

# AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

*Əlyazması hüququnda*

## **REAL VAXT REJİMİNDƏ KOMPÜTER SİMULYASİYASİYA SİSTEMİ ƏSASINDA KARBOHİDROGENLƏRİN DEHİDROGENLƏŞDİRİLMƏSİ PROSESLƏRİNİN OPERATİV İDARƏETMƏ MƏSƏLƏLƏRİ**

İxtisas: 3337.01 İnformasiya- ölçmə və idarəetmə  
sistemləri (Kimya sənayesində)  
Elm sahəsi: Texnika elmləri

**İddiaçı: Nübar Əlimurad qızı Quliyeva**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi  
almaq üçün təqdim olunmuş dissertasiyanın

### **AVTOREFERATI**

**Sumqayıt – 2024**

Dissertasiya işi Sumqayıt Dövlət Universitetinin Proseslərin avtomatlaşdırılması kafedrasında yerinə yetirilmişdir

**Elmi rəhbər:**

texnika üzrə elmlər doktoru,  
**professor Əli Həsən oğlu Nağıyev**

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED. 2.04 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

Texnika elmləri doktoru, professor

\_\_\_\_\_

(imza)

**Nurəli Adil oğlu Yusifbəyli**

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

Texnika elmləri üzrə fəlsəfə  
doktoru, dosent

\_\_\_\_\_

(imza)

**Vahid Qara oğlu Fərhadov**

## İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

### **Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi.**

Tədqiqat mövzusunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. İncə dənəli katalizatorların maye qat texnologiyasından istifadə etməklə karbohidrogen dehidrogenləşdirmə prosesləri müxtəlif polimerlərin istehsalı üçün xammal olan aşağı və qismən orta alkenlərin alınmasının əsas üsuludur. Bu proseslər texnoloji cəhətdən mürəkkəb reaktor-regenerator qurğularında həyata keçirilir ki, bunlar reaktor və regenerator arasında katalizator kütlə dövriyyəsi sisteminin olması ilə xarakterizə olunur. Operativ idarəetmə obyektləri kimi bu proseslərin spesifik xüsusiyyətləri, həm birbaşa, həm də əks əlaqənin olması ilə xarakterizə olunan iki reaksiya aparatının ayrılmaz birləşməsindən irəli gələn bir sıra xüsusiyyətlərdən qaynaqlanır.

Katalitik dehidrogenləşmə prosesi nəticəsində katalizator hissəciklərinin məsaməli strukturunda kanalları bağlaya bilən koks əmələ gəlir. Nəticədə, reaktorda hissəciklərin qalma müddətində katalizator aktivliyini çox tez itirir. Bu, katalizatorun məsamələrində toplanmış koksun yandırılması ilə həyata keçirilən katalizatorun sirkulyasiyasının azalmasının səbəbidir, burada sonuncu ilə yanaşı, faktiki xammal və reaksiya məhsulları da temperaturda adsorbsiya olunur.  $T = 650-670$  0C. Yanma zamanı yaranan istilik sistemin istilik balansında əsas hissəni təşkil edir, hətta proses istilik baxımından özünü təmin etdiyi zaman rejimlər də məqbuldur, yəni. regeneratorda əlavə yanacaq daxil etmədən.

Aydın ki, reaksiyaların sürətləri, o cümlədən koksun çökmə reaksiyaları, temperaturdan Arrhenius asılılığına malikdir, buna görə də reaktordakı kimyəvi proseslərlə regeneratordakı istilik prosesləri arasında bir növ dinamik əlaqə yaranır. Bu əlaqə nəzarət proseslərini ağırlaşdırır - hər hansı bir cihazda kiçik dəyişikliklər sistemdə temperaturun fəvqəladə artması və ya azalmasına qədər böyük pozuntulara səbəb ola bilər.

Yuxarıda göstərilənlərin hamısından bu prosesin nəzarət obyekti kimi özəlliyi yarandı. "Reqlamentlərdə" rejim parametrlərinin göstərilən dəyərlərinə riayət etmək üçün sadə yanaşma nəzarət problemini heç də həll etmir. Fakt budur ki, "güclü"

pozuntular var: - zavodun xammalın yüklənməsi, xammalın tərkibindəki koks dərəcəsi, istilik yanma proseslərindəki dəyişikliklərdən (koksun yanmaması, yəni yanma zamanı CO:CO<sub>2</sub> nisbətindən asılıdır. bir çox amillər üzrə) və s. d.

Deməli, reaktorda və regeneratorda gedən prosesləri ayrıca nəzərdən keçirmək olmaz. Vahid yanaşma tələb olunur - model həm bir-biri ilə dinamik əlaqədə olan müxtəlif aparatlarda baş verən koks əmələ gəlməsi, həm də yanma proseslərini əhatə etməlidir.

Hazırda sənaye istehsalının dünya təcrübəsində istifadə olunan, müəyyən bir səviyyədə fərdi əməliyyat parametrlərinin sabitləşməsini yaxşılaşdırmaq istəyindən ibarət olan ənənəvi yanaşma problemi tamamilə həll etmir, baxmayaraq ki, sonuncunun mövcudluğuna ehtiyac da yoxdur. istisna olunur.

Obyektin bu xüsusiyyətini nəzərə alsaq, problemin aktuallığı kifayət qədər aydındır ki, bu da dövlət dəyişənlərindəki dəyişikliklərin geniş diapazonunda müvafiq idarəetmə texnologiyasının işlənilib hazırlanmasından ibarətdir ki, bu da vahid, eyni zamanda, vahidin yaradılmasına əsaslanıla bilər. bütün sistemin istilik rejiminə nəzarət etmək üçün qeyri-xətti, riyazi model.

**Tədqiqatın obyektı və predmeti:** İşdə tozşəkilli (mikrosferik) katalizatorun fasiləsiz regenerasiyası şəraitində qaynar təbəqə rejimində paralel aparılan iki kimya-texnoloji prosesləri əhatə edən reaktor-regenerator (RR) bloku nəzərdən keçirilir. Periodik rejimdə aparılan karbohidrogenlərin dehidrogenləşmə (KD) proseslərindən fərqli olaraq, bu texnologiyada proseslər fasiləsiz istehsal rejimində xammalın dövrü axını şəraitində həyata keçirilir. Məhz buna görə də qapalı RR sistemi spesifik bir texnologiya olaraq katalizator kütləsinin sistem daxili dövrəninə tələb edir. Sənaye miqyasında bu texnologiyadan istifadəyə nümunə kimi butanın, izobutanın və izopentanın RR sistemində dehidrogenləşmə prosesləri göstərilə bilər.

#### **Tədqiqatın məqsədi:**

Tədqiqatın məqsədi KD proseslərini həyata keçirən RR bloklarının istilik vəziyyətlərinin dinamikasının riyazi modelinin

işlənməsi və bunun əsasında sistemin istilik rejimlərinə dinamikada nəzarət və idarəetmə məsələlərinin həllidir.

İki müvafiq aparatın çıxışında katalizatorun kokslanma dərəcəsinin riyazi modelləşdirmə əsasında virtual qiymətləndirilməsi, mənfi əks əlaqəli lokal nəzarət probleminin həlli, vəziyyət dəyişənlərinə geniş diapazonda nəzarət və idarəetmə məsələlərinin həlli tədqiqatın məqsədini təşkil edir.

Proseslərin dinamikasının təfərrüatlı riyazi təsvirinin istifadəsi vəziyyət dəyişənlərindəki dəyişikliklərin geniş spektrinə, o cümlədən regeneratordan yanacaq qızdırılması lazım olduqda vəziyyətə nəzarət tapşırıqına nəzarət etməyə imkan verəcəkdir.

### **Tədqiqat metodları.**

Tədqiqatda fiziki və kimya-texnoloji proseslərin riyazi modelləşdirilməsi üçün effektiv metodologiya olan maddə və istilik balansı kinetika tənliklərinin qurulması, diferensial tənliklər nəzəriyyəsi, idarəetmə və dayanıqlıq nəzəriyyələri, dinamik sistemlərin identifikasiyası üsulları və real vaxt rejimində simulyasiya üsullarından istifadə edilmişdir.

### **Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:**

1. KD proseslərinin RR bloklarının idarəetmə məqsədi daşıyan kinetik modelinin riyazi quruluşu.

2. Qaynar təbəqə texnologiyası əsasında qurulmuş RR sistemlərində həyata keçirilən karbohidrogenlərin katalitik dehidrogenləşməsi proseslərində katalizatorun kokslanma dərəcəsinin virtual rejimdə ölçülmə məsələsinin qoyuluşu.

3. Xüsusi növ meylətmə funksiyalarının daxil edilməsi hesabına həm statik rejimləri, həm də keçid proseslərini əsk etdirən statistika əsasında dinamika modelinin parametrik identifikasiya məsələsinin həll üsulu.

4. Mürəkkəb dinamik sistemlərin qeyri-xətti riyazi modeli əsasında real vaxt rejimində idarəetmə alqoritmləri.

### **Tədqiqatın elmi yenilikləri.**

1. KD proseslərinin RR bloklarının dinamik vəziyyətlərinin idarə edilməsi üçün qeyri-xətti istilik modelin riyazi quruluşu.

2. KD proseslərinin dinamika modeli əsasında ölçülə bilən koordinatlarının bir hissəsinin cari sensor informasiyasından istifadə olunaraq sistemin fiziki ölçülə bilməyən digər koordinatlarının dolayı ölçülmə üsulu.

3. Yüksək məsaməli mikrosferik (tozvari) bərk katalizatorun məsaməli strukturunun fraktal təsviri əsasında kanallarda koks çöküntülərinin əmələ gəlmə modelinin yaradılması.

4. Sınaq impulsları paketinin formalaşdırılması əsasında KD prosesi RR blokunun istilik modelinin parametrik identifikasiyasının iki kriteriyalı məsələsinin tərtibi və həlli.

5. KD prosesinin idarə olunmasında vizuallaşdırma probleminin həlli üçün dinamika modelinin tərtibinin bir faza koordinatının avtonom tənzimlənməsi əsasında azaldılması.

6. KD prosesləri RR blokunun istilik koordinatlarının böyük meyletmələrinə nəzarət və idarəetmə məsələsinin qoyuluşu və həlli.

