимининг қатлам баландлиги бўйича йўқотилиши каби характерли кўрсаткичларини ифодаловчи математик модель ишлаб чиқилган;

жадаллаштирилган қайнаш қатлами гидродинамикасининг муҳим параметрлари бўлмиш газ ва заррачаларнинг вертикал ўқ бўйича тезликлари, ишчи камерада қаттиқ заррачанинг массаси ва ўлчамига боғлиқ ҳолда максимал баландликга кўтарилиши, қаттиқ заррачалар концентрацияси ва босим йўқотилишининг ишчи камера баландлиги бўйича ўзгаришининг экспериментал ва назарий графиклари ҳамда аналитик тенгламалари олинган;

иссиқлик алмашиниш қурилмаларининг қувурларига ўрнатиладиган ва суюқлик оқими кинетик энергияси ҳисобига тебранма ҳаракатга келтириладиган локал турбулизаторининг янги конструкциялари ишлаб чиқилган;

суюқлик оқимининг кинетик энергияси ҳисобига тебранадиған локал турбулизаторнинг иссиқлик алмашинув қувурларида гидродинамик ва иссиқлик алмашилиш жараёнларини жадаллаштиришнинг физик моҳияти ва турбулизатор элементлари ҳамда турбулизация майдонининг доимий тебранма ҳолатда бўлиши гидродинамик қонуниятлар асосида аниқланган.

**Тадқиқотнинг амалий натижаси** қуйидагилардан иборат:

ёқиш мосламаси ишчи камерасининг рационал конструкциясини аниқлаш имконини берадиган қаттиқ заррача-газ ҳаракати гидродинамикасини ҳисоблаш усули ишлаб чиқилган;

дисперс ва полидисперс материалларни қиздириш, қуритиш, қуйдириш, совутиш, газ олиш, ёқиш, тутуб қолиш, зичлиги ва ўлчамларига қараб сепарация қилиш жараёнларини битта аппаратда ўтказиш имконини берадиган, жадаллаштирилган қайнаш қатлам тамойилларига асосланган кўп функцияли ёқиш мосламаси ишлаб чиқилган;

локал турбулизаторларнинг янги конструкцияларини иссиқлик алмашинув қурилмаларига ўрнатиш ва иш режимларини бошқариш усуллари ишлаб чиқилган;

гидродинамик ва иссиқлик жараёнларини жадаллаштириш асосида иссиқлик энергетикаси ва иссиқлик ишлатувчи қурилмаларнинг энергия самарадорлигини ошириш усуллари ишлаб чиқилган ва ҳисоблаш тенгламалари аниқланган.

жадаллаштирилган қайнаш қатламли, энергия самарадор ёқиш мосламасининг такомиллаштирилган конструкцияси ва қувурли иссиқлик алмашигичлар учун тебранувчи локал турбулизаторларни ҳисоблаш усуллари ишлаб чиқилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги.** Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги термодинамика, гидродинамика ва иссиқлик алмашинуви назариясининг мос бўлимлари асосида ишлаб чиқилган адекват математик моделлар, назарий ва экспериментал маълумотларнинг синовдан ўтган усуллар билан таҳлил қилишда замонавий тадқиқот усулларининг қўлланиши билан таъминланганлиги ҳамда иссиқлик энергетикаси қурилмаларининг компьютер моделлари ва тажриба қурилмаларида олинган натижаларнинг қиёсий таҳлили ва уларнинг ўзаро мослиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти иссиқлик энергетикаси ва иссиқлик ишлатувчи қурилмаларда амалга ошириладиган гидродинамика ва иссиқлик алмашинув жараёнларига, иссиқлик ҳисоби назарияси ва амалиётига, иссиқлик техникасининг назарий асосларига, паст сифатли қаттиқ ёқилғиларни ёқишнинг ва иссиқлик алмашинув қурилмаларининг конструкцияларини такомиллаштиришга ҳамда уларнинг рационал параметрларини танлаш ривожига қўшган ҳиссаси билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти полидисперс материаллар билан турли иссиқлик жараёнларини (қиздириш, қуритиш, қуйдириш, совутиш, газ олиш, ёқиш, қаттиқ заррачаларни тутиш ва сепарация қилиш) бажариш учун ишлаб чиқилган кўп функцияли ёқиш мосламасининг ҳамда

иссиқлик алмашилини жадаллаштириш учун иссиқлик алмашинув курилмаларида локал турбулизаторнинг кенг кўламда қўлланилиши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларнинг жорий қилиниши.** Иссиқлик энергетикаси курилмаларининг (ёқиш мосламаси ва қувурли иссиқлик алмашигич) самарадорлигини ошириш, уларнинг асосий иссиқлик-техникавий ва конструктив параметрларининг рационал қийматларини аниқлаш, гидродинамик ва иссиқлик жараёнларини моделлаштириш бўйича олинган натижалар асосида:

жадаллаштирилган қайнаш қатламли кўп функцияли ўтхона жиҳозининг такомиллаштирилган курилмасига Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк Агентлигининг ихтирога патенти олинган («Полидисперс материалларга иссиқлик ишлов бериш ёки қаттиқ ёқилғиларни ёқиш учун курилма» № IAP 04840 2014 й.). Натижада саноат корхонасида йилига 4,7 млн. нм<sup>3</sup> табиий газни тежаш имкони яратилган;

иссиқлик алмашилиш курилмаларининг қувурларига ўрнатиладиган ва суюқлик оқими кинетик энергияси ҳисобига тебранма ҳаракатга келтириладиган локал турбулизатор конструкциясига Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк Агентлигининг ихтирога патенти олинган («Иссиқлик алмашилиш қувирининг турбулизациялаш курилмаси» № IAP 04514 2012 й.). Натижада саноат корхонасида йилига 1,0 млн. кВт\*соат электр энергияни тежаш имкони яратилган;

жадаллаштирилган қайнаш қатлам технологияси полидисперс материалларни қуриштириш, қиздириш, қуйдириш ва газификациялаш учун «Средацветметэнерго» АЖнинг ишлаб чиқариш цехида жорий этилган («Средацветметэнерго» АЖ 2018 йил 26 июндаги 62- сон маълумотномаси). Натижада корхонада йилига 3,0 млн. нм<sup>3</sup> табиий газни тежаш имкони яратилган;

жадаллаштирилган қайнаш қатлам технологияси полидисперс материал қаттиқ заррачаларини уларнинг ўлчами ва зичлиги бўйича сепарация қилиш, намлаш, совутиш ҳамда майда заррачаларни чўктириб тутиб қолиш учун «Средацветметэнерго» АЖнинг ишлаб чиқариш цехида жорий этилган («Средацветметэнерго» АЖ 2018 йил 26 июндаги 62- сон маълумотномаси). Натижада корхонада йилига 26 000 кВт\*соат электр энергияни тежаш имкони яратилган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқот натижалари 13 та халқаро конгресс ва анжуманларда, 4 та республика илмий амалий анжуманларида апробациядан ўтган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 35 та илмий иш чоп этилган, жумладан, 4 та халқаро, Ўзбекистон Республикаси ОАКнинг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш бўйича тавсия қилган илмий нашрларда 13 та (республика журналларида) мақола нашр этилган, Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк Агентлигининг 4 та ихтирога патентлари олинган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертация ҳажми 198 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

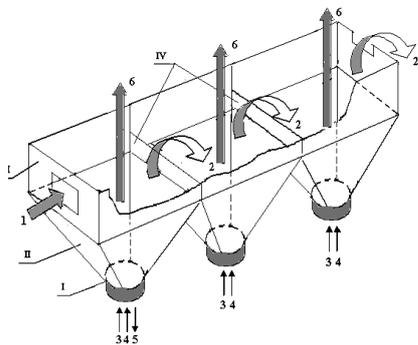
**Кириш** қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этиш, наشر этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Замонавий иссиқлик энергетика қурилмаларида энергия самарадорлигини ошириш имкониятлари**» деб номланган биринчи бобида тадқиқот масалаларининг замонавий ҳолати ва таҳлили асосида тадқиқотлар муаммоси шакллантирилган. Ушбу боб, мавжуд қайнаш қатламли ёқиш мосламалари ишининг самарадорлигини ва қувурли иссиқлик алмашгичларда иссиқлик элтувчи оқимини турбулизацияловчи конструкциялар ва услубларини таҳлил қилишдан бошланган. Ангрен қўнғир кўмирининг характеристикалари ва хоссалари ўрганилган ва кулининг кимёвий таркиби таҳлил қилинган. Маълум илмий ишлар ва маълумотлар манбааларининг таҳлили натижасида тадқиқот масалаларининг етарлича ўрганилмаганлиги эътироф этилган. Иссиқлик энергетикаси қурилмаларининг гидродинамик ва иссиқлик жараёнларини жадаллаштириш ҳамда конструкцияларини такомиллаштириш асосида уларнинг энергия самарадорлигини ошириш ва ҳисоблаш услубларининг етарли даражада ишлаб чиқилмаганлиги тадқиқот масаласининг замонавий ҳолатини таҳлил қилиш натижаси орқали ифодаланган.

Диссертациянинг «**Иссиқлик энергетикаси қурилмаларининг гидродинамик ва иссиқлик алмашинуви жараёнларини математик ва компьютерда моделлаштириш**» деб номланган иккинчи бобида назарий тадқиқотлар натижалари келтирилган. Классик қайнаш ва фавворали қатламлар принципларини биргаликда қўллаш, мавжуд ёқиш қурилмаларининг элемент ва конструкцияларини такомиллаштириш, ёқиш қурилмасининг принципиал янги, жадаллаштирилган қайнаш қатламли (ЖҚК) конструкциясини ишлаб чиқишга имкон яратди. Ёқиш мосламасининг физик модели 1- расмда келтирилган ва унинг ишлаш принциплари баён қилинган. Полидисперс кўмир 1 ҳаво 3 ва рециркуляция тутун газлари 4 билан микрофаввора ҳолатига келтирилади (расм 1). Ёниши ва урилиб парчаланиши ҳисобига ёқилғи қаттиқ заррачаларининг массаси ва ҳажми камая боради. Ёқилғининг нисбатан оғирроқ заррачалари қурилманинг пастки II (конус) қисмида, енгил заррачалар эса қурилманинг призматик III қисмини эгаллайди ва қайнаш қатламини ҳосил қилади. Тезликнинг критик олиб кетиш қийматларига эришган қаттиқ заррачалар бир секциядан кейингисига ўтиш

поғонаси IV орқали ўтади. Кейинги секцияларда критик тезликнинг қиймати олдинги секциядаги қийматига нисбатан кичик бўлади. Кулнинг асосий қисми охириги секцияда совутилади ва чиқариб ташланади. Барча секцияларда ёниш жараёнини бошқариш ва турғун гидродинамик ҳолатни сақлаш учун тутун газларининг маълум миқдори рециркуляция қилинади. Минерал қўшилма заррачаларини чиқариб ташлаш биринчи секциянинг пастки конуссимон қисмидан махсус мослама 5 орқали амалга оширилади.

Қурилманинг гидравлик қаршилигини камайтириш учун рационал геометрик шаклини аниқлаш муҳимдир. Қурилма пастки қисмини турли хил геометрик шакллари учун ҳисобий йўл билан гидравлик қаршиликлари тадқиқот қилинди. Бернулли ва Дарси-Вейсбах тенгламаларини қўллаб сууюқлик оқимиغا канал кўндаланг кесими юзаси шаклининг гидравлик қаршилиги аниқланди. Олинган интеграл боғланишлар Симпсон формуласини қўллаб тахминий услублар билан ҳисобланди. Ҳисоблашлар орқали квадрат шаклдаги кесим юза учун гидравлик қаршилиқ кичик қийматга эга бўлиши ҳамда нисбатан катта ўтказувчанликга эга эканлиги аниқланди. Кесик конус учун ишқаланиш коэффициентини топиш боғлиқлиги қуйидаги кўринишга эга бўлди:



**Расм 1.**

**Жадаллаштиришган қайнаш қатламли ёқиш мосламасининг принципал схемаси**

$$\lambda = \frac{\Delta p \cdot 4 \left( r + \frac{h}{N} \operatorname{tg} \alpha \right) \cdot g}{\frac{h}{N} \cdot \vartheta^2} ; \quad \Delta P = \frac{\rho \vartheta^2}{2\varphi^2}, \quad (1)$$

бу ерда  $h/N$  – конуснинг нисбий баландлиги;

$\alpha$  - конуслик бурчаги, бизнинг ҳолатда  $\alpha = 30^\circ$ ,  $r$  – конус асосининг радиуси, м;  $\rho$  - муҳит зичлиги,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\varphi$  - тезлик коэффициенти;  $\vartheta$  - берилган кесимдаги ўртача тезлик, м/с.

Қурилмада турғун ва ривожланган ЖКҚ гидродинамикасининг муҳим параметрларини ва улар орасидаги боғлиқларни аниқлаш учун жараёнларни математик моделлаштириш масалалари кўриб чиқилган. ЖКҚ нинг юқорида келтирилган принципларига асосланиб ишчи камера секциясида марказий ўқ узунлиги бўйича гетероген муҳитнинг ҳаракатланиш тенгламасини ёзиш мумкин:

$$C_V \rho_M (\overline{W} \nabla) \overline{W} = \rho_M C_V g + \frac{3}{4} \xi \frac{C_V \rho_G}{d} |\overline{\vartheta} - \overline{W}| (\overline{\vartheta} - \overline{W}) - \nabla(C_V P), \quad (2)$$

бу ерда  $\overline{W}$  ва  $\overline{\vartheta}$  - қаттиқ муҳит ва газ тезликлари, м/с;  $\rho_M$  ва  $\rho_G$  - кўмир ва газнинг зичлиги,  $\text{кг/м}^3$ ;  $C_V$  – материалнинг газдаги хажмий концентрацияси;  $d$  – кўмир заррачаларининг диаметри, м;  $\xi$  – кўмир заррачасининг тўқнаш қаршилиқ коэффициенти;  $P$  – газ босими, Па.

Берилган тенгламани ечиш учун қуйидаги фикрларни қабул қиламиз:

1) кўмир заррачалари ва газнинг оқим ядросидаги ҳаракати бир текис; 2) кўтарилаётган оқим ядросида кўмир заррачаларининг қуриши ва майдаланиши жуда кичик; 3) газ ва қаттиқ заррачанинг радиал ва тангенциал тезликлари анча кичик.

Юқорида келтирилганларни инобатга олган ҳолда (2) - тенглама қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$W_z \frac{dW_z}{dz} = g + \frac{3}{4} \frac{\rho_r}{\rho_M} f(\text{Re})(g_z - W_z)^2 - \frac{1}{\rho_M} \frac{dp}{dz}, \quad (3)$$

бунда:  $z$  – вертикал координата;  $g_z$  ва  $W_z$  - тезликларнинг  $z$  ўқиға проекциялари, м/с.

Ёқиш камерасини баландлик бўйича шартли равишда  $n$  участкаларға бўламиз ва  $i$  - участкада ( $i = 1, n$ )  $g_z = \text{const}$  деб қабул қиламиз.

Қайнаш қатлами учун ишчи камера баландлиги бўйича босим йўқотилиши тенгламасини

$$\frac{dP_i}{dz} = -\frac{\Delta P_i}{\Delta h_i} = -\rho_M C_{v_i} g \quad (4)$$

кўринишда ёзишимиз мумкин, бунда:  $\Delta P_i$  - оқим ядросининг  $i$  - участкасида босим тушиши;  $\Delta h_i$  – аппаратнинг  $i$  - участкаси баландлиги;  $C_{v_i}$  - аппарат ядросида материалнинг хажмий концентрацияси.

У ҳолда (3) - тенглама қуйидаги кўринишға эга бўлади:

$$\frac{dW_{z_i}}{dz} = (1 + C_{v_i})g / W_{z_i} + \frac{3}{4} \frac{\rho_r}{\rho_M d} f_i(\text{Re})(g_z - W_{z_i})^2 / W_{z_i}. \quad (5)$$

(5) - тенглама учун бошланғич шартларни  $W_z(z_0) = W_{z_0}$  кўринишда қабул қиламиз. Радиал тезликнинг камера радиусига боғлиқлиги  $V_R(\theta) = B \theta^2$  кўринишда бўлади (бунда  $B$  – қиймати материал баланسدан аниқланадиган пропорционаллик коэффиценти), конуснинг очилиш бурчаги  $\theta$ , газ аралашмаси марказий оқимининг радиуси  $r_0$  га боғлиқлигини эътиборға олиб математик ўзгартиришларни амалға оширган ҳолда, марказий оқимдаги ўртача тезликнинг боғлиқлигини аниқлаш мумкин ва  $i$  – участка учун унинг ечими қуйидаги кўринишда бўлади:

$$g_{z_i} = \frac{L f_1(\theta_{*i})}{2\pi z_i^2 J_1}, \quad (6)$$

бунда:  $J_1 = -\theta_0^2 \cos\theta_0 + 2\theta_0 \sin\theta_0 - 2\cos\theta_0 + 2$ ;  $\theta_0$  - камера конуси учун очилиш бурчагининг ярми;  $L$  – аппаратдаги газнинг тўлиқ сарфи, м /с<sup>3</sup>;  $\theta_*$  қуйидаги тенгликдан аниқланади:  $\sin(\theta_*) = r_0 / z$ .

