

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Никулин Илья Андреевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ТЕЧЕНИЯХ ЖИДКОСТИ В РАМКАХ НЕЛОКАЛЬНОЙ
ГИДРОДИНАМИКИ

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2007 г.

Работа выполнена на кафедре физической механики
математико-механического факультета
Санкт-Петербургского государственного университета

Научный руководитель – доктор физико-математических наук,
доцент Хантулева Татьяна Александровна

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник Цибаров Валерий Афанасьевич
- кандидат технических наук,
старший научный сотрудник Скопин Николай Александрович

Ведущая организация – Балтийский государственный технический университет
"Военмех" им. Д.Ф. Устинова

Защита состоится ___ _____ 2007 г. в ___ ч. ___ мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.232.30 по защите диссертаций на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук при Санкт-
Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-
Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д.28.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького
Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034,
Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан ___ _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

С.А.Зегжда

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена развитию нелокально-гидродинамического подхода к описанию неравновесных процессов переноса в области построения моделей пространственно-временных переходных процессов, характеризующихся изменением механизма переноса на различных этапах развития процесса.

Актуальность проблемы. Одной из основных проблем современной гидромеханики является проблема единообразного описания движения сплошной среды, связанная, прежде всего, с выбором замыкающих соотношений, дополняющих уравнения баланса. Наиболее ярко эта проблема проявляется для задач, лежащих за границей применимости классических моделей, когда выбор тех или иных замыкающих уравнений является нетривиальной задачей. Большинство имеющихся гидродинамических моделей неравновесных процессов справедливы только в достаточно узком диапазоне параметров, а попытки их обобщения на более широкие классы задач, как правило, приводят к весьма громоздким построениям, теряющим физическую наглядность. В первую очередь, это относится к переходным процессам, таким как ламинарно-турбулентный переход. Эти процессы характеризуются весьма сложным механизмом взаимодействия в среде, который существенно зависит от стадии процесса, от режима его протекания, от внешних условий нагружения. Одним из путей решения данной проблемы является развитие нелокальной гидродинамики как фундаментальной теории, базирующейся на строгих результатах неравновесной статистической механики, и как гибкого аппарата решения задач, применимого в силу своей самосогласованности в тех случаях, когда строгая модель явления либо не известна, либо принципиально не может быть построена априори.

В диссертации применяется нелокально-гидродинамический подход, предложенный на кафедре физической механики Санкт-Петербургского

государственного университета. Основопологающими для данного научного направления стали результаты Филиппова Б.В. и Хантулевой Т.А., которым удалось построить математическую модель интегральных ядер переноса в уравнениях обобщенной гидродинамики Зубарева Д.Н. Применение нелокально-гидродинамического подхода к описанию таких неравновесных процессов переноса как течения многофазных сред и сильноградиентные течения было проведено в работах Хантулевой Т.А. и Родионова А.А. При этом изучалось влияние нелокальных корреляций, возникающих в среде в неравновесных условиях, на механизм тепло-, массопереноса. Следующим этапом развития нелокальной гидродинамики является разработка модели, учитывающая возможность изменения пространственно-временных корреляционных масштабов, другими словами, возможность изменения механизмов переноса на различных стадиях процесса.

Цель работы. Целью работы является построение нелокально-гидродинамических моделей пространственно-временных переходных процессов с учетом динамически меняющейся внутренней структуры течения. Для достижения данной цели в ходе выполнения работы необходимо было решить следующие задачи, а именно, проанализировать современные методы описания переходных процессов, развить и уточнить методические основы построения нелокальных моделей переходных процессов, разработать соответствующую вычислительную процедуру решения задач нелокальной гидромеханики и решить ряд модельных тестовых задач гидродинамики (задача о плоской затопленной струе, задача Куэтта) с использованием развиваемого математического аппарата.

Методы исследования. В работе использовались методы математического анализа, математической физики, гидро- и термодинамики необратимых процессов переноса, математического моделирования для построения и уточнения вида зависимости параметров интегральных ядер переноса от распределений гидродинамических полей, методы теории адаптивного

управления для описания изменения структурных параметров на различных стадиях протекания переходного процесса.

Научная новизна. Новизна работы состоит в обосновании методических положений по построению моделей переходных процессов в рамках нелокальной гидродинамики. Впервые в работе предложена и реализована вычислительная процедура с наличием обратных связей между разными масштабными уровнями описания на различных стадиях процесса. Реализация методов управления по структурным параметрам позволяет описать многообразие сценариев эволюции гидродинамической системы в переходных режимах.