### **Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti.**

İzobutanın izobutilenə dehidrogenləşməsi prosesi nümunəsində katalizatorada koksün çökməsi və yandırılaraq təmizlənməsi proseslərini birləşdirən sistemin riyazi modeli alınmışdır. Tətbiq olunan metod və alqoritmlər oxşar reaktor-regenerasiya sistemlərinin idarə edilməsində bir nümunə olaraq istifadə oluna bilər. Alınan nəticələrin qaynar təbəqə rejimli digər proseslərin də istilik dinamikasının real vaxt rejimində monitorinqi üçün tətbiqi oluna bilər.

**Dissertasiya işinin aprobasiyası.** Dissertasiya işinin əsas müddəaları Sumqayıt Dövlət Universitetinin Elmi Şurasının iclaslarında, həmçinin aşağıdakı elmi-texniki konfrans və forumlarda müzakirə edilmişdir: Akademik Toğrul Şaxtaxtinskiyin 90 illik yubileyinə həsr olunmuş Respublika elmi konfransı, Bakı,2015; 2017-ci ildə Ufa şəhərində keçirilmiş Beynəlxalq Elmi konfransı; Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XXI Respublika elmi Konfransı, Bakı,2017; İnformasiya sistemləri və texnologiyalar nailiyyətlər və perspektivlər-Beynəlxalq elmi konfransın materialları, Sumqayıt, 2018; İnformasiya sistemləri və texnologiyalar nailiyyətlər və perspektivlər. Beynəlxalq elmi konfransın materialları, Sumqayıt,

2020, Riyaziyyatın və Yeni İnformasiya Sistemlərinin Tətbiqi Problemləri. IV Respublika Elmi Konfransı, Sumqayıt, 2021.

**Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı.**

Dissertasiya işi Sumqayıt Dövlət Universitetinin Avtomatika və İdarəetmə kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

**Dissertasiyanın strukturu və həcmi.** Dissertasiya işi girişdən, dörd fəsil, nəticə, istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısı və əlavələrdən ibarətdir. İşin əsas məzmunu 178 səhifə, 29 şəkil və 7 cədvəldə öz əksini tapır. Ədəbiyyat siyahısında 116 adda mənbə göstərilmişdir. Dissertasiya işinin ümumi və struktur bölmələrinin işarə ilə həcmi təqribi olaraq aşağıdakı qaydada paylanmışdır:

Ümumi – 182418 işarə; Giriş - 6044 işarə; Birinci fəsil – 27954 işarə; İkinci fəsil – 64788 işarə; Üçüncü fəsil – 72320 işarə; Dördüncü fəsil – 43983 işarə; Nəticə - 2630 işarə.

## **İŞİN MƏZMUNU**

**Girişdə** dissertasiya mövzusunun aktuallığı əsaslandırılmış, tədqiqatın məqsədi şərh olunmuş, həlli tələb olunan əsas məsələlər müəyyən edilmiş, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar göstərilmiş, alınmış nəticələrin elmi yenilikləri və praktiki əhəmiyyəti göstərilmişdir.

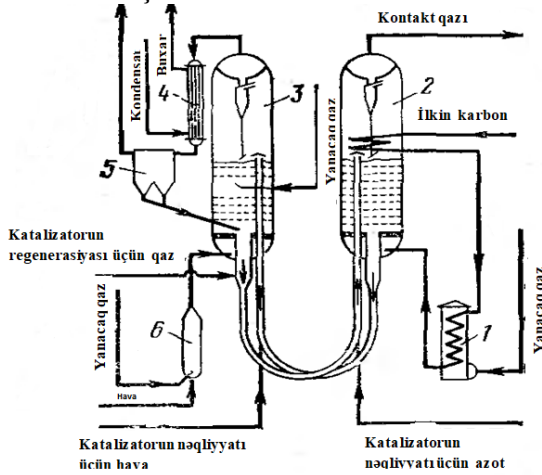
**Birinci fəsildə** KD proseslərinin kimyəvi mahiyyətinə və bu proseslərin modelləşdirilməsi və idarə edilməsi sahəsində ədəbiyyat mənbələrinə, xüsusən də katalizatorun qaynar təbəqəsində izobutanın dehidrogenləşməsi prosesinin şərhinə həsr edilmişdir.

**Karbohidrogenlərin qaynar təbəqədə dehidrogenləşməsi üçün katalitik proseslərin həyata keçirilməsinin texnoloji xüsusiyyətləri. İdarəetmə problemlərinin həlli üçün elmi mənbələrin təhlili**

Karbohidrogenlərin katalitik dehidrogenləşməsi (KD) prosesləri RR sistemlərində həyata keçirilən kimyəvi proseslər sinfinin ən çox diqqəti çəkən nümunələrindən biridir. Karbohidrogen xammalının narın dənəli katalizatorla təması ən optimal olduğuna əsaslanaraq, katalizatorun qaynar təbəqə halına

gətirilmə (QR) texnologiyasını həm reaktorda, həm də regeneratorda tətbiq etmək lazım gəlir. Xammalın kifayət qədər yüksək sürətlə getməsi, katalizatorun tez kokslanması və aktivliyinin azalması ilə müşayiət olunur ki, bu da onun yandırılaraq regenerasiyası ilə paralel olaraq təmizlənməsini zəruri edir. Katalizatorun təmizlənmə prosesi QR-də, onun reaktor ilə regeneratordakı arasında dövriyyəsi sistemində baş verir. Bu işə baxılan sistemlərin əsas xüsusiyyətidir ki, RR qurğusunun istilik rejimlərinin nəzarət və idarə edilməsində bir sıra spesifik problemlərin meydana çıxmasına səbəb olur.

Şəkil 1-də alkanların (butan, izobutilen, izopentan) dehidrogenləşdirilməsi üçün geniş istifadə edilən dizaynlardan biri göstərilir. Burada katalizator eyni tipli, yəni U-şəkilli borularla reaktordan hava ilə regeneratordakı, geriyyə isə xammalın və azotun köməyi ilə aparatlara daşınır.



Şək.1. U-şəkilli nəqliyyat xətləri ilə alkanların dehidrogenləşdirilməsi üçün qurğu.

Texnoloji sxemin mürəkkəbliyi ilə bağlı texniki çətinliklər, ilk növbədə, avtomatik idarəetmə məsələsinin həllinə öz şərtini irəli sürür. Katalizatorun kokslanma dərəcəsinə operativ nəzarət mühüm texnoloji ölçmələrdən biri olaraq, həlli texniki cəhətdən çətin olan



problemi təşkil edir. Katalizatorun reaksiya aparatında orta qalma müddəti 10-16 dəqiqədir və bu müddət ərzində katalizatorun vəziyyətinin qiymətləndirilməsi heç bir hiss olunan gecikmə olmadan aparılmalıdır. Aydındır ki, bu problem yalnız axın xəttlərində yerləşdirilən operativ ölçmə vasitələrindən istifadə yolu ilə həll edilə bilər. Lakin mühitin yüksək temperaturu və aqressivliyi səbəbindən yaradılması bu günə qədər problemlə olaraq qalan müvafiq ölçmə vasitələrinin yaradıla bilməməsi prosesin idarə edilməsində əsas çətinliyi təşkil edir.

Bununla əlaqədar olaraq elmi ədəbiyyatda bəzi müəlliflər RR sisteminin istilik vəziyyətlərinin sabitləşdirilməsi problemini həll etmək üçün xətti avtomatik idarəetmə sisteminin tənzimləmə parametrlərinə robast nəzarət məsələsini, Kalman filtrasiya strategiyasını irəli sürürlər.

Elmi-texniki ədəbiyyatda PID nəzarəti əsasında xətti sistem ilə rejimin sabitləşdirilməsi məsələləri işıqlandırılır. Bu sistemlərdə proqramlaşdırılan məntiqi kontrollerlər (PMK) və SCADA sistemlərinə müraciət diqqəti cəlb edir.

İdarəetmənin vizuallaşdırılması mövzusunda gəldikdə, sənaye avtomatlaşdırılmasında proqramlaşdırılan məntiqi kontrollerlərdən (PMK) istifadə təcrübəsi son vaxtlar xüsusilə real vaxt rejimində idarəetmə prosesinin gedişinə dinamikada nəzarət baxımından xeyli dərəcədə mükəmməlləşmişlər.

### **Reaktor-regenerator tipli kimya-texnoloji sistemin məlum idarəetmə model nümunələri**

Katalizator dövrəni RR sistemlərinin modelləşdirilməsində Qahirə Universitetinin professoru S.S. Əl-Naşainin<sup>1</sup>-nin bir məqaləsi ilk kompleks yanaşma olaraq qeyd edilə bilər. Dehidrogenləşmə proseslərinin kinetikasi Ölkəmizin kimya mühəndisləri tərəfindən ətraflı öyrənilmişdir. İdarəetmə mühəndisliyi sahəsində istilik və material axınlarının vahid diferensial tənliklər sistemində birləşdirilməsi ideyaları 70-ci illərdə AMEA-nın akademiki A.M. Əliyev tərəfindən irəli sürülmüş və özü və əməkdaşları tərəfindən işlənmişdir.

Reaktor-regenerator sisteminin istilik dinamikası baxımından model tədqiqatı katalitik krekinq prosesləri üçün Ə.H.Nağıyev və həmmüəlliflərinin işlərində işıqlandırılmışdır.

Qeyd etmək lazımdır ki, apardığımız tədqiqatda qaynar təbəqələr üçün qəbul edilmiş psevdohomogen reaksiya şəraiti fərziyyəsi məhz yuxarıda göstərilən elmi konsepsiyalardan başlanğıc götürür.

Piyazi modelləşdirmə sahəsində xüsusi istiqamət olaraq diqqəti çəkən informasiya aspektinin ön sıraya çəkilməsi texniki kibernetika və idarəetmə elminin əldə etdiyi nailiyyətlərlə bağlıdır.

Bu baxımdan RR sisteminin idarə olunmasında modelləşdirmə, situasiyaya görə idarəetmə və qeyri-səlis məntiqdən istifadə konsepsiyası diqqəti cəlb edir. Qeyri-səlis məntiq paradixmasının regeneratorda qaynar təbəqə rejimlərinin pozulmasına səbəb ola biləcək kritik vəziyyətlərin baş vermə ehtimalının qiymətləndirilməsinə həsr edilən bir sıra məqalələr də öz orijinal yanaşmaları ilə diqqəti cəlb edirlər.