(6) - тенгламани эътиборға олиб, (5) - тенглама Рунге-Кутт услубини қўллаб, Коши масаласи каби ечилади.

$Z$  ўқи бўйлаб қаттиқ заррачалар тезлигини аниқлаш учун қуйидаги тенглама топилади:

$$W_{z_i} = -\frac{G_M}{C_{v_i} S_1 \rho_M}. \quad (7)$$

Бу ерда:  $G_M$  – аппаратга берилаётган материал сарфи, кг/с;  $S_1$  - ядро кесимининг юзаси,  $m^2$ ;  $S_1 = \pi r_0^2$ ;  $r_0$  – ядро радиуси, м.

(5) - тенгламадан топилган  $W_{z_i}$  қийматини (7) - тенгламага қўйиб, газ таркибидаги материалнинг  $i$  - участкадаги  $C_{V_i}$  - ҳажмий концентрациясини ва ундан сўнг  $i$  - участкадаги кўтарилиш вақти  $\tau_i$  ни топиш мумкин:

$$\tau_i = \frac{\Delta h_i C_{V_i} S_1 \rho_M}{G_M} . \quad (8)$$

Унда, аппарат ядросида материалнинг тўла кўтарилиш вақти:

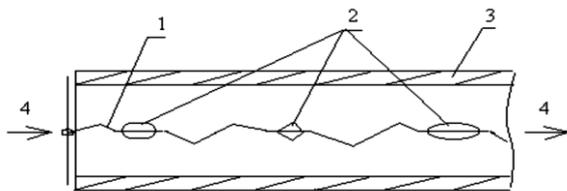
$$\tau = \sum_i \tau_i . \quad (9)$$

Қатламда қаттиқ заррачалар эгаллаган энг юқори нуқтани  $Z_{max} = H$  деб белгиласак, қатламда қаттиқ заррачалар кўтариладиган максимал баландикни характерлайдиган боғланиш олинди:

$$H = \frac{\ln \left[ \left( 1 - \frac{v}{G_M} v^2 \right) \left( 1 + \frac{v}{G_M} v_0^2 \right) \right]}{2 \frac{v}{G_M} g} . \quad (10)$$

(10) - тенглама маълум вақт оралиғида тезлик  $U$  ва масофа  $H$  орасидаги боғланишни ифодалайди. Тезлик кўрсаткичи  $U$  нинг ўзгартирилиши орқали заррачаларнинг ишчи камера баландлиги бўйича ҳаракатланиш траекториясини ва концентрациясини аниқлаш мумкин. Параметр  $H$  қийматини билган ҳолда заррачаларнинг ҳар бир секцияда бўлиш вақти ва ишчи камера унумдорлигини бошқариш имконини таъминлайдиган секциялар орасидаги ўтиш поғоналари баландлиги аниқланади.

Олинган математик модель Рунге-Куттнинг 4 - даражали услуби билан ечилган. Ҳисоблар алгоритмининг блок-схемаси яратилган. Сонли



**Расм 2. Турбулизаторли тажриба қувурининг схемаси:**

- 1 – зангламайдиган сим;**
- 2 – ғовак турбулизаторлар;**
- 3 - иссиқлик алмашиқ қувури;**
- 4 – суюқлик оқимининг ҳаракатланиш йўналиши**

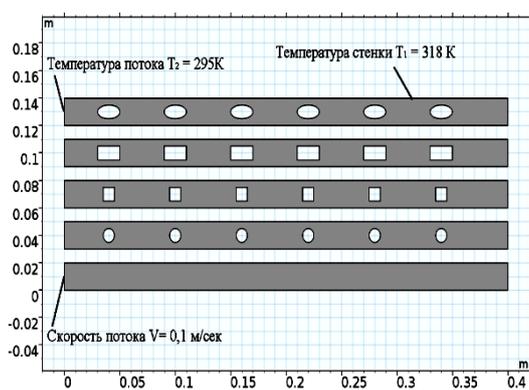
тадқиқотларда **Matlab** дастурий маҳсулоти қўлланилган. Сонли ва экспериментал тадқиқотлар натижалари III бобда келтирилган.

Ишлаб чиқилган локал турбулизаторларнинг (ЛТ) янги конструкциялари қўлланилган қувурли иссиқлик алмашиқларда гидродинамика ва иссиқлик алмашиқининг жадаллаштириш жараёнлари бўйича компьютерда моделлаштириш ва сонли тадқиқот натижалари келтирилган.

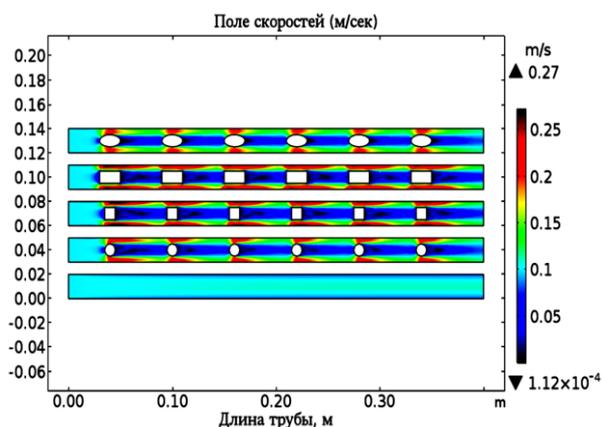
Экспериментал моделнинг ишлаш принциплари келтирилган. Эркин шаклдаги ингичка сим ва ғовак материалдан ясалган сферик ва бошқа

шаклдаги турбулизаторлар 2 ЛТнинг асосий элементлари ҳисобланади (расм 2). Симнинг бир учи қувурнинг 3 кириш қисмига маҳкамланади, иккинчи учи эса эркин қолдирилади. Сув оқими 4 ғовак жисмнинг нотекис юзасини ювиб ўтиши натижасида уларни бўйлама ва радиал йўналишда тебранма ҳаракатга келтиради. ЛТ элементларининг тебраниш частотаси симнинг тарангилик кучига, ғовак жисмнинг солиштирма оғирлиги ва шаклига боғлиқ. Шу усулда суюқлик оқими қувурнинг бутун ҳажми бўйича турбулизацияланади. Интернетнинг эркин ҳудудида жойлашган *COMSOL Multiphysics* дастурий маҳсулотни қўллаб, компьютер модели яратилган. Бу дастурнинг танланишига уни ишлатишнинг соддалиги, экспериментнинг аниқлиги ва илмий тадқиқотлардаги чекланмаган имкониятлари асос бўлди. Иссиқлик алмашинув қувурида суюқлик оқими турбулизациясининг сонли тадқиқоти амалга оширилган.

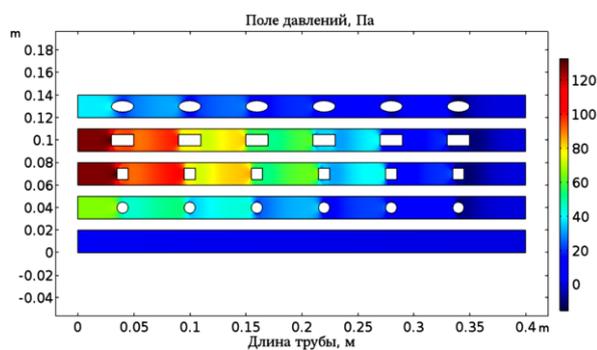
Суюқликдаги турбулентли иссиқлик-масса алмашинув модели Навье-Стокс тенгламасини (импульснинг сақланиш қонуни), узлуксизлик тенгламасини (суюқлик массасининг сақланиш қонуни), скаляр катталиқнинг диффузион узатилиши тенгламасини (массанинг сақланиш қонуни) ўз



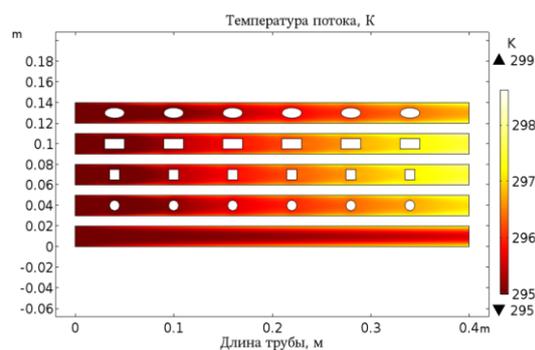
**Расм 3. Тажриба моделининг тузилиши**



**Расм 4. Тезликлар майдонининг тақсимланиши, V [m/c]**



**Расм 5. Оқим босими майдонининг тақсимланиши, P [Па]**

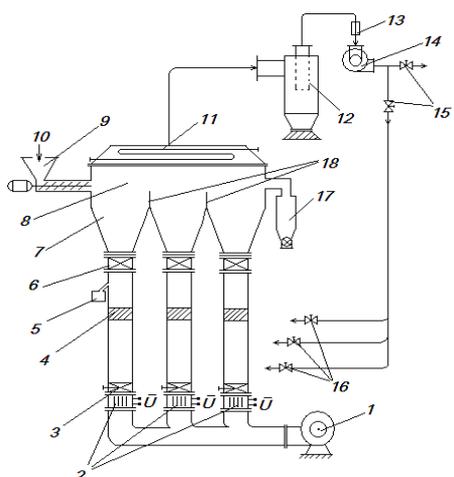


**Расм 6. Ҳарорат майдонининг тақсимланиши, T [K]**

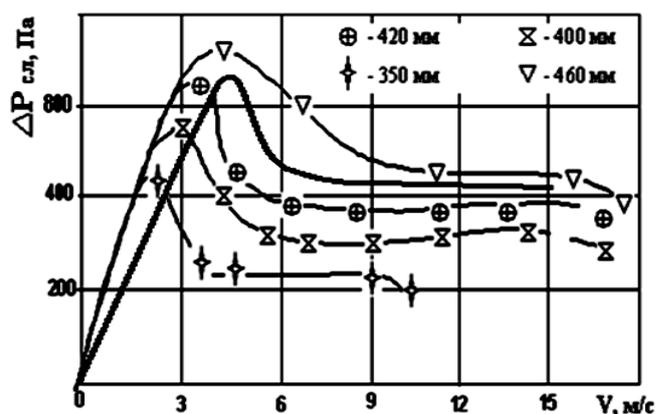
таркибига олган. Иссиқлик алмашинуви ва гидродинамик жараёнларни жадаллаштиришга қаратилган тадқиқотларнинг зарур натижалари олинди. Таклиф этилаётган ЛТ конструкцияларининг натижасини кўрсатувчи сонли

тадқиқотлар сериясининг умумлаштирилган графиклари 3 -, 4 -, 5 - ва 6 - расмларда келтирилган.

Диссертациянинг «**Экспериментал қурилмаларни ишлаб чиқиш ва яратиш, гидродинамика ва иссиқлик алмашинув жараёнларини тадқиқот қилиш**» деб номланган учинчи бобида экспериментал қурилмалар тавсифи, тажрибалар ўтказиш услублари ва экспериментал тажрибаларнинг натижалари келтирилган. ЖКҚнинг гидродинамик характеристикаларини тадқиқот қилиш учун бир қатор экспериментал қурилмалар ишлаб чиқилди ва яратилди. Қурилмаларда ВВД-4 вентилятор, Testo 405-V1 термометри ва ММН-2400 диференциал микроанометри ишлатилди. Паст навли кўмирларнинг гидродинамик кўрсаткичларини ЖКҚда тадқиқот қилиш учун яратилган уч секцияли тажриба қурилмаси (расм 7) куйидагилардан иборат: вентилятор 1, калорифер 2, ҳаво сарфи ростлагичи 3, сарф ўлчагич 4, оғир заррачаларни йиғувчи идиш 5, уюрмалагич 6, қурилма конуссимон 7 ва тўртбурчак 8 қисмлари, бункер 9 ва 10, иссиқлик қабул қилгич 11, циклон 12, фильтр 13, вентилятор 14, тутун газлари рециркуляцияси 15 ва 16, кул йиғич 17 ва оқиб ўтиш поғонаси 18. Секциялар баландлиги  $H = 750$  мм, тўртбурчак қисмининг томонлари  $200 \times 200$  мм. Қурилма маҳсулдорлиги  $G = 22 \dots 24$  кг/соат.

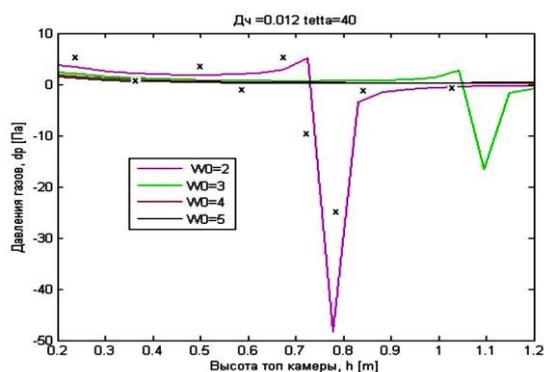
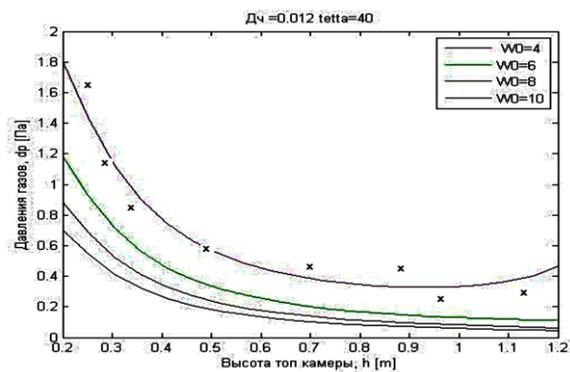


**Расм 7. Жадаллаштирилган қайнаш қатламли уч секцияли тажриба қурилмасининг схемаси**

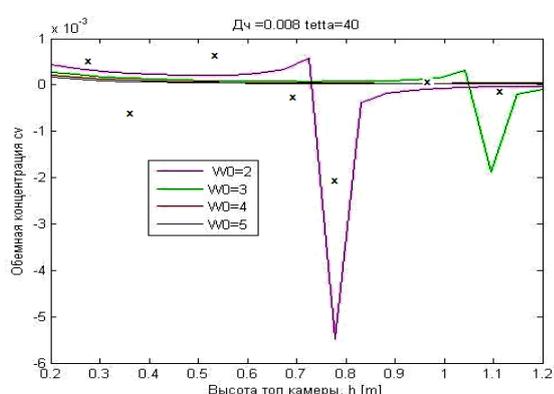
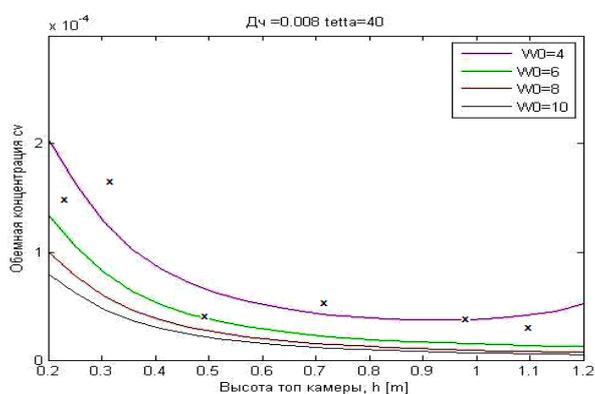


**Расм 8. ЖКҚда бошланғич қатламнинг турли баландликларида модел материаллар учун гидравлик қаршилиги ва критик тезлик графиклари**

Тадқиқотларда қаттиқ заррачалар ҳаракат траекториясини ва уларнинг тезликларини ўлчашда GR-D850AS рақамли видеокамера қўлланилган.