Основные результаты работы, выносимые на защиту:

1. Метод построения нелокально-гидродинамических моделей пространственно-временных переходных процессов.

2. Итерационная самосогласованная вычислительная процедура решения задач нелокальной гидродинамики переходных процессов, реализованная для описания ламинарно-турбулентного перехода в плоской затопленной струе жидкости.

3. Модель нестационарного течения Куэтта в нелокальной постановке с наличием динамически изменяющегося механизма взаимодействия потока с твердой границей.

Практическое значение. В качестве практического приложения результаты работы могут быть использованы для расчета реальных высокоскоростных течений сред в трубах, каналах и струйных потоках, а также для создания новых вычислительных комплексов, оперирующих современными достижениями нелокальной теории. Результаты работы вошли в отчеты за 2005 и 2006 годы по НИР "Поисковые исследования и разработка новых методов управления гидродинамическими полями образцов ВВГ на основе использования эффекта вихре-волнового взаимодействия с жидкостью в целях улучшения их тактико-технических характеристик", выполняемой СПбНЦ РАН.

Достоверность полученных результатов. В основании нелокальной гидродинамики лежат строгие результаты неравновесной статистической механики, а использованное в работе модельное выражение для интегрального ядра переноса успешно применялось ранее при описании ряда неравновесных гидродинамических явлений. Новый подход к постановке и решению задач нелокальной гидродинамики был апробирован на ряде традиционных тестовых задач, а именно, задаче о плоской струе жидкости и задаче о течении Куэтта. Решения, полученные для этих задач, их анализ и качественное сравнение с известными экспериментальными результатами позволили сделать вывод о том, что развиваемый подход адекватно описывает течения в области ламинарно-турбулентного перехода.

Публикации. Основные результаты работы были опубликованы в ряде статей [1-5], в том числе в одном издании по перечню ВАК [5].

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на ряде конференций: Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (СПб, СПбНЦ РАН, 2004), 14-ая Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, ИМСС УрО РАН, 2005), Устойчивость и процессы управления (СПб, СПбГУ, 2005).

Структура работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, состоящего из 70 наименований. Общий объем работы составляет 135 страниц текста и 13 иллюстраций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе излагаются методические основы построения нелокальных моделей переходных процессов при наличии обратных связей между гидродинамическим и мезоскопическим структурным уровнями описания. Для этого приводится краткое описание нелокально-гидродинамического подхода, а также основных путей к самосогласованному замыканию системы уравнений нелокальной гидромеханики. Далее рассматривается возможность применения современных методов теории управления для описания эволюции структурных параметров и приводится разработанная итерационная процедура (рис. 1) решения задач нелокальной гидромеханики, которая предназначена для описания процесса ламинарно-турбулентного перехода в течениях жидкости.

Основные стадии предлагаемого метода заключаются в следующем:

необходимо оценить величину производства энтропии для начального и конечного (реального или гипотетического) состояния системы, и таким образом определить, является ли рассматриваемый процесс переходным;

построить механизм регуляции, переводящий систему из начального режима в конечный – наиболее выгодный с точки зрения минимизации интегрального производства энтропии;

определить основные закономерности влияния нелокальных корреляций в среде на распределения гидродинамических полей и уточнить, если требуется, конкретный вид модельного выражения для интегрального ядра переноса;

поставить начальные условия для системы интегро-дифференциальных нелокальной гидромеханики. В большинстве случаев необходимо по известному распределению гидродинамических переменных, например по профилю скорости среды, согласованным образом подобрать начальные значения нелокальных параметров;

применить разработанную вычислительную процедуру и рассчитать изменение как макроскопических (гидродинамических), так и мезоскопических (структурных) переменных по времени или пространству.