Beləliklə, elmi ədəbiyyat təhlilindən çıxarılan nəticə kimi aşağıdakı bir sıra aspektlərə diqqət yetirilməlidir.

1. Aşağı və orta karbohidrogenlərin, o cümlədən izobutanın dehidrogenləşdirilməsi proseslərinin həyata keçirildiyi RR bloklarının konstruktiv-texnoloji ümumiləşdirilməsi olaraq U-şəkilli nəqliyyat xəttli modelin qəbul edilə bilər.

2. Katalizatorun koklaşma dərəcəsinin hər iki aparatın çıxışında abraziv təsir və yüksək temperatur şəraiti ilə əlaqədar fiziki ölçülməsi texniki problemlə qarşılaşır ki, bu kəmiyyətlərin real vaxt rejimində model qiymətləndirilməsinə zərurət yaranır.

3. Məhz RR bloklarında baş verən müxtəlif proseslərin kvazistasionarlıq əlamətlərinin nəzərə alınması nəticəsində riyazi modeldə koks əmələ gəlmə modelinin statik kinetik asılılıq şəklində, regenerasiya prosesinin isə yanma modeli əsasında diferensial tənliklər sistemi formasında ifadə etmək özünü doğrulda bilər.

4. Real şəraitdə fəaliyyət göstərən sənaye sisteminin riyazi modelləşdirilməsi yalnız konkret sənaye qurğusunun məlumatlarına

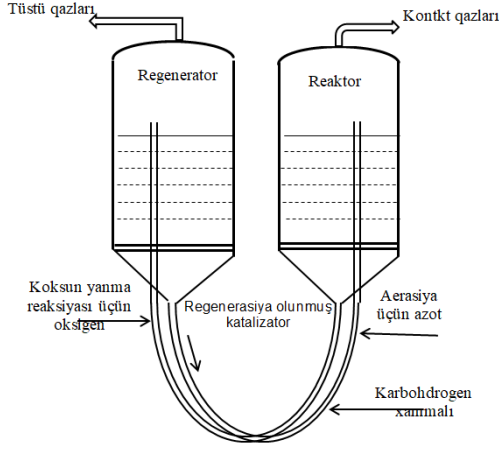
əsasən parametrik identifikasiyaya olunduqda özünü doğrulda bilər. Parametrik identifikasiya probleminin həlli üçün aktiv eksperimentlərin aparılması elmi ədəbiyyatda demək olar ki, işlənilməmiş olduğuna baxmayaraq bu sahədə konkret hesablama eksperimentlərinin nəticələri belə bir identifikasiya istiqamətinin perspektivli olacağına əminlik yaradır.

**İkinci fəsil** RR sistemlərində həyata keçirilən karbohidrogenlərin dehidrogenləşdirilmə proseslərinin riyazi modelləşdirilməsinə həsr olunur.

**Ümumiləşdirilmiş RR blokunun struktur sxemi. Faza koordinatların təsnifatı.**

Katalitik KD prosesləri struktur olaraq iki reaksiya aparatının maddə və energetik baxımdan katalizator dövrəni ilə qarşılıqlı dinamik əlaqədə birləşməsi və vətətdə yaratması kimi təsvir oluna bilərlər (şəkl.2). Burada katalizator axınının həlledici rolu reaksiya nəticəsində koks əmələ gəlməsi və onun regenerasiyası zamanı böyük istilik ayrılması ilə müşayiət olunan aktivliyinin bərpası ilə bağlıdır. Katalizator aktivliyinin daha bir mühüm amili də vardır ki, bu katalizator matrisinə yeridilmiş xromun valentlik faktorudur.

Regenerasiya zamanı yüksək temperatur şəraiti və oksigen mühitinin olması xromun oksidləşmə dərəcəsi baxımından valentinin yüksəlməsinə şərait yarada bilər (katalitik aktiv olan üç valentli oksiddir  $Cr_2O_3$ ). Dezaktivasiyanın bu növü də özünü göstərir ki, riyazi model və idarəetmə məsələsində bu sevrilmə bilavasitə nəzərə alınmalıdır.



Şək.2. Material axınları və sistemin əsas koordinatları baxımından reaktor və regeneratorda arasında əlaqənin sadələşdirilmiş variantı.

Vəhdət təşkil edən RR cütliyünün idarəetmə modeli baxımından faza koordinatlarının aşağıdakı təsnifatını qeyd edək:

1. Giriş koordinatları. Bu texnoloji parametrlər həm idarəetmə, həm də operator-texnoloqun nəzarətində olan həyəcanlandırıcı təsir faktorunu, xüsusən də qurğuya verilən xammalın sərfini, və onun koks yaratma xassəsini əhatə edir. İdarə edici parametrlər isə sistemdə katalizatorun dövr sürəti, regeneratorda qızdırılması üçün əlavə yanacaqın miqdarı, katalizatorun asan nəql edilməsi üçün nəqliyyat xəttində aerasiya üçün verilən azotun sərfini daxil edir.

2. Vəziyyətlər fəzası koordinatları.

İstilik rejimi dinamikasının modeli dörd koordinatla kifayət qədər tam şəkildə göstərilə bilər: - reaktorun və regeneratorda temperaturları və həmin aparatların çıxışlarında katalizatorun koklaşma dərəcəsi.

Aparatlarda operativ temperaturun ölçülməsi heç bir çətinliklə qarşılaşmırsa, digər iki koordinatın operativ ölçülməsi bu işdə diqqət yetirilməli olan əsas vəzifələrdən birini təşkil edir. Təqdim olunan

işin xüsusi bölməsi bu parametrin fiziki ölçülməsi problemləri ilə bağlı məsələyə həsr edilmişdir, burada yalnız onu qeyd etməklə kifayətlənirik ki, hal-hazırda bu koordinata operativ nəzarət etmək üçün texnoloji ölçmələr praktikasında effektiv üsul hələ də müəyyən olunmamışdır.

Qeyd etmək vacibdir ki, sadalanan bu dörd koordinat, RRB-nin istilik vəziyyəti fəzasını təşkil edir və onların sayı istilik dinamikasının idarə olunma məsələsinin qoyuluşundan irəli gəlmişdir. Belə ki, hər iki aparatın daxilində katalizator üzrə xromun valentlilik göstəriciləri istilik dinamikasına təsir etmədiyi üçün onlar baxılan modelin faza koordinatları kimi sistemə daxil edilməmişdir.

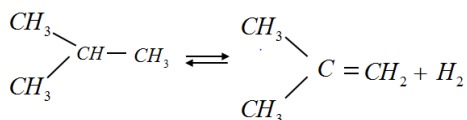
### 3. Çıxış koordinatları.

Tədqiqat probleminin bu prinsip üzrə tərtibində çıxış koordinatları bir-birindən fərqli müxtəlif kriterilər əsasında formalışdırıla bilər. Vəziyyət koordinatları ilə bağlı olan müxtəlif effektivlik göstəriciləri və məqsəd funksiyası ilə müəyyənləşən fiziki-kimyəvi parametrlər ola bilər. Məsələn, variantlardan biri hədəf məhsulun çıxımı ola bilər.

Aydın ki, bu tədqiqat çərçivəsində əsas diqqət bu siyahının ikinci bəndinə, yəni istilik dinamikası baxımından faza koordinatlarına nəzarət probleminə yönəldilir, başqa sözlə RR sistemində dəqiq dinamik proseslərin riyazi modelləşdirilməsinə yönəlmiş olur ki, idarətmə proseslərinin demək olar ki, əsas məsələləri bu model ilə əlaqədar öyrənilir.

### **İzobutanın dehidrogenləşməsi reaksiyası nümunəsində katalizator koklaşmasının kinetik təsviri.**

Koklaşmanın kinetik asılılığını izobutanın izobutilenə çevrilmə nümunəsində şərh edək:



Göründüyü kimi, reaksiya nəticəsində hidrogen molekulu maddə tərkibindən ayrılaraq, daha yüksək reaksiya qabiliyyətli izobutilenin yaranmasına səbəb olur. Qeyd etmək vacibdir ki,

baxılan reaksiya ilə yanaşı, burada yan reaksiyalar da baş verir ki, onların nəzərə alınması kokslaşma baxımından xüsusi olaraq diqqəti cəlb edir. Koks ağır karbohidrogenlərin və bilavasitə kömürün məcmusudur – orta çəki nisbəti C:H = 12-19 civarında dəyişir.

Koks çöküntülərinin əmələ gəlməsi reaksiyalarının kinetikasının təsviri üçün dissertasiyada verilmiş diferensial tənliklər sistemi şəklində dəqiq ifadələri ötürərək, burada yalnız formal ifadədən istifadə edək:

$$w_k = F_1(\bar{k}_k, T_1, v),$$

harada ki,  $\bar{k}_k$  – koks əmələ gəlməsi reaksiyalarının ümumiləşdirilmiş sürət əmsalı,  $T_1$  – reaksiya zonasının temperaturu,  $v$  – koks əmələ gətirən reaksiyaların ümumiləşdirilmiş qatılığına ekvivalent kimi qəbul edilən xammalın reaktora daxil edilməsinin kütlə sürətidir.

Koksun yanma reaksiyası üçün sürət tənliyinin formal yazılışını aşağıdakı formada təqdim etmək məqsədəuyğundur:

$$v = F_2(k_2, T_2, f_6, v_2),$$

harada ki,  $v, k_2, T_2, f_6, v_2$  – müvafiq olaraq katalizatorun regenerasiya reaksiyasının sürəti, ümumiləşdirilmiş sürət sabiti, regeneratordan temperaturu, regeneratordan hava axını və koksun yanma zonasına verilən qaz axınının kütlə sürətidir.

Katalizatorun regenerasiyası prosesində üçvalentli və altıvalentli xromun qarşılıqlı dönən proses olduğunu nəzərə alaraq bu kinetik asılılıq aşağıdakı formada tərtib olunmuşdur:

$$\frac{dC_{Cr^{6+}}^{(2)}}{d\tau} = k_{+3} \exp(-E_2 / RT_2) C_{Cr^{6+}};$$

$$\frac{dC_{Cr^{3+}}^{(1)}}{d\tau} = k_{+6} \exp(-E_1 / RT_1) (1 - C_{Cr^{6+}}^{(1)}) C_{2,3};$$

burada  $C_{Cr^{3+}}^{(1)}, C_{Cr^{6+}}^{(2)}$  – regeneratorda üçvalentli və altıvalentli xromun konsentrasiyaları,  $k_{+3}, k_{+6}$  – müvafiq reaksiyaların sürət əmsalları;  $E_1, E_2$  – koks əmələ gəlmə və yanma reaksiyalarının (katalizator

aktivliyinin bərpası) aktivləşmə enerjiləri;  $R$  – universal qaz sabiti,  $\tau$  – reaksiya müddətidir.

