

УДК 536.46

**ПОВЕДЕНИЕ ПРОТОЧНОГО РЕАКТОРА ИДЕАЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ
ВБЛИЗИ ОСОБЫХ ТОЧЕК И ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ****Опятьюк В. В.**

Одесский национальный политехнический университет
Институт энергетики и компьютерно-интегрированных систем
65044, Одесса, Украина, пр. Шевченко, 1

Аннотация

В статье обсуждается вопрос каскадного механизма горения при микровзрывах капли водотопливной эмульсий (ВТЭ), с существенно различными температурами кипения компонентов. Данные исследования были проведены с целью проверки гипотезы о возможной организации развитой системы множественных микрофакелов с наличием мультиплетного расщепления, названного автором каскадным механизмом микровзрывов капли эмульсии. Материалы статьи содержат детальное описание методики проведения экспериментов и впервые приведены подобные экспериментальные данные. Результаты выполненных исследований могут использоваться при инженерно-технических расчетах на практике для создания горелок, использующих форкамерные технологии, и применяемых для сжигания эмульсий, созданных на основе жидких тяжелых углеводородов. Такие альтернативные топлива (эмульсии из отработанных машинных и пищевых масел) могут заменить штатные топлива (мазут, дизельное топливо, уголь, природный газ), что позволит получать существенный экономический и экологический эффекты.

Ключевые слова: реактор, горение, микрофакелы, микровзрывы, кипение, топливо

Введение

Для проведения химических реакций химическая промышленность активно использует химические реактора. Целью этих реакций может быть получение необходимых конечных продуктов или производство тепла [1]. Необдуманное проведение реакции может привести к спаду производительности и даже к тепловому взрыву или прекращению реакции вместо увеличения производительности. Поэтому существует интерес к проблеме контроля, регулирования и оптимизации химических реакторов. С одной стороны, это необходимо для увеличения производительности реактора, а с другой – для повышения тепловой мощности без снижения надежности, соблюдения экологических норм. Чтобы определить наиболее подходящий способ управления реактором, необходимо знание особенностей его динамического поведения.

Адекватный способ управления выбирается в зависимости от типа устойчивости реактора [2]. Например, в случае фокуса требуется мягкое управление, с незначительными по величине и непродолжительными по времени изменениями параметров системы.

В данной статье рассматривается неизотермический проточный реактор идеального смешения, в котором происходит гомогенное реагирование.

Рассматриваемый реактор представляют собой нелинейную систему. Аналитическое исследование нелинейных систем представляет собой сложную математическую задачу. Поэтому для решения этой задачи применялось компьютерное моделирование нелинейных систем с использованием численных методов.

Целью данной работы является анализ динамического поведения проточного реактора с целью нахождения наиболее эффективных режимов работы.

Анализ динамического поведения проточного реактора

В данной статье рассматривается неизотермический проточный реактор идеального смешения, в котором происходит гомогенное реагирование. Для такого реактора изменение концентрации и температуры со временем описывается системой уравнений [3]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{u}{V} (C_f - C) - ze^{-\frac{E}{RT}} C, \quad (1)$$

$$c_p \rho \frac{dT}{dt} = \frac{u}{V} c_p \rho (T_f - T) - \alpha \frac{S}{V} (T - T_c) + Q z e^{-\frac{E}{RT}} C, \quad (2)$$

где $z e^{-\frac{E}{RT}} C$ – скорость реакции;

$Q z e^{-\frac{E}{RT}} C$ – скорость генерации тепла.

$\frac{u}{V} c_p \rho (T_f - T) - \alpha \frac{S}{V} (T - T_c)$ – функция теплообмена с поступающей смесью и стенками реактора.

$\frac{u}{V} (C_f - C)$ – скорость изменения концентрации смеси реагентов.