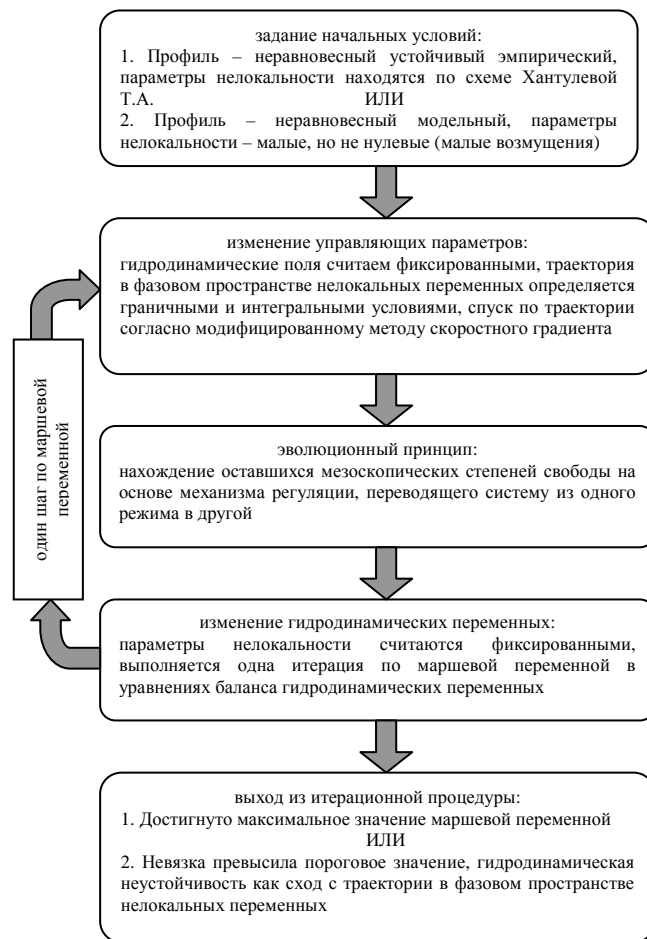


Рис. 1 – Схема вычислительной процедуры

Существенную роль в построении нелокально-гидродинамических моделей переходных процессов играет механизм самосогласованного замыкания задачи, с помощью которого описывается зависимость модельных параметров нелокальности от распределения гидродинамических полей. Замыкание задач в рамках нелокально-гидродинамического подхода должно производиться с учетом непрерывности гидродинамических полей вплоть до границ течения. При этом выполнение граничных условий может быть реализовано только за счет наличия структурных параметров. Оставшиеся мезоскопические степени свободы могут быть определены при помощи принципа минимизации величины производства энтропии в системе по

параметрам нелокальности. Данный гипотетический принцип является обобщением теоремы Пригожина о стационарных неравновесных состояниях на нестационарные процессы. Формализация принципа производится при помощи модифицированного метода скоростного градиента, который заключается в том, что скорость изменения управляющих параметров (параметры нелокальности) пропорциональна градиенту от минимизируемого функционала. При этом граничные и интегральные условия, наложенные на систему, определяют траекторию движения в пространстве параметров нелокальности, а уравнения метода скоростного градиента задают скорость спуска по данной траектории по поверхности производства энтропии в сторону уменьшения данной величины.

В свою очередь, изменение параметров нелокальности приводит к изменению механизма передачи импульса в среде (во всем диапазоне от диффузионного до волнового). Такой самосогласованный подход позволяет рассчитать эффекты, связанные с явлением структуризации (самоорганизации) среды в неравновесных условиях, и описать многообразие возможных вариантов эволюции гидродинамической системы.

Во второй главе приведена постановка задачи об истечении плоской струи из щели конечного размера в рамках нелокальной гидродинамики. Система уравнений, определяющих изменение гидродинамических и структурных параметров по продольной координате (x), включает в себя (в безразмерных переменных):

- уравнение неразрывности для продольной (u) и поперечной (v) компонент скорости несжимаемой среды (y – поперечная координата)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0;$$

- уравнение баланса импульса

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial y} \left(S \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dy'}{\varepsilon} \exp \left(-\frac{\pi (y' - y - \gamma(y))^2}{\varepsilon^2} \right) \frac{\partial u}{\partial y'} \right),$$

где фигурируют параметры нелокальности ε (радиус нелокальных корреляций), γ (параметр поляризации), S (нормировочный параметр, играющий роль эффективной вязкости), а также введено число Рейнольдса Re ;
 - уравнения модифицированного метода скоростного градиента, при помощи которых описывается закон внутреннего управления обеспечивающего обратную связь между двумя (макроскопическим и мезоскопическим) уровнями описания

$$\dot{\varepsilon} = -d_\varepsilon \nabla_\varepsilon \sigma, \quad \dot{\gamma} = -d_\gamma \nabla_\gamma \sigma,$$

$$\sigma = S \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dy'}{\varepsilon} \exp\left(-\frac{\pi(y' - y - \gamma(y))^2}{\varepsilon^2}\right) \frac{\partial u}{\partial y'} \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Здесь символом ∇ обозначен градиент по соответствующей переменной от величины интегрального производства энтропии σ (минимизируемый функционал процесса), точкой сверху – полная производная по времени, а d_ε и d_γ представляют собой эмпирические постоянные, задающие скорость протекания процессов в пространстве структурных (нелокальных) переменных.

