

02.00.04

E598

Челябинский государственный технический
университет

На правах рукописи

Елохин Владимир Александрович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ
В ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ

Специальность 02.00.04 - "Физическая химия"

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Челябинск
1994

Работа выполнена на кафедре двигателей летательных аппаратов Челябинского государственного технического университета.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, с.н.с. В.Д.Груба;

доктор физико-математических наук, профессор Б.Р.Гельчинский;

доктор технических наук, профессор В.С.Швыдкий.

Ведущая организация - Институт новых химических проблем РАН.

Защита состоится " _____ " 1994 г.,
в _____ часов, на заседании специализированного совета
д053.13.03 по защите диссертаций на соискание ученой степени
доктора наук при Челябинском государственном техническом университете.

Отзывы в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью,
просим присыпать по адресу: 454080, г.Челябинск, пр. им.В.И.Ленина,
76, ЧГТУ, совет ЧГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " _____ " 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
к.ф.-м.н., доцент

Б.П.Бескачко

Актуальность проблемы. В закритических областях неустойчивых химически реагирующих и гидродинамических систем возбуждаются, растут и взаимодействуют возмущения, принадлежащие непрерывной полосе спектра волновых чисел. В результате развития неустойчивости в автокаталитических реакциях с диффузией реализуются стационарные диссипативные структуры, периодические, квазипериодические, хаотические и турбулентные режимы. Неустойчивые волновые и турбулентные режимы течения жидких пленок, струй, следов, поверхностей раздела являются преобладающими в физико-химической гидродинамике. Течения жидких пленок, поверхностей раздела, струй в аппаратах химической промышленности, энергетики, металлургии, космической техники сопровождаются химическими реакциями, фазовыми переходами, интенсивными потоками тела и массы, изменяющими границы устойчивости и режимы течения.

Методы исследования нелинейной устойчивости распределенных систем химии и физико-химической гидродинамики к возмущениям из непрерывной полосы волновых чисел разработаны слабо, вследствие чего многие вопросы долговременного поведения физико-химических и гидродинамических систем после потери устойчивости остаются открытыми: не изучена динамика нелинейных взаимодействий возмущений в процессах самоорганизации и турбулизации, не вскрыты механизмы расширения спектра волновых чисел в процессе возникновения многомодовой турбулентности, не выявлены бесразмерные критерии подобия самоорганизации и хаоса, не найдены общие закономерности самоорганизации и хаоса в химических и гидродинамических системах, не проанализировано влияние фазовых переходов и процессов интенсивного тепломассопереноса на развитие неустойчивости в системах физико-химической гидродинамики. Создание методов исследования долговременной эволюции физико-химических и гидродинамических систем после потери ими устойчивости является весьма актуальным.

Целью работы является разработка методов математического моделирования долговременного развития неустойчивости в распределенных системах и анализ динамики процессов самоорганизации, хаоса и турбулентности в неустойчивых химических и гидродинамических системах.

Предмет защиты. Метод редукции систем нелинейных уравнений в частных производных химии и физико-химической гидродинамики

к нелинейным параболическим уравнениям Гинзбурга-Ландау. Полный вид уравнений Гинзбурга-Ландау для абсолютной и конвективной неустойчивостей. Связь нелинейного развития возмущений по пространству с нелинейным развитием возмущений во времени в химически реагирующих и гидродинамических системах. Критерии вторичной неустойчивости стационарных монохроматических волновых режимов при развитии возмущений во времени и в пространстве. Результаты анализа самоорганизации случайного поля возмущений в автокаталитических реакциях с диффузией со сменой устойчивости. Закономерности развития диссипативных структур в автокаталитических реакциях из точечных источников. Механизм расширения спектра волновых чисел при возникновении многомодовой турбулентности в химически реагирующих и гидродинамических системах.

Математическая модель трехмерного течения тонкого слоя вязкой жидкости со свободной поверхностью по наклонной плоскости под действием силы тяжести; возмущенных дозвукового, околозвукового и сверхзвукового потоков газа; поверхностных сил, обусловленных фазовыми переходами, адсорбцией поверхностно-активных веществ, интенсивными процессами теплопереноса. Метод расчета неустойчивого течения жидкой пленки при умеренных числах Рейнольдса. Результаты анализа влияния фазовых переходов, адсорбции поверхностно-активных веществ, процессов тепломассопереноса, околозвукового потока газа на нелинейную устойчивость жидких пленок и параметры развитого волнового движения. Результаты анализа нелинейного взаимодействия возмущений в автокаталитических реакциях с диффузией.

Критерии наблюдаемости и идентифицируемости распределенных систем физической химии с измерениями на границах области. Методы определения точности нелинейных математических моделей химически реагирующих и гидродинамических систем.

Научная новизна. Разработаны методы редукции математических моделей распределенных химически реагирующих и гидродинамических систем к нелинейным параболическим уравнениям Гинзбурга-Ландау. Найден полный вид уравнений Гинзбурга-Ландау при развитии абсолютной и конвективной неустойчивостей в неоднородных системах. Получены безразмерные критерии подобия процессов самоорганизации, маломодового хаоса и турбулентности. Выявлен механизм расширения спектра волновых чисел при возникновении многомодовой химической турбулентности. Методами теории случайных функций изучена

динамика процесса самоорганизации случайного поля возмущений в автокаталитических реакциях с диффузией со сменой устойчивости. Найден новый вид нелинейного взаимодействия возмущений - направленный по спектру перенос волнового пакета. Сформулирована математическая модель движения трехмерной жидкой пленки при наличии на поверхности фазовых переходов, адсорбции поверхностно-активных веществ, возмущенных дозвукового, околосзвукового и сверхзвукового потоков газа. Проанализировано влияние этих факторов на нелинейную устойчивость и на параметры развитого волнового движения. Для автокаталитических реакций с диффузией выведена система уравнений Гинзбурга-Ландау и проанализировано нелинейное взаимодействие двух волновых пакетов, возбужденных в областях с различными видами неустойчивости. Сформулированы новые постановки задач оценивания параметров неустойчивых химически реагирующих и гидродинамических систем, для которых найдены критерии наблюдаемости и идентифицируемости. Для математических моделей химической кинетики, физико-химической гидродинамики, содержащих алгебраические, обыкновенные дифференциальные уравнения и уравнения в частных производных, разработаны методы определения статистических характеристик неизвестных параметров и оценивания точности математической модели.

Практическая и теоретическая ценности. Разработаны методы редукции математических моделей химической кинетики и физико-химической гидродинамики к нелинейным параболическим уравнениям Гинзбурга-Ландау. Для большого класса математических моделей автокаталитических реакций с диффузией и физико-химической гидродинамики получены уравнения Гинзбурга-Ландау, все коэффициенты в которых найдены в явном виде. Найдена связь между нелинейным развитием возмущений во времени и в пространстве. Разработан метод расчета самоорганизации случайного поля возмущений в автокаталитических реакциях с диффузией со сменой устойчивости. Найдены и объяснены механизмы направленного по спектру переноса волнового пакета и расширения спектра волновых чисел при возникновении многомодовой турбулентности.

Получена математическая модель трехмерного течения жидкой пленки при наличии адсорбции поверхностно-активных веществ, поверхностной вязкости, фазовых переходов, возмущающего действия дозвукового, околосзвукового, сверхзвукового потоков газа. Проанализировано влияние этих факторов на развитие нелинейной неустойчи-

вости жидкых пленок и на параметры развитого волнового движения. Выведены нелинейные уравнения Шредингера для волн на поверхности глубокой жидкости, на поверхности цилиндрической струи идеальной жидкости, в течении Кельвина-Гельмгольца. Получена система уравнений Гинзбурга-Ландау взаимодействия двух волновых пакетов с различными типами неустойчивости в автокаталитических реакциях с диффузией.

Введены новые постановки задач оценивания параметров распределенных физико-химических систем с измерениями на границе. Для новых постановок задач найдены критерии наблюдаемости и идентифицируемости. Разработаны методы определения статистических характеристик неизвестных параметров по известным статистическим характеристикам измеряемых величин. Методами параметрической идентификации определены значения коэффициентов гидравлического сопротивления и теплообмена в трубчатых конденсаторах с неустойчивыми волновыми и турбулентными режимами течения пленки конденсата.

Достоверность полученных результатов. Достоверность разработанных математических методов редукции систем нелинейных уравнений в частных производных к уравнениям Гинзбурга-Ландау, метода асимптотической идентификации, методов оценивания статистических характеристик неизвестных параметров обеспечивается корректным формулированием и внутренней непротиворечивостью допущений и ограничений разрабатываемых методов, корректностью вывода. Достоверность методов расчета конкретных физико-химических систем и новых физических результатов подтверждается их соответствием экспериментальным данным. Все полученные научные результаты не противоречат основным концепциям и законам современного естествознания.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на семинаре академика Г.И.Петрова в мае 1978 г.; на семинаре академика В.В.Струминского в мае 1987 г.; на II Всесоюзной конференции по асимптотическим методам в теории сингулярно возмущенных уравнений (Алма-Ата, 1979); на Всесоюзных конференциях по тепломассообмену в Минске (в 1972 г., в 1976 г.); на II Международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 1992); на Всесоюзных конференциях "Методы кибернетики химико-технологических процессов" (Москва, 1984 г.; Москва, 1989 г.); на У Всесоюзной конференции "Математическое моделирование сложных химико-технологических систем" (Казань, 1988 г.); на Всесоюзной конференции "Современные

машины и аппараты химических производств" (Чимкент, 1988 г.); на Всесоюзных конференциях по проблемам турбулентных течений жидкостей и газов (Жданов, 1984 г.; Одесса, 1990 г.); на Всесоюзной конференции по кинетической теории разреженных и плотных газовых смесей и механике неоднородных сред (Ленинград, 1987 г.); на Всесоюзных школах по гидродинамической неустойчивости (Колюбакино, 1978 г., 1980 г.); на Всесоюзных конференциях по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазных потоков в элементах энергетических машин и аппаратов (Ленинград, 1974 г., 1979 г.); на IV Всесоюзной конференции "Теплофизика технологических процессов" (Тольятти, 1976 г.); на Всесоюзной конференции "Стохастические системы управления" (Челябинск, 1976 г.); на II Всесоюзной конференции по исследованию вихревого эффекта и его использованию в технике (Куйбышев, 1975 г.); на Всесоюзной конференции "Методы и средства машинной диагностики состояния газотурбинных двигателей" (Харьков, 1977 г.); на Школе-конференции "Математические вопросы химической кинетики и горения" (Шушенское, 1984 г.).

