

На правах рукописи

Левашов Владимир Юрьевич

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЯХ С УЧЕТОМ
НЕРАВНОВЕСНЫХ ЭФФЕКТОВ ВБЛИЗИ МЕЖФАЗНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2008

Работа выполнена на кафедре низких температур Московского энергетического института (технического университета)

Научный консультант: д.т.н., проф. Крюков Алексей Павлович

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н. Попов Сергей Петрович
к.т.н., Карпов Алексей Васильевич

Ведущая организация: ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского»

Защита состоится “...”2008 года в часов на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: Москва, Красноказарменная ул., д. 14, корп. И, малый актовй зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ)

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, Ученый совет МЭИ (ТУ)

Автореферат разослан

“...”2008 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.04
к.ф.-м.н., доцент

В.И. Мика

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При работе различных теплотехнических устройств возможны ситуации, когда осуществляются процессы переноса, обусловленные испарением жидкости при одной температуре, движением образовавшегося пара через парогазовую смесь и конденсацией этого пара на поверхности, температура которой поддерживается при более низкой по сравнению с поверхностью испарения температуре. Такого рода явления имеют место во время сушки различных тел, при формировании защитных покрытий элементов энергетического оборудования, при перегонке веществ в условиях пониженного давления и др. Одной из важных проблем, при реализации подобного рода процессов, является вопрос, связанный с изменением характера теплообмена при конденсации из парогазовой смеси.

С другой стороны, активно ведущиеся в ряде научных центров разработки различных микромашин и микроустройств, бурное развитие нанотехнологий обуславливают интерес к изучению процессов переноса в системах, характерный размер которых имеет порядок микро-, нано-, десятки и сотни нанометров. В этой связи становятся актуальными исследования течений газов и смесей в каналах соответствующих размеров при наличии процессов испарения – конденсации на стенках этих каналов

Изучение процессов тепломассопереноса, возникающих в таких случаях, составляет важное направление в рамках фундаментальной проблемы гидрогазодинамики и тепломассообмена, связанной с изучением явлений переноса в парогазовых смесях при существенном отклонении от локального термодинамического равновесия.

Цели работы. Главной целью работы является развитие и адаптация методов молекулярно-кинетической теории и сплошной среды для решения новых задач, в которых существенная неравновесность процессов сочетается с наличием двух и более компонентов смеси, а также фазовыми переходами на поверхностях, ограничивающих исследуемую область. Ставится задача определения областей применения этих методов. Также важной целью является апробация используемых методов и подходов, которые впервые применяются для решения рассматриваемых в настоящей работе задач.

Научная новизна работы заключается в оригинальном подходе к решению задач о нестационарном, неравновесном течении парогазовых смесей при наличии процессов испарения-конденсации. Впервые решение такого рода задач осуществляется в общем виде, без дополнительных эмпирических допущений, таких как близость процесса к равновесному, пренебрежение взаимодействием между компонентами, малые градиенты макропараметров. Особое внимание в работе уделяется численному исследованию процессов тепломассопереноса при наличии фазовых переходов в присутствии неконденсируемого компонента, которые в настоящее время мало изучены из-за трудностей математического описания. При этом в работе используется метод совместного решения системы уравнений Больцмана и уравнений механики сплошной среды. Помимо этого

предложены и обоснованы упрощенные подходы, позволяющие, с одной стороны, учитывать кинетические особенности смеси вблизи межфазной поверхности, а с другой стороны избежать решения системы кинетических уравнений Больцмана.

Практическая значимость результатов работы состоит в возможности применения полученных результатов при решении различных прикладных задач, в которых необходим анализ процессов тепломассопереноса в парогазовых смесях. К таким задачам относятся, в частности, задачи о течении в микро и нано каналах газовых смесей при наличии процессов испарения и конденсации на стенках этих каналов. Полученные результаты могут быть использованы в следующих технологиях: микроэлектроника, химическое осаждение пара, создание защитных покрытий на лопатках паровых и газовых турбин, криооткачка в различных криовакуумных системах, нанотехнологии.

Достоверность полученных результатов подтверждается проведенным многократным тестированием отдельных элементов используемых алгоритмов и всей задачи в целом. Стационарное состояние, являющееся результатом исследуемых нестационарных процессов, достаточно хорошо согласуется с предыдущими исследованиями тепломассопереноса в неравновесных условиях. Сравнение расчетов для задачи о переконденсации в присутствии неконденсируемого компонента с имеющимися экспериментальными данными косвенно подтверждает достоверность результатов, полученных в настоящей работе.

Автор защищает

- Результаты исследования нестационарных процессов тепломассопереноса в областях, заполненных парогазовыми смесями, при наличии процессов испарения и конденсации, полученные с учетом кинетических особенностей вблизи межфазных поверхностей.
- Возможность использования метода совместного решения системы кинетических уравнений и уравнений механики сплошной среды для описания данных процессов.
- Упрощенные подходы, позволяющие, с одной стороны, учитывать кинетические особенности смеси вблизи межфазной поверхности, а с другой стороны избежать решения системы кинетических уравнений Больцмана.

Апробация работы. Результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на Юбилейной научной конференции, посвященной 40-летию Института механики МГУ (Москва 1999 г.); III, IV Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2002, 2006 гг.); Всероссийском семинаре «Кинетическая теория и динамика разреженных газов» (Новосибирск, 2002 г.); XIII, XVI школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2001, 2007 г.); Международной конференции по компьютерным

постоянной и равной $T_{хол}$. Область II заполнена смесью: пар – газ. Первоначально вся рассматриваемая система, имеют одну известную температуру $T_{хол}$. При этом плотность пара ($\rho_{пар}$) в области II соответствует по линии насыщения температуре $T_{хол}$. Величина плотности газа (неконденсируемого компонента смеси) в этой области задана. Вся парогазовая смесь и каждый из ее компонентов первоначально покоятся. Считаются известными зависимости теплофизических свойств рассматриваемых веществ от температуры.

В момент времени $t=0$ температура верхней стенки повышается до значения $T_{гор} > T_{хол}$ и поддерживается неизменной в течение всего процесса. Необходимо определить, какое количество массы вещества уходит с единицы межфазной поверхности конденсированной фазы I в единицу времени, проходит через область II и конденсируется на внешней границе области III, т.е. найти плотность потока массы пара j . При рассмотрении данной задачи, в первом приближении, наличием гравитации пренебрегается.

Предполагается, что через ограничивающую область III стенку непрерывно удаляется вся масса жидкости, поступающая из II в результате конденсации. Это предположение позволяет считать толщину области III неизменной и равной $\delta_{хол}$ в течение всего процесса.