**Расм 9. Заррачаларнинг  $W_0$  кириш тезлигининг турли қийматларида  $\Delta P = f(\Delta h)$  графиклари: заррача диаметри  $d_c = 12$  мм, конуснинг очилиш бурчаги  $\theta = 40^\circ$ , x – эксперимент натижалари**

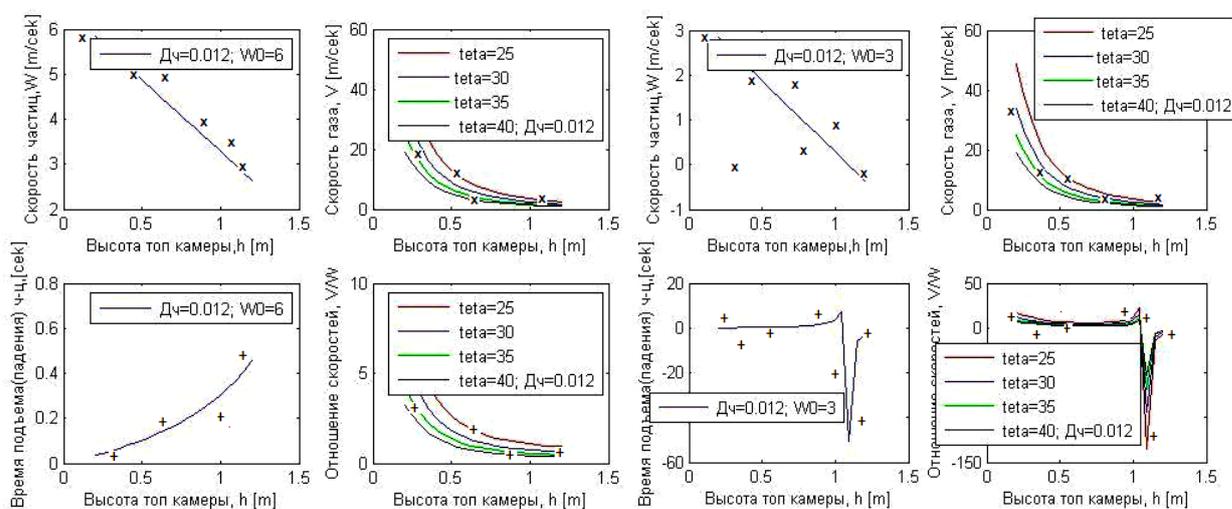


**Расм 10. Заррачаларнинг  $W_0$  кириш тезлиги турли қийматларида  $C_v = f(h)$  графиклари: заррача диаметри  $d_c = 8$  мм, конуснинг очилиш бурчаги  $\theta = 40^\circ$ , x – эксперимент натижалари**

Модел материаллар учун умумлаштирилган фаввора эгри чизиқлари 8-расмда келтирилган. Узлуксиз чизиқ сонли ҳисоб натижаларини ифодалайди. Ушбу график орқали ЖКҚ гидродинамикаси учун муҳим бўлган кўрсаткичлари – иссиқлик элтувчининг тезликлар бўйича биринчи ва иккинчи критик нуқталари аниқланган. Иккита критик нуқта оралиғи ЖКҚ гидродинамикасининг турғунлиги билан тавсифланади. Модел материал сифатида нўхат, кунгабоқар пистаси, гречка, аммоний силикати грануласи ва полидисперс кўмир ишлатилди. Қатлам турғунлиги унинг баландлигига, қаттиқ ва газ муҳитлариининг физик характеристикаларига, қурилманинг геометрик кўрсаткичларига боғлиқлиги аниқланган. Сонли ва экспериментал тадқиқотларнинг айрим натижалари 9 -, 10 - ва 11 - расмларда келтирилган. Ишчи камеранинг  $\Delta h$  баландлигига эга элементар ҳажм кесимларида газлар босимининг камера баландлиги бўйича ўзгариш характери 9- расмда берилган. Эгри чизиқлар  $d_c = 12$  мм бўлган кўмир заррачалари учун бошланғич тезлик  $W_0 = 2 \dots 10$  м/с да олинган. Тезлик қийматлари  $W_0 = 3,0 \dots 3,5$  м/с дан кичик бўлганда чизиқларнинг синиши кузатилади, бу нотурғун гидродинамик ҳолат мавжудлигини, яъни маълум миқдордаги заррачаларни керакли

бадандликга кўтариш учун босимнинг етарли эмаслигини кўрсатади. Ушбу графиклардаги сакрашлар ишчи камерасининг фаввора қатлами тугаётган ва қайнаш қатлами бошланаётган баландлигига тўғри келади. 10 - расмда газ таркибидаги қаттиқ заррачалар концентрацияси  $C_V$  нинг 9 - расмда келтирилган кўрсаткичлар ва ўша  $\Delta h$  да ўзгариши келтирилган. Бу ерда ҳам  $W_0 = 3,0 \dots 3,5$  м/с да нотурғун кўрсаткичли участкалар кузатилди. Кўрилаётган графиклардаги сакрашлар ишчи камерасининг фаввора қатлами тугаётган ва қайнаш қатлами бошланаётган баландлигига тўғри келади.

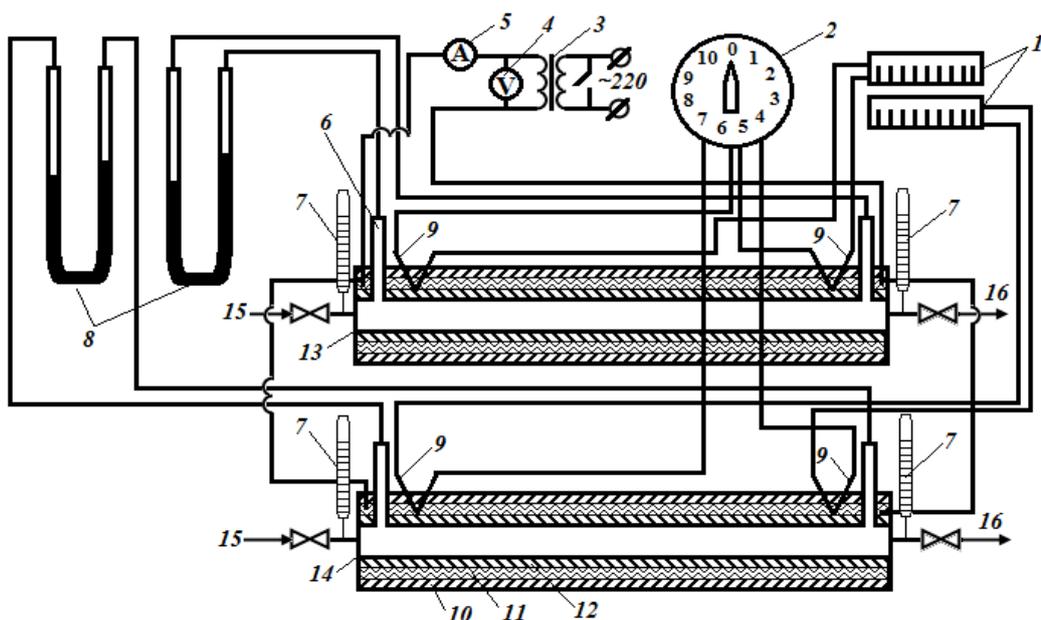
Жадаллаштирилган қайнаш қатлам гидродинамикасини характерловчи қаттиқ заррача  $W$  ва газ  $V$  тезликлари, уларнинг нисбати ҳамда  $\Delta h$  га нисбатан қаттиқ заррачаларнинг кўтарилиш вақти каби кўрсаткичлар бўйича тадқиқот натижалари 11 – расмда келтирилган. Эгри чизиқлар  $W_0$  ва  $\theta$  нинг турли қийматларида олинган. Заррачалар тезлиги юқорига кўтарилган сари ишчи



**Расм 11. Камера баландлиги  $\Delta h$  га нисбатан кўмир заррачалари  $W$  ва газнинг  $V$  тезлиги, заррачаларнинг кўтарилиш вақти  $\tau$ , газ ва заррача тезликлари нисбати  $V/W$  графиклари,  $x$  – эксперимент натижалари**

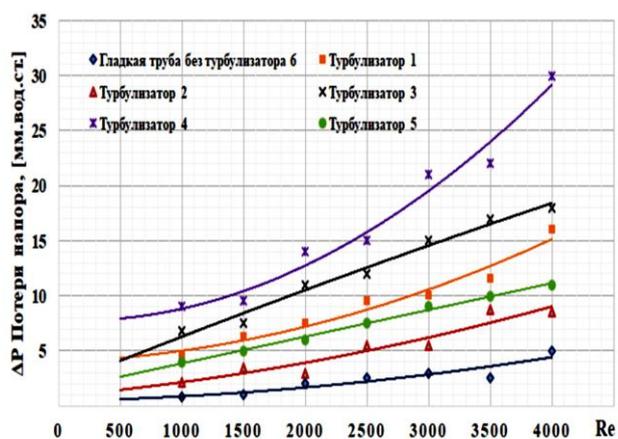
камера каналининг кенгайиши ва босимнинг тушиши (газ оқими тезлигининг пасайиши) ҳисобига монотон равишда камайиб боради. 11 – расмда келтирилган графиклар  $W_0 = 6,0$  м/с ва  $W_0 = 3,0$  м/с олинган.  $W_0 = 3,5$  м/с тезликда заррачаларнинг кўтарилиш вақти ва тезликлар нисбати графиклари турғун гидродинамиканинг бузилиши чегарасида жойлашган.  $W_0 = 3,0$  м/с дан бошлаб жараён турғунлиги бузилади.

ЖҚҚ гидродинамикасининг математик моделини ҳисоблаш натижалари экспериментал қурилмаларда олинган натижалар билан Фишер мезони бўйича адекватликга баҳоланди. Заррачаларнинг ишчи камерасида бўлиш вақтининг корреляция коэффиценти 0,76 ни ташкил этди. Фишер мезонининг ҳисобий қиймати  $F_p = 2,55$ , ишончлилик эхтимоли  $P = 0,95$  да, жадвалий қиймати  $F_T = 5,4$ . Ишлаб чиқилган ЛТ ёрдамида гидродинамика ва иссиқлик алмашинуви жараёнларининг жадаллаштирилишини тадқиқот қилиш учун бир неча тажриба қурилмалари яратилди, улардан бири 12 - расмда келтирилган.

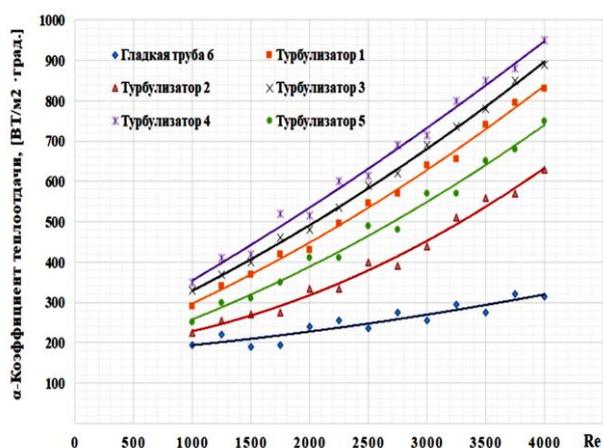


**Расм 12. Локал турбулизаторли қувурларда иссиқлик ва гидродинамика жараёнларини тадқиқот қилиш учун экспериментал қурилманинг принципал схемаси: 1 – логометрлар; 2 – терморелеларни улаш; 3 – лаборатория трансформатори; 4 – вольтметр; 5 – амперметр; 6 – штуцерлар; 7 – термометрлар; 8 – манометрлар; 9 – терморелелар; 10 – иссиқлик изоляцияси; 11 – электр қиздиргич; 12 – қувур девори, 13 – турбулизаторли қувур; 14 – турбулизаторсиз қувур; 15 ва 16 - сувнинг кириш ва чиқиши**

Гидродинамик кўрсаткичларнинг рационал қийматлари аввал шиша қувурли “совук” моделда аниқланди ва сўнгра иссиқлик коэффицентларини аниқлаш учун “иссиқ” қувурга ўтказилди. ЛТ самарадорлигини тадқиқот қилиш натижалари 13 - ва 14 - расмларда келтирилган.

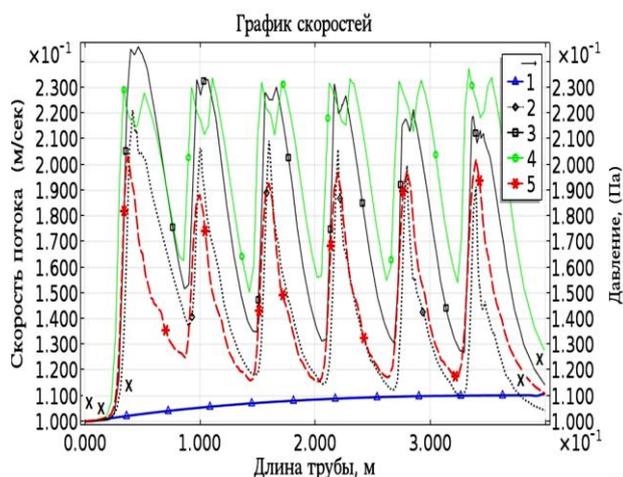


**Расм 13. ЛТ конструкциялари ўрнатилган қувурнинг гидравлик қаршилиги**

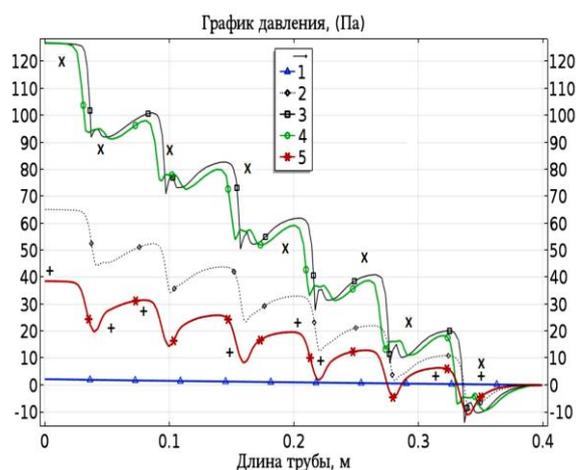


**Расм 14. ЛТ конструкциялари ўрнатилган қувурнинг иссиқлик бериш коэффиценти**

Тадқиқотлар  $Re$  нинг (200-5000) қийматлари оралиғида ўтказилди. Бундан  $Re$  ортиши билан иссиқлик алмашинуви кўтарилиши кўриниб турибди. Тегишли мезонли боғланишлар олинган. Бунда айрим ЛТ конструкцияларининг самарадорлиги гидравлик қаршилиқнинг жиддий ортишига олиб келгани аниқланди. Тажрибалар натижалари асосида ЛТнинг рационал конструкцияси танлаш амалга оширилди. 15 -, 16 -, 17 - ва 18 - расмларда сонли тадқиқот натижаларидан келиб чиққан график кўринишдаги боғланишлар ва “х” белгиси билан белгиланган экспериментлар натижалари келтирилган. Тезликлар графигидан (15- расм) кўринадики, суyoқлик оқими ЛТ таъсирида



**Расм 15. ЛТ конструкциялари ўрнатилган қувурдаги суyoқликнинг тезлик графиклари, х – эксперимент натижалари**

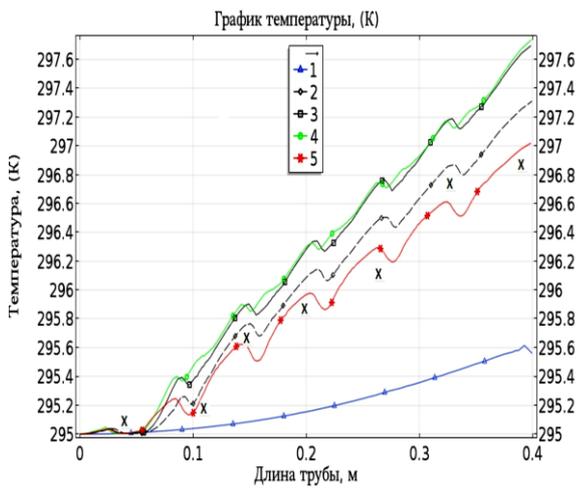


**Расм 16. ЛТ конструкциялари ўрнатилган қувурнинг узунлиги бўйича суyoқлик босими йўқотилиши графиклари, х – эксперимент натижалари**

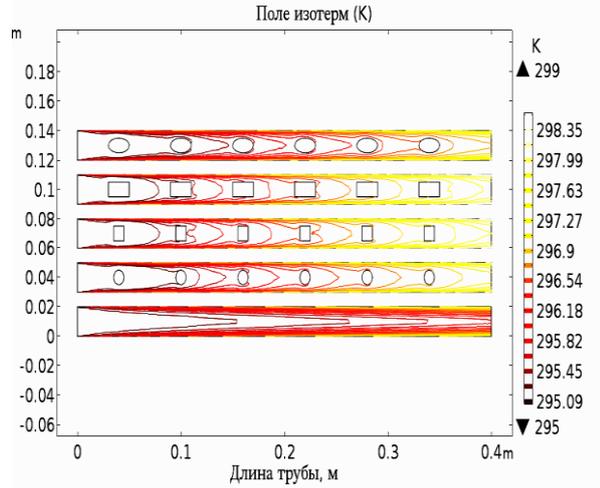
турбулент ҳолатга ўтган. Графикдаги нисбатан тўғри чизиқ силлиқ қувурдаги (ЛТ йўқ) ўша режимнинг оқими тавсифлайди. Қувур узунлиги бўйича босимнинг йўқотилиши 16 - расмда кўрсатилган. Графикдаги ҳар бир сакраш ЛТ элементлари турган жойга мос келган. 17 - ва 18 - расмларда суyoқлик ҳароратининг ўзгариши ва изотермалар таҳлили келтирилган ва булардан кўринадики, суyoқлик ҳароратининг кўтарилишига ЛТ борлиги сезиларли таъсир кўрсатган. Шу билан бирга, ЛТ конструкциялари орасида ҳарорат ўзгаришида фарқ кузатилган. Бу эса, ЛТнинг янги конструкцияларини қўллаб, иссиқлик алмашинув самарадорлигини оширишда ҳали катта резерв борлигини кўрсатган.

19 - расмда ЛТ конструкциялари иш самарадорлигининг таҳлили  $\Delta P/\Delta P_{\text{гл}}$  ва  $Nu/Nu_{\text{гл}}$  нисбатларнинг  $Re$  сонига боғлиқлиги орқали ифодаланган график келтирилган ва ундан иссиқлик алмашинув қурилмасининг самарадорлигини ошириш учун белгиланган ЛТ конструкцияси параметрларининг рационал зонаси ва иссиқлик алмашинув жараёнининг режимларини аниқлаш мумкин.