В предложенной модели учитываются наличие промежуточного (структурного) уровня описания, наличие согласованных взаимосвязей между гидродинамическими и нелокальными переменными, принципы теории адаптивного управления для описания изменения структурных параметров, параметров нелокальности. Таким образом, модель позволяет учесть изменение механизма перераспределения напряжений поперек потока в зависимости от продольной координаты, связанное с зарождением и ростом нелокальных корреляций в среде, и описать струйное течение в области ламинарно-турбулентного перехода. Было проведено исследование основных закономерности влияния нелокальных корреляций на изменение профиля скорости в струе и получено численное решение задачи о течении в области перехода.

В качестве критерия перехода был апробирован принцип, согласно которому предпочтительный режим течения (ламинарный или турбулентный)

характеризуется меньшим значением величины интегрального производства энтропии σ , чем гипотетический противоположный режим. Расчет изменения величины σ по продольной координате (рис. 2) для предельных режимов течения позволил выявить точку бифуркации, переключения с ламинарного режима на турбулентный, положение которой хорошо согласуется с экспериментальными данными.

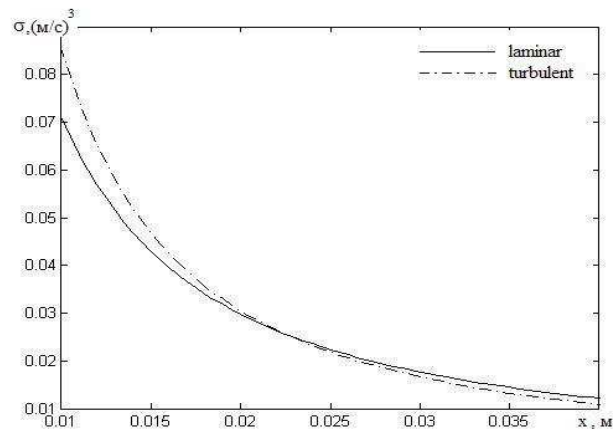


Рис. 2 – График теоретической зависимости интегрального производства энтропии σ от продольной координаты X ; сплошная линия – ламинарный режим, штрих-пунктир – турбулентный режим.

В третьей главе рассмотрен критерий ламинарно-турбулентного перехода применительно к сдвиговому течению жидкости (течение Куэтта). Показано, что при наличии дополнительных предположений относительно связи двух критериальных параметров (заданное сдвиговое напряжение и толщина ламинарного подслоя) теория позволяет рассчитать критическое число Рейнольдса.

Далее приведена постановка задачи о разгоне течения Куэтта под воздействием постоянного сдвигового напряжения на границе в рамках нелокальной гидродинамики. Система уравнений, определяющих изменение гидродинамических и структурных параметров во времени t , включает в себя:

- уравнение баланса импульса для продольной скорости u

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(S \int_{-h/2}^{h/2} \frac{dy'}{\varepsilon} \exp \left(-\frac{\pi(y' - y - \gamma(y))^2}{\varepsilon^2} \right) \frac{\partial u}{\partial y'} \right),$$

где параметры нелокальности, также зависящие от времени, имеют следующие размерности $[\varepsilon]=[\gamma]=L$ (длина), $[S]=L^2T^{-1}$ (кинематическая вязкость);

- одно (в силу симметрии задачи) условие на границе

$$\tau_{wall} = S \int_{-h/2}^{h/2} \frac{dy'}{\varepsilon} \exp\left(-\frac{\pi(y'-h/2-\gamma(h/2))^2}{\varepsilon^2}\right) \frac{\partial u}{\partial y'},$$

где τ_{wall} представляет собой напряжение сдвига, заданное на границах течения $y = \pm h/2$;