В строгой постановке, исследование процессов переноса тепла и массы в области II, необходимо осуществлять совместно с учетом особенностей переноса тепла и массы в областях I и III. Т.е. для исследования рассматриваемой ситуации должна рассматриваться сопряженная задача тепло-массопереноса, представленная на Рис.1., в которую входят соответствующие уравнения и специальные условия совместности для областей I, II и III. Однако в первом приближении процессы, происходящие в конденсированной фазе (области I и II), рассматриваться не будут. Т.е. считается, что температуры поверхности с которой происходит испарение пара – $T_{гор}^{\delta}$ и поверхности на которой этот пар конденсируется – $T_{хол}^{\delta}$ известны и остаются неизменными в течение всего процесса.

Также в работе рассмотрены одномерные задачи о конденсации или испарении пара из парогазовой смеси. Схематическая постановка задачи представлена на Рис.2. Предполагается, что температура межфазной поверхности известна. Кроме этого считаются заданными параметры пара или парогазовой смеси вдали от границы раздела фаз, т.е. на расстоянии много большем средней длины свободного пробега молекул пара.

Для исследования поставленных задач в настоящей работе предлагается использовать метод совместного решения кинетического уравнения Больцмана и уравнений механики сплошной среды¹. Этот метод позволяет, с одной стороны, «обеспечить» уравнения Навье-Стокса граничными условиями, учитывающими неравновесные особенности вблизи межфазных поверхностей, а с другой стороны существенно сократить время

¹ Попов С.П., Черемисин Ф.Г. Совместное численное решение уравнений Больцмана и Навье – Стокса // Вычислительная динамика разреженного газа. — М.: ВЦ РАН, 2000. — С. 75 — 103.

вычислений. При использовании данного подхода, в узких сильнонеравновесных областях (кинетические области на Рис.3), отстоящих на несколько средних длин свободного пробега от межфазных поверхностей, решение осуществляется с использованием одного или системы (для случая смеси газов) кинетических уравнений (КУБ). Вне этих областей (область сплошной среды на Рис.3.) – с использованием системы уравнений сохранения механики сплошной среды.



Рис. 2. Схема одномерной задачи о конденсации или испарении пара на межфазной границе в парогазовую смесь.

Для случая смеси газов система КУБ записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_a}{\partial t} + \xi_x \frac{\partial f_a}{\partial x} &= J_{aa} + J_{ab} \\ \frac{\partial f_b}{\partial t} + \xi_x \frac{\partial f_b}{\partial x} &= J_{bb} + J_{ba} \end{aligned} \quad (1)$$

где $f_a(x, t, \xi_a)$ и $f_b(x, t, \xi_b)$ – функции распределения молекул по скоростям для пара и газа, соответственно; x – декартова координата; t – время; ξ_a и ξ_b – молекулярные скорости компонентов смеси a и b , соответственно, J_{ij} ($i, j = a, b$) – интеграл столкновений, описывающий взаимодействие молекул компонентов смеси между собой.

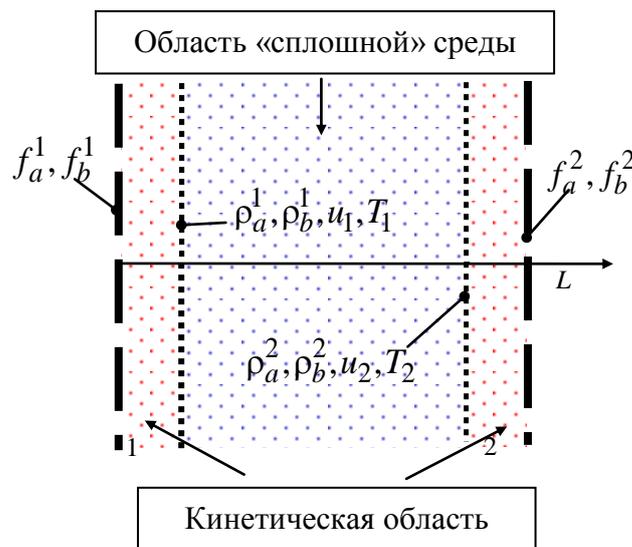


Рис. 3. Схема совместного метода решения.

Результатом решения системы (1) являются массивы функций распределения молекул по скоростям для обоих компонентов смеси. Макропараметры: плотность, температура, давление, потоки массы, энергии и другие моменты функции распределения определяются интегрированием по трехмерному пространству скоростей². Для решения (1) используется метод прямого численного решения КУБ³

Система уравнений сохранения для случая двухкомпонентной смеси имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \frac{\partial \rho_b u}{\partial x} + \frac{\partial j_b^{diff}}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial \rho e u}{\partial x} &= -p \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{4}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 - \frac{\partial q}{\partial x}, \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\rho = \rho_a + \rho_b$ – плотность смеси, $\rho_b = m_b n_b$, $\rho_a = m_a n_a$ – количество вещества «а» и «b» в единице объема соответственно, p – давление смеси, $j_b^{diff} = -\rho D \frac{\partial C_b}{\partial x}$ – диффузионный поток массы, $C_b = \rho_b / \rho$ – массовая концентрация компонента «b», D – коэффициент взаимной диффузии, $q = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x} + (h_b - h_a) j_b^{diff}$ – поток энергии в бинарной смеси, h_a и h_b – парциальные энтальпии компонентов, λ_T – коэффициент теплопроводности смеси, e – внутренняя энергия смеси, μ – коэффициент вязкости смеси, m_a и m_b – масса молекул компонентов «а» и «b» соответственно.

Согласно методу совместного решения, на границе кинетической области и области «сплошной» среды осуществляется процедура «сращивания» решений. Схематично эту процедуру иллюстрирует Рис. 4.



Рис. 4. Процедура сращивания решений.

Из функции распределения f_i^{NK} , полученной путем решения (1) в кинетической области, определяются макропараметры, используемые в

² Коган М.Н. Динамика разреженного газа, М., 1967, 440

³ Аристов В.В., Черемисин Ф.Г. Прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана. М.: ВЦ РАН, 1992. 192с.

качестве граничных условий для системы (2). Из макропараметров ρ_i^1, u_i^1, T_i^1 , полученных как результат решения (2), определяется функция распределения, служащая в свою очередь граничным условием для системы (1). В качестве такой функции используется функция Чепмена-Энскога.

В главе 3 осуществляется тестирование используемых в работе алгоритмов решения. В начале главы приведены результаты решения системы уравнений механики сплошной среды. Для проверки правильности решения системы уравнений Эйлера используются тестовые примеры, традиционно используемые в этих случаях⁴. Далее результаты решения полной системы уравнений сохранения механики сплошной среды сравнивались с известными решениями одномерных стационарных задач испарения-конденсации⁵.

