

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию и соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Косьянчука Василия Викторовича
на тему: «Многомасштабное моделирование течений газа в
разделительных устройствах и мембранах»
по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Косьянчука В.В посвящена теоретическому исследованию эффекта разделения газовых смесей при течениях в микроструктурах с подвижными, изменяющими форму или неизотермическими границами. Отличительной особенностью течений в устройствах с микронными размерами является невозможность описания течения газа в этих системах традиционными подходами, основанными на моделях механики сплошной среды с непрерывно изменяющимися в пространстве и времени макроскопическими параметрами. Интерес к таким задачам вызван тем, что с развитием микротехники в последнее время появилась практическая возможность разделения газовых смесей за счет эффектов, реализующихся при течениях с конечными числами Кнудсена.

Изучаемые в работе способы воздействия на течение газа в микроканалах основаны на том, что в свободномолекулярном и переходном режимах течения усиливается влияние ряда факторов на перемещение различающихся по массе компонентов газовой смеси. К ним относятся изменения градиентов давления и температуры, наложение вынужденных механических колебаний, изменение геометрии микроканала и т.п. Автором изучается эффективность таких воздействий применительно к проблемам разделения газовых смесей.

Рассмотрены следующие способы газоразделения: 1) свободномолекулярное течение смеси через колеблющуюся пористую мембрану, с цилиндрическими порами постоянного круглого сечения; 2) то

же самое, но в порах установлены ряд осцилляторов в виде перегородок; 3) тоже, что и в п.1), но стенки поры вынужденно изгибаются по заданному волновому закону; и 4) численное моделирование течений в газоразделительном устройстве, основанном на температурной транспирации в порах мембраны.

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений, т.к. разделение компонентов газовых смесей на сегодня является важной научно-технической и экологической проблемой. Для её решения непрерывно проводится поиск новых, более совершенных и эффективных методов.

Представленная диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения и списка литературы из 146 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, описана структура диссертации, формулируются положения, выносимые на защиту, дается информация об апробации результатов и личном вкладе автора.

Далее проводится **обзор** существующих подходов, направленных на разделение газовых смесей в микроустройствах. Особенное внимание уделяется течениям, вызванным нагретыми микроэлементами, а также течениям за счет механических или акустических колебаний.

В **первой** главе рассмотрена задача о течении газовой смеси через пористую мембрану, колеблющуюся с определенной частотой. Сформулированы модельные представления о свободномолекулярном течении газов через одиночную цилиндрическую микропору. Предложен оригинальный алгоритм расчета вероятности прохождения молекулами газовой смеси через пору в условиях высокочастотных колебаний, основанный на использовании известных аналитических решений уравнения Больцмана для распределения скоростей частиц. Описан простой метод расчета траекторий частиц с учетом их столкновения со стенкой колеблющегося микроканала. Анализируются модели рассеяния при столкновениях частиц со стенкой. Обсуждается возможность полной и неполной аккомодации энергии и импульса. Устанавливается важная

функциональная связь коэффициента разделения с вероятностью прохождения частиц через микроканал. Демонстрируются результаты расчетов в виде зависимостей вероятности прохождения частиц от скорости колебаний, на основе которых делается вывод о том, что за счет вынужденных колебаний можно управлять проводимостью микроканала. Показано, что оптимальной является амплитуда колебаний, совпадающая с диаметром микроканала, а увеличение его длины усиливает эффект разделения.

Показано, также, что для эффективного разделения, например, смеси аргон-гелий требуются обеспечить колебания мембраны с частотой порядка 10^8 Гц. Делается правильный вывод, что колебания с такой высокой частотой на практике пока невозможно создать. В методическом плане, результаты, полученные в первой главе, оказались полезными и получили дальнейшее развитие во второй главе диссертационной работы.

Во **второй** главе ранее рассматриваемая постановка задачи о свободномолекулярном течении газовой смеси в микроканале осложнена наличием системы поперечных перегородок (затворов), которые могут перекрывать микроканал и осциллировать по волновому закону, создавая, таким образом, колебания требуемой частоты. Проведен сравнительный анализ моделей столкновения частиц со стенкой микроканала на основе ядер рассеяния Максвелла, Черчиньяни-Лэмписа, Ямамото и Эпштейна. Отмечается, что недостатком некоторых моделей является то, что коэффициент аккомодации в них не зависит от скорости падающих молекул. Обсуждаются некоторые обобщения известных моделей рассеяния с точки зрения адекватного описания физических эффектов и минимизации вычислений для их реализации.

Показано, что расход газа зависит от соотношения волновой скорости движения системы затворов и характерной тепловой скорости молекул, и для смеси из двух газов такие колебания будут приводить к более эффективному разделению. Оказывается, что для наличия эффекта разделения волновая

скорость движения системы затворов должна быть сопоставима с тепловой скоростью молекул. С практической точки зрения важным результатом является то, что не требуется высоких частот колебаний, т.к. за счет увеличения количества затворов можно добиться волновых скоростей, сопоставимых с тепловой скоростью молекул.

Также показано, что эффект разделения чувствителен к состоянию поверхности микроканала, что напрямую связано с коэффициентом аккомодации касательного импульса.

В **третьей** главе изучается разделение газов в микроканале с границами, вынужденно изгибающимися по волновому закону. Мотивация такой постановки связана с предположением, что волновое движение поверхности может придать газу дополнительный импульс в направлении, совпадающем с направлением распространения волны. При этом молекулы газа будут иметь более высокую вероятность прохождения через него. В этих условиях отношение скорости колебания канала к тепловой скорости молекул может быть как положительным, так и отрицательным. Автором предложено теоретическое обоснование такому поведению через взаимодействие механизмов, названных им “прокачкой” и “резонансом”. Проведено исследование зависимости эффективности разделения от различных параметров (геометрии микроканала, параметров его колебания и состояния поверхности). Показано, что необходимые для разделения волновые скорости близки к скоростям распространения поперечных волн, что может позволить реализовать предложенную схему разделения на практике. Автором предложены варианты схем практической реализации возможных элементов устройств, работающих по данному принципу разделения газов: гибкая струна с набором микроканалов внутри и генератор поверхностных акустических волн.