Публикации. По результатам работы имеется 68 публикаций и три авторских свидетельства.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, приложения и списка литературы. Работа изложена на 340 страницах машинописного текста, содержит 96 рисунков. Список литературы содержит 422 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность исследования долговременного поведения химически реагирующих и гидродинамических систем после потери ими устойчивости. Проанализировано состояние проблемы нелинейной устойчивости распределенных систем и сделан вывод, что решение этой проблемы для химически реагирующих и гидродинамических систем возможно только с учетом нелинейного взаимодействия возмущений из непрерывной полосы спектра волновых чисел. Сформулированы нерешенные задачи нелинейной устойчивости для конкретных систем физической химии и физико-химической гидродинамики: для автокаталитических реакций с диффузией, для течений тонких слоев вязкой жидкости при наличии интенсивных процессов тепломассопереноса. Поставлены задачи математического моделирования неустойчивых физико-химических систем.

В первой главе развит подход волновых пакетов в задачах исследования долговременного развития неустойчивости в химически реагирующих и гидродинамических системах. Сформулированы допущения и ограничения подхода волновых пакетов при развитии в системах абсолютной неустойчивости:

1. Ширина полосы спектра волновых чисел мала.
2. Неустойчивость слабая.
3. Амплитуда возмущений незначительна.
4. Существует баланс амплитуды, спектральной ширины волнового пакета и величины инкремента:

$$\frac{\Delta K_1}{K_{10}} = O(\epsilon); \quad \frac{\Delta K_2}{K_{20}} = O(\epsilon); \quad \frac{\tilde{\varphi}}{\varphi_0} = O(\epsilon); \\ \omega_i = O(\epsilon^2); \quad \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial K_j} \right)_{\omega_i=0} = O(\epsilon); \quad \epsilon \ll 1. \quad (1)$$

При сделанных допущениях волновой пакет может быть представлен в виде квазимохроматической волны, комплексная амплитуда которой зависит от медленных переменных:

$$\varphi = \varphi_0 + \tilde{\varphi} = \varphi_0 + \\ + \int_{K_{10}-\Delta K_1}^{K_{10}+\Delta K_1} \int_{K_{20}-\Delta K_2}^{K_{20}+\Delta K_2} F(K_1, K_2) \exp i(K_1 X_1 + K_2 X_2 - \omega t) dK_1 dK_2 + \\ + K.C. = A(X_{11}, X_{21}, X_{12}, X_{22}, t_2) \exp i(K_{10} X_1 + K_{20} X_2 - \omega t) + K.C. \quad (2)$$

где $X_{11} = \epsilon X_1$, $X_{21} = \epsilon X_2$, $X_{12} = \epsilon^2 X_1$, $X_{22} = \epsilon^2 X_2$, $t_2 = \epsilon^2 t$.

Модуль комплексной амплитуды A равен амплитуде первой гармоники, а аргумент - нелинейной добавке к фазе.

Для пространственно растущих возмущений (в случае конвективной неустойчивости) при аналогичных допущениях о спектральной узости волнового пакета, малости инкремента и амплитуды возмущений волновой пакет также может быть представлен в виде квазимохроматической волны:

$$\varphi = \varphi_0 + \tilde{\varphi} = \varphi_0 + \int_{\omega_0-\Delta\omega}^{\omega_0+\Delta\omega} F(\omega) \exp i(KX - \omega t) d\omega + \\ + K.C. = A(X_{11}, X_{12}, t_1, t_2) \exp i(K(\omega_0)X - \omega_0 t), \quad (3)$$

где $X_{11} = \epsilon X_1$, $X_{12} = \epsilon^2 X_1$, $t_1 = \epsilon t$, $t_2 = \epsilon^2 t$,

Разработаны асимптотические методы расчета долговременного поведения квазимохроматической волны после потери системой устойчивости. Для систем уравнений вида

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + N(\Phi) + \sum_{i=1}^2 Q_i(\Phi) \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \sum_{ij=1}^2 M_{ij}(\Phi) \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i \partial x_j} = 0, \quad (4)$$

где $\Phi = [\Phi_1, \dots, \Phi_n]^T$ - вещественный вектор, определенный на области

$$D = \{(t, x_1, x_2) / t \geq 0, -\infty < x_1 < \infty, -\infty < x_2 < \infty\},$$

$N = [N_1, \dots, N_n]^T$, Q, M - матрицы $n \times n$, описывающих автокаталитические реакции с диффузией, неустойчивые системы физико-химической гидродинамики, физики твердого тела, методом многих масштабов получено решение для возбужденного волнового пакета, в котором амплитуды высших гармоник выражаются через амплитуду первой гармоники. Уравнение для комплексной амплитуды первой гармоники A находится в третьем приближении из условия ограниченности решения на масштабе X_1, X_2, t и имеет вид

$$\frac{\partial A}{\partial t_2} + i \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x_1} \frac{\partial A}{\partial \eta_1} + \frac{\partial \omega_i}{\partial x_2} \frac{\partial A}{\partial \eta_2} \right) - \frac{i}{2} \left(\frac{\partial^2 w_i}{\partial x_1^2} + i \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial x_1^2} \right).$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial \eta_1^2} - \frac{i}{2} \left(\frac{\partial^2 w_i}{\partial x_1^2} + i \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial x_1^2} \right) \frac{\partial^2 A}{\partial \eta_2^2} - i \left(\frac{\partial^2 w_i}{\partial x_1 \partial x_2} + i \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial x_1 \partial x_2} \right) \frac{\partial^2 A}{\partial \eta_1 \partial \eta_2} + \quad (5)$$

$$+ i \left(\frac{\partial^2 \omega_i}{\partial x_2 \partial x_1} \right) \frac{\partial^2 A}{\partial \eta_1 \partial \eta_2} = \frac{(\alpha_i^2 - (\beta_1 + i\beta_2)) |A|^2 A}{\epsilon^2}.$$

Нелинейное параболическое уравнение Гинзбурга-Ландау (5) описывает эволюцию волнового пакета (2) в неустойчивых системах химии и гидродинамики. Все коэффициенты уравнения (5) найдены в явном виде, что позволяет при исследовании нелинейной устойчивости конкретных физико-химических систем не повторять вычисления, а воспользоваться найденными выражениями. При приведении уравнения (5) к безразмерному виду найдены безразмерные критерии подобия процессов долговременного развития неустойчивости:

$$d_{11} = \frac{\partial^2 \omega_i / \partial K_1^2}{\partial^2 \omega_i / \partial K_1^2}; d_{12} = \frac{\partial^2 \omega_i / \partial K_2^2}{\partial^2 \omega_i / \partial K_2^2}; d_2 = \frac{\omega_i}{\beta_1}; \quad (6)$$

$$d_{31} = \frac{\partial \omega_i}{\partial K_1} \sqrt{\frac{2}{\omega_i \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial K_1^2}}}; d_{32} = \frac{\partial \omega_i}{\partial K_2} \sqrt{\frac{2}{\omega_i \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial K_2^2}}};$$

$$\alpha_2 = \frac{2 \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial K_1 \partial K_2}}{\sqrt{\frac{\partial^2 \omega_i}{\partial K_1^2} \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial K_2^2}}}, d_i = \frac{2 \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial K_1 \partial K_2}}{\sqrt{\frac{\partial^2 \omega_i}{\partial K_1^2} \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial K_2^2}}}.$$

Безразмерные комплексы d_j имеют простой физический смысл: d_{1j} характеризует отношение дисперсии групповой скорости в j направлении к дисперсии инкремента; d_2 характеризует нелинейную зависимость фазы (частоты) от амплитуды (то есть нелинейную дисперсию); d_{3j} характеризует отклонение центра волнового пакета от гармоники максимального инкремента.

Для амплитуды развивающегося по пространству волнового пакета (3) для одномерной по пространству системы (4) найдено нелинейное параболическое уравнение Гинзбурга-Ландау конвективной неустойчивости:

$$\frac{\partial A}{\partial x_2} + \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial K_2}{\partial \omega} + i \frac{\partial K_1}{\partial \omega} \right) \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 K_1}{\partial \omega^2} - i \frac{\partial^2 K_2}{\partial \omega^2} \right] \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\frac{K_1}{\epsilon^2} A - (\beta_1^S + i \beta_2^S) |A|^2 A. \quad (7)$$

Коэффициент при нелинейном члене $\beta_1^S + i \beta_2^S$ в (7) связан с аналогичным коэффициентом в (5) соотношением

$$\frac{\beta_1 + i \beta_2}{\beta_1^S + i \beta_2^S} = \frac{\partial \omega_i}{\partial K_1} + i \frac{\partial \omega_i}{\partial K_2}. \quad (8)$$

При выполнении в линейном приближении условий Гастера

$$\omega_i = \omega, \quad \omega_i = -K_i \frac{\partial \omega_i}{\partial K}$$

исследование нелинейного развития возмущений по пространству, проводимое в рамках уравнения Гинзбурга-Ландау, может быть заменено с точностью до членов $O(\epsilon^2)$ исследованием развития во времени.

При приведении уравнения (7) к безразмерному виду найдены критерии подобия нелинейного развития возмущений по пространству:

$$\alpha_1^S = \frac{\partial^2 K_i / \partial \omega^2}{|\partial^2 K_i / \partial \omega^2|}; \quad \alpha_2^S = \frac{\beta_2^S}{\beta_1^S}; \quad (9)$$

$$\alpha_3^S = \frac{\partial K_i}{\partial \omega} \sqrt{\frac{2}{-K_i / \frac{\partial^2 K_i}{\partial \omega^2}}}$$

Критерий подобия α_1^S характеризует отношение дисперсии групповой скорости к дисперсии инкремента, критерий подобия α_2^S определяет нелинейную зависимость фазы (волнового числа) от амплитуды, критерий подобия α_3^S характеризует отклонение центра волнового пакета от гармоники максимального инкремента.

В задачах физико-химической гидродинамики с интенсивными процессами тепломассопереноса, с фазовыми переходами развитие неустойчивости происходит при медленном изменении параметров невозмущенного состояния по пространству или во времени. Для одномерной по пространству системы (5) с медленными изменениями параметров невозмущенного состояния для абсолютной и конвективной неустойчивостей найдены уравнения эволюции волны огибающей Гинзбурга-Ландау.

Медленная эволюция параметров невозмущенного состояния с точностью до трех приближений асимптотического метода не изменяет вида уравнений Гинзбурга-Ландау, внося изменения только в коэффициент при линейном члене.

Во второй главе в рамках уравнений Гинзбурга-Ландау исследована динамика долговременного развития неустойчивости в физико-химических системах. Найдены амплитуды, частоты и длины волн монохроматических состояний. Для неустойчивых режимов со сменой устойчивости в автокаталитических реакциях с диффузией получены новые многомодовые решения, учитывающие возникновение дислокаций. Для абсолютной и конвективной неустойчивостей исследована вторичная неустойчивость монохроматических режимов. Получены критерии возникновения модуляционной и фокусировочной неустойчивостей развитых волновых режимов. Исследовано нелинейное развитие вторичной модуляционной неустойчивости.