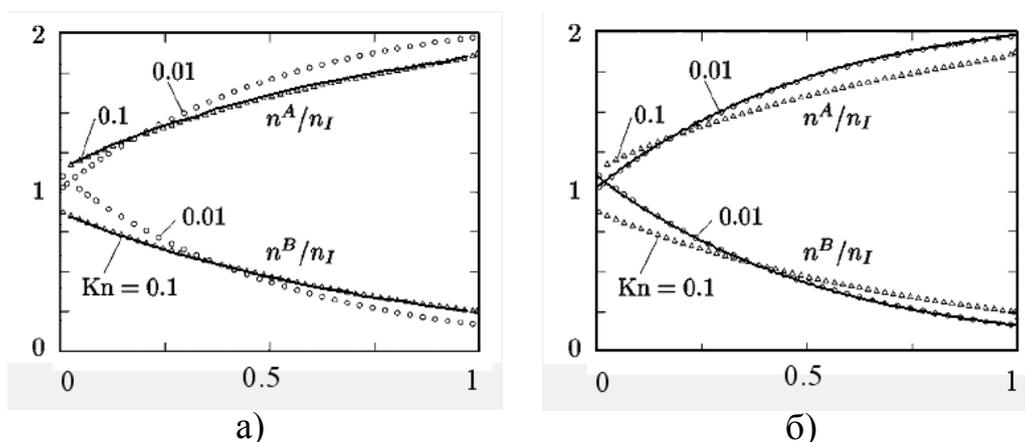


Рис. 5. Сравнение результатов решения системы (1) (сплошные линии) с данными других авторов (точки): зависимости концентраций пара и газа от x при $Kn=0.1$ (а) и при $Kn=0.01$ (б)

При использовании совместного решения важную роль играют решения, получаемые из системы кинетических уравнений. Для проверки корректности этих вычислений проводилось сравнение результатов решения задачи об испарении-конденсации при наличии неконденсируемого компонента с данными других авторов⁶. Результаты сравнения представлены на Рис.5. На этом рисунке приведены распределения концентраций компонентов для двух чисел Кнудсена: $Kn=0.1$ (Рис. 5а) и $Kn=0.01$ (Рис. 5б). Здесь Kn , определяется как отношение средней длины свободного пробега молекул пара к характерному размеру системы. Сплошными линиями на рисунке показаны решения, полученные при помощи метода прямого численного решения системы кинетических уравнений Больцмана (1). Из рисунка видно, что результаты расчетов, полученные при помощи метода

⁴ V. Daru, C. Tenaud High order one-step monotonicity-preserving schemes for unsteady compressible flow calculations // J. Comput. Phys, 2004, V. 193, p.563-594;

⁵ Labuntsov D.A. and Kryukov A.P. Analysis of intensive evaporation and condensation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1979. Vol.22, pp.989-1002

⁶ K. Aoki, S. Takata, and S.Kosuge. Vapor flows caused by evaporation and condensation on two parallel plane surfaces: Effect of the presence of a noncondensable gas.// Physics of Fluids. 1998. V. 10. Num. 6. Pp. 1519-1533.

прямого численного решения системы кинетических уравнений Больцмана, хорошо согласуются с аналогичными результатами, полученными с использованием другого кинетического подхода и обозначенного на рисунке кружками и точками.

Отдельное внимание в главе 3 уделяется вопросу корректности осуществления процедуры сшивания решений. Следует отметить, что рассматриваемая в работе задача об испарении-конденсации при наличии в области течения неконденсируемого компонента является комбинированной с точки зрения задания граничных условий на межфазных поверхностях. С одной стороны эти поверхности являются проницаемыми для пара, так как происходят процессы испарения-конденсации, а с другой стороны они являются непроницаемыми для газа. В связи с этим при тестировании процедуры сшивания рассматривались две задачи. Первая из них – задача о теплопереносе в газе: границы раздела фаз непроницаемы. Вторая – переконденсация в паре, где поверхности испарения-конденсации проницаемы для вещества (пара). Распределения безразмерной плотности (n) и температуры (T) в задаче о теплопереносе показаны на Рис. 6а). Зависимости плотности и удельного потока массы пара от координаты в задаче о переконденсации представлены на Рис. 6 б).

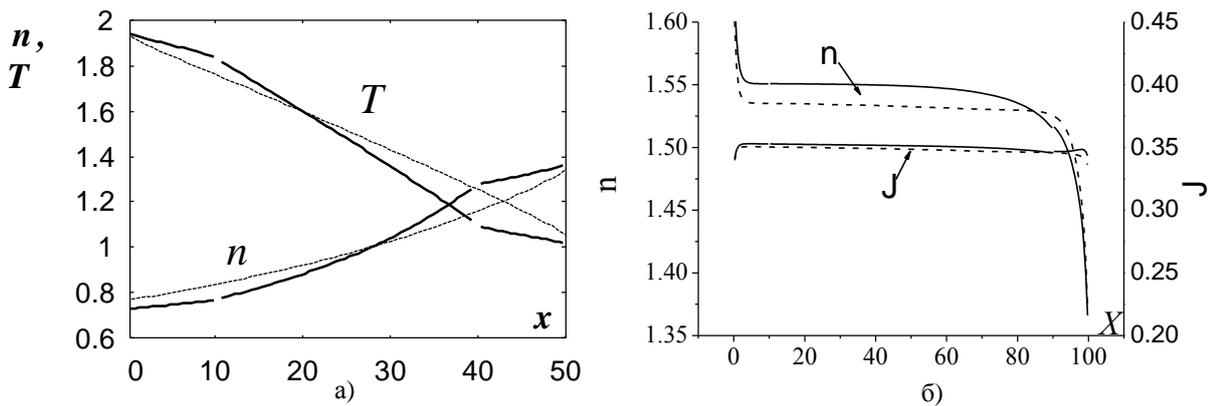


Рис. 6. а) – результаты решения задачи о теплопереносе, б) – результаты решения задачи об испарении-конденсации в паре.

На этих рисунках сплошными линиями показаны результаты решения, полученные при помощи совместного метода решения, а штрихпунктирными линиями – результаты прямого численного решения кинетического уравнения Больцмана. Из Рис. 6 видно, что результаты полученные различными методами имеют удовлетворительное совпадение.

В главе 4 приведены результаты решения задач при наличии испарения-конденсации в присутствии неконденсируемого компонента. Схема задачи представлена на Рис.7.

Значительная часть результатов приводится в безразмерном виде. Безразмерные макропараметры определяются следующим образом ($\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул насыщенного пара при температуре T_θ):

$$T^* = T/T_0 \quad (6)$$

$$\rho^* = \rho/\rho_s^a(T_0) \quad (3)$$

$$p^* = p/\rho_s^a(T_0)R^aT_0 \quad (4)$$

$$x^* = x/l^a \quad (5)$$

$$t^* = t\sqrt{R^aT_0}/l_0 \quad (6)$$

$$j^* = j/\rho_s(T_0)\sqrt{R^aT_0} \quad (7)$$

Звездой отмечены безразмерные величины. Верхний индекс «а» указывает, что в качестве базовых величин использовался компонент «а» - пар. Индекс «b» обозначает неконденсируемый компонент.