Здесь C – концентрация вещества в реакторе,

C_f – концентрация вещества на входе в реактор,

T – температура смеси в реакторе,

T_f – температура входящей смеси,

T_c – температура стенки реактора,

u – объемный расход вещества на входе в реактор,

V – объем реактора,

z – предэкспоненциальный множитель,

E – энергия активации,

R – универсальная газовая постоянная,

c_p – удельная теплоемкость смеси при постоянном давлении,

ρ – плотность смеси,

α – коэффициент теплоотдачи к стенкам реактора,

S – площадь стенок реактора,

Q – тепловой эффект реакции.

Для нахождения связи между моделями разных реакторов, целесообразнее проводить анализ динамики поведения реактора по безразмерной модели. Для этого перепишем уравнения (1) и (2) в безразмерном виде[4,5]:

$$\frac{dx}{d\tau} = (x_f - x)\delta - x e^{-\frac{\alpha}{y} + \beta}, \quad (3)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = y_p - y + x e^{-\frac{\alpha}{y} + \beta}, \quad (4)$$

где $x = \frac{C}{C_f}$ – безразмерная концентрация вещества в реакторе,

$y = \frac{T}{T_m}$ – безразмерная температура смеси,

$\tau = \frac{t}{\bar{\tau}}$ – безразмерное время,

$x_f = \frac{C_f}{C_f} = 1$ – безразмерная концентрация входного потока предварительно смешанного топлива,

$y_f = \frac{T_f}{T_m}$ – безразмерная температура входящей смеси,

$\beta = \ln z \bar{\tau}$ – максимальная активность реакции,

$y_p = \frac{y_f \tau_y + y_{\infty} \tau_x}{\tau_x + \tau_y}$ – безразмерная приведенная температура, учитывающая температуры входного потока и стенок реактора,

$\tau_x = \frac{V}{u}$ – характерное время пребывания смеси в реакторе,

$\tau_y = \frac{r^2 c_p \rho}{6\lambda}$ – характерное время теплоотвода для цилиндрического реактора (в общем случае $\tau_y = \frac{c_p \rho V}{\alpha S}$),

$\bar{\tau} = \frac{\tau_x \tau_y}{\tau_x + \tau_y}$ – приведенное время,

$\delta = \frac{\bar{\tau}}{\tau_x}$ – приведенная скорость теплового потока,

$\alpha = \frac{E}{RT_m}$ – безразмерная энергия активации,

$T_m = \frac{Q C_f}{c_p \rho}$ – адиабатическая температура,

r – радиус реактора,

λ – коэффициент теплопроводности.

Для системы (3), (4), получим:

$$\Phi(x, y) = (x_f - x)\delta - x e^{-\frac{\alpha}{y} + \beta},$$

$$\Psi(x, y) = y_p - y + x e^{-\frac{\alpha}{y} + \beta}.$$

Для нахождения стационарных точек необходимо найти точки фазовой плоскости концентрация-температура.

Для этого из уравнения (3) при $\frac{dx}{d\tau} = 0$ выражаем x :

$$x = \frac{x_f}{1 + \frac{\alpha}{\delta y} - \beta} \quad (5)$$

и подставляем в (4) при $\frac{dy}{d\tau} = 0$. Тогда уравнение, позволяющее определить стационарные значения безразмерной температуры y_0