- уравнения модифицированного метода скоростного градиента с одной эмпирической постоянной d , в которых градиент от величины производства энтропии σ вычисляется вдоль траектории в пространстве параметров нелокальности (ε, γ) , что обозначено символом ∇'

$$\dot{\varepsilon} = -d\nabla'_{\varepsilon}\sigma, \quad \dot{\gamma} = -d\nabla'_{\gamma}\sigma,$$

$$\sigma = S \int_{-h/2}^{h/2} dy \int_{-h/2}^{h/2} \frac{dy'}{\varepsilon} \exp\left(-\frac{\pi(y'-y-\gamma f(y))^2}{\varepsilon^2}\right) \frac{\partial u}{\partial y'} \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Построенная модель ламинарно-турбулентного перехода в течении Куэтта описывает механизм изменения взаимодействия потока с твердой границей за счет возникновения и развития структур (слоев), наличие которых обуславливается нелокальными корреляциями в среде. При этом при рассмотрении режима разгона жидкости из состояния покоя различные варианты эволюции системы в пространстве параметров нелокальности приводят к формированию существенно разных профилей скорости. При отсутствии корреляций устанавливается классический линейный профиль скорости. Изменение корреляционных характеристик в среде согласно принципу минимизации производства энтропии приводит к установлению нелинейных (близких к степенным) профилей. Различный характер поведения структурных параметров в зависимости от текущего макроскопического состояния проиллюстрирован на рис. 3, где показаны поверхность производства энтропии и траектория движения системы в пространстве параметров нелокальности для различных профилей скорости среды $u = u(y)$.

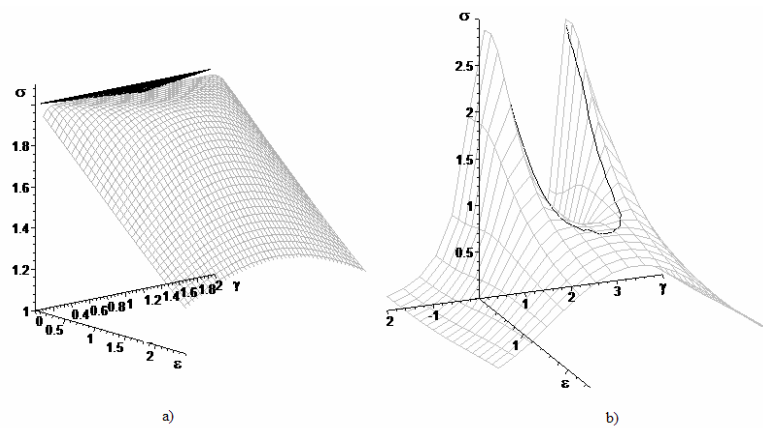


Рис. 3 – Траектория движения системы $(\epsilon, \gamma, \sigma)$
 в "фазовом" пространстве параметров нелокальности
 а) для классического профиля $u(y) = y$
 б) для начального профиля $u(y) = y^{11}$

Далее при помощи метода установления, учитывающего возможность подстройки структурных параметров под режим течения, было получено решение задачи о поиске стационарных неклассических решений задачи Куэтта в рамках нелокальной гидродинамики. Такой подход является упрощением предложенного в первой главе метода построения нелокальных моделей переходных процессов, позволяющим при этом качественно описать возможные сценарии перехода к стационарному неравновесному состоянию.

В заключении работы сформулированы основные выводы диссертации.

В диссертации разработан новый метод построения нелокально-гидродинамических моделей, который предназначен для моделирования переходных процессов в течениях жидкости. Характерной особенностью метода является наличие двух уровней описания, поскольку помимо гидродинамического макроскопического уровня существенный вклад в поведение системы вносит структурный мезоскопический уровень описания. Наличие обратной связи, когда изменение гидродинамических и структурных переменных определяются друг через друга, предполагает возможность проявления эффектов самоорганизации и саморегуляции в ходе протекания неравновесного процесса, которые и являются признаками изменения режима течения. Таким образом, учет генерации и эволюции внутренней структуры

среды под воздействием сильно неравновесных условий протекания процесса переноса дает возможность применять разработанный метод для создания моделей течений, принципиально не описываемых классической гидродинамической теорией. При этом самосогласованный механизм взаимодействия структурного и гидродинамического уровней системы позволяет создавать "гибкие" модели переходных процессов и, следовательно, открывает возможность для единообразного описания широкого класса сложных гидродинамических явлений. Для применения предложенного метода к решению конкретных задач гидродинамики, связанных с ламинарно-турбулентным переходом в течениях жидкости, была разработана самосогласованная итерационная процедура.

