

На правах рукописи

Курчатов Иван Михайлович

**ЯВЛЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧЕСКОГО ПЕРЕНОСА ГАЗА В
НАНОПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Автор:



МОСКВА – 2011

Работа выполнена в национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: кандидат физико-математических
наук, доцент Лагунцов Н.И., НИЯУ
МИФИ

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОПОНЕНТЫ: доктор физико-математических наук,
профессор Ролдугин В.И., Институт
физической химии и электрохимии им.
А.Н. Фрумкина РАН

доктор физико-математических наук,
профессор Троян В.И., НИЯУ МИФИ

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: НИЦ «Курчатовский институт»

Защита состоится «14» декабря 2011 г. в 16 час 30 мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 НИЯУ МИФИ
по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «14» ноября 2011 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н., профессор



И.И. Чернов

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В настоящее время анизотропные пористые среды, т.е. среды с изменением радиуса пор и пористости в выбранном направлении, широко используются в мембранном газоразделении, водородной энергетике и других высокотехнологичных отраслях. В частности, к таким средам относятся композиционные и асимметричные мембраны, в которых размер пор уменьшается от слоя к слою. Последний, так называемый селективный слой – непористый или нанопористый, с размером пор от десятых долей до единиц нанометров. Селективный слой формируется на нанопористом слое, размеры пор в котором составляют десятки нанометров. Недавние исследования газопереноса через такие среды показали, что транспорт газа через них может быть несимметричным, т.е. поток газа зависит от направления градиента давления, причем его изменение может достигать нескольких раз (гигантская анизотропия проницаемости).

Течение газа в пористых средах в широком интервале давлений исследовалось ранее в связи с решением ряда технологических проблем, в частности, газодиффузионного метода разделения изотопов. Теоретическое описание основывалось на решении линейризованного уравнения Больцмана с граничными условиями, описывающими взаимодействие газа с поверхностью, как правило, в модели диффузно-зеркального рассеяния.

При уменьшении размера пор в канале режим течения газа переходит от вязкого к свободномолекулярному; при нанометровых размерах пор кроме свободномолекулярного объемного потока газа становится существенным поток адсорбированных на поверхности молекул (поверхностный поток). В общем случае при расчете течения газа необходимо учитывать эти потоки, дающие заметный вклад в общий поток при заданных условиях.

Существующие методы расчета течения газа в градиентных пористых средах основаны на модели, согласно которой каждому слою мембраны ставится в соответствие сопротив-

ление газовому потоку, а перепад давления на мембране рассматривается как разность потенциалов. Этот подход не позволяет объяснить экспериментальные различия проницаемости, когда анизотропия достигает нескольких раз.

В настоящее время опубликованные сведения о несимметрическом переносе газа не имеют систематического характера, отсутствуют данные о закономерностях этих явлений.

В связи с этим, тема диссертационного исследования является актуальной.

Цель и задачи исследования:

Целью диссертационной работы явилось экспериментальное исследование и установление закономерностей несимметрического переноса газа в нанопористых средах. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Экспериментально исследованы эффекты несимметрического переноса газа, проведен поиск пористых сред, в которых реализуются явления несимметричного переноса газа.
2. Определены закономерности несимметрического переноса газа.
3. Проведен анализ возможных механизмов несимметрических эффектов газопереноса.

Научная новизна работы:

Впервые экспериментально обнаружены эффекты анизотропии проницаемости в нанопористых средах с градиентом радиусов пор и пористости в объектах различной природы и геометрии – промышленных газоразделительных мембранах из поливинилтриметилсилана (ПВТМС) с непрерывным изменением размеров пор по толщине мембраны и непористым слоем, пористых двухслойных керамических мембранах, изготовленных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Впервые получены количественные зависимости анизотропного переноса в трековых мембранах с асимметричной формой пор от давления. Эффект анизотропии переноса газа обнаружен на газах с различной адсорб-

ционной способностью. Экспериментально обнаружен «гистерезис» проницаемости градиентных нанопористых средах с градиентом радиусов пор и пористости.

Проведен анализ и определены возможные механизмы анизотропного переноса и гистерезиса переноса газа.