Четвертая глава посвящена численному моделированию течений в газоразделительном устройстве, основанном на эффекте транспирации газа в порах мембраны. Прототип подобного устройства был создан в Киотском

университете. Автором диссертационной работы реализован оригинальный алгоритм решения уравнений Навье–Стокса в макроканалах ввода и вывода газовой смеси, повышающий точность расчёта при малых числах Маха ($M \sim 0.001-0.01$). Для описания термострессовых течений в порах мембраны, вызванных температурным градиентом в газе и давлением, используется модель МакКормака. Автором диссертации предложена методика расчета, которая объединяет описание процессов на микро- и макромасштабах. Показано, что устройство потенциально позволяет разделять газы даже при очень небольших перепадах температуры (15-30 К) между горячим и холодным потоками, разделенными пористой мембраной. Проведен численный анализ зависимости эффективности работы устройства от основных физических параметров процесса. Расчеты процессов в устройстве газоразделения, полученные с помощью разработанной методики, показывают хорошее соответствие с ранее опубликованными данными авторов его прототипа. Сформулированы практические рекомендации по совершенствованию исследованного устройства разделения газовой смеси.

Заключение содержит формулировки основных результатов диссертационной работы.

Диссертация написана ясным и доступным языком, результаты понятно изложены.

В качестве замечаний к работе следует отметить:

1. В главах 1–3 исследуются свободномолекулярные течения газа. Однако даже при малых размерах микроканалов порядка 0.1–1 микрон для получения свободномолекулярного режима течения ($Kn \sim 10$) необходимо снижать давление газа на 1–2 порядка. В связи с этим встает вопрос эффективности применения рассмотренных автором методов к промышленному разделению газов. Было бы интересно посмотреть результаты моделирования при числах Кнудсена порядка единицы, что лучше соответствует режимам работы микротехники.

2. В главе 4, при описании численного метода, отсутствует описание валидации расчетов. Упоминается сравнение результатов с разным количеством ячеек разбиения, однако отсутствуют графики, которые бы демонстрировали анализ сеточной сходимости метода. Автор пишет, что задача решается методом установления, но не приводит никаких графиков, показывающих выход на стационарный режим. Отсутствуют упоминания о том, как проверялся предложенный метод на стандартных тестовых задачах.
3. На рис. 4.7 двумерное распределение концентрации легкой компоненты смеси и поперечный профиль скорости потока в каналах устройства, по сути мало отличаются от одномерных расчетов из работы [65]. Желательно на этом графике показать область разворота потока с перетеканием смеси в канал с обратным направлением течения, где должно наблюдаться существенно неоднородное распределение параметров газа.
4. В главе 4 представлены результаты расчетов в случае, когда забор газа равен нулю, т.е. устройство разделения газов работает вхолостую. Неясно, почему автор не провел ни одного расчета с забором газа отличным от нуля?
5. На стр. 97, диссертации имеется утверждение автора, *цитата*: «... все выводы, полученные в работе, будут справедливы и при других конфигурациях...», *конец цитаты*. Без проведения дополнительных расчетов такое утверждение автора является необоснованным.
6. На рис. 4.8(б) приведены расчёты оценивающие влияние числа Кнудсена на выход продукта $\Delta\chi = \chi_{h,out}^A - \chi_{h,in}^A$. При скорости течения 0.65 м/с наблюдается расхождение результатов расчетов с данными из работы [65] примерно на 35%. Чем можно объяснить это расхождение?
7. Допущена неточность при выборе основных уравнений (4.2.1-4.2.6) и приближенных уравнений (4.2.11-4.2.14) из них полученных, которая связана с предположением об отсутствии теплообмена между горячим и

холодным газами, который неизбежно возникает через мембранную перегородку. Перепад температуры $\Delta T = T_H - T_C$ в 100 К на толщине перегородки в $l = 10^{-4}$ м порождает градиент температуры $\frac{\partial T}{\partial y} \sim 10^6$ К/м.

Это какую теплопроводность должна иметь мембрана, чтобы можно было пренебречь потоком тепла через неё?

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости полученных автором результатов.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. В частности, основные научные результаты диссертации опубликованы в одиннадцати научных статьях, в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, при этом пять из этих статей опубликованы в журналах, входящих в первую четверть. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Название работы соответствует проведенному исследованию. Публикации по теме диссертации содержат описание примененной методики исследования и в полной мере отражают содержание работы.

Таким образом, соискатель Косьянчук Василий Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор
заведующий лабораторией физики
плазменно-дуговых и лазерных процессов
ФГБУН «Институт теоретической и прикладной
механики им. С.А. Христиановича Сибирского
отделения Российской академии наук»

КОВАЛЕВ Олег Борисович

Дата подписания

16.09.2019

О.Б. Ковалев

Контактные данные:

тел.: +7(383)330-75-42, e-mail: kovalev@itam.nsc.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Адрес места работы:

630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт
теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского
отделения Российской академии наук»
Тел.: +7(383)330-42-73; e-mail: kovalev@itam.nsc.ru

Подпись О.Б. Ковалева удостоверяю:

Ученый секретарь ИТМ СО РАН

к.ф.-м.н.



дата

16.09.2019

Ю.В. Кратова

Кратова Ю.В.