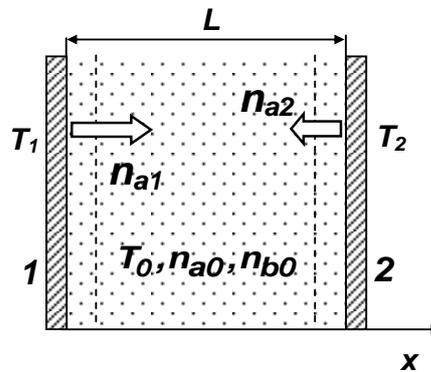


Рис. 7. Схема решения задачи об испарении-конденсации в парогазовой смеси

При проведении расчетов предполагалось, что $n_{a1} = 2n_{a2}$. Поверхности 1 и 2 непроницаемы для газа. На первом этапе предполагалось, что $T_1 \approx T_2$. В начальный момент времени компонент «b» равномерно распределен во всей исследуемой области. Результаты решений для различного содержания газа представлены на Рис.8-10. В качестве базовых в работе приняты концентрация пара n_{a2} и температура поверхности T_2 .

Из рисунков хорошо видно, что неконденсируемый компонент может оказывать существенное влияние на распределение макропараметров и величину плотности потока массы пара. Так, уменьшение количества газа в пять раз, с 0.5 до 0.1, приводит к тому, что величина плотности потока массы пара увеличивается примерно в 4 раза. Кроме этого, из Рис. 9 хорошо видно, что для случая, когда содержание газа в области не велико (в данном случае $n_b = 0.1n_{a2}$) параметры пара и газа (на Рис.9 плотность) практически постоянны во всей исследуемой области. Значительные изменения наблюдаются лишь в непосредственной близости к межфазной поверхности.

Увеличение плотности газа с величины 0.5 (Рис.8) до 5.0 (Рис.10), приводит к уменьшению величины плотности потока массы пара примерно в 7.5 раз.

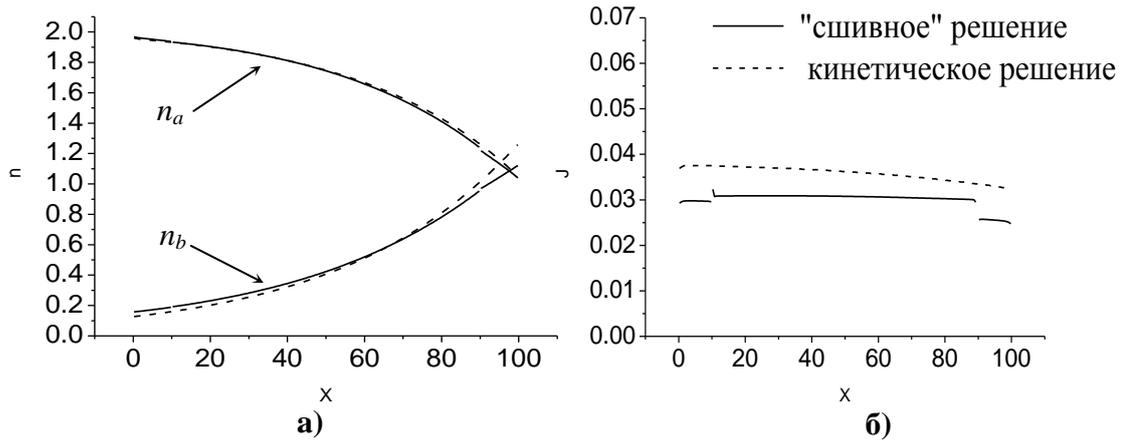


Рис. 8. Зависимости плотности пара и газа – (а), плотности потока массы пара – (б) от координаты для случая $n_b=0.5n_{a2}$ ($m_a/m_b = 18/28$, $d_a/d_b = 4.64/3.7$)

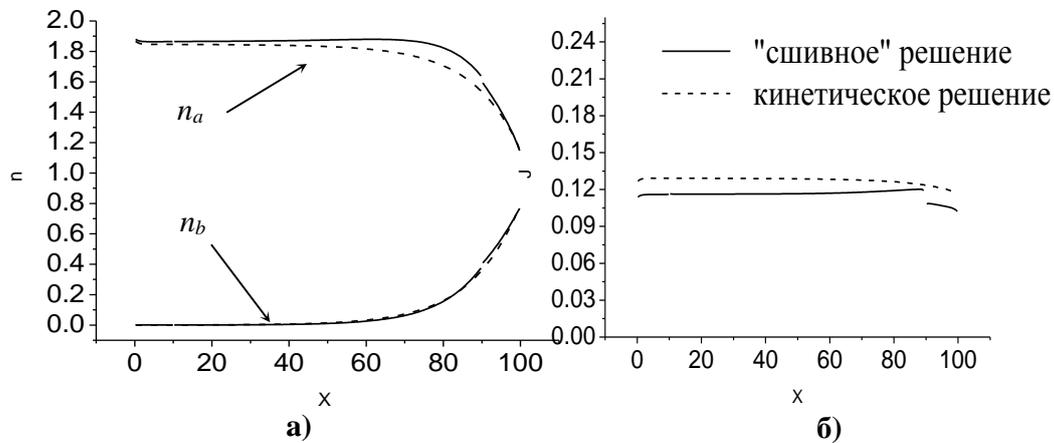


Рис. 9. Зависимости плотности пара и газа – (а), плотности потока массы пара – (б) от координаты для случая $n_b=0.1n_{a2}$ ($m_a/m_b = 18/28$, $d_a/d_b = 4.64/3.7$)

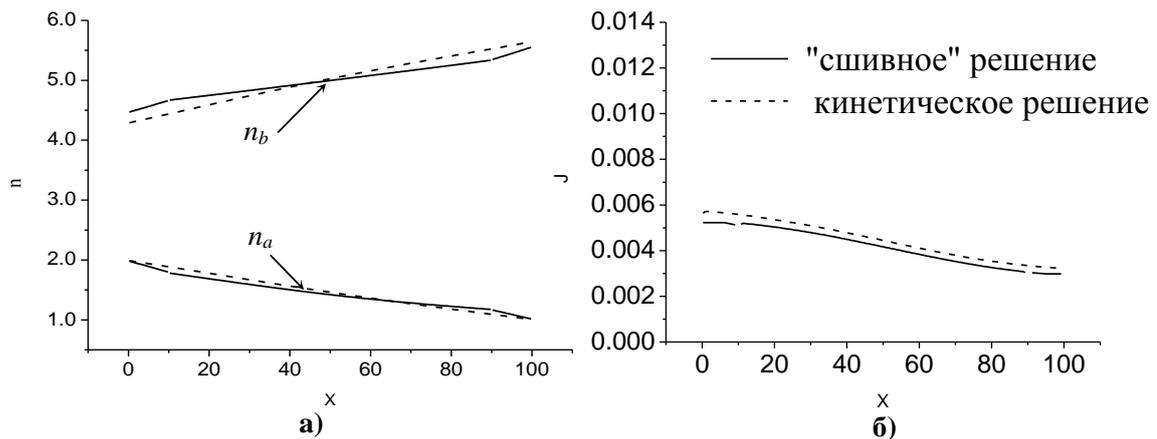


Рис. 10. Зависимости плотности пара и газа – (а), плотности потока массы пара – (б) от координаты для случая $n_b=5.0n_{a2}$ ($m_a/m_b = 18/28$, $d_a/d_b = 4.64/3.7$)

Далее изучалось влияние температуры поверхности испарения на характер течения. В этом случае предполагалось, что $T_1 = 2.0T_2$. Результаты решений представлены на Рис.11.