Практическая значимость работы

Практическая ценность работы определяется возможностью использования обнаруженных эффектов в мембранном нанокатализе для увеличения и регулирования скорости каталитических реакций, в системах регулирования процесса хранения водорода и водородных энергетических источниках, в газоразделительных системах, использующих адсорбционные и мембранные методы.

Предложенные модели могут быть использованы в качестве основы для разработки новых методов расчета оптимальных характеристик систем газоразделения, мембранного катализа и хранения водорода.

Исследования проведены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 07-08-00461-а, госконтракта Роснауки № 02.513.12.3053 по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России», госконтрактов № П372 и №П1002 по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Основные положения выносимые на защиту

1. Экспериментально обнаруженные явления несимметрического переноса газа (анизотропия и гистерезис проницаемости) в анизотропных мембранах из нитрида бора, изготовленных методом СВС и промышленных асимметричных газоразделительных мембранах из ПВТМС.

2. Установленные закономерности несимметрического переноса газов (азот, гелий, углекислый газ, водород) в различных градиентных пористых средах (трековых, СВС и ПВТМС мембранах).

3. Анализ возможных механизмов несимметрических эффектов газопереноса

Апробация работы

Основные положения работы докладывались автором на конференциях: «Научная сессия МИФИ» (г. Москва, 2006, 2007, 2008); I и II Всероссийские конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях» (г. Москва, 2008, 2009); International Symposium on Physico-Chemical Methods of Separation «Ars Separatoria – XXI, XXII, XXIII» (Poland, 2006, 2007, 2008); Membrane Science and Technology Conference of Visegrad Countries PERMEA-2007 (2007, Siofok, Hungary); Euromembrane 2009 (Montpellier, France, 2009); Всероссийская научная конференция «Мембраны-2007» (г. Москва); V Всероссийская цеолитная конференция (г. Москва, 2008); Всероссийская конференция по общей и прикладной химии «XVIII Менделеевский съезд» (г. Москва, 2008); I, II и III Международные форумы по нанотехнологиям (г. Москва, 2008, 2009, 2010), 11th Network Young Membranes 2009 (2009, Meze, France).

Разработка награждена дипломами конференций «Молодежь и наука» (г. Москва, 2006, 2007) и дипломом XII выставки «Наука и инновации НИЯУ МИФИ».

Публикации

По результатам исследований опубликовано 7 статей в рецензируемых научных журналах и 15 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 70 наименований. Диссертация изложена на 101 странице, содержит 8 таблиц и 27 рисунков.

Основное содержание работы

Во введении проведен анализ существующего состояния исследований в области газопереноса через пористые мембраны, обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, указана научная новизна и практическая ценность работы, изложены основные положения выносимые на защиту.

В первой главе описаны объекты исследования: асимметричных полимерных газоразделительных мембран, композиционных неорганических мембран, изготовленных методом СВС и трековых мембран с асимметричной формой пор; описаны методы и подходы экспериментального исследования.

Объекты исследования. В работе экспериментально исследовано три объекта различной природы с разной структурой пористого пространства: асимметричные газоразделительные полимерные мембраны из ПВТМС с непрерывным изменением радиусов пор по толщине, двухслойные композиционные мембраны, изготовленные методом СВС, а также трековые полиэтилентерефталатовые мембраны с асимметричной формой пор.

Выбор объектов обусловлен с одной стороны их существенными отличиями друг от друга и, с другой стороны, общим свойством – наличием градиента пористости и радиусов пор.

Первый объект исследования – промышленная газоразделительная мембрана из ПВТМС. Толщина мембраны составляет 150 мкм, размер пор меняется от 3–5 мкм до единиц нанометров в пористой подложке, на которой сформирован непористый селективный слой толщиной около 100 нм, пористость подложки уменьшается при приближении к селективному слою и меняется по толщине в интервале 50–70% .

Второй объект исследования – композиционные мембраны, изготовленные методом СВС. Исследовались мембраны из нитрида бора, карбида кремния и оксида алюминия. Гигантская анизотропия наблюдалась только на образцах из нитрида бора, которые имели следующие характеристики: первый слой мембраны пористый из нитрида бора («белый гра-

фит») имеет: пористость 38%, размер пор 50 нм, удельная поверхность 50 м²/г; второй слой имеет толщину около 120 мкм и размер пор 3 нм, пористость 7%.