### **RR blokunun vəhdət halında maddə və istilik balanslarına əsaslanan istilik modelinin işlənməsi**

Sistemin vəhdət halında dinamika modelinin qurulmasında aparatlar arasındakı müxtəlif kanallar üzrə düz və əks əlaqə mexanizminin struktur cəhətdən təsvirindən tədqiqatda əsas yanaşma olaraq istifadə edilmişdir:

$$G_1 \frac{dC_1}{dt} = F_k(C_2 - C_1) - \phi_1(T_1, C_1, C_2, w)G_1;$$

$$G_2 \frac{dC_2}{dt} = F_k(C_1 - C_2) + \phi_2(T_2, C_2)G_2;$$

$$G_1 c_k \frac{dT_1}{dt} = F_k c_k (T_2 - T_1) - \phi_1(T_1, C_2, w)q_2 G_1 + \\ + c_{raw} F_{raw} (T_{raw} - T_1) + k_{en} S_1 (T_{en} - T_1);$$

$$G_2 c_k \frac{dT_2}{dt} = F_k c_k (T_1 - T_2) + \phi_2(T_2, C_1)q_1 G_2 + q_3 F_{fu} + \\ + q_4 \delta F_k + F_{air} c_{air} (T_{air} - T_2) + k_{en} S_2 (T_{en} - T_2);$$

Burda  $C_1, C_2, T_1, T_2$  – reaktorda və regeneratorda koks konsentrasiyaları və temperaturları;  $F_k, F_{air}, F_{raw}$  – katalizatorun, regeneratorda verilən havanın və reaktora verilən xammalın kütlə axın sürətləri;  $k_{en}, S_1, S_2, G_1, G_2$  – ətraf mühitə istilik ötürmə əmsalı, reaktor və regeneratordanın mühiti ilə təmas sahələri, və müvafiq reaksiya aparatlarındakı katalizatorun kütləsi;  $c_k, c_{raw}, c_{air}$  – katalizatorun, xammalın və havanın istilik tutumu;  $\phi_1(T_1, C_2, w)$ ,  $\phi_2(T_2, C_1)$  kinetik asılılıqları Arrhenius formasında təsvir edən funksiyalar olub, koks əmələ gəlmə və yanma reaksiyalarının sürətlərini ifadə edirlər;  $q_1, q_3, q_4$  – koksun, adsorbsiya olunmuş karbohidrogenlərin və yanacaq qazının istilik törətmə qabiliyyəti;  $q_2$  – dehidrogenləşmə reaksiyasının istilik effektidir.

Qeyd edək ki, (1) bəndində koks əmələ gəlməsi və katalizatorun aktivliyinin bərpasını əks etdirən sürət funksiyaları aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$\phi_1(T_1, C_1, C_2, w) = k_{01} \exp(-E_1 / RT_1) \frac{\alpha w C_1}{1 + \exp(-\beta C_2)}; \quad (2)$$

$$\phi_2(T_2, C_2) = k_{02} \exp(-E_2 / RT_2) C_2^\eta; \eta = 1.0 - 1.4$$

Burada  $w$  – xammalın verilməsinin çəki sürəti;  $\alpha, \beta, \eta$  – sabit ədədlərdir.

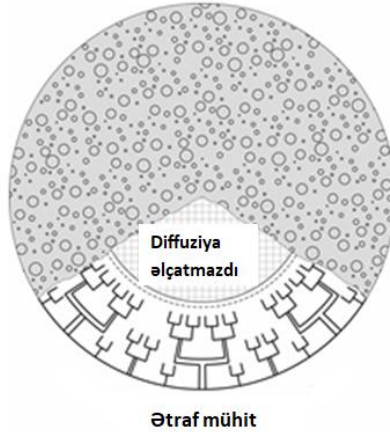
RR sisteminin istilik rejiminin dinamikasının riyazi strukturu katalizatorun səthində və ya məsamələrində çökən koksün oksidləşmə reaksiyalarını heç cürə fərqləndirmir. Qaynar təbəqə modelinə uyğun olaraq reaksiya mühitinin kvazihomogen təsvirinə əsaslanaraq, həmin reaksiya sürəti üçün yekun sürət ifadəsi tərtib edilir. Yalnız xüsusi rejimlərdə, yəni regeneratordan əlavə qaz hesabına qızdırılması zəruri olduqda mürəkkəbləşdirilmiş kinetik təsvirdən istifadə olunur ki, bunun üçün tədqiqatda səthi prosesləri məsamədaxili proseslərdən fərqləndirməyə imkan verən “psevdo kanal” anlayışından istifadə olunur. Psevdo kanal konsepsiyası katalizatorun məsaməli strukturunun fraktal analizinə əsaslanır. İşdə fraktal konsepsiyası əsasında məsaməli bərk katalizatorun xaotik məsamə strukturu üçün dendrit modeli təklif olunur və bu modelə uyğun fraktal parametrlərinin müəyyənləşdirilməsinə imkan verən metodikadan istifadə olunur.

### **Koklaşma prosesinin katalizator məsamə strukturunun fraktal təsviri əsasında modelləşdirilməsi**

Tədqiqat işində katalizator üzərinə koks çökmə proseslərinin və oksidləşmə yolu ilə katalizatorun aktivliyinin bərpası reaksiyalarının sürətləri stoxastik həndəsi strukturların fraktal təhlilinə də ayrıca diqqət yetirilir. Fraktal konsepsiyasının istifadəsi məsaməli mühitin makro, mezo və mikro kanallarında molekulyar diffuziya proseslərinin təsvirində effektiv üsul kimi özünü göstərir.



Bu baxımdan, ədəbiyyatda bərk materialın məsamə sisteminin dendrit modeli kimi tanınan hipotetik strukturun çox effektiv olduğu ortaya çıxdı. Bu hipotetik, həndəsi konstruksiyadan istifadə edərək və mücərrəd “psevdo-kanal” modelinə əsaslanaraq, məsaməli materialın dərinliklərində bəzi kütlə ötürmə əmsallarını hesablamaq üçün düsturdan istifadə olunur. Aşağıdakı həndəsi model katalizator zərrəsinin məsamə strukturunu statistik mənada kifayət qədər dolğun əks etdirmə imkanına malikdir.



Şək. 3. Məsaməli katalizatorunda hipotetik dendrit strukturlarının sxematik təsviri.

Maddə kütlə ötürmə əmsallarını qiymətləndirmək üçün aşağıda verilən həndəsi-fraktal yanaşmadan istifadə olunmuşdur.

$\ell$  uzunluğa malik kanalların perimetr cəmləri  $\Pi'(\ell)$  ilə, kəsiklərin sahələri  $S'(\ell)$  ilə,  $\ell$  uzunluğu olan budağın həcmi  $V'(\ell)$  ilə ifadə etməklə silindrik kanalın uzunluğunun radiusa nisbətini  $r = b\ell$  ilə ifadə edilərsə, bu düsturları adekvat fraktal kəmiyyətlər kimi qəbul etmək olar:

$$\Pi'(\ell) = \frac{2\pi\ell}{b} \left( \frac{\ell_0}{\ell} \right)^{D_n} \quad (3)$$

$$S'(\ell) = \frac{\pi \ell^2}{b} \left( \frac{\ell_0}{\ell} \right)^{D_s} \quad (4)$$

$$V'(\ell) = \frac{\pi \ell^3}{b^2} \left( \frac{\ell_0}{\ell} \right)^{D_v} \quad (5)$$

harada ki,  $D_n, D_s, D_v$  qeyd olunan həndəsi kəmiyyətlərə görə fraktal ölçüləri olub,  $a = \frac{r_{n+1}}{r_n} = \frac{\ell_{n+1}}{\ell_n}$ ,  $\frac{r_n}{\ell_n} = b$ ,  $\frac{\chi_{n+1}}{\chi_n} = c$  nisbət parametrlərinə nəzərən aşağıdakı ifadələrlə hesablanır:

$$D_v = 3 + \frac{\ln c}{\ln a}; \quad D_s = 2 + \frac{\ln c}{\ln a}; \quad D_n = 1 + \frac{\ln c}{\ln a}.$$

Sonuncu ifadələrdə  $r_n, \ell_n$  – silindrik kanalın radiusu və uzunluğunu;  $\chi_n$  – dendritin gövdəsindəki budaqların sayını;  $n$  – dendrit strukturunda “nəsillərə” verilən şərti nömrəni iadə edir.

(3)–(5) ifadələri kanal ölçülərinin funksiyası olaraq maddə köçürülməsində diffuziya ləngimlərinin qiymətləndirilməsinə xidmət edir. Başqa sözlə, həcm və ya səth üzrə molekulyar diffuziyaya məhdudiyət nə qədər böyükdürsə, yanma reaksiyası üçün kanalın dərinliyinə oksigenin çatdırılma şəraitinin pisləşməsi də bir o qədər nəzərə qarpan olacaqdır.

### **Regeneratorun əlavə qaz yanacağı ilə qızdırılma rejimlərində istilik dinamikası modeli.**

İdarəetmə prosesində regeneratorda əlavə olaraq müəyyən miqdarda qaz yanacağıının daxil edilməsi zərurəti yaranan situasiyalar mövcuddur. Bu hallarda yalnız hidrodinamik vəziyyət dəyişmələri deyil, həm də yanma reaksiyası üçün oksigen balansında ciddi dəyişikliklər meydana çıxır. Belə ki, nominal rejimlərdə reaksiya mühitində oksigen artıqlığı olduğu halda, bu rejimdə, indi əksinə, yanma prosesində oksigen defisiti özünü göstərir. Bu vəziyyət yanma proseslərinin riyazi yazılışının strukturuna yenidən baxılmasını tələb edir, yəni artıq qaynar təbəqədə iki fazanın mövcudluğu nəzərə alınmalı olur ki, bu fazalardan biri sıx faza, yəni hava qabarcıqlarının olmadığı faza müstəqil surətdə nəzərdən keçirilməli və yanma prosesi bilavasitə modelləşdirilməli olur. Digər

faza – hava qabarcıqlarının təşkil etdiyi fazadır ki, orada yanma prosesləri və fazalar arası oksigen köçürülmə effektləri hökmən nəzərdə tutulmalı olur. Tənliklərin strukturu təkə hidrodinamik vəziyyətin dəyişməsi səbəbindən deyil, həm də bu iki faza üçün müxtəlif tənliklərin tərtib olunması ilə əlaqədar olaraq ciddi dəyişikliyə məruz qalmış olur.