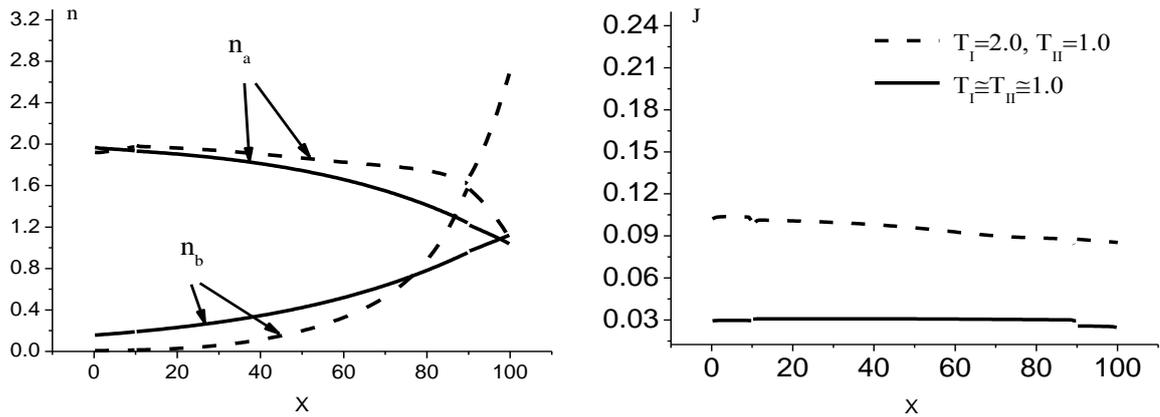


Рис. 11. Влияние температуры поверхности испарения на зависимости плотности пара и газа – (а), плотности потока массы пара – (б) для случая $n_b=0.5 n_{a2}$ ($m_d/m_b = 18/28, d_d/d_b = 4.64/3.7$)

Как видно из представленных результатов, на перераспределение газа в исследуемой области влияет не только движение пара от поверхности испарения к поверхности конденсации, но и различие температур этих поверхностей. Это влияние хорошо видно из Рис.11. Так, повышение температуры поверхности испарения в 2 раза приводит к возрастанию интенсивности массопереноса через исследуемую область примерно в 3 раза.

Значительное влияние неконденсируемого компонента на переконденсацию пара, выявленное в предыдущих расчетах, вызвало необходимость дальнейшего изучения этого процесса при различных граничных условиях. В предыдущих расчетах обе поверхности непроницаемы для газа, и отражение происходит диффузно. На Рис.12. представлены расчеты, полученные для различных размеров исследуемой области, при этом предполагалось, что поверхность 1 непроницаема для газа, однако в тоже время молекулы неконденсируемого компонента могут покидать исследуемую область и поступать в эту область через границу 2.

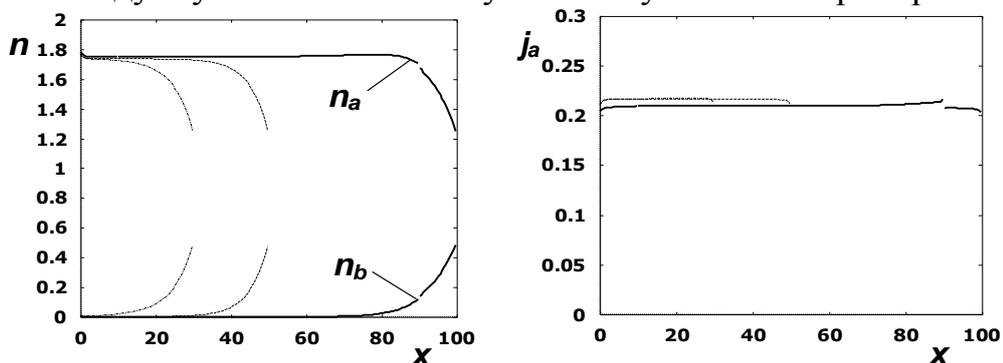


Рис. 12. Переконденсация с проницаемой для газа границей.

Из рис. 12. видно, что в данном случае большая часть газа выталкивается из области потоком пара, что приводит к увеличению плотности потока массы пара. Интересно отметить, что начиная с величины $L \approx 30, j_a$ практически не зависит от размера области L .

Таким образом, можно отметить, что процессы с испарением-конденсацией парогазовых смесей существенно различны в областях, ограниченных непроницаемыми для газа поверхностями, и в камерах устройств, имеющих проницаемые границы.

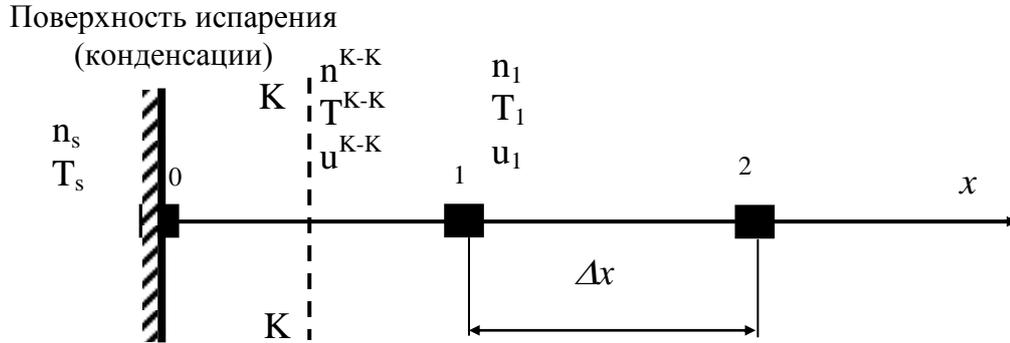


Рис. 13. Схема сращивания решений на уровне функции распределения

Далее в работе рассматриваются упрощенные подходы, которые позволяют с одной стороны учитывать специфику поведения пара (газа) вблизи границы раздела фаз, а с другой стороны избежать сложностей решения кинетического уравнения Больцмана. Для иллюстрации этих подходов рассматриваются примеры задач.