Третий объект исследования – трековые мембраны, изготовленные на основе пленок из полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Выбор этого объекта обусловлен его простой геометрической структурой, но при этом он обладает, как и два других объекта, градиентом пористости и радиусов пор. В работе были исследованы трековые мембраны с различным числом пор на единицу поверхности и различными входными/выходными диаметрами пор. Характеристики исследованных мембран представлены в табл.1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых мембран ПЭТФ.

Мембрана	Число пор на см ²	Толщина мембраны, мкм	Диаметр пор с одной стороны, нм	Диаметр пор с другой стороны, нм
МА-30/50-2·10 ⁹	2·10 ⁹	12	30	50
МА-30/50-3·10 ⁹	3·10 ⁹	12	30	50
МС-50/50-9·10 ⁸	9·10 ⁸	12	50	50
МА-20/50-2·10 ⁸	2·10 ⁸	12	20	50

Типичное изображение поперечного сечения исследованных мембран с асимметричной формой пор (мембраны серии МА) представлено на рис. 1.

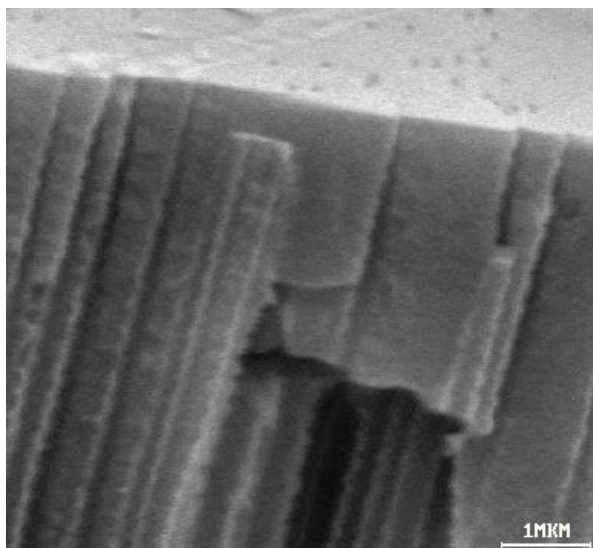


Рис. 1. Поперечное сечение трековой мембраны с несимметричной формой пор.

Из рисунка видно, что размер пор меняется по толщине пленки и вблизи одной из поверхностей диаметр поры меньше, чем внутри образца.

Определение параметров объектов исследования проводили на основе обработки изображений сколов и срезов образцов, полученных в сканирующем электронном микроскопе, а в случае образцов СВС-сред также использовали метод ртутной порометрии. При помощи обработки изображений сколов мембран были определены средний гидравлический радиус пор и пористость образцов.

Методы и методики. Исследовались зависимости от давления плотности потока газа, нормированные на перепад давления, т.е. проницаемость, которая выбрана в качестве характеристики транспортных свойств мембраны.

Проницаемость определяли методом постоянного объема, т.е. рассчитывали по скорости изменения давления газа в контрольном объеме. До проведения серии измерений образец выдерживали 30 мин. при давлении 10^{-3} атм. Таким образом, исключалось влияние остаточного газа. Измеряли давление до и после мембраны. Давление до мембраны поддерживалось постоянным, давление после мембраны менялось от 10^{-3} до 10^{-2} атм. Измеряли время повышения давления после мембраны на выбранную величину (от 10^{-3} до $20 \cdot 10^{-3}$ атм.) Образцы, имеющие большие сквозные поры (линейная зависимость от перепада давления) вы-

браковывались. Методика проведения измерения проницаемости позволила повысить точность измерения за счет оптимального выбора объема газа после мембраны, в который происходит натекание газа. Для исключения возможной механической деформации и разрушения полимерных образцов использовались специальные ячейки. Для предотвращения течения газа через торцы мембран были использованы специальные уплотнительные проставки.

Измерения проводили с использованием трех газов: легким плохо сорбируемом – He, тяжелым легко сорбируемом – CO₂ и промежуточном N₂; при исследовании проницаемости СВС пористых сред использовали водород.

Во второй главе представлены результаты и обсуждение полученных экспериментальных данных.