**Диссертациянинг «Иссиқлик энергетика қурилмалари ва аппаратларининг ишланмалари ва уларнинг энергия самарадорлигини**



**Расм 17. Қувур узунлиги бўйича харорат ўзгариши графиги, x - эксперимент натижалари**

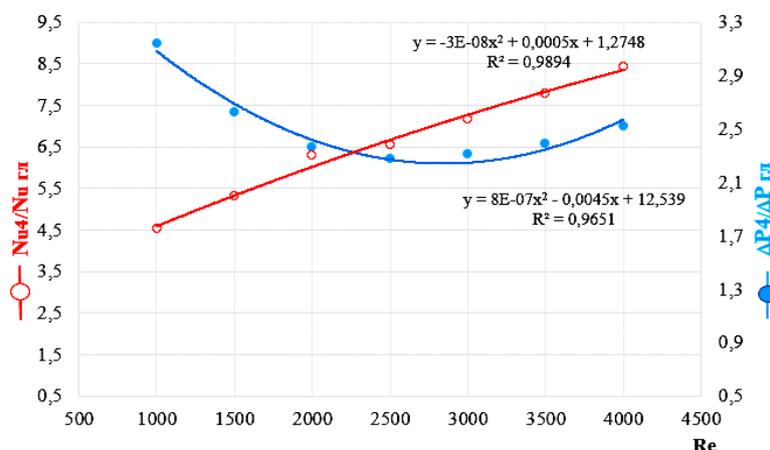


**Расм 18. ЛТ конструкциялари ўрнатилган қувурларда суюқлик изотермалари майдони**

баҳолаш» деб номланган тўртинчи бобида иссиқлик энергетика қурилмалари ва жиҳозларининг янги ишланмаси ва такомиллаштирилган конструкциялари келтирилган.

«Средацветметэнерго» АЖда жорий қилишдан қутилган тежамкорлик йилига 1,26 млн. кВт\*соат электр энергияни ва 7,7 млн. нм<sup>3</sup> табиий газни ташкил қилди.

Илмий ишланма амарант ўсимлигининг уруғини қуритиш, сепарация қилиш ва совутиш жараёнларини амалга ошириш қурилмаси сифатида тадбиқ этилди. Самарали қуритиш, йўлдош қўшимчаларни сепарация қилиш ва самарали совутиш ҳисобига бошқа усул ва услубларга нисбатан ёғ чиқишини 0,3 % оширилиши шаклида самарадорликга эришилган.



**Расм 19. ЛТ конструкциясини рационал кўрсаткичлари графиги**

Диссертация иловаларида жадаллаштирилган қайнаш қатламли қурилманинг ишчи камерасида кечадиган гидродинамик жараёнларнинг ишлаб чиқилган математик моделини ҳисоблаш дастурининг матни ҳамда

кўриб чиқилаётган диссертацияда келтирилган илмий тадқиқот ишларининг натижалари асосида ишлаб чиқаришга тадбиқ этилган ва тадбиқ этишга қабул қилинган ишланмаларнинг энергетик самарадорлик ҳисоблари келтирилган.

## ХУЛОСА

Техника фанлари доктори (DSc) диссертацияси мавзуси «Гидродинамик жараёнларни жадаллаштириш асосида иссиқлик энергетикаси қурилмаларининг энергетик самарадорлигини ошириш усуллари» илмий иш натижалари асосида қуйидаги хулосалар тақдим этилган:

1. Ёқиш мосламаси ва қувурли иссиқлик алмашгич мисолида иссиқлик энергетика қурилмаларининг замонавий ҳолати ва ривожланиш истикболлари ўрганилди. Конструкцияларни такомиллаштириш ва гидродинамик жараёнларни жадаллаштириш натижасида паст навли қаттиқ ёқилғи ёқишнинг ҳамда қувурли иссиқлик алмашинув қурилмаларнинг энергетик самарадорлигини ошириш учун сезиларли резервлар борлиги аниқланди.
2. Паст навли қаттиқ ёқилғини классик фавворали-қайнаш қатламлари асосида ташкил этилган жадаллаштирилган қайнаш қатлами гидродинамик жараёнларини жадаллаштиришнинг илмий асослари ишлаб чиқилди ва натижада янги технологиянинг яратилиш имконини берди.
3. Паст навли қаттиқ ёқилғини ёқиш учун ҳамда полидисперс материаллар билан бошқа иссиқлик ва масса алмашиниш (қуритиш, қиздириш, пишириш, газификациялаш, қаттиқ заррачаларни ўлчам ва зичлигига қараб сепарациялаш, намлигини ошириш, совутиш ва майда дисперсли чангни ушлаш) жараёнларини амалга оширувчи янги, илмий асосланган конструкцияси ишлаб чиқилди. Ушбу қурилма, «Средазцветметэнерго» АЖда жорий қилиниши натижасида, йилига 1,26 млн. кВт\*соат электр энергияни тежаш имконини берди.
4. ЖКҚ гидродинамикасининг математик модели ишлаб чиқилди ва Рунге-Куттнинг тўртинчи даражали усули билан ечилган ночизиқли дииференциал тенглама келтириб чиқарилди. Сонли усулда ечиш *Matlab* дастурий муҳитида амалга оширилди. Натижада гидродинамиканинг муҳим параметрлари бўлмиш газ ва заррачаларнинг вертикал ўқ бўйича тезликлари, ишчи камерада қаттиқ заррачанинг массаси ва ўлчамига боғлиқ ҳолда максимал баландликга кўтарилиши, қаттиқ заррачалар концентрацияси ва босим йўқотилишининг ишчи камера баландлиги бўйича ўзгаришининг экспериментал ва назарий графиклари ҳамда аналитик тенгламалари олинди.
5. Жадаллаштирилган қайнаш қатламли ёқиш мосламаси ишчи камерасининг гидравлик қаршилигини минималлаштириб такомиллаштирилган конструкциясини ҳисоблаш услуги ишлаб чиқилди. Натижада энергия самарадор қурилмалар яратилиши имконини берди.
6. Жадаллаштирилган қайнаш қатламининг гидродинамикаси бўйича биринчи марта янги экспериментал маълумотлар олинди ва сонли усулда

бажарилган ҳисоб натижалари билан таққослаш таҳлили бажарилди ҳамда олинган тадқиқот натижаларининг адекватлиги аниқланди. Натижада ушбу олинган маълумотлар гидродинамик, иссиқлик ва конструктив ҳисобларни бажаришда ишлатилди.

7. Иссиқлик элтувчи оқим кинетик энергияси ҳисобига локал турбулизаторларнинг тебранадиған элементлари асосида иссиқлик алмашинув қувурларида суюқлик оқими турбулизациясининг илмий асослари яратилди. Натижада иссиқлик алмашиниш жараёнини силлиқ юзага нисбатан 2...3 марта оширишга эришилди.
8. Иссиқлик алмашиниш аппаратларининг қувурларига ўрнатиладиган, суюқлик оқимининг кинетик энергияси ҳисобига тебранадиған ва шунинг натижасида суюқликнинг чегараланган ҳажмда турбулизацияланган майдонлар фазовий ҳолатини силжити оладиган ЛТнинг бир қатор энергия самарадор янги конструкциялари ишлаб чиқилди.
9. *COMSOL Multiphysics* дастурий муҳитида ЛТ қўлланилган иссиқлик алмашигич қувурларида кечадиған гидродинамик ва иссиқлик алмашинуви жараёнларининг компьютер модели ишлаб чиқилди ва сонли усулда тадқиқотлар ўтказилди. Натижада сонли усулда ҳисоблаш суюқлик оқим турбулентлиги, иссиқлик алмашинувининг жадаллаштирилиши ва гидравлик қаршиликни камайитириш ҳамда ЛТ элементларининг рационал конструкцияларини ҳисоблаш имконини берди.
10. ЛТ қўлланилган қувурларда гидродинамик ва иссиқлик алмашиниш жараёнлари бўйича янги экспериментал маълумотлар олинди ва сонли тадқиқот натижалари билан таққослаш орқали олинган илмий натижаларнинг адекватлиги аниқланди. Натижада олинган маълумотлар ЛТ қурилмаларини қўллаб гидродинамик ва иссиқлик ҳисобларини бажариш ва энергия самарадорликни аниқлаш имконини берди.
11. Илмий изланиш натижалари ишлаб чиқаришга йилига 523 880 нм<sup>3</sup> тежалган табиий газ, 462 тонна қўмир ва ўсимлик уруғидан ёғ чиқишини 0,3% оширилиши билан тадбиқ этилди. Энергия самарадорлик йилига 7,7 млн. нм<sup>3</sup> табиий газ ва 1,26 млн кВт\*соат электр энергияни ташкил этди.
12. Диссертация мавзуси бўйича Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк Агентлигининг 4 та ихтирога патентлари олинди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК DSc 27.06.2017.Т.03.03 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ И  
ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР»**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**БАБАХОДЖАЕВ РАХИМЖАН ПАЧЕХАНОВИЧ**

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ  
ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**05.05.04 – Промышленная теплоэнергетика  
(технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ (DSc) ДИССЕРТАЦИИ  
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2018**

**Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2017.3.DSc/Т153.**

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) и Информационно-образовательном портале “ZiyoNet” ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Научный консультант:** **Мухиддинов Джалалиддин Насырович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Алияров Бирлесбек Каниевич**  
академик (Республика Казахстан),  
доктор технических наук, профессор

**Мирзаев Шавкат Мустакимович**  
доктор технических наук, профессор

**Аббасов Ёркин Садыкович**  
доктор технических наук, профессор

**Ведущая организация:** **АО «Теплоэлектропроект»**

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_\_\_ часов на заседании научного совета DSc.27.06.2017.T.03.03 при Ташкентском государственном техническом университете и ООО «Научно-технический центр». Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2, ауд. \_\_\_\_.  
Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно – ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (регистрационный номер \_\_\_\_).

Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-03-41.

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года.  
(протокол рассылки № \_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.)

**К.Р. Аллаев**

Председатель научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
академик, д.т.н., профессор

**О.Х. Ишназаров**

Ученый секретарь научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
д.т.н., с.н.с.

**Ш.И. Клычев**

Зам. председателя научного семинара при  
научном совете по присуждению ученых  
степеней, д.т.н., профессор.

## ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире за счет интенсификации гидродинамических процессов в теплоэнергетических установках, совершенствования конструктивных элементов и проведения нескольких тепловых процессов в одной установке создаются эффективные технологии. В этой связи в национальных энергетических программах развитых стран указано «покрыть до 20...25% от общей потребности в энергетических ресурсах за счет интенсификации гидродинамических процессов»<sup>1</sup>. В том числе в данном направлении уделяется особое внимание на разработку и эффективное использование методов интенсификации процессов сжигания низкосортного твердого топлива в кипящем слое и техническое и технологическое усовершенствование теплообменных процессов и установок.

В мире ведутся научные исследования, направленные на создание и повышение энергоэффективности теплоэнергетических процессов, установок и технических характеристик, необходимых для разработки режимных, технологических и конструктивных параметров, схем контроля и управления, обеспечивающих непрерывность гидродинамических и тепловых процессов. Исследования, проводимые в данной области, в том числе в области изменения значения критической скорости потока теплоносителя, изменения гидравлического сопротивления и концентрации твердых частиц по направлению движения в зависимости от конструктивных параметров, а также усовершенствования их математических моделей, методики расчетов и разработки современных конструкций трубопроводов на основе изменения элементов, турбулизирующих поток теплоносителя, считаются одними из важных и актуальных. Вместе с этим считается необходимым создание технологий по сжиганию низкосортного угля в кипящем слое на основе усовершенствованной конструкции многофункционального топочного устройства, интенсификации процессов теплообмена за счет турбулизации потока теплоносителя.

В республике осуществляются мероприятия по усовершенствованию конструкций и широкому внедрению теплоэнергетических и теплоиспользующих установок, разработанных на основе научных исследований. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы отмечены задачи: «...сокращение энергоемкости и ресурсоемкости экономики, широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий, повышение производительности труда ...»<sup>2</sup>. Реализация этих положений, в том числе

---

<sup>1</sup> <https://www.worldenergy.org>; <http://www.energyefficiencycentre.org>; Sompol Skullong, Pongjet Promvong, Nuthvipa Jayranaiwachira, Chinaruk Thianpong Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts // Chemical Engineering and Processing 109 (2016) 164–177. Journal home page : [www.elsevier.com/locate/cep](http://www.elsevier.com/locate/cep).

<sup>2</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан»

разработка и внедрение в практику современных эффективных технологий и установок, а также снижение удельных показателей по использованию топливно-энергетических ресурсов, считаются одними из важнейших задач.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-3012 от 26 мая 2017 года «О Программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017 — 2021 годы», № ПП-3238 от 23 августа 2017 года «О мерах по дальнейшему внедрению современных энергоэффективных и энергосберегающих технологий» и № ПП-3379 от 8 ноября 2017 года «О мерах по обеспечению рационального использования энергоресурсов», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в этой сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологии: II. «Энергетика, энерго-ресурсосбережение».

### **Обзор международных научных исследований по теме диссертации<sup>3</sup>.**

Широкомасштабные научные исследования, направленные на создание новых энерго- и ресурсосберегающих технологий и усовершенствованных конструкций сжигания низкосортного твердого топлива и передачи тепла в трубчатых теплообменных установках, ведутся в высших учебных заведениях и передовых научных центрах мира, в том числе в Technical University Drezden, Technical University Shtuttgart (Германия), Technical University Toyohashi, Technical University Nagoya (Япония), в Московском энергетическом институте – Национальный исследовательский университет, в Уральском Федеральном техническом университете, во Всероссийском теплотехническом институте, в Научно-исследовательском институте теплофизики Сибирского отделения Академии наук, (Россия); в Научно-исследовательском институте угольных технологий, в Научно-исследовательском институте теплофизики (Украина).

В мире, в результате проводимых научных исследований по созданию новых конструкций твердотопливных топочных устройств и по турбулизации теплоносителя в теплообменниках, получен ряд научных результатов, в том числе: разработаны и усовершенствованы по режимным показателям новые конструкции устройств по интенсификации гидродинамических и тепловых процессов; разработаны методы расчетов сжигания твердого топлива (уголь и пеллеты) во взвешенном слое на основе результатов расчетно-теоретических и экспериментальных исследований по выбору их рациональных показателей

---

<sup>3</sup> Обзор международных научных исследований по теме диссертации выполнен на основе следующих источников: <http://www.iea-coal.org/>; <http://www.energyefficiencycentre.org/>; <https://en.euroacad.eu> ; Market report series. - International Energy Agency Publications. – France, 2017. – 143 p.

(Technical University Drezden, Technical University Shtuttgart, Германия); разработаны также горелочные и топочные устройства по эффективному сжиганию твердого топлива (Всероссийский теплотехнический институт, Уральский Федеральный технический университет, Научно-исследовательский институт теплофизики Сибирского отделения Академии наук (Россия), Научно-исследовательский институт угольных технологий (Украина); оптимизированы основные показатели процессов гидродинамики и теплообмена в теплообменных аппаратах и созданы пилотные образцы таких установок (Московский энергетический институт – Национальный исследовательский университет, Россия, Technical University Toyohashi, Technical University Nagoya, Япония, Научно-исследовательский институт теплофизики, Украина).

В мире проводятся исследования по интенсификации гидродинамических и тепловых процессов в топочных устройствах и теплообменниках, в том числе по следующим приоритетным направлениям: усовершенствование системы управления критическими скоростями теплоносителя в соответствии с тепловой мощностью; усовершенствование процессов и установок на основе методов определения оптимальных значений режимных параметров и математического моделирования; оптимизация параметров, характеризующих показатели гидравлического сопротивления установок и создание новых энергосберегающих конструкций; разработка способов и методов управления конструктивными параметрами установок и снижения удельных расходов использования топливно-энергетических ресурсов.

**Степень изученности проблемы.** В мировой практике разработаны методы расчета и интенсификации гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в усовершенствованных конструкциях теплоэнергетических установок. Изучение характеристик повышения эффективности сжигания топлива рассмотрены в трудах ряда таких ученых, как: Рамзин Л.К., Кнорре Г.Ф., Померанцев В.В., Ахмедов Р.Б., Кутателадзе С.С., Баскаков А.П., Майстренко А.Ю., Алияров Б.К., Бухман М.А., Рыжков А.П., Бурдуков Ю.М., Мунц В.А., Григорьев К.А., Бородуля В.А., Michael Beckmann, Мессерле В.Е. и других. В этих трудах изучены влияние конструктивных и режимных параметров топочных устройств и установок на интенсификацию процесса горения.

Закономерности теплообменных процессов в установках и зависимости гидродинамических режимов, а также методы расчета изучены в трудах ряда известных ученых, в том числе Кирпичева М.В., Гухмана А.А., Михеева М.А., Исаченко В.П., Халатова А.А., Мигай В.К., Дрейцера Г.А., Кузьма-Кичта Ю.Г., Бродова А.Ф., Kenzo Kitamura и в трудах других ученых.