Численно и аналитически исследована самоорганизация возмущений в автокаталитических реакциях со сменой устойчивости. Построен фазовый портрет системы трех взаимодействующих волн (рис. I). Все устойчивые узлы расположены на осях амплитуд первых гармоник φ_0 , φ_1 , φ_2 . При подходе амплитуды одной из волн к предельному значению конкуренция волн уменьшает амплитуды остальных волн, в результате чего в системе реализуется одна волна. Две другие волны затухают, не передавая своей энергии растущей волне. Выживаемость волны зависит от инкремента и начальной амплитуды. Возбуждение возмущений в автокаталитических реакциях с диффузией происходит в различных пространственных точках со случайными амплитудами и фазами. Численный расчет самоорганизации случайного поля возмущений приведен на рис. 2. В результате самоорганизации в системе выживает одна монохроматическая волна.

Методами теории случайных функций исследована динамика процесса самоорганизации случайного поля возмущений в автокаталитических реакциях со сменой устойчивости в неограниченной среде. Комплексная амплитуда A считается случайной функцией пространственной координаты и детерминированной функцией времени. После перехода от уравнения Гинзбурга-Ландau к системе уравнений для средних величин и семиинвариантов случайного поля возмущений получена бесконечная система сцепленных между собой уравнений в частных производных. Задача об эволюции средних величин и семиинвариантов случайного поля решается асимптотическим методом при предположении, что величины семиинвариантов обратно пропорциональны их порядку. Корректность асимптотического разложения во все моменты времени проверялась по найденным решениям. Расчет показал, что в начальный период времени все семиинварианты случайного поля растут. Если случайное поле возмущений было гауссовским, то нелинейное взаимодействие средней величины возмущения с семиинвариантами второго порядка приводит к появлению высших семиинвариантов. Стохастичность системы увеличивается. В дальнейшем рост семиинвариантов сдерживается нелинейным взаимодействием со средней величиной. В последующие моменты времени средняя величина возмущения поглощает из высших семиинвариантов больше энергии, чем те получают, в результате чего величина семиинвариантов уменьшается и при стремлении времени к бесконечности они стремятся к нулю. В системе устанавливается идеальная корреляция,

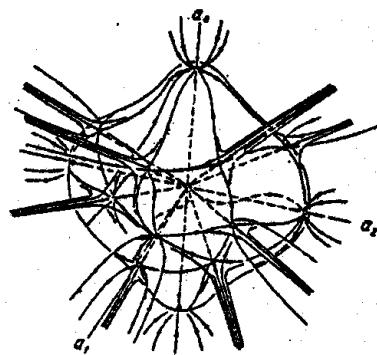


Рис.1. Фазовый портрет трех взаимодействующих волн концентрации в автокаталитической реакции со сменой устойчивости

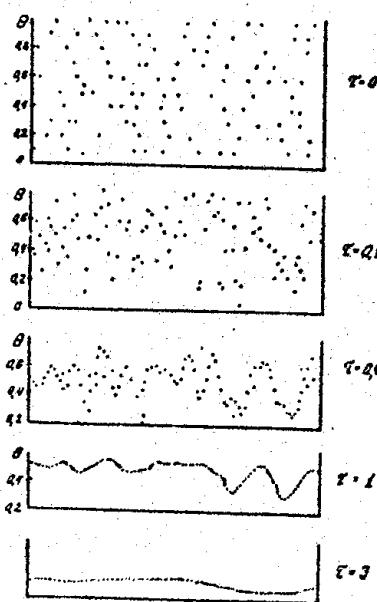


Рис. 2. Синхронизация фаз случайных возмущений в автокаталитической реакции со сменой устойчивости

реализуется монохроматическая волна. Прослежена динамика стремления к нулю различных семиинвариантов и выявлены аналогии поведения случайных полей в процессе самоорганизации и в процессе вырождения изотропной турбулентности.

Особенности долговременного развития неустойчивости в химических и гидродинамических системах исследованы в рамках одномерного по пространству уравнения Гинзбурга-Ландау. Расчет уравнения Гинзбурга-Ландау проводился методом прямых на конечном пространственном отрезке $[0, L]$ с периодическими граничными условиями $A(0) = A(L)$. В качестве начальных условий были приняты точечные источники возмущений, локализованные волновые пакеты, слабомодулированные волны и распределенные случайные источники. Подобные начальные условия реализуются в автокаталитических реакциях с диффузией, на поверхности жидких пленок, в пограничном слое, в течении Пуазейля. Анализ эволюции волнового пакета проводился как с точки зрения волны огибающей, так и с точки зрения нелинейного взаимодействия волн. Анализ эволюции волны огибающей и анализ взаимодействия волн взаимно дополняют один другого, раскрывая различные стороны нелинейного развития неустойчивости. В процессе анализа рассчитывались эволюции волны огибающей, спектра волновых чисел, частотные спектры амплитуд и фаз гармоник и средних величин амплитуды и энергии волнового пакета, средние значения и центральные моменты энергии волнового пакета, автокорреляционные функции амплитуд взаимодействующих волн, показатели Ляпунова.

Установлено, что в результате долговременного развития неустойчивости в системах могут реализоваться самоупорядочивающиеся монохроматические, квазипериодические, маломодовые хаотические и многомодовые турбулентные режимы. Найдена зависимость реализуемости различных режимов от безразмерных критериев подобия (6,9), позволяющая провести классификацию закритических режимов. Изучены и объяснены механизм сужения спектра волновых чисел в процессах самоорганизации, механизм расширения спектра волновых чисел в процессе развития многомодовой турбулентности. Найден новый вид нелинейного взаимодействия волн: направленный по спектру перенос волнового пакета. Установлены причины появления и исследована динамика развития когерентных структур в неустойчивых системах. Изучен сценарий перехода вторичной продольной неустойчивости в маломодовый хаос.

При независимости фазы возмущения от амплитуды ($\alpha_{2j} = 0$) в химических и гидродинамических системах происходит самоорганизация возмущений и реализуется монохроматическая волна. Распространение фронта волнового пакета от точечного источника в автокаталитических реакциях со сменой устойчивости происходит устойчиво, скорость движения фронта реакции постоянна и пропорциональна $\sqrt{\omega_i \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial k^2}}$. Линейная дисперсия увеличивает скорость распространения фронта. В системах с сильной нелинейной дисперсией ($|\alpha_{2j}| > 1$) распространение фронта волнового пакета неустойчиво. Волна огибающая разбивается на клиновидные волновые пакеты, длина которых является естественным масштабом турбулентности. В системе развивается хаотический режим, характерной особенностью которого при $L > 20$ является многомодовость. Найдена связь масштаба турбулентности с шириной спектра волновых чисел, критериями подобия (6, 9) и ляпуновской размерностью глобального аттрактора. Механизм развития многомодовой турбулентности в химических и гидродинамических системах описан с точки зрения эволюции волны огибающей и с точки зрения взаимодействующих возмущений. Найдена оценка числа эффективно взаимодействующих мод P_n при возбуждении N мод на некомбинированных волновых числах

$$P_n \sim 2^{n-1}$$

При анализе сценария перехода продольной неустойчивости в хаотический режим исследованы эволюции спектра волновых чисел, спектра частот основных гармоник, отображение последействия, показателей Ляпунова. Изучены особенности возникновения многомодовой турбулентности в пограничном слое и течении Пуазейля. Отмечено, что увеличение линейной дисперсии в системах с сильной нелинейной зависимостью фазы от амплитуды может привести к образованию когерентных структур и самоорганизации хаотических режимов. В пограничных слоях, в жидких пленках увеличение линейной дисперсии, приводящее к самоорганизации возмущений, может быть получено увеличением дисперсности среды, добавлением в жидкую среду полимерных добавок, мелких пузырьков газа.

В третьей главе исследовано нелинейное развитие возмущений на поверхности тонких слоев вязкой жидкости. Течение жидких плёнок реализуется в устройствах и аппаратах химической технологии, энергетики, металлургии, космической техники и сопровождается интенсивными процессами тепломассопереноса и фазовыми переходами.

Нелинейные краевые условия на свободной поверхности трехмерной жидкой пленки, учитывающие диффузию поверхностно-активных веществ; поверхностную вязкость; неоднородность поверхностного напряжения, обусловленную процессами тепломассопереноса; фазовые переходы; обдув жидкой пленки дозвуковым, околозвуковым и сверхзвуковым потоками газа, получены методами тензорного анализа. Математическая модель течения трехмерного тонкого слоя вязкой жидкости по наклонной плоской поверхности под действием силы тяжести, касательного напряжения потока газа при наличии интенсивных процессов тепломассопереноса, фазовых переходов и вдува жидкости через твердую стенку имеет вид:

$$\frac{\partial U_{1+}}{\partial t_+} + U_{1+} \frac{\partial U_{1+}}{\partial x_+} + V_{1+} \frac{\partial U_{1+}}{\partial y_+} + W_{1+} \frac{\partial U_{1+}}{\partial z_+} = - \frac{\partial P_{1+}}{\partial x_+} + \\ + F_x + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U_{1+}}{\partial x_+^2} + \frac{\partial^2 U_{1+}}{\partial y_+^2} + \frac{\partial^2 U_{1+}}{\partial z_+^2} \right); \quad (10)$$

$$\frac{\partial V_{1+}}{\partial t_+} + U_{1+} \frac{\partial V_{1+}}{\partial x_+} + V_{1+} \frac{\partial V_{1+}}{\partial y_+} + W_{1+} \frac{\partial V_{1+}}{\partial z_+} = - \frac{\partial P_{1+}}{\partial y_+} + \\ + F_y + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V_{1+}}{\partial x_+^2} + \frac{\partial^2 V_{1+}}{\partial y_+^2} + \frac{\partial^2 V_{1+}}{\partial z_+^2} \right); \quad (11)$$

$$\frac{\partial W_{1+}}{\partial t_+} + U_{1+} \frac{\partial W_{1+}}{\partial x_+} + V_{1+} \frac{\partial W_{1+}}{\partial y_+} + W_{1+} \frac{\partial W_{1+}}{\partial z_+} = - \frac{\partial P_{1+}}{\partial z_+} + \\ + F_z + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 W_{1+}}{\partial x_+^2} + \frac{\partial^2 W_{1+}}{\partial y_+^2} + \frac{\partial^2 W_{1+}}{\partial z_+^2} \right); \quad (12)$$