$$\frac{x_f}{1 + \frac{\alpha}{\delta y} - \beta} = y - y_p. \quad (6)$$

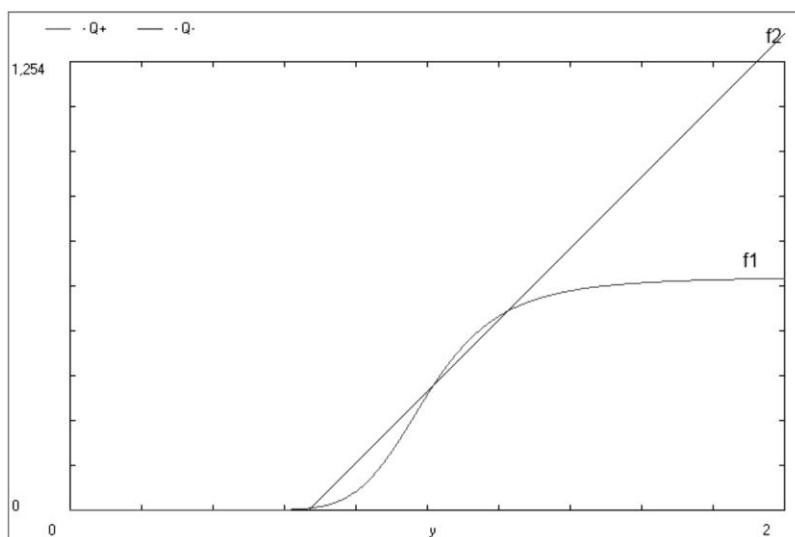


Рис. 1 – Графическое решения уравнения (6)

Кривой f1 обозначена функция $f1 = \frac{x_f}{\frac{1}{\delta} + e^{\frac{\alpha}{y} + \beta}}$, характеризующая скорость подвода тепла, а кривой f2 функция $f2 = y - y_p$, которая характеризует скорость теплоотвода

Анализируя этот график, можно сделать вывод, что максимальное количество особых точек в фазовом пространстве температура – концентрация равно трем [4]. Минимум же будет одна стационарная точка.

Поиск корней уравнения (6) при заданных параметрах системы осуществлялся численными методами.

Были определены следующие стационарные состояния:

$$1. x_0 = 0,911, y_0 = 0,674. \\ C_0 = 11,43 \frac{\text{моль}}{\text{м}^3}, T_0 = 1148,9 \text{ K}.$$

$$2. x_0 = 0,468, y_0 = 1,016. \\ C_0 = 5,4 \frac{\text{моль}}{\text{м}^3}, T_0 = 1730,5 \text{ K}.$$

$$3. x_0 = 0,147, y_0 = 1,225. \\ C_0 = 1,7 \frac{\text{моль}}{\text{м}^3}, T_0 = 2087,7 \text{ K}.$$

Опишем динамическое поведение реактора в окрестности стационарных точек.

Для этого:

Определим производные $\Phi(x, y)$ и $\Psi(x, y)$ как:

$$\Phi_x = -\delta - e^{-\frac{\alpha}{y} + \beta},$$

$$\Phi_y = -x \frac{\alpha}{y^2} e^{-\frac{\alpha}{y} + \beta},$$

$$\Psi_x = e^{-\frac{\alpha}{y} + \beta},$$

$$\Psi_y = -1 + x \frac{\alpha}{y^2} e^{-\frac{\alpha}{y} + \beta}$$

Теперь можем получить зависимости температуры и концентрации от времени в окрестности стационарных точек рис.2.

Со временем устанавливается стационарная температура. Аналогично ведет себя и концентрация реагентов.

Траектории в фазовом пространстве (X, Y), соответствующие узлу, представляют собой параболы, которые в случае устойчивого узла сходятся в точку рис. 3. То есть, это состояние устойчиво.

Траектории в фазовом пространстве (X, Y) в окрестности седла представляют собой гиперболы. Это неустойчивая стационарная точка.

При малейшем возмущении система переходит в другое состояние. Если температура оказалась больше стационарной, то система перейдет в состояние с меньшей температурой.

Если температура оказалась больше стационарной, то система перейдет в состояние с большей температурой.

Происходят периодические затухающие колебания температуры с некоторой частотой рис.4. Аналогично ведет себя и концентрация.