По методам снижения удельных показателей использования топливных и энергетических ресурсов в теплоэнергетических установках занимались Захидов Р.А., Мухиддинов Д.Н., Авезов Р.Р., Кремков М.В., Закиров С.Г., Шокиров А.О., Мирзаев Ш.М., Аббасов Ё.С., Исмаходжаев С.К. и Цоколаев И.Б. Однако в данных исследованиях вопросы активации гидродинамики и на этой основе достижения высокой интенсификации тепловых процессов,

повышения эффективности использования топливных и энергетических ресурсов, обеспечение устойчивой гидродинамики в топочных устройствах, использующих высокозольный уголь, научные основы интенсифицированного кипящего слоя, а также создание конструкций локальных турбулизаторов, приводимые в вибрационное движение за счет кинетической энергии потока жидкости и на этой основе интенсификации процессов в теплообменниках, изучены не на достаточном уровне.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ.** Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Ташкентского государственного технического университета по темам № П-18.47 «Комплексная теплотехнологическая схема экологически безопасной технологии сжигания топлива с эффективным улавливанием диоксида углерода и других побочных продуктов» (2004-2005 г.г.), № М-Р-44 «Разработка теоретических и практических основ совершенствования технологий энергетического использования низкосортных углей» (2008-2009 г.г.), № А-3-79 «Энергоэффективная многофункциональная установка с активным гидродинамическим режимом для тепловой обработки полидисперсных материалов и сжигания низкосортных твердых топлив» (2015-2017 г.г.), № ОТ-А3-58 «Повышение энергоэффективности выработки тепловой энергии методом максимального использования теплоты дымовых газов в технологической схеме получения теплоты» (2017-2018 г.г.).

**Целью исследования** является разработка новой энергоэффективной технологии сжигания низкосортного твердого топлива в интенсифицированном кипящем слое, интенсификация гидродинамических и тепловых процессов за счет усовершенствования конструкции теплоэнергетических и теплоиспользующих установок на примере топочного устройства и трубчатого теплообменника.

**Задачи исследования:**

определение энергетических показателей установок сжигания твердого топлива и теплообмена посредством интенсификации гидродинамических и тепловых процессов;

разработка нового интенсифицированного кипящего слоя для сжигания низкосортного твердого топлива на базе принципов классических фонтанирующего и кипящего слоев;

разработка конструкции многофункционального топочного устройства для сжигания низкосортного твердого топлива и одновременной сепарацией сопутствующих примесей;

создание математической модели процессов гидродинамики, протекающих в топочном устройстве с интенсифицированным кипящим слоем;

разработка новых конструкций локальных турбулизаторов, вибрируемых за счет кинетической энергии потока теплоносителя;

разработка метода интенсификации гидродинамических и тепловых процессов в теплообменных установках с локальными турбулизаторами;

разработка и создание физических установок топочного устройства и трубчатого теплообменника с локальными турбулизаторами для экспериментального исследования интенсификации гидродинамических и теплообменных процессов;

разработка энергоэффективных технологических схем эксплуатации теплоэнергетического оборудования и теплоиспользующих установок на промышленных предприятиях и оценка их энергетической эффективности.

**Объектом исследования** являются системы топливоподготовки, сжигания твердого топлива и улавливания золы, а также теплообменные аппараты тепловых электрических станций и промышленные теплоиспользующие установки и их параметры.

**Предметом исследования** являются закономерности и принципы методов интенсификации гидродинамических и тепловых процессов, протекающих в теплоэнергетических установках.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач использованы теория математического моделирования, физическое моделирование гидродинамических и тепловых процессов, методы термодинамических и теплотехнических расчетов, численные и физические методы исследования гидродинамических и тепловых процессов, а также методы обработки полученных результатов.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

на основе гидродинамических закономерностей определена физическая сущность интенсифицированного кипящего слоя, отличающаяся от принципов циркулирующего кипящего слоя и основанная на принципах классических кипящего и фонтанирующего слоев;

разработана новая, основанная на принципах классического кипящего и фонтанирующего слоев, конструкция многофункционального топочного устройства, а также энергоэффективная технология для сжигания высокозольного угля в интенсифицированном кипящем слое;

разработана математическая модель, описывающая характерные параметры интенсифицированного кипящего слоя, такие как скорость газа и твердых частиц, концентрация твердых частиц, потери напора газовзвеси по высоте слоя в зависимости от геометрических параметров рабочей камеры;

получены экспериментальные и теоретические зависимости и аналитические выражения для таких важных гидродинамических параметров интенсифицированного кипящего слоя, как скорости газа и частиц по вертикальной оси, максимальная высота подъема твердых частиц в рабочей камере в зависимости от массы и размера, изменение концентрации твердых частиц и потери давления по высоте рабочей камеры;

разработаны принципиально новые конструкции локальных турбулизаторов, устанавливаемые в трубках теплообменников и приводимые к вибрации за счет кинетической энергии потока жидкости;

на основе гидродинамических закономерностей определена физическая сущность интенсификации гидродинамических и тепловых процессов в трубчатых теплообменниках с локальными турбулизаторами, вибрирующих

за счет кинетической энергии потока жидкости и постоянства вибрации элементов турбулизаторов и турбулизированного поля.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработан метод расчета гидродинамики поведения газозвеси, позволяющий определить рациональную конструкцию рабочей камеры топочного устройства;

разработано многофункциональное топочное устройство, основанное на принципах интенсифицированного кипящего слоя, позволяющее обеспечивать процессы нагрева, сушки, обжига, охлаждения, газификации, сжигания, улавливания и сепарации твердых частиц по размерам и плотности полидисперсного материала в одном аппарате;

разработаны методы установки новых конструкций локальных турбулизаторов в теплообменные аппараты и управления рабочими режимами;

разработаны методы повышения энергоэффективности теплоэнергетических и теплоиспользующих установок на основе интенсификации гидродинамических и тепловых процессов и определены расчетные уравнения; .

разработаны теоретические основы методов расчета усовершенствованных конструкций энергоэффективных топочных устройств с интенсифицированным кипящим слоем и вибрируемых локальных турбулизаторов для трубчатых теплообменников.

**Достоверность результатов исследований.** Достоверность научных результатов подтверждается применением современных методов исследований, основанных на адекватных математических моделях с привлечением соответствующих разделов теории термодинамики, гидродинамики и теплообмена и известных апробированных методов обработки экспериментальных данных, а также результатами сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных, полученных в компьютерных и экспериментальных моделях теплоэнергетических установок.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследований определяется весомым вкладом, внесенным в развитие процессов гидродинамики и теплообмена, протекающих в теплоэнергетических и теплоиспользующих установках, теоретические основы теплотехники, теорию и практику теплового расчета, усовершенствование сжигания низкосортного твердого топлива и теплообмена, а также развитие методики выбора рациональных параметров теплоэнергетических установок.

Практическая значимость полученных результатов определяется разработанным многофункциональным топочным устройством для проведения различных видов тепловых процессов (нагрева, сушки, обжига, охлаждения, газификации, сжигания, улавливания и сепарации твердых частиц) с полидисперсными материалами и широким применением локальных

турбулизаторов для интенсификации теплообмена в теплообменных установках.

**Внедрение результатов исследования.** На основании полученных результатов по повышению энергоэффективности теплоэнергетических установок (топочного устройства и трубчатого теплообменника), определению рациональных значений основных теплотехнических и конструктивных параметров, моделирования тепловых и гидродинамических процессов:

получен патент на изобретение Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на усовершенствованную конструкцию многофункционального топочного устройства с интенсифицированным кипящим слоем («Установка для сжигания твердых топлив или тепловой обработки полидисперсных материалов». № IAP 04840 2014 г.). В результате на промпредприятии создана возможность экономии 4,7 млн. нм<sup>3</sup> природного газа в год;

получен патент на изобретение Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на конструкцию локального турбулизатора, приводимого в вибрационное движение за счет кинетической энергии потока жидкости и устанавливаемого в трубки теплообменников («Турбулизирующее устройство теплообменной трубы». № IAP 04514 2012 г.). В результате на промпредприятии создана возможность экономии 1,0 млн. кВт\*час электрической энергии в год;

технология интенсифицированного кипящего слоя для сушки, нагрева, обжига и газификации полидисперсных материалов внедрена в производственном цеху АО «Средацветметэнерго» (Справка АО «Средацветметэнерго» за № 62 от 26 июня 2018 года). В результате на предприятии создана возможность экономии 3,0 млн. нм<sup>3</sup> природного газа в год;

технология интенсифицированного кипящего слоя для сепарации твердых частиц полидисперсного материала в зависимости от их размера, плотности, увлажнения, охлаждения, а также улавливания мелких частиц осаждением внедрена в производственном цеху АО «Средацветметэнерго» (Справка АО «Средацветметэнерго» за № 62 от 26 июня 2018 года). В результате на предприятии создана возможность экономии 26 000 кВт\*час электроэнергии в год.

**Апробация работы.** Результаты исследований апробированы на 13 международных конгрессах и конференциях и 4 республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов.** По теме диссертации опубликовано всего 35 научных работ, в том числе 4 - в международных, 13 - в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, получены 4 патента на изобретение Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан.

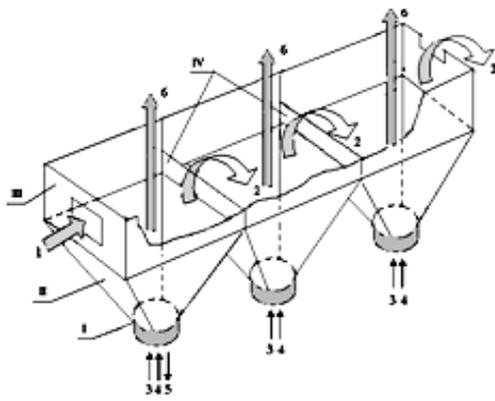
**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 198 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

В **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, отмечено соответствие исследования основным приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике, приведен обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, указаны объект и предмет исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, представлены их научная и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Резервы повышения энергоэффективности современных теплоэнергетических установок»** на основе проведенного анализа современного состояния исследуемого вопроса поставлена проблема исследований. Глава начинается с анализа эффективности работы известных топочных устройств со взвешенным слоем, конструкций и методов турбулизации потока теплоносителя в трубчатых теплообменниках. Изучены характеристики и свойства Ангреновского бурого угля и выполнен химический анализ состава его золы. На основе анализа известных научных работ и источников определена их недостаточная изученность. Кроме этого, на основе результатов проведенного анализа современного состояния исследуемого вопроса установлено, что повышение энергоэффективности теплоэнергетических установок за счет интенсификации гидродинамических и тепловых процессов, а также усовершенствование конструкции и методы расчета недостаточно разработаны.

Во второй главе диссертации **«Математическое и компьютерное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в теплоэнергетических установках»** приведены результаты теоретического исследования. Совместное использование принципов классического кипящего и фонтанирующего слоев, усовершенствование элементов и конструкций известных топочных устройств позволили разработать принципиально новую конструкцию топочного устройства с интенсифицированным кипящим слоем (ИКС). На рис. 1 приведена физическая модель топочного устройства и описываются принципы ее работы.



**Рис. 1. Принципиальная схема топочного устройства с интенсифицированным кипящим слоем**

Полидисперсный уголь 1 приводится в состояние микрофонтанирования воздухом 3 и рециркулируемыми дымовыми газами 4 (рис.1). За счет выгорания и раздробления твердые частицы топлива начинают терять свою массу и объем. Относительно тяжелые частицы топлива находятся в нижней (конической) части II, а легкие частицы занимают призматическую часть III и образуют кипящий слой. Твердые частицы, достигшие критической скорости уноса, начинают перетекать из одной секции в

последующую через переливные пороги IV. В последующих секциях значения критических скоростей становятся относительно меньшими по сравнению с предыдущей секцией. Основная масса золы выводится через последнюю секцию, где происходит её охлаждение. Для регулирования процесса горения топлива и сохранения устойчивого гидродинамического режима во всех секциях осуществляется рециркуляция определенного количества дымовых газов 4. Вывод сопутствующих частиц минералов производится в первой же секции через низ конической части 5 при помощи специального устройства.

С целью минимизации гидравлического сопротивления важно было определить рациональную геометрическую форму. Для этого методом расчета исследовано гидравлическое сопротивление нижней части устройства при различной геометрической конфигурации. Используя уравнения Бернулли и Дарси – Вейсбаха, было найдено влияние формы поперечного сечения канала на гидравлическое сопротивление при течении жидкости. Полученные интегральные зависимости вычисляются приближенными методами с использованием формулы Симпсона. Расчетным путем было выявлено, что для квадрата гидравлический радиус имеет наименьшие значения, соответственно, и меньшее гидравлическое сопротивление, а также относительно большую пропускную способность. Полученная зависимость коэффициента трения для усеченного конуса представлена в виде:

$$\lambda = \frac{\Delta p \cdot 4 \left( r + \frac{h}{H} \operatorname{tg} \alpha \right) \cdot g}{\frac{h}{H} \cdot g^2} ; \Delta P = \frac{\rho g^2}{2\varphi^2} , \quad (1)$$

где  $h/H$  - безразмерный коэффициент высоты конуса;  $\alpha$  - угол конусности, в нашем случае -  $\alpha = 30^\circ$ ;  $r$  - радиус конуса в нижнем основании, м;  $\rho$  - плотность среды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\varphi$  - коэффициент скорости;  $g$  - среднее значение скорости в данном сечении, м/с.

Для нахождения основных гидродинамических параметров устойчивого и развитого ИКС в установке, а также определения взаимосвязи между ними

рассмотрены вопросы математического моделирования процессов гидродинамики.

Основываясь на вышеуказанных принципах ИКС, можно написать уравнения движения гетерогенной среды в центральной продольной части секции рабочей камеры в следующем виде:

$$C_V \rho_M (\overline{W} \nabla) \overline{W} = \rho_M C_V g + \frac{3}{4} \xi \frac{C_V \rho_G}{d} |\overline{g} - \overline{W}| (\overline{g} - \overline{W}) - \nabla(C_V P), \quad (2)$$

где  $\overline{W}$  и  $\overline{g}$  - скорости твердой фазы и газа, м/с;  $\rho_M$  и  $\rho_G$  - плотности угля и газа, кг/м<sup>3</sup>;  $C_V$  - объемная концентрация материала в газе;  $d$  - диаметр частиц угля, м;  $\xi$  - коэффициент лобового сопротивления частицы угля;  $P$  - давление газа, Па.

Для решения данного уравнения принимаем допущения: 1) движение частиц угля и газа в ядре потока одномерное; 2) сушка и раздробление частиц угля в ядре восходящего потока незначительны; 3) радиальные и тангенциальные скорости газа и твердых частиц существенно малы.

С учетом вышеприведенного уравнение (2) выглядит как:

$$W_z \frac{dW_z}{dz} = g + \frac{3}{4} \frac{\rho_G}{\rho_M} f(\text{Re})(g_z - W_z)^2 - \frac{1}{\rho_M} \frac{dp}{dz}, \quad (3)$$

где  $z$  - вертикальная координата;  $g_z$  и  $W_z$  - проекции скоростей на ось  $z$ , м/с.

Топочную камеру по высоте условно делим на  $n$  участков и на  $i$  - том участке ( $i = 1, n$ ) принимаем, что  $g_z = \text{const}$ .

Для кипящего слоя напишем уравнение, характеризующее потери давления по высоте рабочей камеры:

$$\frac{dP_i}{dz} = -\frac{\Delta P_i}{\Delta h_i} = -\rho_M C_{V_i} g, \quad (4)$$

где  $\Delta P_i$  - перепад давления в ядре потока на  $i$ -м участке;  $\Delta h_i$  - высота  $i$ -го участка аппарата;  $C_{V_i}$  - объемная концентрация материала в ядре аппарата.

Тогда уравнение (3) преобразуется в виде:

$$\frac{dW_{z_i}}{dz} = (1 + C_V)g / W_{z_i} + \frac{3}{4} \frac{\rho_G}{\rho_M d} f_i(\text{Re})(g_z - W_z)^2 / W_{z_i}. \quad (5)$$

Начальное условие для уравнения (5) принимается в виде  $W_z(z_0) = W_{z_0}$ .

Выполняя математическое преобразование с учетом зависимости радиальной скорости от радиуса камеры  $V_R(\theta) = B \theta^2$  (где  $B$  - коэффициент пропорциональности и его значение определяется из материального баланса), угла раскрытия конусности  $\theta$ , радиуса центрального потока газозвеси  $r_0$ , можно будет определить интегральную зависимость средней скорости газа в центральном потоке, которая при решении имеет для  $i$ -того участка следующий вид:

$$g_{z_i} = \frac{L f_1(\theta_{*i})}{2\pi z_i^2 J_1}, \quad (6)$$

где  $J_1 = -\theta_0^2 \cos \theta_0 + 2\theta_0 \sin \theta_0 - 2 \cos \theta_0 + 2$ ;  $\theta_0$  - половина угла раскрытия конусности камеры;  $L$  - полный расход газа в аппарат, м<sup>3</sup>/с;  $\theta_*$  определяется из выражения  $\sin(\theta_*) = r_0 / z$ .

Уравнение (5) с учетом (6) решается как задача Коши с применением метода Рунге-Кутты. Находим уравнение для определения скорости твердых частиц по оси  $z$ :

$$W_{z_i} = -\frac{G_M}{C_{v_i} S_1 \rho_M}, \quad (7)$$

где  $G_M$  - расход материала, подаваемого в аппарат, кг/с;  $S_1$  - площадь сечения ядра, м<sup>2</sup>;  $S_1 = \pi r_0^2$ ;  $r_0$  - радиус ядра, м.