$$\frac{\partial U_{1+}}{\partial x_+} + \frac{\partial V_{1+}}{\partial y_+} + \frac{\partial W_{1+}}{\partial z_+} = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_{1+}}{\partial t_+} + U_{1+} \frac{\partial T_{1+}}{\partial x_+} + V_{1+} \frac{\partial T_{1+}}{\partial y_+} + W_{1+} \frac{\partial T_{1+}}{\partial z_+} = \\ = Q_1 \left(\frac{\partial^2 T_{1+}}{\partial x_+^2} + \frac{\partial^2 T_{1+}}{\partial y_+^2} + \frac{\partial^2 T_{1+}}{\partial z_+^2} \right); \quad (14)$$

$$Y_+ = 0; \quad U_+ = \omega_{1+} = 0; \quad (I5)$$

$$U_+ = U_s; \quad T_{1+} = T_A;$$

$$Y_r = \delta_r : \frac{1}{Re_1} \left[2 \frac{\partial U_{1+}}{\partial X_r} - \frac{\partial \delta_r}{\partial X_r} - \left(\frac{\partial U_{1+}}{\partial Y_r} + \frac{\partial V_{1+}}{\partial X_r} \right) + \frac{\partial \delta_r}{\partial Z_r} \left(\frac{\partial U_{1+}}{\partial Z_r} + \frac{\partial \omega_{1+}}{\partial X_r} \right) - \right.$$

$$\left. - 2 \frac{\partial V_{1+}}{\partial Y_r} \frac{\partial \delta_r}{\partial X_r} \right] + \tilde{E}_X + \sum_{X_r} (\delta_r - 1) + M \frac{\partial T_{1+}}{\partial X_r} +$$

$$+ M_{j1} \frac{\partial \delta_r}{\partial X_r} + M_{j2} \frac{\partial^2 \delta_r}{\partial Z_r^2} + N_1 \left(\frac{\partial^2 U_{1+}}{\partial X_r^2} + \frac{\partial^2 \omega_{1+}}{\partial X_r \partial Z_r} \right) +$$

$$+ N_2 \left(\frac{\partial^2 U_{1+}}{\partial Z_r^2} - \frac{\partial^2 \omega_{1+}}{\partial X_r \partial Z_r} \right); \quad (I6)$$

$$\frac{1}{Re_1} \left[2 \frac{\partial \omega_{1+}}{\partial Z_r} \frac{\partial \delta_r}{\partial Z_r} - \left(\frac{\partial \omega_{1+}}{\partial Y_r} + \frac{\partial V_{1+}}{\partial Z_r} \right) + \frac{\partial \delta_r}{\partial X_r} \left(\frac{\partial \omega_{1+}}{\partial X_r} + \frac{\partial U_{1+}}{\partial Z_r} \right) - 2 \frac{\partial V_{1+}}{\partial Y_r} \frac{\partial \delta_r}{\partial X_r} \right] + \tilde{E}_Z + \sum_Z (\delta_r - 1) + M_r \frac{\partial T_{1+}}{\partial Z_r} +$$

$$+ M_{j1} \frac{\partial \delta_r}{\partial Z_r} + M_{j2} \frac{\partial^2 \delta_r}{\partial Z_r^2} + N_1 \left(\frac{\partial^2 \omega_{1+}}{\partial Z_r^2} + \frac{\partial^2 U_{1+}}{\partial X_r \partial Z_r} \right) +$$

$$+ N_2 \left(\frac{\partial^2 \omega_{1+}}{\partial X_r^2} - \frac{\partial^2 U_{1+}}{\partial X_r \partial Z_r} \right) = 0; \quad (I7)$$

$$P_{1+} = P_{20+} + \Pi_{1+} (\delta_r - 1) + \Pi_{2+} \frac{\partial \delta_r}{\partial X_r} + D_p \frac{1}{\delta_r^2} + \frac{2}{Re_1} \left(\frac{\partial \delta_r}{\partial Y_r} - \frac{\partial U_{1+}}{\partial Y_r} \frac{\partial \delta_r}{\partial X_r} - \frac{\partial \omega_{1+}}{\partial Y_r} \frac{\partial \delta_r}{\partial Z_r} \right) - W \left(\frac{\partial^2 \delta_r}{\partial X_r^2} + \frac{\partial^2 \delta_r}{\partial Z_r^2} \right); \quad (I8)$$

$$-U_{1t} + \frac{\partial \delta_t}{\partial t_r} + U_{1r} \frac{\partial \delta_r}{\partial x_r} + \Delta U_{1t} \frac{\partial \delta_r}{\partial z_r} = D_m \frac{1}{\delta_r}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial T_{1t}}{\partial y_t} = d(T_{2t} - T_{1t}); \quad (20)$$

$$Re_1 = \frac{U_m \delta_0}{V_1}; \quad F_x = \frac{g_x \delta_0}{U_m^2}; \quad F_y = \frac{g_y \delta_0}{U_m^2}; \quad F_z = \frac{g_z \delta_0}{U_m^2};$$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 C_{p1} U_m \delta_0}; \quad T_{xr} = \frac{E_x}{\rho_1 U_m^2}; \quad T_{zt} = \frac{E_z}{\rho_1 U_m^2};$$

$$M_T = \frac{\partial \delta}{\partial T} \frac{\Delta T}{\delta_0 \rho_1 U_m^2}; \quad M_{j1} = \frac{\partial \delta}{\partial j} \frac{F_1}{\rho_1 U_m^2}; \quad M_{j2} = \frac{\partial \delta}{\partial j} \frac{F_2}{\delta_0 \rho_1 U_m^2};$$

$$\sum_{x_r} = \frac{\sum x \delta_0}{\rho_1 U_m^2}; \quad \sum_{z_r} = \frac{\sum z \delta_0}{\rho_1 U_m^2}; \quad (21)$$

$$N_1 = \frac{K + E}{\delta_0^2 \rho_1 U_m}; \quad N_2 = \frac{E}{\delta_0^2 \rho_1 U_m}; \quad W = \frac{G}{\rho_1 \delta_0 U_m^2};$$

$$\Pi_{1t} = \frac{\Pi_1 \delta_0}{\rho_1 U_m^2}; \quad \Pi_{2t} = \frac{\Pi_2}{\rho_1 U_m^2};$$

$$D_p = \frac{1}{\rho_1 \rho_2} \frac{\lambda_1 \Delta T}{\delta_0 U_m Z}; \quad D_m = \frac{\lambda_1 \Delta T}{\rho_1 Z' U_m \delta_0};$$

$$d_+ = \frac{d \delta_0}{\lambda_1}; \quad U_m = \sqrt{\bar{U}_1^2 + \bar{w}_1^2}; \quad \bar{U}_1 = \frac{1}{\delta_0} \int_{S_0} U_{10} dy;$$

$$\bar{w}_1 = \frac{1}{\delta_0} \int_{S_0} w_{10} dy; \quad t_+ = \frac{t U_m}{\delta_0}; \quad X_+ = \frac{x}{\delta_0}; \quad Y_+ = \frac{y}{\delta_0};$$

$$Z_+ = \frac{z}{\delta_0}; \quad U_{1t} = \frac{U_1}{U_m}; \quad V_{1t} = \frac{V_1}{U_m}; \quad W_{1t} = \frac{W_1}{U_m};$$

$$P_{1t} = \frac{P_1}{\rho_1 U_m^2}; \quad T_{1t} = \frac{T_1}{\Delta T} = \frac{T_1}{T_2 - T_{cr}}; \quad \delta_t = \frac{\delta}{\delta_0}.$$

В (21) функции F_1, F_2 учитывают адсорбцию жидкой пленкой поверхности-активных веществ и найдены из решения уравнений массопереноса поверхностного слоя возмущенной жидкой пленки; функции Π_1, Π_2 учитывают влияние возмущенных дозвукового, околозвукового и сверхзвукового потоков газа на нормальное напряжение на свободной поверхности и найдены из решения нелинейных уравнений газовой динамики; функции Σ_x, Σ_z учитывают влияние возмущенного потока газа на касательное напряжение на свободной поверхности.

В рамках математической модели (10 - 21) проанализирована устойчивость течений жидких пленок; исследовано долговременное развитие неустойчивости; изучено нелинейное взаимодействие волн на поверхности пленок; определены параметры развитого волнового течения; найдены формы волн, профили скорости и температуры волновых течений; построены линии тока, траектории жидких частиц, изотермы; рассчитаны процессы массообмена при адсорбции поверхности-активных веществ и коэффициенты теплоотдачи при конденсации.

Нелинейная устойчивость и течения жидких пленок при малых числах Рейнольдса ($0 < Re < 5$) исследованы методом узких полос. Устойчивость, гидродинамика и тепломассоперенос жидких пленок в случае умеренных чисел Рейнольдса ($0 < Re < 50$) рассчитаны с помощью метода, основанного на представлении профиля скорости квадратичным полиномом. Адсорбция поверхности-активных веществ и её влияние на устойчивость и параметры волнового течения изучены с помощью уравнения массопереноса поверхностного слоя волновой жидкой пленки, выведенного методами тензорного анализа из уравнения сохранения массы поверхностного слоя. Наличие фазовых переходов на свободной поверхности описывалось членами, учитывающими поток массы через свободную поверхность в кинематическом граничном условии и поток количества движения в граничном условии для нормального напряжения на свободной поверхности. Влияние возмущенного потока газа найдено из решений уравнений газовой динамики потока газа, обтекающего волновую поверхность жидкой пленки с дозвуковой, околозвуковой или сверхзвуковой скоростями.

Из дисперсионных уравнений системы (10 - 21) найдены основные параметры линейной устойчивости: кривые нейтральной устойчивости, инкремент, фазовая и групповая скорости, частота возникающих волн, волновые числа гармоник максимального роста, коэффи-

циенты при линейных членах уравнений Гинзбурга-Ландау. Хорошее совпадение расчетных значений инкремента и фазовой скорости с экспериментальными данными для жидких пленок минеральных масел и воды свидетельствует об удовлетворительной точности применяемых методов. Экспериментальные значения волновых чисел, реализующихся в экспериментах волн, лежат в окрестности кривой гармоник максимального роста. При малых числах Рейнольдса ($Re < 10$) на образование волн и параметры волнового движения значительное влияние оказывают неоднородность поверхностного натяжения, обусловленная адсорбцией ПАВ и процессами тепломассопереноса; фазовые переходы на поверхности раздела; возмущенный поток газа. Отрицательные градиенты температуры дестабилизируют течение пленки. Наличием этого типа неустойчивости объясняются разрывы жидких пленок и образование сухих пятен в парогенераторах. Положительные градиенты температуры, реализующиеся при охлаждении камер сгорания, при оплавлении поверхности твердого тела, способствуют предотвращению волнообразования. В пленках сложного состава неоднородность поверхностного натяжения оказывает определяющее воздействие на устойчивость, обуславливая переход пленочной конденсации бинарных паров в капельную. Поверхностная вязкость значительно уменьшает интенсивность роста возмущений. Влияние поверхностной вязкости падает с ростом длины волны. Для чисел Рейнольдса

$Re > 5$ увеличение поверхностной вязкости уменьшает фазовую скорость волнового течения. Конденсация стабилизирует течение жидких пленок, уменьшает область неустойчивости при малых числах Рейнольдса. Процессы испарения увеличивают область неустойчивости, повышают инкремент и способствуют образованию сухих пятен в испарителях и парогенераторах.