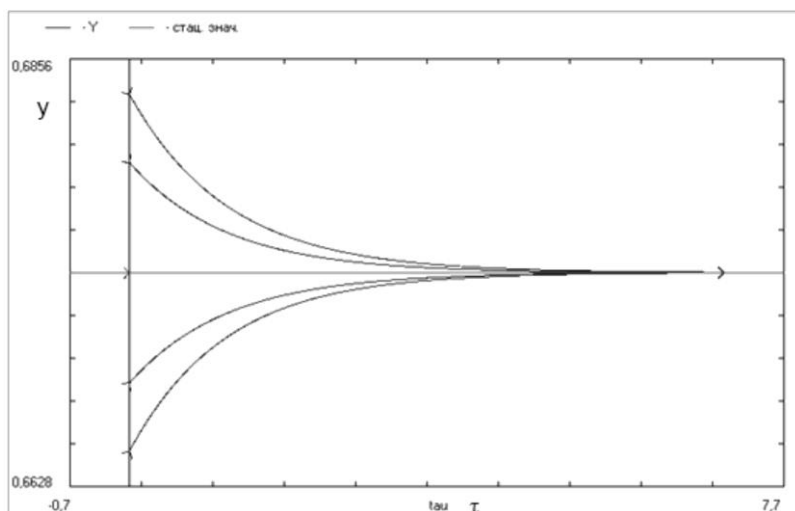


Рис. 2 – Временная зависимость безразмерной температуры от безразмерного времени

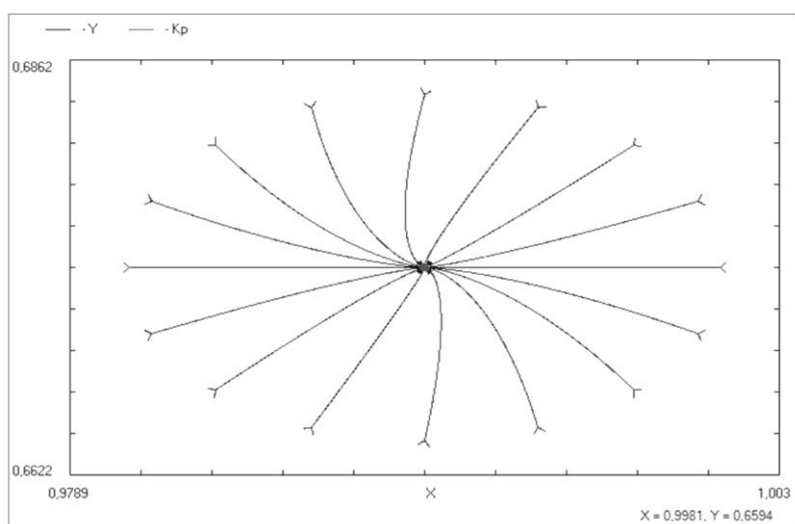


Рис. 3 – Фазовый портрет (X, Y) в окрестности стационарной точки устойчивый узел

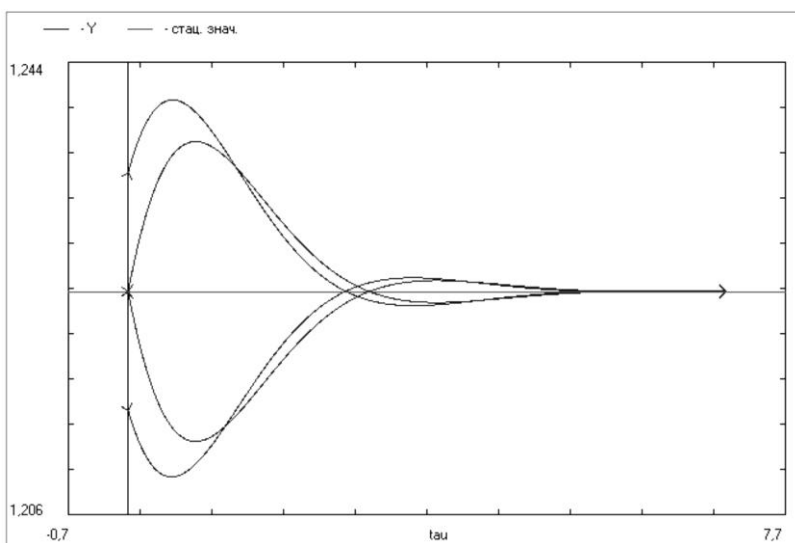


Рис. 4 – Временная зависимость температуры

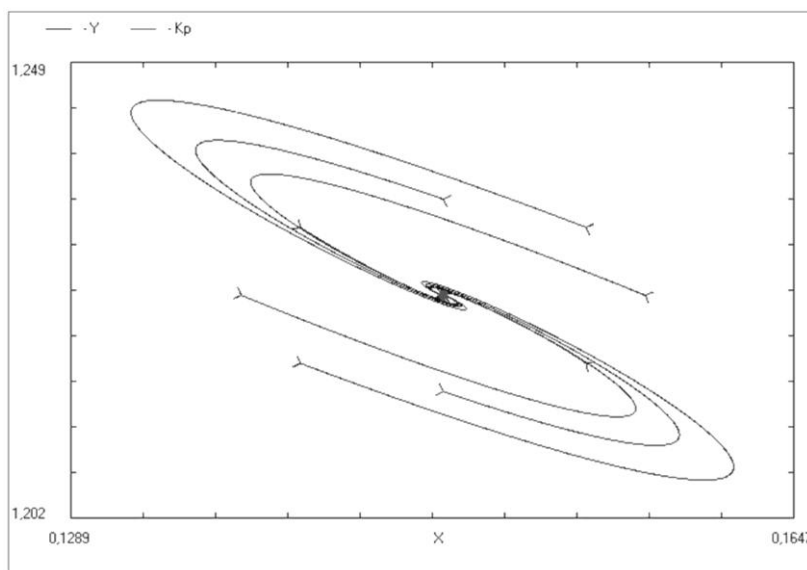


Рис. 5 – Фазовый портрет (X, Y) в окрестности стационарной точки устойчивый фокус

Траектории в фазовом пространстве (X, Y) представляют собой логарифмические спирали рис. 5, которые в случае устойчивого фокуса сходятся в точку. То есть это устойчивое состояние. При возникновении какого-либо