Рассмотрим задачу, схема которой представлена на Рис.7. Для учета особенностей поведения пара (газа) вблизи межфазной поверхности используется процедура, схематическое пояснение которой представлено на Рис.13.

Для нахождения макропараметров в сечении К-К, служащих граничными условиями для уравнений механики сплошной среды (2), необходимо знать функцию распределения молекул газа (или пара) по скоростям (f) во всем пространстве скоростей молекул. В качестве функции распределения молекул, летящих от поверхности ($\xi_x > 0$), для точки $x=0$, задается, согласно диффузной схеме испарения, полумаксвеллиан:

$$f^0 = n_s \left(\frac{1}{2\pi RT_s} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_z^2}{2RT_s} \right), \quad \xi_x \geq 0 \quad (8)$$

где T_s – температура межфазной поверхности, n_s – соответствующая этой температуре по линии насыщения числовая плотность (концентрация).

В первом приближении будем предполагать, что в точке 1 функция распределения максвелловская, т.е.

$$f^1 = n_1 \left(\frac{1}{2\pi RT_1} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{(\xi_x - u_1)^2 + \xi_y^2 + \xi_z^2}{2RT_1} \right), \quad -\infty \leq \xi_x \leq \infty, \quad (9)$$

где T_1 , n_1 и u_1 температура, концентрация и скорость в точке 1. Следует заметить, что, строго говоря, вид этой функции не известен заранее (для ее определения необходимо решить уравнение Больцмана). В промежуточном сечении К-К предлагается функцию распределения задавать следующим

образом: молекулам, летящим на стенку, ставится в соответствии функция, пропорциональная функции распределения в точке 1, т.е. $f = Cf^1$ (для $\xi_x \leq 0$), где C – параметр задачи⁷, а молекулы движущиеся в противоположном направлении описываются функцией (8).

Зная вид функции распределения и определения моментов этой функции, можно получить выражения для концентрации, скорости и температуры в сечении К-К, которые в дальнейшем и используются в качестве граничных условий для системы (2).

Результаты решения для случая когда начальная концентрация газа $n_b = 0.5n_{a2}$ представлены на Рис. 14.

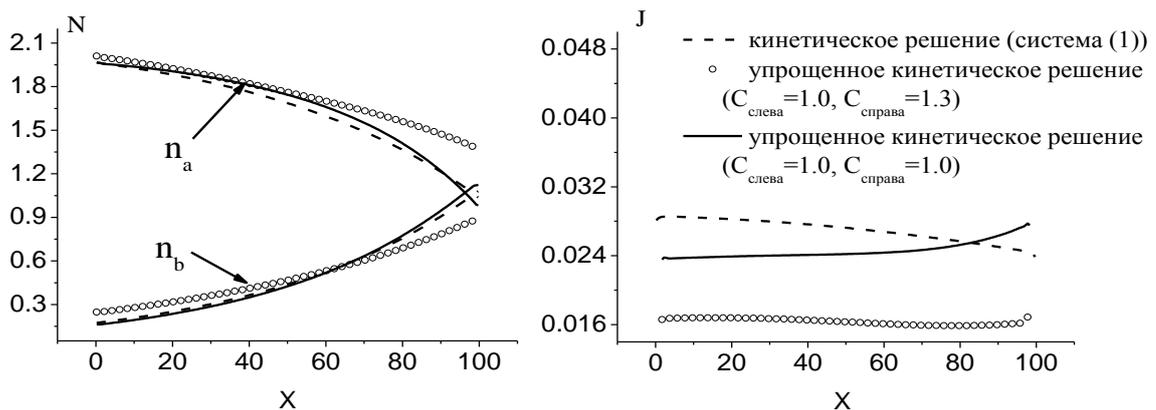


Рис. 14. Упрощенный подход к решению задачи об испарении-конденсации для случая $n_b = 0.5n_{a2}$ ($m_a = m_b, d_a = d_b$).

На рис.14 пунктирной линией обозначены результаты, полученные из решения системы кинетических уравнений (1). Символами (кружок), а также сплошной линией – результаты решений, полученные на основе упрощенного подхода для различных C . Хорошо видно, что при определенном выборе параметра C наблюдается удовлетворительное совпадение результатов, полученных различными методами.

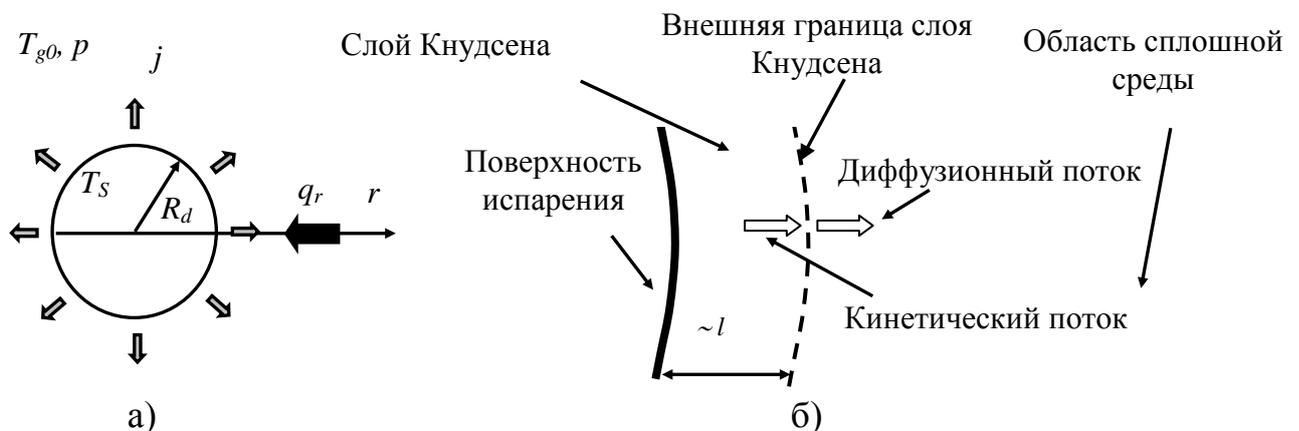


Рис. 15. Схема задачи – а) задача об испарения капли топлива– б) метод решения.

⁷ Лабунцов Д.А., Крюков А.П. Процессы интенсивного испарения // Теплоэнергетика. 1977. №4. С.8-11

Другой упрощенный подход используется при рассмотрении задачи об испарении одиночной неподвижной капли топлива (н-додекана), «погруженной» в горячий (по отношению к начальной температуре капли) окружающий воздух. Схема задачи и метод ее решения представлены на Рис. 15 а), б).