Dissertasiya işində qaynar təbəqənin strukturunun sıx və seyrəkləşmiş fazalardan ibarət olması əsasında ayrılıqda seyrəkləşdirilmiş və sıx fazalar üçün diferensial tənlik modelləri tərtib olunur və situasiyaya görə idarəetmə konsepsiyası əsaslandırılır.

**Üçüncü fəsilə** RR bloku modelinin parametrik identifikasiyası əsasında sistemin statik və dinamik xüsusiyyətləri tədqiq olunur.

**Sənaye qurğusunun məlumatlarına əsasən riyazi modelin parametrik identifikasiyası.**

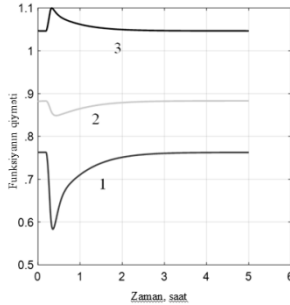
Qeyd olunmalıdır ki, sənaye miqyaslı RR sistemlərinin parametrik identifikasiyası sahəsində bir müsbət təcrübə mövcuddur ki, onun baxılan tədqiqatda nəzərə alınması çox effektivdir. Bu təcrübə aktiv təsirlərin sınaqdan keçirilməsi prinsipi kimi adlandırıla bilər. İdeya ondan ibarətdir ki, meyletmə funksiyası tarazlıq vəziyyətlərini əks etdirən statistik məlumatlar əsasında əldə edilən parametrik identifikasiya ilkin mərhələ olaraq qəbul edildikdə, sonradan onun bir sıra eksperimental keçid rejimlərinin dinamikası əsasında dəqiqləşdirilməsi çox müsbət nəticələr verə bilər. Daha öncə elmi ədəbiyyatda digər sistemlər nümunəsində öz müstət effektlərini sübut etmiş olan bu prinsipin baxdığımız tədqiqat obyektinin identifikasiyasında bir sıra texnoloji xüsusiyyətlərin nəzərə alınması ilə tətbiq edilməsi uğurlu nəticələr verə bilmişdir. Baxdığımız modelləşmə obyektini əlaqədar olaraq təklif etdiyimiz meyletmə funksiyası aşağıdakı şəkli almışdır:

$$R(p_1, p_2) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{N_1} \left( y_{ij}^M(p_1, p_2, u_j) - \xi_{ij}^T \right)^2 +$$

$$+\alpha \cdot \sum_{i=1}^4 \sum_{n=1}^{N_2} \left[ Y_i^M(p_2, u_n, t_n) - Y^T(t_n) \right]^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

harada ki,  $p_1 \in P_1; p_2 \in P_2$  – müəyyən ediləcək identifikasiya parametrlər vektorları;  $y_{ij}^M, Y_i^M$  – müvafiq olaraq (1), (2) sisteminin dörd ölçülü vəziyyət vektorunun komponentləri və sınaq impulsundan sonra məcburi hərəkəti əks etdirən vektor;  $\xi_{ij}^T$  – statistik məlumatların eksperimental qiymətləri;  $N_1$  – müşahidələrin sayı (statistikanı təşkil edən toplum);  $M, T$  – müvafiq olaraq tənliklərdən hesablanmış və eksperimental qiymətlər;  $t_n$  – diskret zaman;  $\alpha \in (0,1)$  – meyletmə funksiyasının statik və dinamik (keçid prosesləri baxımından) hissələri üçün prioriteti müəyyən edən çəki əmsalidir. Qeyd edək ki, identifikasiyada sağ tərəfləri sıfıra bərabər edilən (1) diferensial tənlikləri və (2) statik asılılıqlar şəklində verilmiş modellərdən istifadə edilmişdir.

Statik vəziyyətlər çoxluğunda parametrik identifikasiya üçün adi passiv təcrübə statistikasına kifayət edirsə, dinamik vəziyyətlərin adekvat əks etdirilməsi üçün bir sıra kanallar üzrə keçid proseslərindən ibarət bir paket tərtib etmək lazım gəlir (şəkl.4).



Şəkl.4. Sistemdə katalizator dövriyyə sürətinin impuls şəklində azalmasına qarşı sistemin dinamikada reaksiyası: 1- regenerasiyadan sonra koksün konsentrasiyası; 2-reaktorda temperatur; 3- regeneratordan temperaturu.

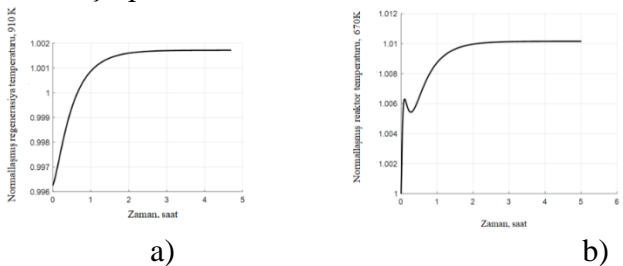
Qrafikdə göstərilən üç keçid prosesi aktiv təcrübə olaraq (6) ifadəsində  $p_2$  identifikasiya parametrlər vektorunun korreksiyası üçün istifadə olunur.

**RR blokunun istilik rejimlərinin lokal tənzimlənmə sistemləri üçün (1), (2) modeli əsasında ötürmə funksiyalarının əldə edilməsi**

Məlum olduğu kimi, sənayedə xətti stabilləşdirmə sistemlərinin yaradılması texnologiyası ötürmə funksiyası prinsipinə əsaslanır ki, bu da öz növbəsində Laplas inteqral çevrilməsi üzərində qurulmuşdur. Aydındır ki, sistemin dinamik modelinin (1), (2) şəklində olması onu müvafiq girişlərdə 5% -li “pillə” formasında xarici təsirə məruz qoyaraq, sistemin reaksiyasını asan bir şəkildə əldə etməyə və praktikada hər zaman texniki baxımdan asanlıqla əldə edilə bilməyən işəburaxma əyrisinin qurulmasına imkan yaradır.

Şəkil 5-də. (a, b əyriləri) regeneratora verilən havanın həcm sürətinin 5% amplitud ilə pilləli azalmasından sonra yeni stabil vəziyyətə keçidin qrafiki göstərilmişdir ( $F_{raw}(t_0) = 1.15F_{raw}^{nom}$ ). Digər qrafik xammalın reaktora daxil olma sürətinin 15%-li pilləvari azalmasına sistemin reaksiyasını (temperatur üzrə) ( $F_{raw}(t_0) = 1.15 \cdot F_{raw}^{nom}$ ) əks etdirir.

Göründüyü kimi, 1,2-1,4 saat ərzində sistem yeni regenerasiya temperaturunun əsas hissəsini alır və sonra bu vəziyyət dəyişəninin artımı nəzərə çarpmır.



Şək.5. Regenerasiyaya verilən havanın həcm sürətinin 5%-li (a) və 15%-li (b) azalmasından sonra temperatur üzrə işəburaxma əyriləri.

Qeyd etmək lazımdır ki, lokal tənzim sistemlərinin sintezi üçün qeyri xətti model əsasında işəburaxma əyrilərindən istifadə olunmasının mühüm bir aspekti diqqəti cəlb edir ki, bu pilləvari təkan üçün amplitudun optimal seçilməsi imkanının yaranmasıdır. Məsələn, hesablama eksperimentinə istinad edən bu üsulun tətbiqi qurğunun xammala görə müxtəlif yükləndirmə dərəcələrində baxılan kanal üzrə ötürmə funksiyasının hansı dəyişikliyə məruz qaldığı asanlıqla əldə oluna bilər. Aydındır ki, tənzimləmə sisteminin sintezində bu informasiya əhəmiyyət kəsb etməklə yanaşı, həm də geniş diapazonda idarəetmə praktikasını üçün bu xarakterli informasiyanın mühüm əhəmiyyəti vardır.

**Dördüncü fəsil** sistemin qeyri-xətti riyazi modeli əsasında RR blokunun istilik rejiminə nəzarət və idarəetmə probleminin həlli üçün alqoritmlərin işlənilməsinə həsr edilmişdir.

**Reaktor temperaturu ATS-nin tətbiqi ilə sistemin istilik modelinin sərbəstlik dərəcəsinin azaldılması.**

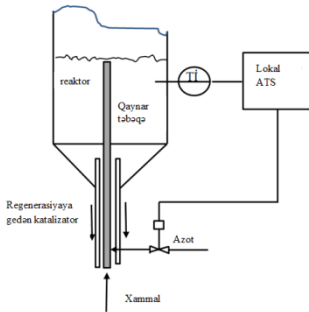
Bu məsələ (1),(2) sisteminə daxil edilməmiş xarici təsir vasitəsindən stabilləşdirici amil kimi istifadə edərək dinamik modelin ölçüsünün azaldılması insan-maşın idarəetmə sistemlərində idarəetmənin vizuallaşdırma probleminin həllinə yönəldilmişdir. Qeyri-xətti sistemlərin idarə olunmasında xüsusi önəmə malik olan sistem dinamikasının izlənməsi məhz üç ölçülü koordinat sistemində əyani təsəvvürlər əks etdirmə imkanına malikdir. Real vaxt rejimində idarəetmə proseslərinin vizuallaşdırılması üç ölçülü trayektoriyalar fəzasında önəmli informasiya mənbəyi kimi çox əhəmiyyətlidir.

RR blokunun koordinatlarından birinin yüksək dəqiqliklə stabilləşdirilməsi, başqa sözlə, üç ölçülü faza fəzasında dinamikanın izlənilməsi işəburaxma prosesinin idarə olunma praktikasına bilavasitə əhəmiyyətli şərait yarada bilər.