Подставив значение  $W_{z_i}$ , найденное из уравнения (5) в уравнение (7), можно найти объемную концентрацию материала в газе на  $i$ -том участке  $C_{v_i}$  и после этого время подъема на  $i$ -том участке  $\tau_i$ :

$$\tau_i = \frac{\Delta h_i C_{v_i} S_1 \rho_M}{G_M}. \quad (8)$$

Полное время подъема материала в ядре аппарата определяется как:

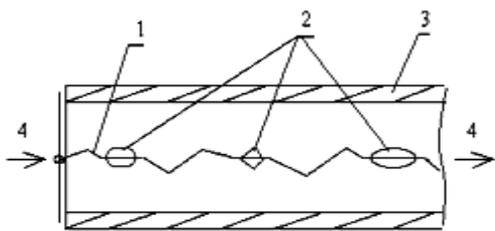
$$\tau = \sum_i \tau_i. \quad (9)$$

Обозначив самую высокую точку в слое, занимаемую твердыми частицами, как  $Z_{max} = H$ , получим зависимость, характеризующую максимальную высоту подъема твердых частиц:

$$Z = \frac{\ln \left[ \left( 1 - \frac{v}{G_M} v^2 \right) \left( 1 + \frac{v}{G_M} v_0^2 \right) \right]}{2 \frac{v}{G_M} g} \quad (10)$$

Уравнение (10) характеризует зависимость между скоростью  $U$  и расстоянием  $Z$  при определенном отрезке времени. Изменением значения параметра  $U$  можно определить траектории движения частиц по высоте рабочей камеры и их концентрацию, что обуславливает активацию гидродинамики. Зная величину параметра  $Z$ , определяем высоты переливных порогов между секциями, которые дают возможность регулировать время пребывания частиц в каждой секции и производительность рабочей камеры.

Полученная математическая модель решена по методу Рунге-Кутты четвертого порядка. Составлена блок-схема алгоритма расчета. При



1-упругая нержавеющая проволока; 2-турбулизаторы, выполненные из пустотел; 3-трубка теплообменника; 4-направление движения потока жидкости.

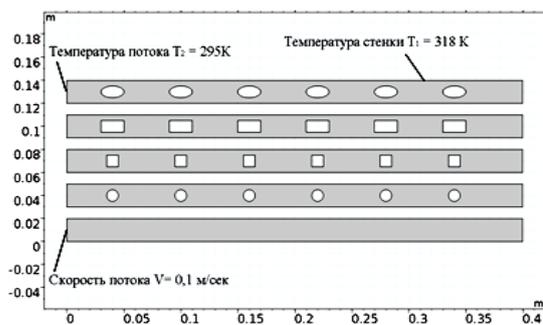
Рис. 2. Схема экспериментальной трубки с турбулизаторами

численном эксперименте использованы программ-продукты *Matlab*. Результаты численного и экспериментального исследования приводятся ниже, в главе III.

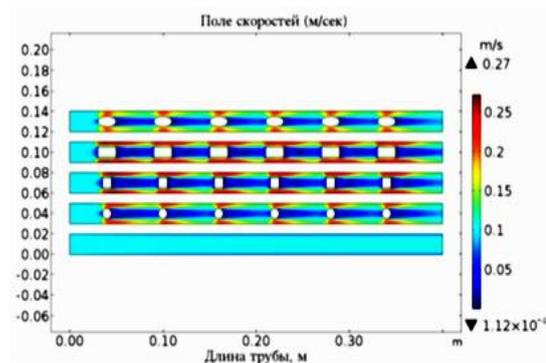
Приведены результаты компьютерного моделирования и численного исследования процессов интенсификации гидродинамики и теплообмена в трубчатых теплообменниках с использованием вновь разработанных конструкций локальных турбулизаторов (ЛТ). Приводится описание принципа работы

экспериментального стенда. Основными элементами ЛТ (рис. 2) являются тонкая упругая проволока 1 со свободной конфигурацией и турбулизаторы, выполненные из пустотел в виде сферических и тому подобных фигур 2. Один конец проволоки крепится на входную часть трубки 3, а другой оставляется свободным. Поток воды 4, омывая неровные поверхности пустотел, приводит их в вибрационное движение по продольному и радиальному направлениям. Частота вибрации элементов ЛТ зависит от упругости проволоки, удельного веса пустотела, их внешней конфигурации и от расхода жидкости. Таким образом, турбулизируется поток жидкости по всему его объему в трубке. Составлена компьютерная модель в программной среде *Comsol Multiphysics*. Выбор программ продукта основывается на простоте использования, точности эксперимента и огромной возможности в научных исследованиях. Выполнено численное исследование турбулизации потоков жидкости в трубках теплообменников. Модель турбулентного теплопереноса в жидкости включает уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса), неразрывности (закон сохранения массы жидкости), диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы). Получены результаты исследования по интенсификации процессов гидродинамики и теплообмена. На рис. 3, 4, 5 и 6 представлены обобщенные графики серии численного исследования, показывающие результативность предлагаемых конструкций ЛТ.

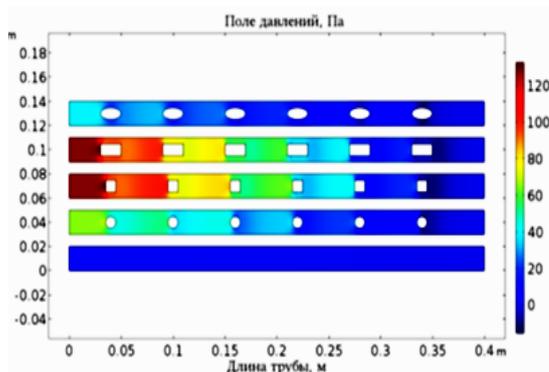
В третьей главе диссертации «Разработка, создание экспериментальных установок и исследования процессов гидродинамики и теплообмена» приведены описания экспериментальных установок, методики проведения опытных исследований и результаты физического эксперимента. Для исследования гидродинамических характеристик ИКС был разработан и создан ряд экспериментальных установок. Были использованы вентилятор ВВД-4, термоанемометр Testo 405-V1 и дифференциальный микроанометр ММН-2400. Трехсекционная экспериментальная установка (рис. 7) для исследования процессов гидродинамики низкосортных углей



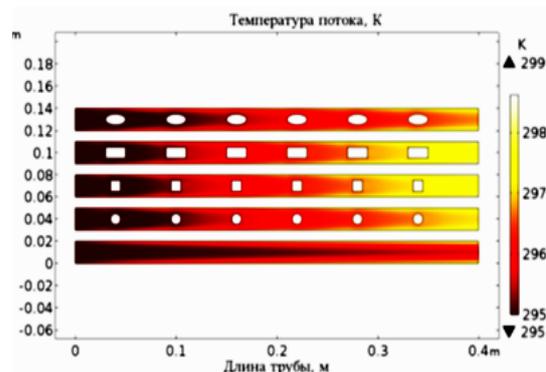
**Рис. 3. Структурная модель эксперимента**



**Рис. 4. Распределение поля скоростей,  $V$  [м/с]**

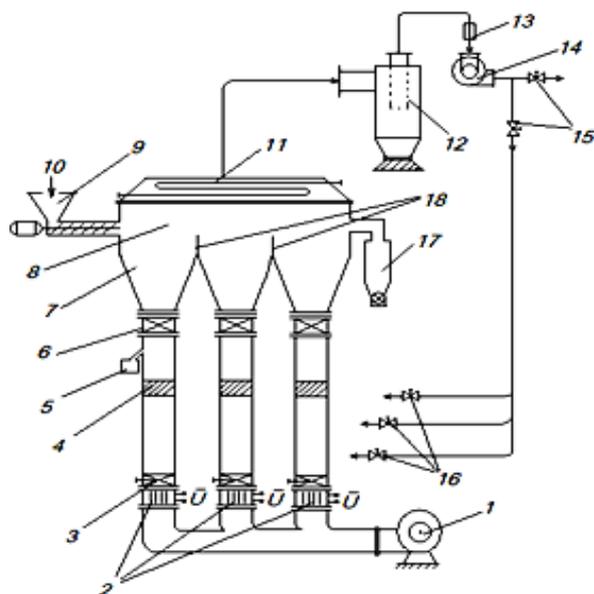


**Рис. 5. Распределение поля давления потока,  $\Delta P$  [Па]**



**Рис. 6. Распределение поле температуры,  $T$  [К]**

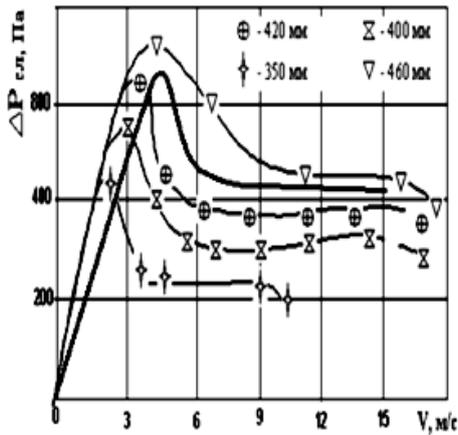
ИКС состоит из вентилятора 1, калорифера 2, регулятора расхода воздуха 3, расходомера 4, сборника для тяжелых частиц 5, завихрителя 6, конических частей 7, прямоугольных частей 8, бункеров 9 и 10, теплоприемника 11,



**Рис. 7. Схема трехсекционной экспериментальной установки с интенсифицированным кипящим слоем**

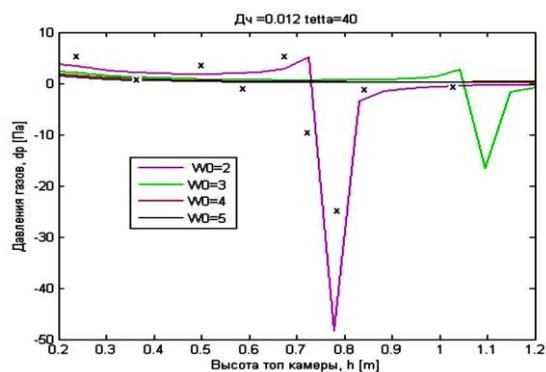
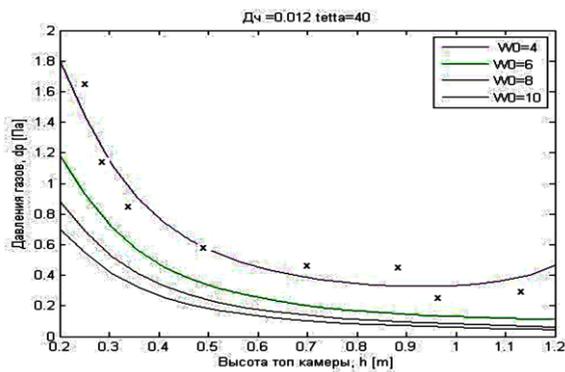
циклона 12, фильтра 13, вентилятора 14, устройств рециркулирования дымовых газов 15 и 16, золоборника 17 и переливных порогов 18. Высота секций составляет  $H = 750$  мм, стороны прямоугольной части составляют  $200 \times 200$  мм. Производительность установки  $G = 22 \dots 24$  кг/час. При исследовании траекторий движения твердых частиц и их скорости использовалась скоростная цифровая видеокамера GR-D850AS.

На рис. 8 представлены обобщенные кривые фонтанирования для модельных

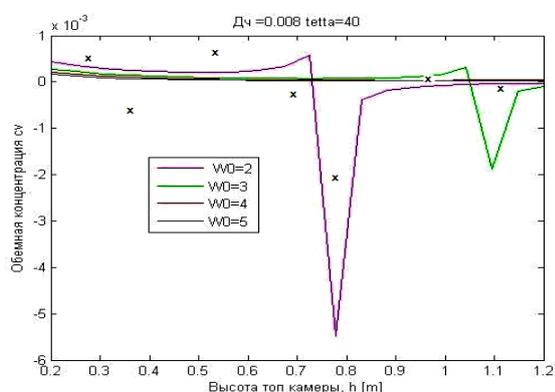
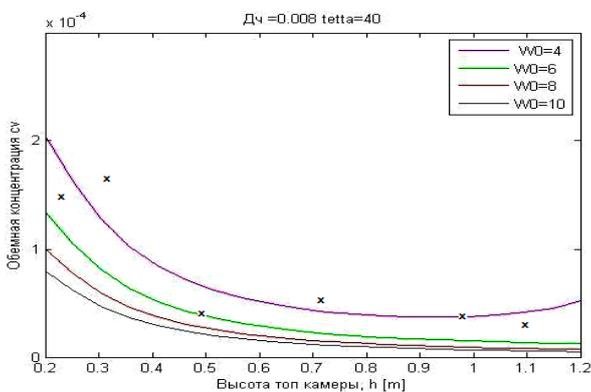


**Рис. 8. Гидравлическое сопротивление и критические скорости для модельных материалов в ИКС при различных высотах насыпного слоя**

материалов. Непрерывная линия характеризует результаты численного исследования. По этому графику определяются важные параметры для гидродинамики ИКС: первая и вторая критические точки скорости теплоносителя на входе. Диапазон между двумя критическими точками характеризует устойчивость гидродинамики ИКС. Выявлено, что секционирование аппарата позволит регулировать время пребывания материала в камере и производительность установки. В качестве модельного материала применялись горох, семена подсолнуха, гречка, гранулы аммония фосфата и полидисперсный уголь. Устойчивость слоя также зависит от



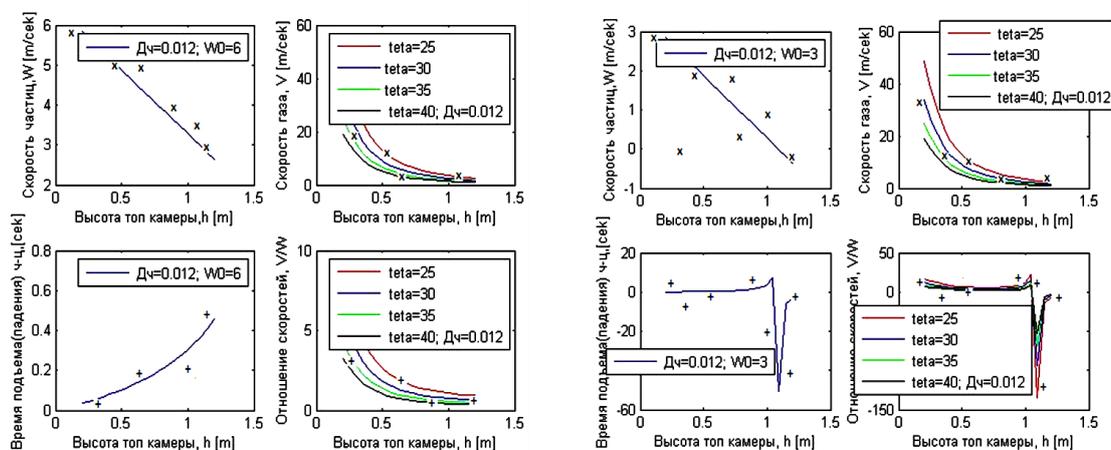
**Рис. 9. Графики  $\Delta P = f(\Delta h)$  при различных входных скоростях частиц  $W_0$ : диаметр частицы  $d_c = 12$  мм, угол раскрытия конуса  $\theta = 40^\circ$ , x – экспериментальные данные**



**Рис. 10. Графики  $C_V = f(h)$  при различных входных скоростях частиц  $W_0$ : диаметр частицы  $d_c = 8$  мм, угол раскрытия конуса  $\theta = 40^\circ$ , x – экспериментальные данные**

высоты слоя, физических характеристик твердой и газовой фаз, от геометрических параметров установки.