возмущения система возвратится в стационарное состояние.

Общий фазовый портрет (T, C) в окрестности трех стационарных точек будет иметь следующий вид, изображенный на рис.6.

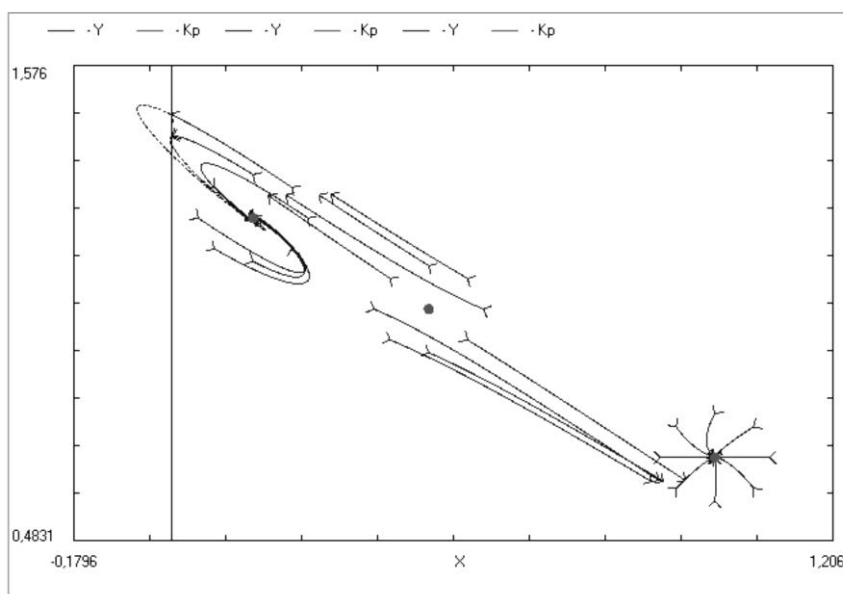


Рис. 6 – Фазовый портрет (X, Y) в окрестности трех стационарных точек

Где слева направо: устойчивый фокус, седло, устойчивый узел. Из данной диаграммы можно сделать вывод о наибольшей скорости движения по фазовой траектории в окрестности седла, меньшей в окрестности устойчивого фокуса и наименьшей в окрестности устойчивого узла.