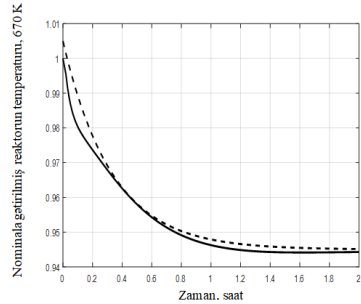
Qeyd edək ki, reaktor temperaturunun stabil saxlanması (1), (2) sisteminin aprior olaraq üç ölçülü sistemə çevirir. Burada məsələ onunla bağlıdır ki, baxılan modelə daxil edilməmiş xarici idarə təsiri mövcuddur və onun təsiri avtonomluq xassəsi daşıyaraq, diferensial

tənliyin heç bir xassəsini dəyişdirmir. Məhz bu texnoloji cəhət sistemin (həm real obyektin, həm də onun diferensial tənliyinin) ölçüsünün bir dərəcə azaldılmasına imkan yaratmış olur. Biz azotun nəqliyyat xəttinə daxil edilməsi üçün texnoloji xəttin mövcudluğuna diqqət çəkdik (şək.6a). Şək.6b-də azot xəttinə 5%-li təkanın verilməsindən sonra reaktor temperaturunun keçid prosesi göstərilmişdir.

Reaktor temperaturuna kifayət qədər böyük təsir vasitəsi kimi bu kanal digər vəziyyət dəyişənlərindən və idarə edici parametrlərdən təmamilə təcrid olunaraq, avtonom şəkildə temperaturu stabilləşdirmə imkanına malikdir.



a)



b)

Şək.6. Nəqliyyat xəttinə verilən azotun sərfi ilə həyata keçirilən reaktor temperaturu ATS-in prinsiplial sxemi və azot sərfi üzrə pilləvari təkana (1),(2) sisteminin reaksiyası (bütov xətt) və onun eksponensial aproksimasiyası (punktir xətt).

Azot sərfi ilə bağlı parametr texnoloji olaraq yalnız nəqliyyat xəttində tıxaclar yaranma ehtimalına qarşı yönəlmiş olduğundan riyazi modelə, sadəcə, daxil edilməmişdir. Digər tərəfdən azotun kimyəvi baxımdan tam passiv maddəni təşkil edərək, heç bir reaksiyada iştirakının olmadığı və ondan yalnız istilik balans parametiri kimi avtonom tənzimləmə sisteminin idarə təsiri olaraq istifadəni mümkün etmişdir.

**Həyacanlandırıcı təsir kimi "xammal verilmə sürəti - reaktor temperaturu" kanalına görə ötürmə funksiyasının qurulması.**

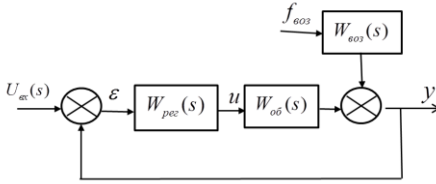
Bu kanalın ötürmə funksiyasının qurulması əvvəllər tədqiq edilmiş kanaldan əsaslı şəkildə fərqlənmir, lakin qeyri-xətti effekti nəzərə almalıyıqsa, nəzərə almalıyıq ki, pilləvari təkanın amplitudunun fərqli qiymətlərində ötürmə funksiyası müəyyən dərəcədə dəyişə də bilər. Bu baxımdan, obyektlərin model öyrənilməsinin xüsusiyyətlərindən irəli gələn bir cəhətə toxunmağı lazım bildik. Bu, praktikada tənzimlənən parametrlərin nominal qiymətinin 5 faizi kimi götürülən pillənin amplitudu ilə bağlı məsələdir. Xətti sistemlər nəzəriyyəsiindən bəllidir ki, qeyri xəttilik dərəcəi kifayət qədər aşağı olduqda keçid prosesinin forması sınaq pilləvari təsirin amplituduna qarşı dəyişməz qəbul edilir. Model tədqiqatının bu xüsusiyyəti ilə qarşılaşaraq belə nəticəyə gəlirik ki, sistemin baxılan halda qeyri-xəttilik dərəcəsinin öyrənilməsi baxımından sınaq pillənin amplitudunun bəzi hallarda 5-10 % civarında seçilərək işəburaxma əyrisinin qurulması effektiv addım kimi qəbul edilə bilər.

Şəkil 7-də tədqiq olunan kanalın işəburaxma əyrisinin eksponensial funksiya ilə (qırıq xətt) approksimasiyası göstərilmişdir ( $k_1 = 0.056$  və  $\tau_1 = 0.185$  saat).

Struktur sxemdə (şəkl.8) bizi maraqlandıran kanal « $f_{603} - y$ » kanalıdır.  $W_{603}(s)$  ötürmə funksiyasının heç bir dinamik maneə iştirakı olmadan cəmləyiciyə daxil olduğuna baxmayaraq, aydındır ki, həmin həyəcandırıcı təsirə görə də əks əlaqə mexanizmi öz təsirini göstərəcəkdir.

Şəkilə 7. reaktorun temperaturunun sabitləşdirilməsi üçün əks əlaqə yolunun struktur sxemi göstərilmişdir.





Şək.7. Reaktorun temperatur sabitləşdirmə sistemində əks əlaqə yolunun struktur sxemi.

Xüsusi girişlər sabitləşdirilmiş temperatur dəyəri və əks əlaqə fəaliyyət nöqtəsində tətbiq olunan pozğunluq üçün tapşırıqlara uyğundur. Bu kanalların hər ikisi üçün sistemin reaksiyalarını əks əlaqə ilə öyrənmək maraqlıdır.

Tənzimləyici qanunu seçərkən biz “sadədən mürəkkəbə” mülahizədən çıxış etdik. Bunlar, bu kontekstdə hər hansı bir fəsadın əlavə qarışıqlığa səbəb ola biləcəyini və nəticənin vizuallaşdırılmasının əsassız mürəkkəbliyinə səbəb ola biləcəyini güman edirdi.

Struktur diaqrama görə, Laplas çevrilməsinə əsaslanaraq yazırıq:

$$u(s) = \left( K + \frac{1}{T_u s} \right) \varepsilon(s) ; W_p(s) = \left( K + \frac{1}{T_u s} \right)$$

" $U_{\text{ex}} - y$ " kanal üzrə vahid təkannın ötrülməsinin tənliyini yazaq:

$$y(s) = \frac{w_p(s)w_{\omega\omega}(s)}{1 + w_p(s)w_{\omega\omega}(s)} U_{\text{ex}} ; G_z(s) = \frac{w_p(s)w_{\omega\omega}(s)}{1 + w_p(s)w_{\omega\omega}(s)} .$$

(3.4.2.1), (4.2.1.1) ifadələrindən istifadə edərək (4.2.1.2) əlaqəni konkret formaya gətiririk:

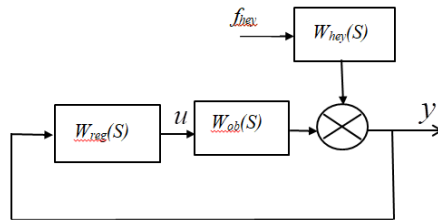
$$G(s) = \frac{W_{ob}(s) \cdot W_p(s)}{1 + W_{ob}(s) \cdot W_p(s)} ;$$

harda ki,

$$W_{ob}(s) \cdot W_p(s) = W_0(s) = \left( \frac{k}{T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1} \right) \left( K \cdot s + \frac{1}{T_u s} \right) =$$

$$= \frac{KkT_u s + k}{T^2 T_u s^3 + 2T\zeta T_u s^2 + T_u s}.$$

Dinamik sistemin sıfır ilkin şərtləri üçün ötürmə funksiyasının tərtib edilməli olduğunu nəzərə alaraq, çıxışa (reaktorun temperaturu) həyə siqnalının ötürülməsinin blok-sxemini tərtib edək. Bu o deməkdir ki, “reaktorun temperatur istinadı” siqnalı sıfıra bərabər götürülməlidir, yəni. . Sonra pozğunluq siqnalının çıxışa ötürülməsinin blok diaqramı aşağıdakı formanı alacaqdır:



Şək.8. Həyacanlandırıcı təsirin çıxışa ötürülməsinin struktur sxemi.

Bundan əlavə, superpozisiya prinsipinə əsaslanaraq, yəni. Hər bir təsirin digərlərindən asılı olmayaraq öz kanalından keçməsinə əsaslanaraq, “xammal sərfi - reaktor temperaturu” kanalı boyunca qapalı sistemin ötürmə funksiyasını yazacağıq. Şəkil 8-dəki blok diaqrama istinad edərək aşağıdakı əlaqəni qururuq:

$$G_f(s) = \frac{W_{soz}(s)}{1 + W_{ob}(s) \cdot W_p(s)}; \text{ rde}$$

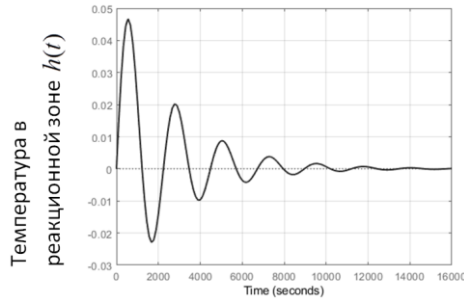
$$W_{soz}(s) = \frac{k_1}{T_1^2 s^2 + 2T_1 \zeta_1 s + 1};$$

$$W_{ob}(s) \cdot W_p(s) = W_0(s) = \frac{KkT_u s + k}{T^2 T_u s^3 + 2T\zeta T_u s^2 + T_u s}$$

Aşağıda istifadə olunan tənliklərin əmsallarının qiymətləri verilmişdir:  $k=0.23$ ;  $k_1=0.14$ ;  $T=100$  c;  $psi=1.2$ ;  $T_u=70$  c;  $K=0.55$ ;

$T_1=120$  c;  $psi_1=1.33$ .

İşdə daha sonra ötürmə funksiyaları ilə verilmiş xətti sistemlərin tədqiqi üçün “qütblər və sıfırlar” prinsipinə əsaslanmış standart Matlab prosedurlar vasitələri ilə qapalı sistemin keçid proseslərinin xarakteri müəyyənləşdirilir (şək.9).