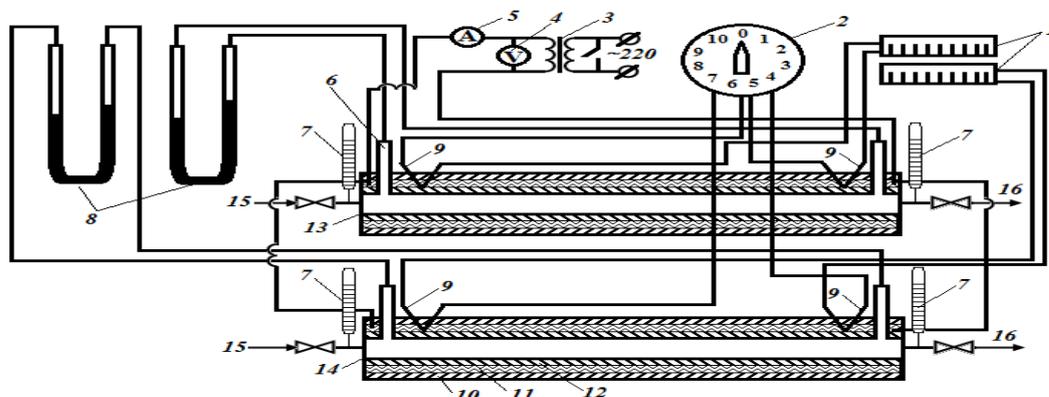
На рис. 9, 10 и 11 представлены некоторые результаты численного и экспериментального исследования. На рис. 9 представлен характер изменения давления газов по высоте рабочей камеры на элементарных объемных сечениях с высотой  $\Delta h$ . Кривые получены для частиц угля с  $d_{\text{ч}} = 12$  мм при начальных скоростях частиц  $W_0 = 2 \dots 10$  м/с. При значении скорости ниже, чем  $W_0 = 3,0 \dots 3,5$  м/с, наблюдаются переломные участки, что характеризует наличие неустойчивой гидродинамики: недостаточность напора для подъема определенной массы частиц на нужную высоту. Скачки на рассматриваемых графиках приходятся на высоту рабочей камеры, где заканчивается фонтанирующий слой и начинается кипящий слой. На рис. 10 представлен характер изменения объемной концентрации твердых частиц в газах  $C_V$  по той же  $\Delta h$  и с теми же параметрами, как на рис. 9. При  $W_0 = 3,0 \dots 3,5$  м/с здесь тоже наблюдаются участки с неустойчивыми параметрами. Скачки на рассматриваемых графиках также приходятся на высоту рабочей камеры, где заканчивается фонтанирующий слой и начинается кипящий слой. На рис. 11 приводятся результаты исследования по следующим параметрам, характеризующим гидродинамику интенсифицированного кипящего слоя: скорости твердых частиц  $W$ , газа  $V$  и их отношения, а также время подъема твердых частиц в зависимости от  $\Delta h$ . Кривые получены при различных



**Рис. 11. Скорости частиц угля  $W$  и газа  $V$ , время подъема частиц  $\tau$  и отношение скоростей газа и частиц  $V/W$  в зависимости от высоты камеры  $\Delta h$ ,  $x$  – экспериментальные данные**

значениях  $W_0$  и  $\theta$ . Скорость частиц по мере продвижения вверх монотонно снижается за счет расширения канала рабочей камеры (снижение скорости газового потока) и падения напора. Как видно, на рис. 11, графики получены при  $W_0 = 6,0$  м/с и при  $W_0 = 3,0$  м/с. Определено, что при  $W_0 = 3,5$  м/с графики времени подъема частиц и отношение скоростей находятся на грани провала устойчивой гидродинамики. Начиная с  $W_0 = 3,0$  м/с, устойчивость процесса нарушается.

Результаты расчета математической модели гидродинамики ИКС оценивались на адекватность по критерию Фишера с полученными результатами на экспериментальных установках. Значение коэффициента корреляции для времени пребывания частиц в рабочей камере составило 0,76. Расчетная величина критерия Фишера  $F_p = 2,55$ , табличное значение для доверительной вероятности  $P = 0,95$  составило  $F_T = 5,4$ .



1 – логометры; 2 – переключатель термопар; 3 – ЛАТР;  
 4 – вольтметр; 5 – амперметр; 6 – штуцеры; 7 – термометры;  
 8 – манометры; 9 – термопары; 10 – теплоизоляция;  
 11 – электронагреватель; 12 – стенка трубы; 13 – трубка с турбулизатором; 14 – трубка без турбулизатора; 15, 16 – вход и выход воды.

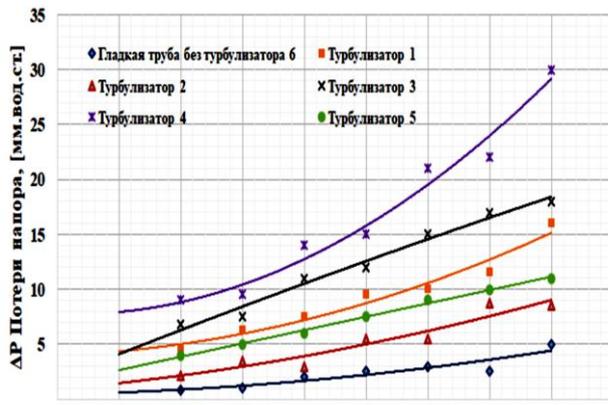
**Рис. 12. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования гидродинамики и теплообмена в трубах с ЛТ**

Для исследования интенсификаций процессов гидродинамики и теплообмена, организуемых при помощи разработанных конструкций ЛТ, также был создан ряд экспериментальных установок, одна из которых представлена на рис. 12.

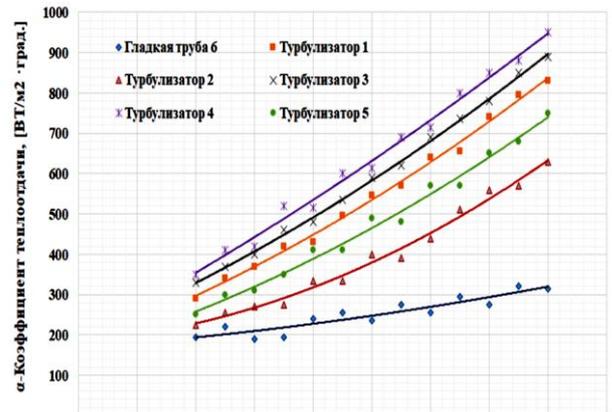
Рациональные значения гидродинамических параметров процесса сначала находились на холодной модели со стеклянной трубкой и потом перенесены на горячую установку, где определялись значения тепловых коэффициентов. Экспериментальные данные по исследованию эффективности ЛТ показаны на рис. 13 и рис. 14. Эксперименты проводились в диапазоне  $Re$  (200...5000). Оттуда видно, что с увеличением  $Re$  значительно повышается теплообмен. Были получены соответствующие критериальные зависимости. При этом обнаружено, что эффективность некоторых конструкций ЛТ сопровождается значительным повышением гидравлического сопротивления.

На основе результатов исследований осуществляется выбор рациональной конструкции ЛТ.

На рис. 15, 16, 17 и 18 представлены графические зависимости, полученные методом численного эксперимента и данные физического эксперимента, отмеченные крестиками. Из графика скоростей (рис.15) видно, что поток жидкости переходит в турбулентное состояние за счет влияния



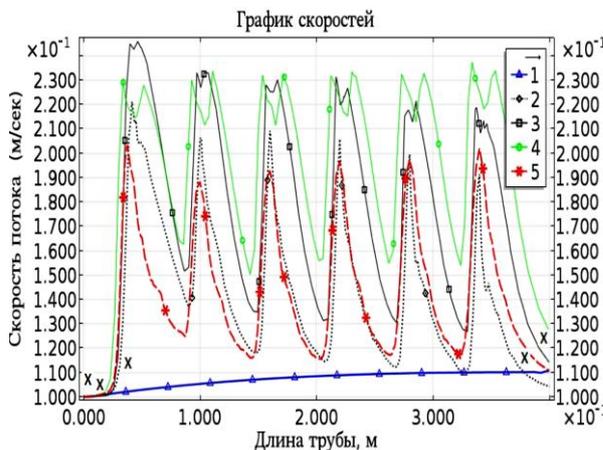
**Рис. 13. Гидравлическое сопротивление трубки с разработанными конструкциями локальных турбулизаторов**



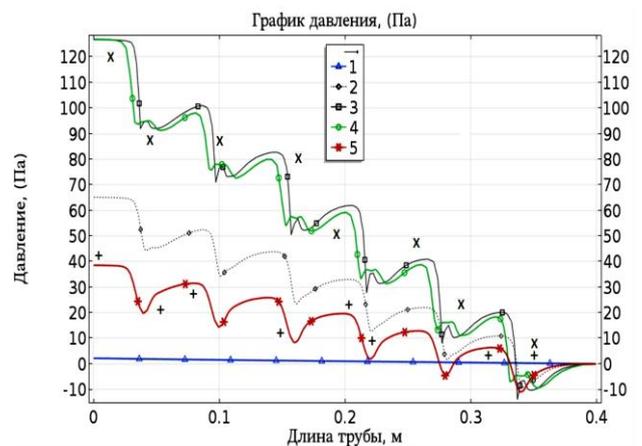
**Рис. 14. Коэффициент теплоотдачи при различных разработанных конструкциях локальных турбулизаторов**

элементов ЛТ. Нижняя относительно прямая линия характеризует процесс в гладкой трубке (без ЛТ) при тех же режимах течения.

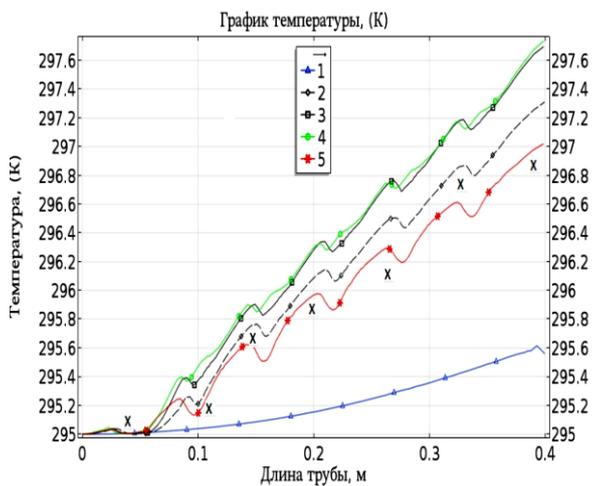
На рис. 16 видна потеря напора по длине трубки. Каждый скачок на графике приходится на месторасположение элементов ЛТ. Изменения температуры жидкости и изотермы температуры представлены на рис. 17 и 18. Отсюда видно, что на повышение температуры жидкости значительно влияет



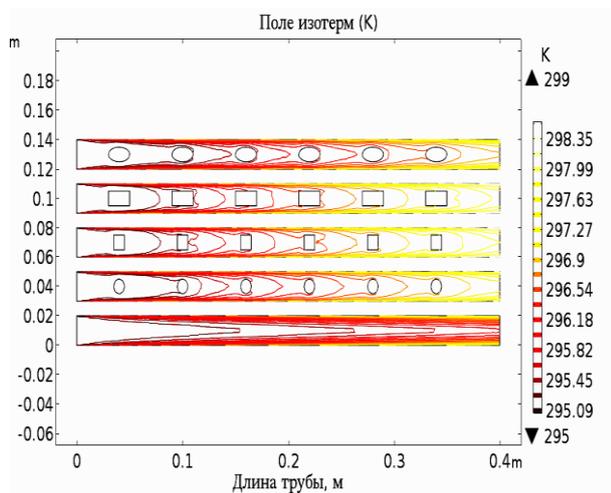
**Рис. 15. График скоростей жидкости в трубке с локальными турбулизаторами, x – экспериментальные данные**



**Рис. 16. График потери напора жидкости по длине трубки с локальными турбулизаторами**



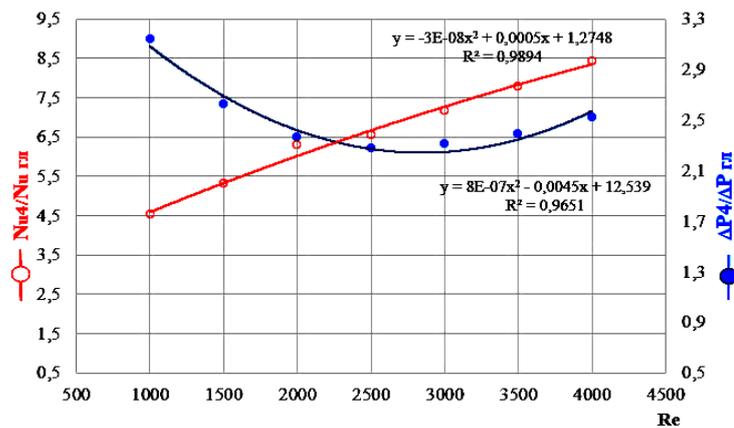
**Рис. 17. График изменения температуры по длине трубки, x – экспериментальные данные**



**Рис. 18. Поле изотерм жидкости в трубке с локальными турбулизаторами**

присутствие ЛТ и в сравнении без них. Между тем, существенное различие по температуре имеется между конструкциями элементов ЛТ. Это показывает, что еще имеется большой резерв повышения эффективности теплообмена с использованием новых конструкций ЛТ.

На рис. 19 представлен анализ эффективности работы ЛТ в виде графика зависимости  $Nu/Nu_{гЛ}$  и  $\Delta P/\Delta P_{гЛ}$  от числа  $Re$  и по нему можно определить рациональную область конструктивных параметров ЛТ указанной конструкции и режимов процесса теплообмена для повышения эффективности работы теплообменного оборудования.



**Рис. 19. Графическое определение рациональных конструктивных параметров ЛТ**

В четвертой главе «Разработка и оценка энергоэффективности теплоэнергетических установок и аппаратов» представлены вновь разработанные и усовершенствованные конструкции теплоэнергетических установок.

Ожидаемая экономия от внедрения на АО «Средазцветметэнерго» составит 1,26 млн. кВт\*час электро энергии и 7,7 млн.  $нм^3$  природного газа в год.

Научная разработка внедрена в качестве установки для проведения процессов сушки, сепарации и охлаждения семян растения амарант. За счет эффективной сушки, сепарации сопутствующих примесей и эффективного охлаждения достигнута эффективность выхода масла по сравнению с другими способами на 0,3 %.

В приложениях диссертации приведен текст программы расчета разработанной математической модели процессов гидродинамики в рабочей камере установки с интенсифицированным кипящим слоем газозвеси, а также даны подробные расчеты по определению энергетической эффективности внедренных в производство и принятых к внедрению разработок, выполненных на основе результатов научных исследований представленных в рассматриваемой диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов диссертационной работы (DSc) по техническим наукам «Методы повышения энергоэффективности теплоэнергетических установок на основе интенсификации гидродинамических процессов» представлено следующее заключение:

1. На примере топчного устройства и трубчатых теплообменников изучено современное состояние и перспективы развития теплоэнергетических установок. Установлено, что имеются существенные резервы повышения энергетической эффективности сжигания низкосортного твердого топлива и работы трубчатого теплообменного оборудования путем усовершенствования конструкций и интенсификации гидродинамических процессов.

2. Созданы научные основы интенсификации процессов гидродинамики при осуществлении сжигания низкосортного твердого топлива в интенсифицированном кипящем слое, организуемом на базе классических фонтанирующее-кипящих слоев, что привело к созданию новой технологии.

3. Разработана новая научно обоснованная конструкция топчного устройства для сжигания низкосортного твердого топлива, которая также может быть использована как многофункциональная установка для проведения других тепло- и массообменных процессов над полидисперсными материалами в одной и той же рабочей камере (сушка, нагрев, обжиг, газификация, сепарация твердых частиц по размерам и плотности, увлажнение, охлаждение и осаждение мелкодисперсной пыли). Внедрение данной установки в производственном цеху АО «Средазцветметэнерго» дало возможность экономии 1,26 млн кВт\*час/год электрической энергии.

4. Разработана математическая модель процесса гидродинамики ИКС и получено нелинейное дифференциальное уравнение, которое решено методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Численное решение проводилось в программной среде *Matlab*, при этом получены экспериментальные и теоретические графики, а также аналитические зависимости, характеризующие основные гидродинамические параметры, такие как осевые скорости газа и частиц, высота максимального подъема твердых частиц в

зависимости от их размера и массы в пространстве рабочей камеры, в том числе изменения концентрации твердых частиц и потери напора газозвеси по высоте рабочей камеры.

5. Разработана методика расчета усовершенствованной конструкции рабочей камеры топочного устройства с интенсифицированным кипящим слоем с минимизацией гидравлического сопротивления, которая позволяет создавать энергоэффективные установки.

6. Получены экспериментальные данные процессов гидродинамики интенсифицированного кипящего слоя и выполнен сопоставительный анализ с результатами численного исследования, где определена адекватность полученных результатов. В результате полученные данные использовались при выполнении гидродинамических, тепловых и конструктивных расчетов.

7. Созданы научные основы турбулизаций жидкости в трубках теплообменников на основе вибрирующих элементов локальных турбулизаторов за счет кинетической энергии потока теплоносителя. В результате достигнуто повышение теплообмена в 2-3 раза по сравнению с гладкой поверхностью.

8. Разработан ряд энергоэффективных конструкций ЛТ, устанавливаемых в трубках теплообменных аппаратов и вибрирующих за счет кинетической энергии потока жидкости, вследствие чего пространственные положения турбулизированных полей жидкости в ограниченном объеме становятся перемещающимися.

9. Разработана компьютерная модель и проведены численные эксперименты в программной среде *Comsol Multiphysics* гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в трубках теплообменников с использованием ЛТ. Результаты численного исследования позволили рассчитать турбулентность потока жидкости, интенсивность теплообмена и гидравлическое сопротивление, а также рациональные конструкции элементов ЛТ.

10. Получены новые экспериментальные данные процессов гидродинамики и теплообмена в трубках с использованием ЛТ и определена адекватность полученных научных результатов посредством сопоставительного анализа с результатами численного исследования. Полученные результаты нашли применение при выполнении гидродинамических и тепловых расчетов и определении энергетической эффективности применения ЛТ установок.

11. Результаты НИР внедрены в производство с реальной энергоэффективностью: экономия 523 880 м<sup>3</sup>/год природного газа, экономия угля 462 тн/год: повышение выхода масла из масличных культур на 0,3%. Энергоэффективность составляет 7,7 млн. м<sup>3</sup> природного газа и 1,26 млн. кВт\*час электроэнергии.