Изобразим векторное поле температур, воспользовавшись выражением, полученным делением (4) на (3):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_p - y + x e^{-\frac{\alpha}{y} + \beta}}{(x_f - x)\delta - x e^{-\frac{\alpha}{y} + \beta}},$$

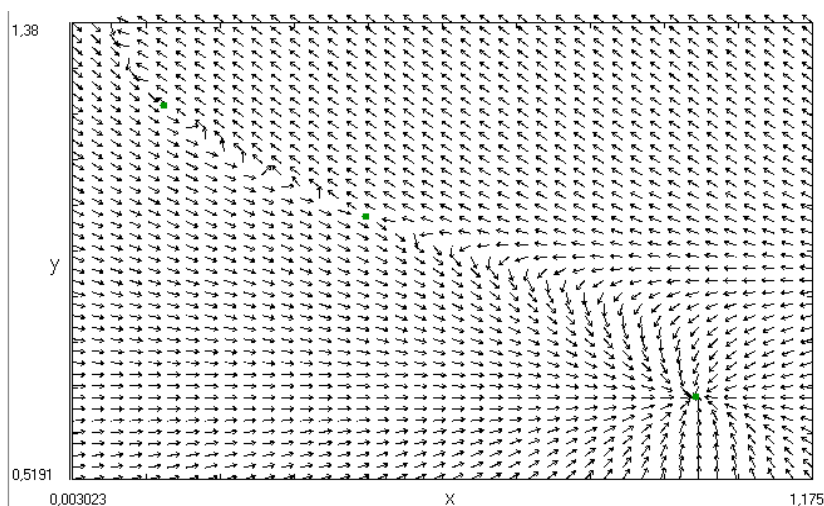


Рис. 7 – Векторное поле температур в широкой области фазового пространства.
Слева направо: устойчивый фокус, седло, устойчивый узел

Из анализа данного портрета можно сделать вывод, что седло захватывает самую значительную область фазового пространства, устойчивый узел меньшую, а устойчивый фокус – наименьшую. Данный метод позволяет также определять предельные циклы. Преимущество данного метода в том, что она позволяет исследовать поведение системы в любой области.

Получена область существования устойчивого фокуса для диапазона скоростей входного потока $u = (0; 0,001948) \frac{м^3}{с}$.

Устойчивый узел существует при:

$$u = (0,000001; 0,000009) \frac{м^3}{с},$$

$$u = (0,000388; 0,000389) \frac{м^3}{с},$$

$$u = (0,000633; \infty) \frac{м^3}{с}.$$

Седло существует при

$$u = (0,000388; 0,001948) \frac{м^3}{с}.$$

Производительность реактора

Полезной тепловой мощностью будем считать $W_Q = \alpha \frac{S}{V} (T - T_c)$ – тепловая мощность, снимаемая со стенок реактора. А тепловая производительность химического реактора равна $Qze^{-\frac{E}{RT}C}$ – тепловая мощность, выделяемая химической реакцией. Под тепловой эффективностью будем понимать отношение тепловой мощности, снимаемой со стенок реактора к общей производимой тепловой мощности:

$$K = \frac{\alpha \frac{S}{V} (T - T_c)}{Qze^{-\frac{E}{RT}C}}$$

Количество реагента, прореагировавшего в реакторе равно $W_C = ze^{-\frac{E}{RT}CV}$, а его доля по отношению к входящему потоку равна $K_C = 1 - x = 1 - \frac{C}{C_f}$.