Şək.9. Qapalı sistemin xammalın sərfinə reaksiyası

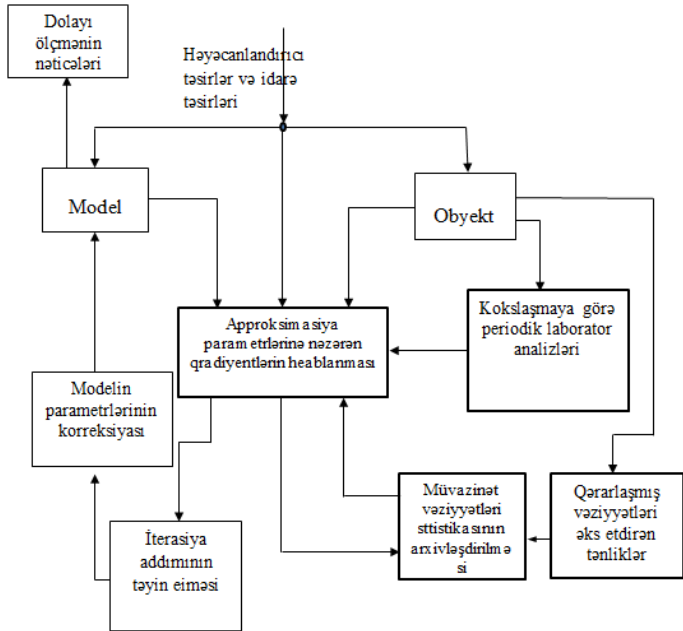
### **(1),(2) modeli əsasında katalizatorun koklaşma dərəcəsinin dolayı qiymətləndirilməsi.**

Katalizatorun koklaşma dərəcəsinin bilavasitə (fiziki olaraq, ölçü cihazı ilə) ölçülməsi problemi aparatlarda yüksək temperatur, koklaşma mühitinin olması və ölçü cihazları detallarının abraziv aşınması səbəbindən ciddi çətinliklərlə üzləşir.

Katalizatorun koklaşma dərəcəsinin fiziki ölçülməsinə olan ehtiyac özünü bu qədər kəskin büruzə verdiyinə baxmayaraq hazırkı dövrdə hələ də bu mühüm kəmiyyətin dolayı qiymətləndirilməsinə müraciət zərurəti qalmaqdadır. Hərçənd, bəzi ədəbiyyat nümunələrində regeneratordan çıxan tüstü qazları tərkibində karbon və dəm qazları konsentrasiyaları əsasında dolayı olaraq qiymətləndirmə məsələsi qarşıya qoyulur, lakin qeyd olunan tərkiblərin məhz koksün yanması ilə bilavasitə korelyasiyada olması

heç bir obyektiv faktlarla təsdiq olunmamışdır. Başqa sözlə, yanmada adsorbsiya olunmuş bütün digər karbohidrogenlərin də iştirak etməsi bir fakt kimi praktiki olaraq ölçmə-qiyətləndirmə metodu kimi bu təklifinin səmərəli olacağı ehtimalını sıfıra endirir.

Şəkil 10-da davamlı adaptiv tənzimləmə tələb edən katalizatorun koklaşma dərəcəsinin dolayı ölçülməsi üçün sistemin strukturu göstərilir.



Şək.10. Davamlı surətdə adaptiv köklənmə tələb edən dolayı qiymətləndirmə sisteminin blok sxemi.

Göstərilən sistemin fəaliyyəti diferensial tənlik sisteminin həlli ilə real obyektin ölçülən fəza trayektoriyaları arasında sinxronlaşdırma həyata keçirmə prinsipinə əsaslanır. Sinxronizasiya obyektin ölçülən koordinatları, yəni aparatlarda temperaturlar və onların dəyişmə sürətləri üzrə həyata keçirilir.

Dolayı ölçmə sisteminin mühüm bloku davamlı korreksiya edici identifikasiyadır ki, həmin funksiya “aproksimasiya parametrinə nəzərən qradiyentin formalaşdırılması” adlanır. Bu blokda həm sistemin giriş parametrləri, həm də ölçülən faza koordinatları və törəmələri toplanır.

### **Proqramlaşdırılan məntiq kontrollerlərindən istifadə etməklə vəziyyət dəyişənlərinə lokal nəzarət sistemlərinin işlənməsi**

Bu bölmədə diqqət mərkəzi (1), (2) sisteminin vəziyyət koordinatlarının bir-biri ilə qarşıqıqlı əlaqədə olduğuna köçürülür. Bu baxımından avtonom idarə (stabilizasiya) olunma probleminə bir koordinatın stabilliyinin təminatı ilə digərlərinə interval məhdudluğu qoyulma məsələsi alternativ kimi irəli sürülür..

Faza koordinatlarına təsir kanallarının qismən məhdud olmasının mənfi təzahürü özünü məhz bu məsələnin həllində büruzə verir. Ümumi götürüldükdə, məlum olduğu kimi, bu məsələnin kompleks həlli yalnız bütün faza koordinatlarının fiziki ölçülən olması daxilində xəttləşdirilmiş model əsasında çoxəlaqəli tənzimlənmə sistemləri sinfində həll oluna bilər. Nəzəri baxımdan bu məsələnin həllini xeyli dərəcədə mürəkkəbləşdirən cəhət təsir kanallarının sayının yetərincə olması tələbidir ki, bu kriteri avtonomluq şərti kimi elmi ədəbiyyatda özünü təsbit etmişdir.

Bu şəraitdə stabilizasiya məsələsini bir koordinat üçün qarşıya qoyaraq, məsələni, dolayı qiymətləndirilən koordinat üzrə əks əlaqə dövrəsi yaratmaqla digər koordinatlara intervaldan uzaqlaşma xəbərdarlığı formasında nəzarət sistemi tətbiq etmək yolundan istifadə oluna da bilər.

Qeyd edək ki, bu və ya digər faza koordinatlarına avtomatik nəzarətin təşkili proqramlaşdırılan məntiqi kontrollerlərin istifadəsi ilə çox effektiv surətlə öz həllini tapa bilər.

### **SMATİK seriyalı proqramlaşdırılan məntiqi kontrollerlər əsasında katalizatorun regenerasiya dərəcəsinin stabilləşdirmə sistemi**

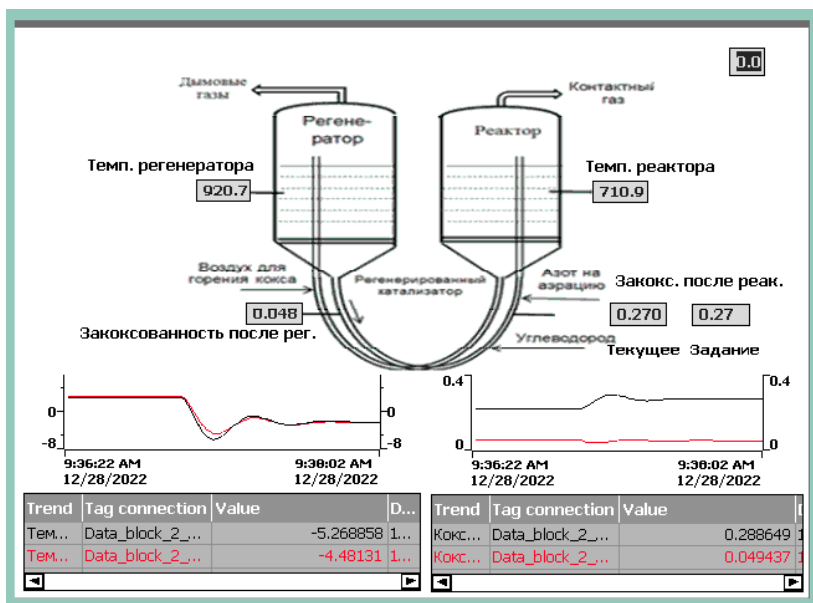
Kokslaşma dərəcəsinin operativ dolayı qiymətləndirmə məsələsinin uğurlu həlli RR blokunun bir sıra rejim parametrlərinin əks əlaqə dövrəsi yaratmaqla avtomatik stabilləşdirilməsinə real imkanlar açır.

Bu parametrlər kimi bütün faza dəyişənləri, o cümlədən - reaktorda temperatur, regeneratorda temperatur, reaktorun çıxışında katalizatorun kokslaşma dərəcəsi və regenerasiyadan sonra katalizatorada qalıq koksun miqdarı göstərilə bilər.

Qeyd olunan parametrlərin hamısı katalizatorun dövretmə sürətindən güclü asılıqda olduğu üçün axırıncını eyni zamanda yalnız bir parametrin tənzimlənməsində əks əlaqə konturu kimi istifadə etmək mümkün ola bilər. Məsələn, reaktorda temperatur katalizatorun dövretmə sürəti hesabına tənzimlənəcəksə, bu zaman həm aparatların çıxışında kokslaşmaya, həm də regenerasiya temperaturuna interval məhdudiyyəti qoyulmalıdır, yəni “reqlamenti aşma siqnalizasiyası” yaradılmalıdır.

Dissertasiya işində tərkibində 5 müstəqil Network komponent olan LAD proqramlaşdırma dilində yazılmış proqram-funksiyalar verilmişdir ki, onun fəaliyyətinin əsasını “Screen” vizuallaşdırma mühitində tərtib olunmuş proqram təşkil edir. Belə sistemin ekran təsvir formatı şəkl.11-də göstərilmişdir.

Həmin tənzimləmə sistemlərinin koklənməsi və sistemin dayanıqlıq məsələlərinin həllinə gəldikdə isə qeyd edək ki, həm Matlab sisteminin “Simulink” əlavəsində, həm də Siemens şirkətinin



Şək.11. Real zaman miqyasında ölçmə və rəqəmsal nəzarət funksiyalarını yerinə yetirmək üçün istifadə olunan vizuallaşdırma prosesini həyata keçirən modulun Экран (Screen) bloku.

proqramlaşdırma mühiti Simatic sistemində müvafiq modullar mövcuddur ki, onların istifadəsi ilə məsələnin prinsiplial həllinə nail olmaq mümkündür.

Onu da qeyd edək ki, adları çəkilən proqramlaşdırma mühitlərində yalnız bir konturlu ATS-lərin simulyasiyası və sintezi üçün standart bloklar nəzərdə tutulmuşdur. Məsələn, kaskad tənzimləmə standart prosedur kimi layihələndirilə bilmir. Bununla əlaqədar qeyd edək ki, bu sahədə müsbət təcrübə mövcuddur. Belə ki, bu məsələ Sumqayıt Dövlət Universitetinin bir qrup mütəxəssisləri<sup>4</sup> tərəfindən işlənmiş proqram məhsulundan istifadə edilməsi problemin tam həllinə nail olmağa imkan verə bilər.