В рамках уравнения Гинзбурга-Ландау найдены амплитуда, нелинейная фазовая скорость, нелинейная частота, форма волн, проанализированы вторичные неустойчивости монохроматических волн, исследовано нелинейное взаимодействие волн. Расчетные значения амплитуды и фазовой скорости хорошо согласуются с экспериментальными данными. Поверхностная вязкость изменяет форму волн, приближая её к форме гармонической волны. Границы вторичной неустойчивости монохроматической волны совпадают с экспериментальными границами существования волновых течений. В окрестности гармоники максимального инкремента реализуется механизм конкуренции мод. В области, лежащей между кривой нейтральной устойчивости

и границей вторичной неустойчивости монохроматических волн найден новый вид нелинейного взаимодействия волн - направленный по спектру перенос волнового пакета. В этой области периодические волны экспериментально не наблюдаются. Зоны направленного переноса волнового пакета существуют и в области с отрицательной скоростью роста возмущений. В случае возбуждения волнового пакета в области декремента его моды затухают, одновременно возбуждая волны на комбинированных волновых числах в зоне инкремента. Благодаря существованию зон направленного переноса волнового пакета, область неустойчивости жидкой пленки к волновым пакетам конечной амплитуды больше области линейной неустойчивости. Механизм направленного переноса волнового пакета обнаружен также для наклонных мод при обдуве пленки сверхзвуковым потоком газа (рис.3). Этим эффектом объясняется "штриховая" структура взаимно перекрещивающихся волн на оплавленной поверхности тел, входящих в плотные слои атмосферы. Фронт волны "штриховой" структуры образует угол Maxa с вектором скорости набегающего потока газа.

Для развитого волнового течения жидких пленок построены линии тока и траектории жидких частиц. Для процессов пленочной конденсации построены изотермы волновых жидких пленок и найдены коэффициенты теплоотдачи.

В четвертой главе исследовано взаимодействие нелинейных волн в консервативных системах идеальной жидкости и в автокаталитических реакциях с диффузией. Для трех задач динамики идеальной жидкости; волн на поверхности круглой струи, капиллярно-гравитационных волн на поверхности тяжелой жидкости, волн в течении Кельвина-Гельмгольца найдено нелинейное уравнение Шредингера - аналог уравнения Гинзбурга-Ландау для консервативных систем. В рамках этого уравнения исследованы устойчивость волновых движений и найдены новые виды стационарных волн огибающих в консервативных системах.

В закритической области автокаталитических реакций с диффузией существуют две области неустойчивости. В одной из них реализуется смена устойчивости, то есть возникают стационарные периодические по пространству волны концентрации реагентов. Во второй области возбуждаются периодические во времени реакции. Для двух автокаталитических реакций: "Брюсселятора" и реак-

ции Белоусова-Жаботинского выведены уравнения Гинзбурга-Ландау и системы уравнений Гинзбурга-Ландау, описывающие взаимодействие волновых пакетов, принадлежащих различным областям неустойчивости. В результате нелинейного взаимодействия могут реализовываться решения, принадлежащие одной из областей неустойчивости, и возникать принципиально новые типы решений, содержащие периодичности во времени и в пространстве. В пространстве параметров автокаталитических реакций построены области существования различных видов реакций.

В пятой главе рассмотрены вопросы построения математических моделей неустойчивых систем методами параметрической идентификации. Системы уравнений химической кинетики, физико-химической гидродинамики содержат функциональные зависимости и коэффициенты скоростей химических реакций, теплоотдачи, массопереноса, скоростей фазовых переходов, определение которых возможно только экспериментально. Разработанные методы параметрической идентификации позволяют по ограниченному числу экспериментальных данных определить неизвестные параметры и оценить точность математической модели.

Размерность вектора экспериментальных измерений, как правило, значительно меньше размерности вектора оцениваемых параметров, в связи с чем возникает вопрос о возможности оценивания неизвестных параметров по ограниченному числу измерений. В диссертации сформулированы критерии наблюдаемости и идентифицируемости нелинейных систем, позволяющие решить вопрос о взаимно однозначном соответствии вектора измеряемых параметров и вектора неизвестных величин. Для новых постановок задач параметрической идентификации, характерных для химических и ядерных реакторов, камер сгорания, живых организмов, измерения в которых возможны только на входе и выходе распределенной системы, выведены критерии наблюдаемости и идентифицируемости.

В неустойчивых системах химии и гидродинамики реализуются хаотические и турбулентные режимы, характеризуемые значительным разбросом экспериментальных данных. Методы оценивания параметров таких систем должны быть робастны, то есть малочувствительны к разбросу экспериментальных данных. Такими свойствами обладает предложенный в диссертации асимптотический метод оценивания параметров сложных систем. Асимптотический метод оценивания параметров обеспечивает малую вероятность нахождения локального

минимума функции качества, являющегося критерием соответствия экспериментальных и расчетных данных, и обладает высокой склонностью сходимости, так как далекие от глобального минимума области в этом методе проходятся быстрее, чем в других методах.

Значительный разброс экспериментальных данных в задачах оценивания параметров неустойчивых систем приводит к появлению разброса оцениваемых параметров. Доверительные интервалы оцениваемых параметров отражают не только величину погрешности измерений, но и характеризуют степень хаотичности процесса. Для математических моделей, содержащих алгебраические, обыкновенные дифференциальные уравнения и уравнения в частных производных, разработаны методы расчета доверительных интервалов оцениваемых параметров по известным статистическим характеристикам коррелированных ошибок измерений. Разработанные методы позволяют к каждой оценке неизвестного параметра присоединить оценку его точности. На основе предложенных методов даны рекомендации по оптимальному планированию эксперимента в задачах оценивания параметров нелинейных систем.

Разработанными методами параметрической идентификации проведено оценивание коэффициентов гидравлического сопротивления и теплообмена в трубчатом конденсаторе. Функциональная зависимость для коэффициента гидравлического сопротивления записывалась в виде

$$C_f = \alpha_1 + \alpha_2 \left[1 - \left(\frac{R-\delta}{R} \right)^2 \right];$$

а для коэффициентов теплоотдачи – в виде:

$$\alpha_6 = \alpha_3 + \text{sign}(Re - \alpha_4) \cdot \alpha_5 (Re - \alpha_4)^{\alpha_6},$$

для $0 < Re \leq 160$

$$\text{и } \alpha_6 = \alpha_7 Re^{\alpha_8} \quad \text{для } 160 < Re < 600.$$

Математическая модель рабочего процесса содержит систему интегродифференциальных уравнений сохранений количества движения пара и пленки конденсата, уравнения энергии пленки конденсата, уравнения сохранения массы. Эксперименты проводились на конденсаторах различной длины. В процессе работы конденсаторов измерялись расходы пара и конденсата на входе и выходе конденсаторов, давление и температура на входе и выходе, распределение температуры стенки по длине конденсатора. В диссертации доказаны наблюдаемость и идентифицируемость математической модели конденсатора.

Параметрическая идентификация проводилась методами наискорейшего спуска, Ньютона, сопряженных градиентов. При решении задачи методом асимптотической идентификации искомые функции раскладывались в ряд по малым параметрам

$$\xi_2 = \frac{\lambda, \Delta T}{\mu, \varepsilon'}; \quad \xi_3 = \frac{C_p, \Delta T}{\varepsilon'}$$

В исходную систему уравнений малые параметры ξ_2 , ξ_3 введены при приведении ее к безразмерному виду таким образом, что малый параметр ξ_2 стоит перед инерционными членами и членами передачи импульса массопереносом в уравнениях количества движения, а малый параметр ξ_3 введен в уравнение теплосодержания пленки конденсата перед членами, определяющими конвективный теплоперенос и аккумуляцию тепла пленкой конденсата. Во всех применяемых методах найдены доверительные интервалы оцениваемых параметров и по критериям адекватности математической модели и реального процесса доказана адекватность полученных оценок реальному процессу конденсации. Наиболее высокая скорость сходимости отмечена в методе асимптотической идентификации. В методе оценивания параметров конденсатора по измерениям только на входе и выходе использован значительно меньший объем экспериментальной информации, чем в других методах. Доверительные интервалы оцениваемых параметров в этом методе незначительно превышают доверительные интервалы, найденные другими методами. Величина доверительных интервалов отражает не только экспериментальные погрешности измерений, но и разброс параметров, обусловленный хаотическим волновым движением пленки конденсата. Величины оцениваемых параметров и их 95% доверительные интервалы в методе оценивания по измерениям на концах конденсатора равны:

$$\alpha_1 = 0,006 \pm 0,001; \quad \alpha_2 = 0,42 \pm 0,03;$$

$$\alpha_3 = 1,12 \pm 0,06; \quad \alpha_4 = 36 \pm 2;$$

$$\alpha_5 = 0,064 \pm 0,009; \quad \alpha_6 = 0,118 \pm 0,008;$$

$$\alpha_7 = 0,28 \pm 0,02; \quad \alpha_8 = 0,30 \pm 0,1.$$

Полученные значения коэффициента теплоотдачи в широком диапазоне чисел Рейнольдса жидкой пленки ($0 < Re < 800$) хорошо совпадают с экспериментальными значениями коэффициента теплоотдачи внешней задачи конденсации для водяного пара и органических теплоносителей (рис.4). При умеренных числах Рейнольдса ($0 < Re < 50$) значения коэффициента теплоотдачи соответствуют полученным в тре-