Выводы

В результате проделанной работы установлено что:

➤ Устойчивость состояния равновесия определяется тремя критериями. Состояния равновесия являются или седлом, которое неустойчиво, либо узлом, либо фокусом. В обоих случаях, т. е. для всех «неседел» условие неустойчивости определяется знаком величины $\Phi_x + \Psi_y$: «неседло» неустойчиво при условии $\Phi_x + \Psi_y > 0$.

➤ Если число уравнений (и искомых функций) в системе более двух, то вместо фазовой плоскости приходится иметь дело с фазовым пространством большего числа измерений и характеристическим уравнением степени выше второй. Свойства особых точек при этом сильно усложняются.

➤ Возможно существование одного, двух или трех стационарных состояний.

➤ Были найдены все три стационарные точки. Но одна из них (седло) оказалась неустойчивой, другая не обеспечивала самоподдержание реакции (устойчивый узел).

➤ Несмотря на низкую концентрацию реагентов в окрестности устойчивого фокуса, именно в этом режиме наблюдается большая тепловая мощность и большой выход продуктов.

➤ Найдено, что седло «захватывает» наибольшую область фазового пространства (Т, С).

➤ Устойчивый фокус реализуется при низких значениях скорости входного потока *и*. При высоких же скоростях реализуется устойчивый узел.

Литература

1. Ю. Б. Швалёв, В. В. Коробочкин. Общая химическая технология. Химические процессы и реакторы. Учебное пособие. – Томск, 2008. – 181с.

2. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. – 478с.

3. Дайчман Е. Е., Кондратьев Е. Н. Модель циклически обостряемого реактора. //Вісник Одеського Державного Університету. – 2001. –т.6, №3. –С.134-139.

4. Кондратьев Е. Н., Мартынова Е. А. Анализ динамики поведения реактора идеального смешения вблизи особой точки типа фокус. //Физика аэродисперсных систем. – 2006, №43. – с.75-81.

5. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – Москва: Наука, 1987. – 502с.

THE BEHAVIOR OF A FLOW REACTOR OF IDEAL MIXING NEAR SINGULAR POINTS AND ITS EFFECTIVENESS

Опытюк В. В.

Odessa national Polytechnic University
Institute of power engineering and computer-integrated systems
65044 , Odessa, Ukraine, Shevchenko Ave, 1

Abstract

The article presents the investigation results of the flow reactor of ideal mixing. Analysis of stability of such a reactor by the method of special points using computer simulation. The found stationary solutions and their type. The analysis of the dynamic behavior in a neighborhood of stationary solutions. Consider the performance of the reactor. Considered region of phase space that are captured by stationary points. Calculated the region of existence of singular points. Revealed that there is only one self-sustaining state of operation of such a flow reactor.

Keywords: reactor, burning, mikrofakely, microexplosions, boiling, fuel

АРНАЙЫ НҮКТЕЛЕР ЖАНЫНДАҒЫ МІНСІЗ АРАЛАСУ АҒЫНДЫ РЕАКТОРЫНЫҢ КӨРСЕТЕТІН ҚАСИЕТІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ТИІМДІЛІГІ

Опытюк В. В.

Энергетика және компьютерлік-интеграцияланған жүйелер институты
Одесса ұлттық политехникалық университеты

Аннотация

Бұл мақалада мінсіз араласу жүретін ағынды реакторды зерттеу бойынша нәтижелер көрсетілген. Компьютерлік модельдеуді қолдану арқылы арнайы нүкте әдісімен осындай реактордың тұрақтылығына анализ жүргізілген. Стационарлы шешулері және олардың түрлері табылған. Стационарлық шешулердің төңірегіндегі динамикалық қылығына анализ жүргізілді. Реактордың өнімділігі туралы сұрақтар қарастырылды. Стационарлық нүктелер қамтитын фазалық кеңістік аумағы қарастырылды. Арнайы нүктелердің пайда болу облыстары есептелді. Осындай реактордың тек бір ғана өзін өзі ұстайтын жұмыс күйі бар екені анықталды.

Түйінді сөздер: реактор, жану, микро қыздырғыштар, микро жарылыстар, қайнаған, отын