Для описания явления ламинарно-турбулентного перехода в струйных и сдвиговых течениях в работе были построены модели плоского струйного течения и течения Куэтта, учитывающие изменение механизма взаимодействия внутри среды на разных стадиях процесса.

Нелокально-гидродинамическая модель струйного течения описывает течение в области перехода, в которой происходит потеря устойчивости ламинарного режима течения (появление флуктуаций скорости) и зарождение корреляций в среде, определяющих турбулентный режим течения при удалении от источника струи. Расчет поведения параметров нелокальности, характеризующих внутреннюю структуру среды, подтвердил предположение о возникновении и росте нелокальных корреляций в среде при переходе к турбулентности, а использование разработанной вычислительной процедуры позволило получить профили скорости среды в переходной области и провести качественное сравнение расчетных и экспериментальных данных.

В задаче о течении Куэтта (в плоской геометрии) исследован критерий перехода, который предназначен для выявления предпочтительного (реализующегося) режима течения путем оценки величины интегрального производства в системе. Предпочтительный режим характеризуется меньшим значением производства энтропии, чем нереализующийся режим,

гипотетически продолженный в область существования предпочтительного режима. Полученное методом установления решение задачи о поиске стационарных состояний в течении Куэтта в рамках нелокальной гидродинамики позволило единообразно описать как ламинарные (линейный профиль скорости), так и турбулентные (профиль, близкий к степенному) состояния.

Важную роль в развиваемом подходе играет анализ поведения величины производства энтропии в системе, который, во-первых, позволяет сформулировать критерия ламинарно-турбулентного перехода, во-вторых, определяет механизм регуляции (управления), переводящий систему из одного состояния в другое, и, наконец, путем применения современных методов теории адаптивного управления для минимизации производства энтропии дает возможность самосогласованно описать эволюцию внутренней структуры.

Список основных публикаций по теме диссертационной работы.

1. Хантулева Т.А., Никулин И.А. Высокоскоростное движение пластины в рамках самосогласованного нелокально-гидродинамического подхода // Межвузовский сборник статей «Модели неоднородных сред» (Физическая механика 8), СПб.: изд-во СПбГУ, 2004, с.196-218.

В работе Хантулевой Т.А. принадлежит модель интегрального ядра переноса и постановка задачи о высокоскоростном движении тела в жидкости (стр. 196-206), а частное решение задачи и его параметрический анализ (стр. 197-218) – Никулину И.А..

2) Хантулева Т.А., Никулин И.А. Структурная устойчивость высокоскоростного движения тела в жидкости // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: Труды конф., СПб.: 2004. – с. 269-273.

В работе идея применения принципов теории управления для описания эволюции структурных нелокальных параметров принадлежит Хантулевой Т.А. (стр. 269-270), численный анализ возможных сценариев эволюции системы – Никулину И.А. (стр. 271-273).

3) Хантулева Т.А., Никулин И.А. Применение кибернетических методов в неравновесных задачах механики // 14-ая Зимняя школа по механике сплошных сред: Тезисы конф., Пермь: 2005. – с. 235.

В работе идея применения принципов теории управления для описания эволюции структурных нелокальных параметров принадлежит Хантулевой Т.А., метод постановки и решения задач в рамках нелокальной гидродинамики – Никулину И.А.

4) Хантулева Т.А., Никулин И.А. Неравновесные процессы переноса с позиций теории управления // Устойчивость и процессы управления: Труды конф., СПб.: 2005. – с. 1212-1221.

В работе обсуждение новых принципов замыкания задач нелокальной гидродинамики принадлежит Хантулевой Т.А. (1212-1217), численная реализация метода скоростного градиента для описания эволюции структурных параметров – Никулину И.А. (стр. 1218-1221).

5) Никулин И.А., Хантулева Т.А. Эволюция структурных параметров в рамках нелокально-гидродинамической теории // Вестник СПбГУ, СПб., изд-во СПбГУ, 2006, сер.1, вып.3, стр.102-108.

В работе Хантулевой Т.А. принадлежит общее обсуждение результатов (стр.102-103), а метод построения нелокально-гидродинамических моделей на основе разработанной самосогласованной итерационной процедуры и модель нестационарного течения Куэтта – Никулину И.А. (стр.104-108).