<sup>4</sup>Алекперли Ф.А., Аскерова С.Ф., Симуляция системы управления технологическими процессами и адаптация ее программного обеспечения к промышленным условиям//ВКИТ, №9 (171), 2018, 39-48.

## DİSSERTASIYA İŞİNİN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ

1. Ədəbiyyat təhlili göstərmişdir ki, faza dəyişənlərinin geniş diapazonunda KD proseslərinə nəzarət etmək üçün riyazi modelləşdirmə problemi hələ də işlənməmişdir.
2. Texnoloji prosesin istilik rejimlərinin idarə olunmasında müstəsna əhəmiyyəti olan, lakin fiziki ölçülə bilməyən katalizatorun kokslaşma dərəcəsinin dolayı olaraq model qiymətləndirmə məsələsi qarşıya qoyulmuş, əsaslandırılmış və metodik baxımdan işlənmişdir.
3. Tədqiqatlar göstərmişdir ki, qoyulmuş ölçmə və idarəetmə probleminin həlli RR aparatlar blokunun birgə dinamika modelinin səmərəliliyindən bilavasitə asılıdır ki, bu məsələ reaktorda koks əmələ gəlmə endotermik, regeneratorda isə yanma ekzotermik reaksiyalarının kinetikasını əks etdirən diferensial tənliklər əsasında əldə oluna bilər.
4. Sistemdə təcili qızdırılma ehtiyacının meydana çıxdığı bütün hallarda regeneratorda əlavə qaz yanacağına verilməsi ilə xüsusi rejim yaranır. Bu situasiyada riyazi model struktur dəyişikliyinə məruz qaldığı üçün situasiyaya görə idarəetmə məsələsinin həll olunması zərurəti yaranır.
5. Katalizatorun strukturunun məsaməli olması daxili mikroskopik kanallar vasitəsilə oksigen kütləsinin ötürülməsi proseslərinin nəzərə alınmasını zəruri edir. Təklif olunan modeldə katalizator strukturunun fraktal təsvirindən istifadə olunması öz səmərəsini vermişdir.
6. Karbohidrogen dehidrogenləşdirmə dinamika modelinin parametrik identifikasiyası üçün spesifik yanaşma ondan ibarətdir ki, burada parametrik identifikasiya həm qurğunun tarazlıq iş rejimlərinin məlumatlarına əsasən, həm də aktiv təsirlər əsasında yaradılan keçid proseslərindən istifadə əsasında həll edilir.
7. İdarəetmə prosesinin vizuallaşdırılması məqsədi ilə əlaqədar olaraq riyazi modelin tərtibinin üçə endirilməsi, yəni vizual baxımdan əyani fəza təsvirinin əldə edilməsi və trayektoriya



məvhumundan istifadə üçün reaktor istilik tənzimləyicisinin sistemdən çıxarılmasını təmin edən avtomatik stabilizasiya sisteminin tətbiqi təklif olunur.

8. Eyni başlanğıc vəziyyətə gətirilmiş “obyekt-model” cütlüyünün real zaman üzrə sinxronizminin təmin olunma şərtlərinin nəzərə alınması ilə dinamika modeli əsasında dolayı ölçmə sisteminin prinsipli sxemi işlənmişdir.
9. Vəhdət təşkil edən RR qeyri-xətti dinamika modeli əsasında komputer hesablama eksperimentlərindən istifadə edilərək yüksək dəqiqliyi təmin edən lokal tənzim sistemləri layihələndirmə imkanı əldə edilmiş olur. Tədqiqatda bu sistemlərin TİA (Totally Integrated Automation) mühit modullarından istifadə edilməsi ilə bir sıra nümunələri real vaxt rejimində tərtib olunur.

## **DİSSERTASIYA İŞİNİN MÖVZUSUNA DAİR DƏRC OLUNMUŞ ELMİ ƏSƏRLƏRİN SİYAHISI**

1. Гулиева Н.А. Снижение степени свободы четырехмерной модели системы реактор-регенератор для визуализации управления процессом дегидрирования углеводородов.// - Baki: Azərbaycan Ali Texniki Məktəblərinin Xəbərləri, - 2022, c.17. №6, -s.156-164.
2. Нагиев, А.Г., Амрахова, Н.А. Моделирование нестационарных тепловых режимов реакторного блока установки кк для пуска и управления в критических ситуациях// «азерб.хим.журнал». -2000,№4. -с.40-45.
3. Нагиев, А.Г., Мамедов, Дж. И., Гулиева, Н.А. Моделирование нестационарных процессов переноса вещества и адсорбции в пористой среде на основе фрактала «Дендрит»// Химия и химическая технология.- Иваново:- 2014. т:57, №8. -с.80-84.
4. Нагиев, А.Г., Нагиев, Г.А., Гулиева, Н.А. О структуре пространства состояний тепловой модели реакционно-

- регенерационных систем с кипящим слоем катализатора и принципах визуализации управления// Теор. Основы хим. Технол. РАН. -2019. -т:53, №1.- с.31-45.
5. Нагиев, Г.А., Гулиева, Н. А. Косвенная оценка переменных состояния реакционно-регенерационных систем на основе компьютерной симуляции// Измерительная техника. - 2021, № 8.-с.41-49.
  6. Алиев, А.М., Нагиев, Г.А, Гулиева, Н.А. Об эволюции функций распределения концентрационных и температурных полей в моделях химических реакторов вытеснения и проблема описания траекторий// сум. гос. университет.научные известия. -2015.т:15, №1, - с.50-54
  7. Нагиев, Г.А., Садыгов В.В., Гулиева Н.А. Жесткие системы дифференциальных уравнений и пути совершенствования алгоритмов численного решения// Сум. гос. университет. Научные известия.-2016, т:16, №2, - с.61-65
  8. Гулиева, Н.А. Математическое моделирование для управления тепловыми режимами реакционно-регенерационной системы, осуществляющей дегидрирование изобутана// Сум. гос. университет.научные известия.- 2018, т:18, №2, - с.66-70
  9. Нагиев, Г.А., Садыгов, В.В., Гулиева, Н.А. Алгоритмизация численного анализа динамичных систем с дифференциально-алгебраическими связями.// интеллектуальные технологии в машиностроении. междунвродная научно-техническая конференция. – Баку: - 2016, -с.48-50.
  10. Нагиев, Г.А., Гулиева, Н.А. Моделирование каталитических процессов дегидрирования с учетом меняющейся валентности хрома// Международная научная конференция, информационные системы и технологии: достижения и перспективы.- Сумгаит: - 2018,- с.155-157

11. Гулиева, Н.А. Оперативный контроль степени закоксованности катализатора в реакционно-регенерационных системах по измерениям их температурных координат// прикладные вопросы математики и новые информационные технологии, IV Республиканская научная конференция . -Сумгаит:-2021, - с.237-239
12. Гулиева, Н.А. О фрактальном представлении структуры высокопористых твердых катализаторов для математического моделирования адсорбционных процессов// Doktorantların və gənc tədqiqatçıların xix respublika elmi konfransinin materialları.- Bakı:-2015, - с.169-170
13. Нагиев, Г.А., Гулиева, Н.А. Об аппроксимации решений моделей реакторов вытеснения для описания их нестационарных режимов функционирования// Akademik Toğrul Şaxtaxtinskiyin 90 illik yubileyinə həsr olunmuş respublika elmi konfransı-Bakı: - 2015, - с.84.
14. Нагиев, Г.А., Садыхов, В.В., Гулиева, Н.А. Дендритовая модель пористого зерна адсорбента как пространственно-геометрический объект со свойством фрактальности//III Respublika elmi konfrans. Riyaziyyatın tətbiqi məsələləri və yeni informasiya texnologiyaları.- Sumqayıt: - 2016, - с.149
15. Гулиева, Н.А. О численном решении модельных уравнений механических систем с вариаторами// Doktorantların və gənc tədqiqatçıların xxi respublika elmi konfransı.- Bakı:-2017, с. 42
16. Нагиев, Г.А., Гулиева, Н.А. Двухфазная модель структуры кипящего слоя катализатора для моделирования процессов дегидрирования углеводородов// Международная научно-техническая конференция, посвященная дню химика и 40-летию кафедры химико-технологических процессов филиала уфимского государственного нефтяного технического университета г. Салават- Уфа:- 2017, -с.189-190

17. Нагиев, Г.А., Гулиева, Н.А. Об одном подходе к снижению размерности динамической системы для визуализации управления на примере процесса дегидрирования углеводородов//Informasiya sistemləri və texnologiyalar nailiyyətlər və perspektivlər. II beynəlxalq elmi konfransi. –Sumqayıt: -2020, с. 40-42

**Həmmüəlliflərlə birgə işlərdə iddiaçının şəxsi fəaliyyəti:**

- [2,3] - Katalizator məsələli strukturunun dendrit fraktalı əsasında parametrik identifikasiyası və modelə tətbiqi;
- [4] - Qaynar təbəqəli reaksiya-regenerasiya sistemlərinin dinamika modelinin parametrik identifikasiyası və kompüter həlli;
- [5] - Dolayı ölçmədə riyazi modelləşdirmə və ölçü dəqiqliyinin hesablanması;
- [6] - Katalizator nəqliyyat xətlərində porşenli axın modelinin hidrodinamik parametrlərinin qiymətləndirilməsi;
- [7] - Kimyəvi prosesin kinetik tənliyində sürət əmsallarının təyini;
- [9] - Diferensial-cəbri əlaqəli sistemin ədədi həlli üçün iterasiya addımlarının dinamik qiymətləndirilməsi proqram modulunun işlənməsi;
- [10,14] - Dehidrogenləşdirmə prosesində reaksiya sürət əmsallarının temperaturdan asılılığını müəyyən edən kinetik əmsalların təyini;
- [13] - İdeal sıxışdırma modelinin kimyəvi kinetika parametrlərinin qiymətləndirilməsi;
- [16] - Qaynar təbəqə modelində fazalar arası maddə mübadilə əmsallarının qiymətləndirilməsi;
- [17] - Karbohidrogenlərin dehidrogenləşdirmə prosesində reaktor temperaturunun avtomatik tənzim sisteminin sintezi.