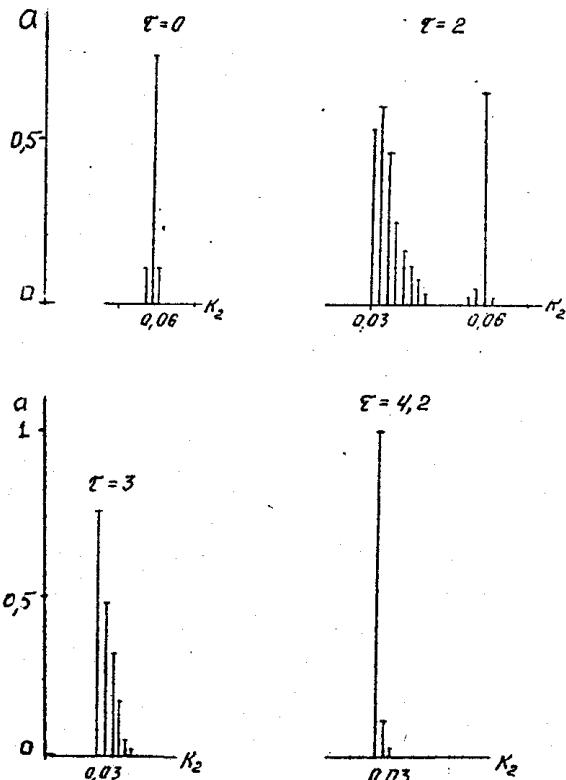


Рис. 3. Направленный по спектру перенос волнового пакета на поверхности оплавленной пленки, обдуваемой сверхзвуковым потоком газа

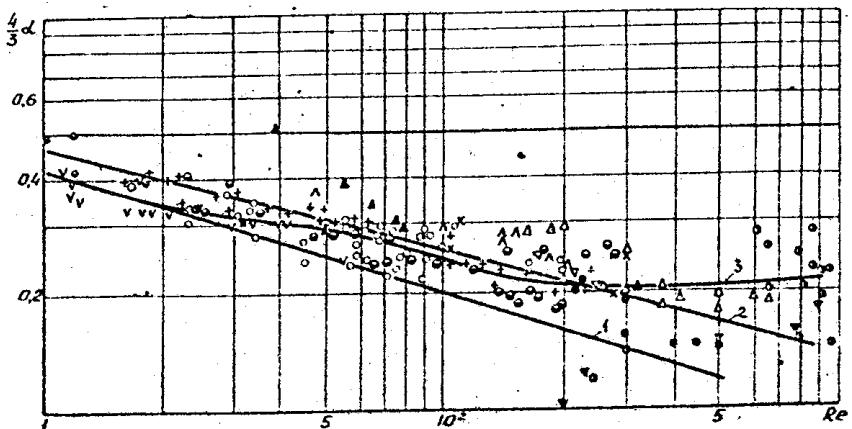


Рис.4. Коэффициент теплоотдачи при конденсации органических теплоносителей. Кривая 1 - по В.Нуссельту, кривая 2 - по С.С.Кутателадзе, кривая 3 - по зависимости, найденной методами идентификации

тьей главе диссертации расчетным значениям коэффициента тепло - отдачи при конденсации пара на волновой пленке конденсата.

Выводы

1. Разработаны методы математического моделирования долговременного поведения после потери устойчивости систем физической химии и физико-химической гидродинамики. Сформулированы допущения и ограничения подхода волновых пакетов. Область применения подхода волновых пакетов распространена на области неустойчивости автокаталитических реакций с диффузией, далекие от критических значений, и на неустойчивые гидродинамические системы, кривые нейтральной устойчивости которых не содержат "носика" нейтральной кривой.

2. Разработаны методы редукции математических моделей автокаталитических реакций с диффузией и систем физико-химической гидродинамики к нелинейным параболическим уравнениям эволюции волны огибающей Гинзбурга-Ландау. Для системы нелинейных уравнений в частных производных достаточно общего вида, описывающей автокаталитические реакции с диффузией и системы физико-химической гидродинамики, приведен вывод уравнений Гинзбурга-Ландау. В явном виде определены выражения для всех коэффициентов уравнений Гинзбурга-Ландау, позволяющие при исследовании конкретных систем не повторять вывод, а воспользоваться найденными зависимостями. Найдено, что все коэффициенты при линейных членах уравнений выражаются через параметры линейной устойчивости и их производные, что дает возможность определить физический смысл всех коэффициентов и построить систему безразмерных критериев подобия долговременного развития неустойчивости.

3. Для систем нелинейных уравнений в частных производных, описывающей развитие возмущений по пространству в системах физико-химической гидродинамики, выведено нелинейное параболическое уравнение Гинзбурга-Ландау конвективной неустойчивости. Коэффициенты полученного уравнения найдены в явном виде, коэффициенты при линейных членах выражены через параметры линейной устойчивости и их производные. Определена система безразмерных критериев подобия развития и взаимодействия возмущений по пространству. Найдена связь коэффициентов уравнений Гинзбурга-Ландау, описывающих развитие возмущений во времени и в пространстве. Показано, что при

выполнении условий Гастера возможна замена исследования нелинейного развития возмущений по пространству исследованием нелинейного развития возмущений во времени.

4. Проведен вывод уравнений Гинзбурга-Ландау для систем с медленно изменяющимися во времени и в пространстве параметрами. Показано, что медленная эволюция параметров с точностью до трех приближений асимптотического метода не изменяет вида уравнений Гинзбурга-Ландау, внося изменения только в коэффициент при линейном члене.

5. Найдены стационарные и монохроматические решения уравнений Гинзбурга-Ландау, описывающие стационарные и периодические по времени диссипативные структуры в автокаталитических реакциях с диффузией. Выведены критерии устойчивости диссипативных структур к продольным и поперечным возмущениям. Проанализировано отличие критериев вторичной неустойчивости в химически реагирующих и гидродинамических системах от аналогичных критерий в физике плазмы и динамике идеальной жидкости. Показано, что нелинейное развитие продольной неустойчивости в химически реагирующих системах может быть исследовано в рамках уравнения Курамото-Сивашинского.

6. Исследованы процессы самоорганизации в автокаталитических реакциях с диффузией в областях неустойчивости, для которых выполняется принцип смены устойчивости. Для модельной системы трех взаимодействующих волн в пространстве амплитуд построен фазовый портрет. Все устойчивые узлы расположены на осях координат, что свидетельствует о выживании в процессе нелинейного взаимодействия одной волны. Возникновение одной монохроматической волны концентраций в автокаталитических реакциях с диффузией со сменой устойчивости при случайному начальном поле концентрации показано численным расчетом уравнение Гинзбурга-Ландау. Динамика самоорганизации случайного поля возмущений в неограниченных системах со сменой устойчивости исследована методами теории случайных функций. Показано, что при стремлении времени к бесконечности все семиинварианты случайного поля возмущений стремятся к нулю, что свидетельствует об установлении в системе идеальной корреляции. Скорость стремления семиинвариантов к нулю зависит от их связи со средней величиной возмущения. Выявлена аналогия поведения семиинвариантов в процессах самоорганизации и в процессах вырождения поля изотропной турбулентности.

7. Исследовано развитие и распространение возмущений в неустойчивых автокаталитических реакциях из точечных источников возмущений. Отмечено, что в реакциях со сменой устойчивости распространение фронта волнового пакета реакции устойчиво. Линейная дисперсия увеличивает скорость распространения фронта реакции. При наличии зависимости фазы от амплитуды и малой линейной дисперсии распространение фронта волнового пакета становится неустойчивым, происходит разбиение волны огибающей на клиновидные волновые пакеты, сопровождающиеся резким расширением спектра волновых чисел. В процессе дальнейшей эволюции волны огибающей в ограниченном пространстве с периодическими граничными условиями система выходит на хаотический атTRACTор, характеризуемый сплошным частотным спектром, спадающей до нуля автокорреляционной функцией, положительностью наибольших показателей Ляпунова и широким спектром волновых чисел.

8. Найден механизм расширения спектра волновых чисел при возникновении турбулентности в химически реагирующих и гидродинамических системах. Отмечены общие закономерности развития турбулентности из различных начальных условий: из модуляционной неустойчивости, из фокусировочной неустойчивости, из локализованного волнового пакета. Численными расчетами показана возможность перехода хаотического режима в линейно недиспергирующих средах в монохроматическую волну при действии на систему белого шума.

9. Для областей, примыкающих к кривой нейтральной устойчивости, при наличии нелинейной зависимости фазы от амплитуды найден новый вид нелинейного взаимодействия волн в химически реагирующих и гидродинамических системах: направленный по спектру перенос волнового пакета.

10. Для неустойчивых химических и гидродинамических систем типа пограничного слоя, в которых отсутствует нелинейное затухание возмущений, найдено, что ограничение роста возмущений связано с расширением спектра волновых чисел в процессе развития многоходовой турбулентности. Найдены условия возникновения образований типа когерентных структур, в которых сосредоточена значительная часть энергии турбулентности. Исследовано развитие взрывной неустойчивости в течении Пуазейля.

II. Построена математическая модель трехмерного течения жидкой пленки, движущейся по наклонной плоской поверхности под дей-

ствием силы тяжести; касательных напряжений дозвукового, околозвукового или сверхзвукового потоков газа; при наличии фазовых переходов, интенсивных процессов тепломассопереноса, поверхностной вязкости, вдува жидкости через твердую стенку. Методами тензорного анализа найдены нелинейные граничные условия на возмущенной свободной поверхности трехмерной жидкой пленки, учитывающие адсорбцию пленкой поверхностно активных веществ, поверхностную вязкость, испарение, конденсацию, процессов переноса, возмущающее действие дозвукового, околозвукового или сверхзвукового потоков газа. Полученная математическая модель описывает течение жидких пленок в адсорберах, парогенераторах, конденсаторах, испарителях, камерах сгорания, в агрегатах металлургической промышленности, на поверхности горящего твердого топлива в ракетных двигателях, на оплавленной поверхности входящих в плотные слои атмосферы тел.

12. Разработаны методы анализа развития неустойчивости течений жидких пленок и методы расчета параметров развитого волнового течения. Проанализировано влияние силы тяжести, касательного напряжения, поверхностного натяжения, поверхностной вязкости, испарения, конденсации, адсорбции поверхностно активных веществ на кривые нейтральной устойчивости, инкремент, частоту, фазовую скорость, амплитуду растущих трехмерных волн. Найденные значения инкремента, фазовой скорости, амплитуды хорошо согласуются с экспериментальными данными. При малых числах Рейнольдса основным механизмом нелинейного взаимодействия волн является конкуренция мод, в результате чего в процессе нелинейного взаимодействия на поверхности пленки реализуется монохроматичная волна, что подтверждается экспериментальными данными. Для течений жидких пленок, числа Рейнольдса которых превышают 10, кривые инкремента содержат точки перегиба. В области, лежащей между кривой нейтральной устойчивости и кривой точек перегиба, возникает направленный по спектру перенос волнового пакета, в результате чего в этой области не могут реализоваться стационарные волновые течения, что соответствует экспериментальным данным. При умеренных числах Рейнольдса ($10 < Re < 50$) в окрестности гармоники максимального инкремента нелинейная зависимость фазовой скорости от амплитуды незначительна, вследствие чего основным механизмом нелинейного взаимодействия волн является конкуренция мод, и стационарные мо-

нохроматические волны в этой области устойчивы к возмущениям. Построены линии тока и траектории жидких частиц в волновом движении жидких пленок, определены профили скорости и температуры, найдены коэффициенты теплоотдачи волнового течения в процессах конденсации.