Важной частью процесса испарения в парогазовую смесь является этап «удаления» молекул пара от поверхности. Обычно предполагают, что все поступающее к межфазной поверхности тепло тратится на испарение, а образовавшийся пар в дальнейшем отводится от поверхности испарения при помощи диффузии. Однако процесс формирования диффузионного потока происходит на расстоянии порядка средней длины свободного пробега молекул пара (l) от поверхности испарения – в слое Кнудсена (Рис.15 б)). В настоящей работе для определения величины кинетического потока массы при испарении используется следующее выражение⁸:

$$j = \frac{\beta}{1-0.4\beta} \left(\frac{P_s}{\sqrt{2\pi RT}} - \frac{P_{Rd}}{\sqrt{2\pi RT_{Rd}}} \right). \quad (10)$$

Величина диффузионного потока массы может быть определена следующим образом⁹:

$$j_{diff} = \frac{\rho_{mix} D_c}{R_d} \ln(1 + B_M) \quad (11)$$

здесь ρ_{mix} - плотность смеси на внешней границе слоя Кнудсена, D_c - коэффициент взаимной диффузии, $B_M = Y_{Rd}/(1-Y_{Rd})$, $Y_{Rd} = \rho_{Rd}/\rho_{mix}$.

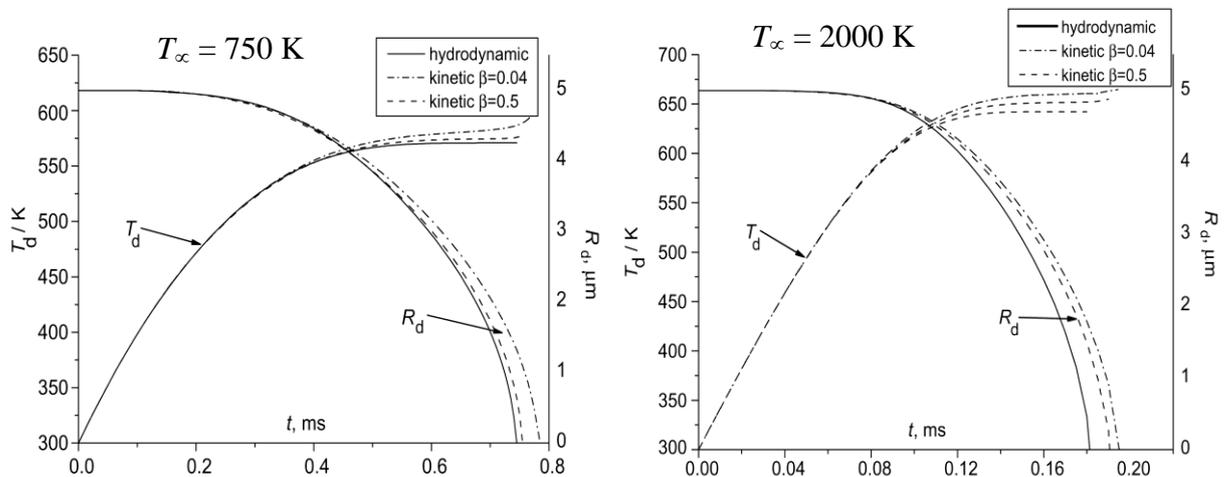


Рис. 16. Результаты решения задачи об испарении капли топлива в полубесконечную среду (начальный радиус капли $R_d=5\text{мкм}$, $P_\infty=30 \cdot 10^5 \text{Па}$).

Диффузионный поток на внешней границе слоя Кнудсена должен равняться сформировавшемуся в этом слое кинетическому потоку, т.е. $j=j_{diff}$.

⁸ Муратова Т.М., Лабунцов Д.А. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // Теплофизика Высоких Температур. 1969. Т.7. №5. С.959-967

⁹ А. Н. Lefebvre Atomization and spray, Taylor & Francis, 1989, W. A. Sirignano Fluid dynamic and transport of droplets and spray, Cambridge University Press, 1999

Величина коэффициента испарения (конденсации) – β , входящего в выражение для кинетического потока, в принималась равной 0.5 и 0.04.

Температура поверхности капли определяется из уравнения баланса тепла, при этом предполагается, что поступающее к капле тепло тратится не только на ее нагрев, но и на испарение.

Результат расчета процесса испарения капли для различных температур окружающей среды представлены на Рис. 16. Как следует из рисунка, учет кинетических эффектов приводит к увеличению времени «жизни» капли по сравнению с обычным гидродинамическим расчетом, согласно которому величина j определяется из (11), а плотность на внешней границе слоя Кнудсена соответствует по линии насыщения температуре поверхности капли.

В качестве следующего направления в работе предлагается подход, позволяющий найти предельное количество газа в системе, при котором вообще возможна конденсация пара на поверхности. При этом, в силу того, что для неконденсируемого компонента граница непроницаема, не потребовалось прибегать к методам молекулярно-кинетической теории, а оказалось достаточным привлечь известные результаты применения этих методов для исследования однокомпонентной системы (чистого пара)¹⁰ и решить уравнение сохранения массы компонента.

В заключительной части главы приводится сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными данными по испарению воды¹¹. В этих работах осуществляется экспериментальное исследование процесса испарения. Основное внимание в экспериментах уделяется измерению температурного распределения в жидкой и паровой фазе в непосредственной близости к межфазной поверхности. Кроме этого в работах приводятся данные по экспериментально измеренному значению плотности потока массы испаряющегося вещества.

Приведенные в работах данные о температуре поверхности испаряющейся жидкости, температуре и давлении в экспериментальной ячейке, позволяют осуществить сравнение результатов измерений с результатами численного расчета.

Следует отметить, что авторы публикаций отмечают, что в ячейке оставалось некоторое количество неконденсируемого газа, величина которого составляла около 3% (относительно общего давления в измерительной камере). В связи с этим при проведении вычислений была рассмотрена ситуация когда в исследуемой области находится 2% или 5% неконденсируемого газа.

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных представлены в таблице 1. В первой колонке таблицы приведено давление в

¹⁰ Labuntsov D.A. and Kryukov A.P. Analysis of intensive evaporation and condensation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1979. Vol.22, pp.989-1002

¹¹ G. Fang, C.A. Ward Temperature measured close to the interface of an evaporating liquid//Phys. Rev.E,1999,59, N1, p.417; V.K. Badam, V. Kumar, F. Durst, K. Danov Experimental and theoretical investigations on interfacial temperature jumps during evaporation//Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 32, p. 276-292.

испарительной ячейке, во второй – температура межфазной поверхности. В последних колонках таблицы приведены величины плотности потока массы пара, полученная в результате вычислений.