12. По теме диссертации получены 4 патента на изобретение Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING DEGREE OF DOCTOR  
OF SCIENCES No: 27.06.2017.T.03.03 AT TASHKENT STATE  
TECHNICAL UNIVERSITY AND LLS  
«SCIENTIFIC-TECHNICAL CENTRE»**

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**BABAKHODJAEV RAKHIMJAN PACHEHANOVICH**

**METHODS FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY  
OF THERMAL POWER PLANTS ON THE BASIS OF  
INTENSIFICATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES**

**05.05.04 - Industrial thermal power engineering**

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (DSc)  
ON TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent - 2018**

**The theme of doctoral (DSc) dissertation on technical sciences was registered at Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.3.DSc/T153**

Dissertation has been prepared at the Tashkent State Technical University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific council ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) and on Information-educational portal «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scientific consultant:** **Mukhiddinov Djalaliddin Nasirovich**  
doctor of technical sciences, professor

**Official opponents:** **Aliyarov Birlesbek Kanievich**  
Academician (Republic of Kazakhstan),  
doctor of technical sciences, professor

**Mirzaev Shavkat Mustakimovich**  
doctor of technical sciences, professor

**Abbasov Yorqin Sadikovich**  
doctor of technical sciences, professor

**Leading organization:** **JSC «Teploelektroproekt»**

The defense will take place «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 y. in \_\_\_ at the meeting of Scientific Council DSc 27.06.2017.T.03.03 at the Tashkent State Technical University and LLC «Scientific-Technical Center». Address: 2, University str. Tashkent 100095, Uzbekistan. Phone: (99871) 246-46-00; Fax: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz).

The doctoral (DSc) dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of the Tashkent State Technical University (Registration number \_\_\_) Address: 2, University str. Tashkent 100095, Uzbekistan. Phone/Fax: (99871) 246-03-41;

Abstract of the dissertation was distributed on «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 year.  
(mailing report № \_\_\_ of «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 year).

**K.R. Allaev**  
Chairman of the Scientific council on award of scientific degrees,  
Doctor of technical sciences, Professor, Academician

**O.X. Ishnazarov**  
Scientific secretary of the Scientific Council  
an awarding scientific degrees,  
Doctor of technical sciences, Senior Scientific Researcher

**Sh.I. Klichev**  
Vice-chairman of the scientific seminar under Scientific Council  
an awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor

## INTRODUCTION (abstract of DSc dissertation)

**The aim of the research** is to develop a new energy-efficient technology for burning low-grade solid fuels in an intensified fluidized bed, intensifying hydrodynamic and thermal processes by improving the design of heat-power and heat-using installations, on example of a furnace device and a tubular heat exchanger.

**The tasks of the research:**

determination of energy indicators of equipment of the combustion of solid fuel and heat exchange through the intensification of hydrodynamic and thermal processes;

development of a new intensified fluidized bed for burning low-grade solid fuel on the basis of the classical flowing and fluidized beds;

development of a multifunctional furnace equipment for burning low-grade solid fuel and separation of associated impurities;

creating a mathematical model of the hydrodynamic processes, which take place in the furnace device with an intensified fluidized bed;

development of a new design of local turbulence devices vibrating due to the kinetic energy of the flow of heat transfer agent;

development of a method for intensifying hydrodynamic and thermal processes in heat exchangers with local turbulators;

development and creation of a physical installation of a furnace and a tubular heat exchanger with local turbulators for an experimental study of the intensification of hydrodynamic and heat exchange processes;

development of energy efficient technological schemes for the exploitation of heat-power equipment and heat-using installations in industrial enterprises and an assessment of their energy efficiency.

**The objects of the research** are the systems of fuel preparation, solid fuel combustion and ash trapping, as well as heat exchangers of thermal power plants and industrial heat-using installations and their parameters.

**The scientific novelty of the research consists of following:**

on the basis of hydrodynamic regularities, the physical essence of the intensified fluidized bed, which differs from the principles of the circulating fluidized bed is determined and based on the principles of the classical fluidized and flowing beds;

developed a new, based on the principles of the classical fluidized and spouting beds, the design of a multifunctional furnace and an energy efficient technology for burning high-ash coal in an intensified fluidized bed;

a mathematical model describing the characteristic parameters of the intensified fluidized bed, such as gas and solid particle velocities, the concentration of solid particles, the loss of pressure of the gas suspension according to the height of the layer, depending on the geometric parameters of the working chamber;

experimental and theoretical graphs and analytical equations for such important hydrodynamic parameters of the intensified fluidized bed as the gas and particle velocities along the vertical axis, the maximum height of the rise of solid particles

in the working chamber as a function of mass and size, the change in the concentration of solid particles and the pressure loss along the working height camera are received;

fundamentally new designs of local turbulators, which will be installed in tubes of heat exchangers and brought into vibration due to the kinetic energy of the liquid flow are developed;

on the basis of hydrodynamic regularities the physical essence of the intensification of hydrodynamic and thermal processes in tubular heat exchangers with local turbulators is determined, vibrating due to the kinetic energy of the liquid flow and the constant vibration of the elements of the turbulence and the turbulized field.

**Implementation of the research results.** On the basis of the results obtained to improve the energy efficiency of thermal power plants (furnace device and tube heat exchanger), to determine the rational values of the main heat engineering and design parameters, to simulate thermal and hydrodynamic processes:

patent for the invention of the Agency of Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan is received for the improved design of a multifunctional furnace with an intensified fluidized bed ("Plant for burning solid fuels or heat treatment of polydisperse materials". No. IAP 04840 2014). As a result, industrial enterprise was able to save 4.7 million  $\text{nm}^3$  of natural gas per year;

patent for the invention of the Agency of Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan on the design of a local turbulizer driven into the vibrational motion due to the kinetic energy of the liquid flow is received and installed in the tubes of heat exchangers ("Turbulent device of the heat exchange pipe". No. IAP 04514 2012). As a result, industrial enterprise was able to save 1.0 million kWh of electrical energy per year;

the technology of the intensified fluidized bed for drying, heating, roasting and gasification of polydisperse materials is embedded in the production workshop of JSC "Sredaztsvetmetenergo" (reference #62 of the JSC "Sredaztsvetmetenergo" dated June 26, 2018). As a result, the enterprise has been able to save 3.0 million  $\text{nm}^3$  of natural gas per year;

the technology of the intensified fluidized bed for the separation of solid particles of a polydisperse material depending on their size and density, humidification, cooling, as well as the trapping of fine particles by sedimentation is introduced in the production department of JSC "Sredaztsvetmetenergo" (reference #62 of the JSC "Sredaztsvetmetenergo" dated June 26, 2018). As a result, a possibility of saving 26.000 kWh electricity per year was created in the enterprise.

**Structure and volume of the dissertation.** The thesis consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of used literature, and applications. The volume of the thesis is 198 pages.

**НАШР (ЭЪЛОН) ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Бабаходжаев Р.П., Мухиддинов Д.Н., Рахмонов Н.М., Ходжаев Б.А., Тохтохунов К.А., Юсупов Б.В., Ибрагимов У.Х., Мухиддинова Я.Дж. Ороситель теплообменного аппарата. № IAP 04794. Патент на изобретение Республики Узбекистан. Бюлл., 2013. № 12. С.69.
2. Шакиров А.О., Бабаходжаев Р.П., Каримов А.А., Рахманом Н.М. Теория применения фото мутномера для исследования распределения концентрации твердых частиц во взвешенном слое // Узб. Журнал «Проблемы информатики и энергетики». - Ташкент, 2008. № 1. С. 46-49. (05.00.00; №5).
3. Шакиров А.А., Бабаходжаев Р.П., Каримов А.А., Рахманов М., Али-Ахунова М. Исследование коэффициента гидравлического сопротивления неподвижного слоя дисперсного угля в трубе с расширяющимся сечением // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент, 2008, №3-4. С. 41-47. (05.00.00; №21).
4. Бабаходжаев Р.П., Тохтохунов К.А., Каримов А.А., Арзикулов Г.П. Технологическая схема использования предтопки с ИКС на Ангренской ТЭС // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2008. № 2-3. С. 90-92. (05.00.00; №16).
5. Бабаходжаев Р.П. Коэффициент гидравлического сопротивления канала предтопки с различными сечениями и безнапорным течением потоков // Доклады АН РУз. № 3-4. – Ташкент; 2009. С.70-73. (05.00.00; №9).
6. Ибрагимов У.Х., Бабаходжаев Р.П., Тохтохунов К.А. Интенсификация теплообмена при помощи локальных турбулизаторов // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2009. №3-4. (05.00.00; №16).
7. Бабаходжаев Р.П., Каримов А.А., Шакиров А.А. Гидродинамические исследования двухфазного фонтанирующего слоя в коническом аппарате // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2009. № 3-4. С. 79-84. (05.00.00; №16).
8. Бабаходжаев Р.П. Пути решения проблемы широкого энергетического использования высокочольного бурого ангреноского угля // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент, № 3-4. 2009. С. 137-142. (05.00.00; №21).
9. Бабаходжаев Р.П., Шакиров А.А., Каримов А.А., Пулатова Д.М. Движение твердой частицы в восходящем потоке газа в камере сгорания конической формы // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». – Ташкент, 2012. № 1. С. 45-48. (05.00.00; №5).
10. Шакиров А.А., Бабаходжаев Р.П., Каримов А.А., Пулатова Д.М. Гидродинамические аспекты двухфазного фонтанирующего слоя в

аппарате конической формы // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент, 2012, № 1-2. С. 96-99. (05.00.00; №21).

11. Шокиров А.О., Бабаходжаев Р.П., Тошбоев Н.Т., Каримов А.А. Математическое описание движения частицы твердого тела в интенсифицированном кипящем слое // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент, 2013. № 3-4. С. 113-117. (05.00.00; №21).
12. Шакиров А.О., Бабаходжаев Р.П., Ташбаев Н.Т., Пулатова Д.М. Гидродинамические процессы в теплообменных аппаратах при турбулентном течении пристеночной области потока // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент, 2014. № 4. С. 113-117. (05.00.00; №21).
13. Ташбаев Н.Т., Бабаходжаев Р.П., Тохтохунов К.А. Турбулизация потока и эффективность теплообменной поверхности регенеративного воздухоподогревателя // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2015. № 2. С. 113-116. (05.00.00; №16).
14. Бабаходжаев Р.П. Некоторые результаты численного исследования гидродинамики топочной камеры с интенсифицированным кипящим слоем // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2017. № 3. С. 74-80. (05.00.00; №16).

## **II бўлим (II часть; II part)**

15. R. Babahodzhaev. Intensified fluidized bed burning of the angren brown coal containing an increased amount of ash. N. Syred and A. Khalatov (eds.), *Advanced Combustion and Aerothermal Technologies*. 2007. Springer. P. 65-72.
16. Мухиддинов Д.Н., Бабаходжаев Р.П., Ходжаев Б.А., Юсупов Б.В., Тохтохунов К.А., Рахмонов Н.М. Вихревое устройство для сушки и очистки дисперсных материалов. № IAP 04753. Патент на изобретение Республики Узбекистан. Бюлл., 2013. № 3. С.57.
17. Бабаходжаев Р.П., Мухиддинов Д.Н., Тохтахунов К.А., Ходжаев Б.А., Ибрагимов У.Х., Юсупов Б.В., Хужанов Р.А. Турбулизирующее устройство теплообменной трубы. № IAP 04514. Патент на изобретение Республики Узбекистан. Бюлл., 2012. № 6. С.47.
18. Бабаходжаев Р.П., Мухиддинов Д.Н., Каримов А.А., Шакиров А.О., Ходжаев Б.А., Юсупов Б.В., Пулатова Д.М., Хужанов Р.А. Установка для сжигания твердых топлив или тепловой обработки полидисперсных материалов. № IAP 04840. Патент на изобретение Республики Узбекистан. Бюлл., 2014. № 3. С.49.
19. Бабаходжаев Р.П. К вопросу газификации ангренового бурого угля // 1-я Научно-практическая конференция «Угольная теплоэнергетика и проблемы реабилитации и развития». Сб. тезисов докладов. – Алушта, 2004. С. 49.
20. Бабаходжаев Р.П., Мухиддинов Д.Н., Каримов А.А. Комплексная переработка ангренового бурого угля с целью получения

- энергетического и технологических продуктов // Энергетика: управление, качество, и эффективность использования энергоресурсов: Сб. трудов четвертой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск, 2005. С. 457-459.
21. Бабаходжаев Р.П. Интенсифицированный кипящий слой для сжигания ангренового бурого угля с повышенной зольностью // Международный научный семинар НАТО «Современные технологии горения и аэротермодинамики: защита окружающей среды и снижение выбросов в атмосферу». Сб. научных статей. – Киев, 2006. CD-диск.
22. Бабаходжаев Р.П., Юнусов Б.Х., Каримов А.А., Алимбаев А.У. Некоторые результаты экспериментального исследования гидродинамики интенсифицированного кипящего слоя для бурого низкосортного угля // Материалы докладов Национальной конференции по теплоэнергетике. Том 2. – Казань, 2006. С. 113-116.
23. Бабаходжаев Р.П., Каримов А.А., Алимбаев А.У. Утилизация золошлаковых отходов при сжигании ангренового бурого угля в псевдооживленном слое // II Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании». Материалы в 2-х томах. Том 1. – Варна, 2006. С. 261-263.
24. Бабаходжаев Р.П., Юнусов Б.Х., Рахманов Н.М. Сжигание ангренового бурого низкосортного угля в интенсифицированном кипящем слое // Горение твердого топлива. Сб. докладов VI Всероссийской конференции (с участием иностранных ученых). Часть 2. – Новосибирск, 2006. С. 20-27.
25. Бабаходжаев Р.П. Технологическая схема привязки предтопки с интенсифицированным кипящим слоем к углесжигающим котлоагрегатам ТП-45 и ТП-230 // Спец. Выпуск Международного научного журнала «Наука, образование, техника». – Ош, 2008. № 3(25). С. 251-253.
26. Бабаходжаев Р.П. Возможности применения предтопки с интенсифицированным кипящим слоем в котлоагрегатах П-64-2 // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. Том 1. – Казань, 2009. С. 619-622.
27. Бабаходжаев Р.П. Исследование процесса микрофонтанирования в интенсифицированном кипящем слое для сжигания низкосортных углей // VII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива». Сб. докладов. Часть 2. – Новосибирск, 2009. С. 15-19.
28. Бабаходжаев Р.П., Шакиров А.А., Каримов А.А. Математическое моделирование гидродинамики двухфазного потока в предтопках с интенсифицированным кипящим слоем // Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. Специализированный научно-практический отраслевой журнал. – Алматы, №4. 2010. С. 14-16.

- 29.Бабаходжаев Р.П., Хужанов Р.А., Шарипов А.М., Тургунов Ф., Эшкуватов Л.М. Разработка схемы использования энергии солнца на тепловых станциях для подогрева сетевой воды. ISSN 2076-6866. Modern science. Collection of Research Papers (researches, ideas, results, technologies). №3(11). 2012. - Kiev (Ukraine), pp. 98-100.
- 30.Бабаходжаев Р.П., Ходжаев Б.А., Ташбаев Н.Т. Энерготехнология использования Ангреновского бурого угля // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. Сборник трудов седьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск, 2013. С. 383-386.
- 31.Бабаходжаев Р.П. Математическое описание гидродинамики топочной камеры с интенсифицированным кипящим слоем. «VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике». Конференция с международным участием. Сборник тезисов докладов. – Екатеринбург, 12-14 ноября 2013. С. 15.
- 32.Shakirov A.A., Karimov A.A., Babakhodjaev R.P., Khidirova G.A., Mukolyants A.A. Studying of hydrodynamics of the two-phase gushing forth layer in the conic device. European Applied Sciences. ISSN 2159-2183. #3 2014. p. 96-100. ORT Publishing. – Stuttgart (Germany). [www.ortpublishing.de](http://www.ortpublishing.de).
- 33.Babakhodjaev R.P., Shakirov A.A., Karimov A.A. Researches of creation steady spouting – fluidized bed at thermal processing of disperse materials. European Science and Technology: 10th International scientific conference. - Munich (Germany). 28-29 May 2015, pp. 23-26. <http://sciencic.com/archive.php>.
- 34.Бабаходжаев Р.П. Возможности снижения потребления технической воды и повышения эффективности тепловых электрических станций Узбекистана. Education and science for sustainable development. International Theoretical and Practical Conference. - Tashkent. Uzbekistan. April 6-8, 2016, pp. 18-20.
- 35.Бабаходжаев Р.П. Повышение энергоэффективности работы топочного устройства с применением принципов фонтанирующе-кипящего слоев при сжигании низкосортного твердого топлива // Всемирный конгресс инженеров и ученых «Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации» (WSEC-2017). Материалы конгресса. - Астана (Казахстан), Том 1. июнь 2017. С. 126.

Автореферат «ТошДТУ хабарлари» ва «Энергия ва ресурс тежаш муаммолари» журналлари таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди (07.09.2018 йил).

Босишга рухсат этилди: 08.09.2018 йил  
Бичими 60x45 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 4. Адади: 100.

“BusinessFayzPrint” масъулияти чекланган жамияти.  
1000011, Тошкент шаҳри, Навоий кўчаси, 30