13. В рамках подхода волновых пакетов разработан метод редукции систем нелинейных уравнений в частных производных, описывающих волновые движения в течениях идеальной жидкости и физике плазмы, к нелинейному параболическому уравнению Шредингера. Для системы уравнений достаточно общего вида выведено нелинейное уравнение Шредингера. Все коэффициенты уравнения получены в явном виде, что дает возможность при исследовании конкретных систем не повторять вывод, а воспользоваться найденными выражениями.

14. Для трех систем динамики идеальной жидкости: капиллярно-гравитационных волн на поверхности тяжелой жидкости, волн на поверхности круглой струи идеальной жидкости, волнового движения в течении Кельвина-Гельмгольца выведено нелинейное уравнение Шредингера. В рамках этого уравнения проанализировано нелинейное взаимодействие волн, найдены стационарные решения уравнения Шредингера, исследована устойчивость однородных стационарных цугов волн.

15. Выведены уравнения Гинзбурга-Ландау для двух видов автокаталитических реакций с диффузией: "брюсселятора" и реакции Белоусова-Жаботинского. В рамках этого уравнения проанализировано нелинейное взаимодействие возмущений. В автокаталитических реакциях с диффузией существуют две области неустойчивости, в одной из них реализуется принцип смены устойчивости, во второй области возникают колебательные реакции. Для исследования нелинейного взаимодействия двух неустойчивых режимов, возбужденных в двух различных областях неустойчивости, выведена система уравнений Гинзбурга-Ландау, в рамках которой исследована реализуемость различных режимов.

16. Разработаны вопросы оценивания коэффициентов скоростей реакций, коэффициентов массопереноса, теплообмена в химических реакциях и в системах физико-химической гидродинамики. Сформулированы постановки задач оценивания параметров неустойчивых систем. Для новых постановок задач оценивания параметров стационарных распределенных систем по измерениям на границах получены критерии наблюдаемости и идентифицируемости.

17. Для математических моделей неустойчивых химически реагирующих и гидродинамических систем, содержащих алгебраические, обыкновенные дифференциальные уравнения и уравнения в частных производных, разработаны методы расчета статистических характеристик оцениваемых параметров по известным статистическим характеристикам измеряемых величин. Получены рекомендации для оптимального планирования экспериментов в задачах оценивания параметров неустойчивых систем.

18. Проведено оценивание параметров гидродинамики и теплообмена волновых и турбулентных режимов течения пленки конденсата в трубчатом конденсаторе. Найдены статистические характеристики разброса оцениваемых параметров, обусловленного как ошибками экспериментальных данных, так и хаотичностью волновых и турбулентных режимов течения пленки конденсата. Найденные значения коэффициентов межфазного трения и теплообмена хорошо согласуются с экспериментальными данными.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

t - время; X_1, X_2, X_3, Y, Z - пространственные координаты; Φ_0 - вектор невозмущенного состояния системы; $\tilde{\Phi}$ - вектор возмущений; K_1, K_2 - составляющие волнового числа по осям X_1, X_2 ; $2K_j$ - ширина полосы спектра волновых чисел; ω_i - инкремент; ω_x - частота; K_{10}, K_{20} - коэффициенты центра волнового пакета; К.С. - комплексно-сопряженные величины; ϵ - малый параметр; β_1, β_2 - постоянные Ландау; q - среднее число эффективно взаимодействующих мод на комбинированных волновых числах при возбуждении двух мод; U, V, W - проекции вектора скорости жидкости на оси X, Y, Z , соответственно; δ - толщина жидкой пленки; δ_0 - толщина жидкой пленки в невозмущенном состоянии; U_{10}, W_{10} - проекции вектора скорости в невозмущенной пленке на оси X, Z ; P_1, P_2, T_1 - давление, плотность и температура в слое жидкости; ρ_2, T_2 - плотность и температура газа; T_{cr} - температура твердой стенки; $\mathcal{J}_x, \mathcal{J}_y, \mathcal{J}_z$ - проекции вектора ускорения свободного падения на оси X, Y, Z ; \tilde{Z}_x, \tilde{Z}_z - проекции вектора касательного напряжения на оси X, Z ; λ - коэффициент теплопроводности жидкости; σ - коэффициент поверхностного натяжения; K, ϵ - коэффициенты поверхностной вязкости; Z' - скрытая теплота фазового перехода; α - коэффи-

циент теплоотдачи; ρ - поверхностная плотность; η - коэффициент кинематической вязкости жидкости; M - коэффициент динамической вязкости жидкости; Σ_1, Σ_2 - проекции возмущенного касательного напряжения на оси X, Z ; Π_1, Π_2 - составляющие возмущенного нормального напряжения; F_1, F_2 - функции, определяющие зависимость поверхностной плотности в процессах адсорбции от волновых параметров пленки; $\gamma_1 = \varepsilon(x_1 - \frac{\partial \omega_2}{\partial x_1} t)$; $\gamma_2 = \varepsilon(x_2 - \frac{\partial \omega_2}{\partial x_2} t)$.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Елюхин В.А., Холпанов Л.П., Малюсов В.А. Возникновение многомодовой турбулентности в гидродинамических и химически реагирующих системах // Доклады АН СССР. - 1984. - Т.278, - № 5. - С.1188 - 1191.
2. Елюхин В.А., Холпанов Л.П., Малюсов В.А. Самоорганизация неустойчивых режимов в химической технологии // Доклады АН СССР. - 1987. - Т.297, - № 4. - С.913 - 916.
3. Елюхин В.А., Холпанов Л.П., Малюсов В.А. Неустойчивые режимы в гидродинамических и химически реагирующих системах с линейным затуханием // Доклады АН СССР. - 1989. - Т.306, № 4. - С.906-910.
4. Елюхин В.А., Холпанов Л.П., Малюсов В.А. Асимптотическая идентификация и оптимизация сложных систем // Доклады АН СССР. - 1990. - Т.311, № 6. - С.1417 - 1420.
5. Елюхин В.А., Калимулина Л.А. Нелинейные диспергирующие волны на поверхности неизотермической жидкой пленки // Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа. - 1979. - № 1. - С.83 - 88.
6. Елюхин В.А. Образование и устойчивость диссипативных структур // Биофизика. - 1979. - Т.24, № 6. - С.1085 - 1089.
7. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Неустойчивые режимы в автокаталитических реакциях с диффузией. I. Нелинейное параболическое уравнение эволюции волны огибающей // Журн. физ. химии. - 1986. - Т.60, № 5. - С.1274 - 1276.
8. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Неустойчивые режимы в автокаталитических реакциях с диффузией. II. Самоорганизация возмущений // Журн. физ. химии. - 1986. - Т.60, № 5. - С.1276 - 1280.
9. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Неустойчивые режимы в автокаталитических реакциях с диффузией. III. Классификация закритических режимов // Журн. физ. химии. - 1987. - Т.61, № 3. - С.842-844.

- I0. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Неустойчивые режимы в автокаталитических реакциях с диффузией. IУ. Развитие локализованных волновых пакетов. Химическая турбулентность // Журн.физ.химии. - 1989. - Т.63, № 5. - С.1202 - 1207.
- II. Елюхин В.А., Тимофеева Д.А. Линейная устойчивость течения жидкой пленки в тепломассообменных процессах. // Теорет. основы хим.технол. - 1980. - Т.14, № 4. - С.542 - 548.
- I2. Елюхин В.А., Холпанов Л.П., Малосов В.А. Волновые течения неизотермических жидких пленок // Теорет. основы хим.технол.- 1983. - Т.17, № 4. - С.484 - 489.
- I3. Елюхин В.А. Волновые режимы течения жидких пленок // Теорет.основы хим.технол. - 1985. - Т.19, № 5. - С.630 - 636.
- I4. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Определение статистических характеристик оцениваемых параметров в задачах идентификации химико-технологических систем. // Теорет.основы хим.технол. - 1987. - Т.21, № 4. - С.522 - 528.
- I5. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Оценивание параметров химико-технологических систем с измерениями на границе // Теорет. основы хим.технол. - 1988. - Т.22, № 5. - С.673 - 680.
- I6. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Самоорганизация, маломодовый хаос и многомодовая турбулентность в неустойчивых системах химической технологии // Теорет.основы хим.технол. - 1989. - Т.23, № 6. - С.741 - 752.
- I7. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Статистическое оценивание параметров в задачах идентификации // Теорет. основы хим.технол.- 1990. - Т.24, № 6. - С.784 - 793.
- I8. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Идентификация сложных химико-технологических и теплофизических процессов // Теорет.основы хим.технол. - 1992. - Т.26, № 3. - С.373 - 382.
- I9. Елюхин В.А. Автомодельные решения внешней задачи конденсации // Инж.-физ.журн. - 1978. - Т.35, № 2. - С.338 - 343.
20. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Развитие и взаимодействие возмущений в неустойчивых гидродинамических и химически реагирующих системах // Механика неоднородных и турбулентных потоков. - М.: Наука, 1989. - С.132 - 142.
21. Елюхин В.А., Калимулина Л.А., Сазонов В.В. Нелинейные диспергирующие волны в консервативных системах // Динамика систем: Межвузовск.сб. - Горький, 1980. - С.126 - 141.

22. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Оценивание точности математических моделей теплофизических систем // Весці Акадэміі навук Беларусі . Серыя фізіка-энергетических науку. - 1992. - № 2.- С.90 - 98.
23. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Условия самоорганизации неустойчивых процессов химической технологии. // Молекул.газодинамика и мех.неоднородных сред. Матер.Всес.конф. по кинет. теории разрежен. и плот.газ.смесей и мех.неоднородных сред. Ленинград.- 1987. - М.1990. - С.131 - 137.
24. Елюхин В.А. Метод многомасштабных разложений в задачах нелинейной устойчивости распределенных систем при возбуждении возмущений из непрерывной полосы волновых чисел // П Всесоюзн. конф. по асимптотическим методам в теории сингулярно возмущен. уравнений. - Алма-Ата: Наука, 1979. - Т.2. - С.128 - 130.
25. Елюхин В.А. Гидродинамика и тепломассоперенос волновых течений жидких пленок // Тепло- и массоперенос. - Минск, 1972. - Т.4. - С.63 - 72.
26. Елюхин В.А. Влияние процессов тепломассопереноса на течение жидких пленок // Тр. У Всесоюзн. конф. по теплообмену и гидравл.сопротивл. - Ленинград, 1974. - Т.2. - С.284 - 287.
27. Елюхин В.А., Марков В.В. Идентификация теплогидравлических систем с распределенными параметрами // Тр. У Всесоюзн . конф. по теплообмену и гидравл.сопротивл. - Ленинград, 1974. - Т.2. - С.280 - 283.
28. Елюхин В.А., Марков В.В. Исследование конденсации насыщенного и влажного пара в цилиндрическом канале // Тр. У Всесоюзн. конф. по теплообмену и гидравл.сопротивл. - Ленинград, 1974. - Т.1.- С.116 - 117.
29. Елюхин В.А., Кузнецов Г.Ф. Методы оценки параметров вихревых аппаратов // Тр. П Всесоюзн.научно-техн.конф. по исследован.вихр.эффекта и его использован. в техн. - Куйбышев, 1975.
30. Елюхин В.А., Кузнецов Г.Ф., Политов В.С. Взаимодействие закрученного потока газа и жидкой пленки в вихревых аппаратах // Тр. П Всесоюзн. научно-техн.конф. по исследован. вихр.эффекта и его использован. в техн. - Куйбышев, 1975.
31. Елюхин В.А., Марков В.В. Идентификация стохастических турбулентных систем. // Тезисы докл.Всесоюзн.конф. "Стochasticеские системы управления". - Челябинск, 1976. - С.97 - 98.

32. Елюхин В.А., Калимулина Л.А. Исследование гидродинамики и тепломассообмена нестационарных течений жидкых пленок // Тепломассообмен - У - Минск, 1976. - Т.4. - С.33 - 40.
33. Елюхин В.А., Павленко В.И. Методы расчета стохастических теплофизических процессов в технологических системах // Тр. IV Всесоюзн.конф. "Теплофизика технолог.процесс". - Тольятти, 1976. - С.9.
34. Елюхин В.А, Павленко В.Н. Оценка теплофизических параметров сложных технологических систем // Тр. IV Всесоюзн.конф. "Теплофизика технолог. процесс". - Тольятти, 1976. - С.100-101.
35. Елюхин В.А., Павленко В.Н. Идентификация сложных систем по измерениям на концах // Тез.докладов Всесоюзн.конф. "Методы и средства машинной диагностики состоян.газотурбин.двигателей". - Харьков, 1977. - С.119 - 121.
36. Елюхин В.А., Калимулина Л.А. Гидродинамика и теплообмен раздельного волнового течения двухфазного потока в каналах // Тез.докл. IV Всесоюзн.конф. по теплообмену и гидравл.сопротивл. при движ.двухфазн.потока в элемент.энергет.маш. и аппарат. - Ленинград, 1978. - Т.1. - С.190 - 192.
37. Елюхин В.А. Исследование и идентификация рабочих процессов в трубчатых конденсаторах // Тез.докл. VI Всесоюзн.конф. по теплообмену и гидравл. сопротивл. при движ. двухфазного потока в элемент.энергет.маш. и аппарат. - Ленинград, 1978. - Т.2. - С.26 - 28.
38. Елюхин В.А. Методы идентификации и оценки параметров теплообменных аппаратов // Тез.докл. VI Всесоюзн.конф. по теплообмену и гидравл. сопротивл. при движ. двухфазн.потока в элемент. энергет.маш. и аппарат. - Ленинград, 1978. - Т.2. - С.267 - 269.
39. Елюхин В.А., Холланов Л.П. Идентификация химико-технологических систем в условиях ограниченности экспериментальных измерений // Тр. I Всесоюзн. конф."Методы кибернетики хим.-технол. процесс". - Москва, 1984.
40. Елюхин В.А., Холланов Л.П. Оценивание достоверности математических моделей химико-технологических систем // Тез.докл. У Всесоюзн.научн.конф. "Математ.моделир. сложных хим.-технол. систем". - Казань, 1988. - С.152 - 153.

41. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Асимптотическая идентификация сложных химико-технологических систем // III Всесоюзн.научн. конф. "Методы кибернетики хим.-технол.процессов". - Москва, 1989. - Т.1. - С.29 - 30.
42. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Применение функций чувствительности к исследованию, идентификации, оптимизации и диагностике сложных систем // III Всесоюзн.научн.конф. "Методы кибернетики хим. - технол.процессов". - Москва, 1989. - Т.2. - С.82
43. Елюхин В.А., Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.В. Теплообмен и гидродинамика в неоднородных неустойчивых псевдоожженных слоях. // Тепломассообмен. - ММФ. - 92. - Минск, 1992. - Т.5.
44. Елюхин В.А., Холпанов Л.П., Малюсов В.А. Условия самоорганизации неустойчивых режимов в химической технологии // - Современные машины и аппараты химических производств. Докл. Всесоюзной конф. "Химтехника-88". - 1988, часть I. - С.349 - 354.
45. Елюхин В.А., Кириллов В.В. Конденсация потока пара в цилиндрическом канале при турбулентном течении пленки конденсата // Динамика гидравл.систем. Тр.Челяб.политехн.ин-та. - Челябинск, 1972. - № 115. - С.135 - 140.
46. Елюхин В.А., Даурских Ю.К. Конденсация турбулентного потока пара в канале // Динамика гидравл.систем. Тр. Челяб.политехн. ин-та. - Челябинск, 1972. - № 115. - С.121 - 125.
47. Елюхин В.А. Увеличение информации и самоупорядочения при эволюции нелинейных систем // Сб.тр.Челяб.политехн.ин-та. - Челябинск, 1976. - № 180. - С.46 - 50.
48. Елюхин В.А., Калимулина Л.А. О семиинвариантном подходе к слабо и линейным стохастическим процессам // Сб.тр.Челяб.политехн.ин-та. - Челябинск, 1976. - № 180. - С.42 - 45.
49. Елюхин В.А., Малиновский Ю.Г. О применении методов оптимизации в задачах идентификации и оценки параметров нелинейных систем // Сб.тр. Челяб.политехн.ин-та. - Челябинск, 1976. - № 180. - С.37 - 41.
50. Елюхин В.А., Калимулина Л.А. Устойчивость волны огибающей неконсервативных систем // Сб.научн.тр. Челяб.политехн.ин-та. - Челябинск, 1978. - № 219. - С.135 - 138.
51. Елюхин В.А. Методы идентификации теплофизических систем. // Управл.микроклимат. в обогреваем. зданиях. - Челябинск, 1979. - С.99 - 101.

52. Елюхин В.А., Калимулина Л.А. Гидродинамика и тепломассоперенос неустойчивого раздельного течения двухфазных сред // Управл.микроклимат. в обогреваем.зданиях. - Челябинск, 1979. - С.86 - 90.
53. Елюхин В.А., Сазонов В.В. Распространение волновых пакетов в теплофизических системах // Управл.микроклимат. в обогреваем.зданиях. - Челябинск, 1979. - С.98 - 99.
54. Елюхин В.А. Нелинейное параболическое уравнение эволюции волн огибающей в неконсервативных системах // Сб.научн.тр. Челяб.политехн. ин-та. - Челябинск, 1980. - № 252. - С.40 - 46.
55. Елюхин В.А. Нелинейное развитие гидродинамической неустойчивости. // Сб.научн.тр. Челяб.политехн. ин-та. - Челябинск, 1981. - № 267. - С.137 - 144.
56. Елюхин В.А. Переход к турбулентности в гидродинамике. // Динамика теплофизич.процесс. Сб.научн.тр. Челяб. политехн. ин-та. - Челябинск, 1987. - С.12 - 19.
57. Елюхин В.А. Развитие неустойчивости в системах с линейным затуханием // Динамика теплофиз.процесс. Сб.научн. тр.Челяб. политехн.ин-та. - Челябинск, 1989. - С.26 - 34.
58. Елюхин В.А. Уравнения Гинзбурга-Ландау абсолютной и конвективной неустойчивостей в неоднородных системах // Динамика теплофиз.процесс. Сб. научн.тр. Челяб.гос.техн.ун-та. - Челябинск, 1991. - С.33 - 47.
59. Елюхин В.А., Голодков В.А., Торсупов В.Г. Линейная устойчивость слоя жидкости // Динамика теплофиз.процесс. Сб.научн. тр.Челяб. гос.техн.ун-та. - Челябинск; 1991. - С. II6 - I24.
60. Елюхин В.А. Нелинейные параболические уравнения эволюции во времени и в пространстве волны огибающей в неустойчивых системах // Деп. в ВИНИТИ, № 6444-82 Деп. - Челябинск, 1982. - 34 с.
61. Елюхин В.А., Прокудина Л.А. Применение метода узких полос для исследования течений трехмерных тонких жидких пленок.// Деп. в ВИНИТИ, № 3062-82 Деп. - Челябинск, 1982. - 33 с.
62. Елюхин В.А., Прокудина Л.А. Развитие трехмерных возмущений на поверхности тонкого слоя вязкой жидкости // Деп. в ВИНИТИ, № 6443-82 Деп. - Челябинск, 1982. - 41 с.

63. Елюхин В.А., Прокудина Л.А. Самоорганизация случайных возмущений в распределенных системах // Деп. в ВИНИТИ, № 6430-82. Деп. - Челябинск, 1982. - 42 с.
64. Елюхин В.А. Многомодовая неустойчивость волны огибающей в неконсервативных системах // Деп. в ВИНИТИ, № 4107-83 Деп. - Челябинск, 1983. - 13 с.
65. Елюхин В.А., Прокудина Л.А. Вторичная неустойчивость трехмерного волнового течения тонкого слоя вязкой жидкости // Деп. в ВИНИТИ, № 7031-83 Деп. - Челябинск, 1983. - 10 с.
66. Елюхин В.А., Прокудина Л.А. Нелинейное разложение продольной неустойчивости волнового течения жидкой пленки // Деп. в ВИНИТИ, № 7042-83 Деп. - Челябинск, 1983. - 12 с.
67. Елюхин В.А., Холпанов Л.П. Развитие и взаимодействие возмущений из непрерывной полосы волновых чисел в неустойчивых системах // Деп. в ВИНИТИ, № 1849-88, - Черноголовка, 1988. - 67 с.
68. Елюхин В.А., Прокудина Л.А. Уравнение Гинзбурга-Ландау брюсселатора // Деп. в ВИНИТИ, № 6038-1388. - Челябинск, 1988. - 18 с.

Р.Елюхин

Издательство Челябинского
государственного технического университета

ЛР № 020364. 20.01.92. Подписано в печать 28.06.94.

Формат бум. 60x84 I/16. Печать офсетная. Печ. л. 2,25.

Уч.-изд.л. 2. Тираж 100 экз. Заказ 146/371.

УОП издательства. 454080. г. Челябинск, пр.им. В.И. Ленина, 76.