Из таблицы хорошо видно, что для случая когда количество неконденсируемого компонента изменяется в диапазоне от 2% до 5%, имеется удовлетворительное согласование результатов эксперимента и вычислений.

| P, Па | t, °C | $j_{\text{эксп}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^2\text{с}}$ | $j_{\text{расч}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^2\text{с}}$ | $j_{\text{расч}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^2\text{с}}$ |
|-------|-------|--|--|--|
| | | | 2% | 5% |
| 596.0 | -0.2 | 0.28 | 0.39 | 0.32 |
| 493.3 | -2.8 | 0.25 | 0.28 | 0.16 |
| 426.6 | -4.7 | 0.30 | 0.29 | 0.14 |
| 413.3 | -5.1 | 0.42 | 0.56 | 0.34 |
| 310.6 | -8.7 | 0.37 | 0.41 | 0.27 |
| 342.6 | -7.6 | 0.35 | 0.40 | 0.25 |
| 333.3 | -7.7 | 0.39 | 0.47 | 0.26 |

Таблица 1. Результаты сравнений вычислений с экспериментальными результатами

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведено исследование нестационарных процессов тепломассопереноса в парогазовых смесях при наличии процессов испарения, конденсации или совместно испарения-конденсации. Обоснована и реализована процедура «сшивания» решений, позволяющая с одной стороны существенно сократить время вычислений, а с другой стороны осуществить расчет процессов с испарением-конденсацией при произвольных режимах течения компонентов в широком диапазоне рабочих давлений. Предложены варианты упрощенных кинетических подходов.

Полученные в работе результаты позволили сформулировать следующие выводы:

1. Присутствующий в области течения неконденсируемый компонент оказывает существенное влияние на характер течения пара в исследуемой области. Так, увеличение плотности газа в 10 раз приводит к уменьшению

величины плотности потока массы пара в 7.5 раз.

2. Процессы с испарением-конденсацией в парогазовых смесях существенно различны в областях, ограниченных непроницаемыми для газа поверхностями, и в камерах устройств, имеющих проницаемые границы.

3. Для случая испарения капель топлива, учет молекулярно-кинетических особенностей течения пара в непосредственной близости к границе испарения приводит к увеличению времени «жизни» капли по сравнению с обычным гидродинамическим расчетом.

4. Предлагаемая в работе упрощенная процедура позволяет находить распределения параметров пара и газа при наличии процессов испарения и конденсации на поверхностях, ограничивающих исследуемую область.

5. Развитые в работе подходы для конденсации парогазовой смеси позволяют найти предельное количество газа в системе, при котором возможна конденсация пара на поверхности.

6. Проведенное сравнение с известными экспериментальными данными по испарению воды, показало удовлетворительное совпадение результатов расчета и эксперимента.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 08-08-00629 и № 08-08-00638).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1) Е.Г. Колесниченко, А.П. Крюков, В.Ю. Левашов Вопросы систематики макроскопических моделей течений газовых смесей // Вестник МЭИ. 2000. № 3. С. 95-102.

2) Крюков А.П., Левашов В.Ю., Шишкова И.Н. Переконденсация в газопылевой смеси // Теплофизика высоких температур, 2004, Т. 42. №4. С. 601-607

3) Крюков А.П., Левашов В.Ю. Граничные условия для задач испарения-конденсации в парогазовых смесях // Вестник МЭИ. 2008. № 3, с. 24-30.

4) Крюков А.П., Левашов В.Ю. Конденсация на плоской поверхности из парогазовой смеси // Теплофизика высоких температур, 2008, Т. 46, №3, с. 765-770.

5) Крюков А.П., Левашов В.Ю., Шишкова И.Н. Численный анализ сильного испарения-конденсации через пористую среду (статья, англ.) // Международный журнал тепло и массо- переноса (Int. J.Heat Mass Transfer) 2001. Т.44. С.4119-4125

6) Крюков А.П., Левашов В.Ю., Сажин С.С. Испарение капель дизельного топлива: сравнение кинетических и гидродинамических моделей (статья, англ.) // Международный журнал тепло и массо- переноса (Int. J.Heat Mass Transfer) 2004. Т. 47, С. 2541-2549

7) Сажин С.С., Шишкова И.Н., Крюков А.П., Левашов В.Ю. М.П. Хейкал Испарение дизельного топлива в присутствии фонового газа: кинетический подход (статья, англ.) // *Международный журнал тепло и массо- переноса (Int. J. Heat Mass Transfer)* 2007. Т. 50, 2675-2691

8) В.Ю. Левашов, И.Н. Шишкова Течение пара с конденсацией в запыленной среде // Труды XIII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» Москва. Издательство МЭИ. 2001. т.1. С.405-408

9) А.П. Крюков, В.Ю. Левашов, И.Н. Шишкова Исследование течений газопылевой смеси методами молекулярно-кинетической теории // *Инженерно-физический журнал*. 2002. т.75. № 4. с.12-17

10) А.П. Крюков, В.Ю. Левашов, И.Н. Шишкова Течение парогазовой смеси через запыленную область с учетом роста частиц пыли в результате конденсации//Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. Москва. Издательство МЭИ. 2002. т.5., с. 235-238.

11) Крюков А.П., Левашов В.Ю., Шишкова И.Н Течение пара при наличии процессов испарения-конденсации на твердых частицах // *Прикладная механика и техническая физика*, 2004, Т.45, № 3, с. 119-128.

12) Крюков А.П., Подчерняев О, Холл П., Плюмлей Д.Ж., Левашов В.Ю., Шишкова И.Н. Селективная откачка водяного пара через аргоновую среду (статья, англ.) // *Журнал вакуумной науки и технологии, А. Вакуум, Поверхности и пленки (Journal of Vacuum Science and Technologys)* 2006. Т. 24, вып. 4, с.. 1592-1596

13) Крюков А.П., Левашов В.Ю., Шишкова И.Н Переконденсация при наличии неконденсируемого компонента//*Инженерно-физический журнал*. 2005, Т. 78. № 4. С. 15 – 21

14) Крюков А.П., Левашов В.Ю., Шишкова И.Н Течения парогазовых смесей в микро- и наносистемах при наличии испарения-конденсации // Труды 4-ой Российской национальной конференции по теплообмену, М.: Издательство МЭИ, 2006, Т.1, С. 164-167

15) Крюков А.П., Левашов В.Ю., Шишкова И.Н Проблема испарения-конденсации в парогазовых смесях (англ.) // Труды 25-го международного симпозиума по динамике разреженных газов, редактор М.С. Иванов, А.К. Ребров, Новосибирск, 2007, С.1176-1181.

16) В.Ю. Левашов, И.Н. Шишкова, А.К. Ястребов Особенности задач испарения-конденсации при наличии неконденсируемого компонента //Труды XVI школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. М.: Изд-во МЭИ, 2007, Т.1.,С. 442-445.

17) Крюков А.П., Левашов В.Ю. Возможные подходы к исследованию процессов испарения-конденсации в присутствии неконденсируемого компонента // Труды 6-го Минского международного форума по теплообмену, 2008 г.