Выбор объектов исследований, использованных газов и диапазона давлений обусловлен исследованием проницаемости при числах Кнудсена $Kn \geq 1$. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости проницаемости чистых газов умноженной на корень из молярной массы газа (приведенная проницаемость), через трековую мембрану с цилиндрической формой пор MC-50/50-8·10⁹ из полиэтилентерефталата от давления.

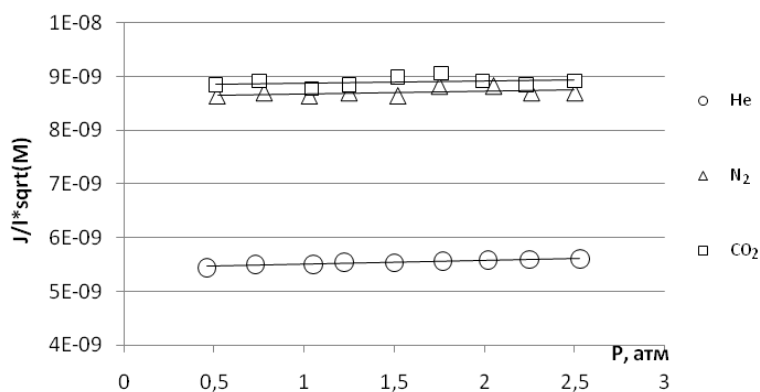


Рис. 2. Приведенная проницаемость газа через MC-50/50-8·10⁹ в зависимости от давления в расчете на одну пору: ○ – He, △ – N₂, □ – CO₂

Выбор координат обусловлен тем, что обычно такое построение позволяет оценить влияние различных эффектов на проницаемость (например, поверхностного потока).

Анизотропии проницаемости на симметричном образце обнаружено не было, но при этом зависимости азота и углекислого газа лежат значительно выше зависимости гелия. При таком построении зависимости, различия в положении кривых объясняют поверхностным потоком, однако, при размерах пор 50 нм поверхностный поток не может объяснить увеличение потока на 60% в выбранном диапазоне давлений.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости проницаемости чистых газов через трековую асимметричную мембрану MA-30/50-2·10⁹ из полиэтилентерефталата. На рис. 3-4 «прямая подача» означает, что поток газ течет в направлении от меньшего радиуса пор к порам большего радиуса, «обратная подача» означает обратное направление потока.

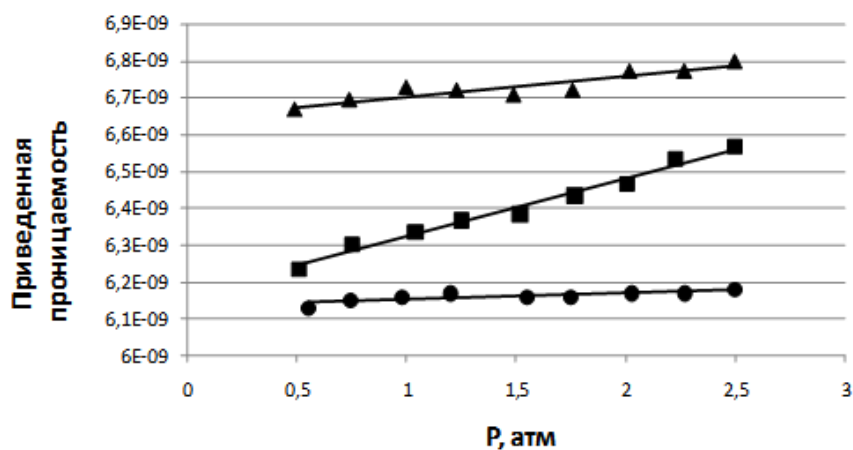


Рис. 3. Приведенная проницаемость при прямой подаче газа через MA-30/50-2·10⁹ в зависимости от давления в расчете на одну пору: о – He, Δ – N₂, □ – CO₂

Из сравнения рис. 2 и 3, следует, что при прямой подаче газа на ассиметричную мембрану проницаемость N₂ и CO₂ уменьшаются, а проницаемость гелия увеличивается на 10–15% в сравнении с образцом MC-50/50-8·10⁹. Отметим также, что при увеличении перепада давления проницаемость гелия и азота практически не меняются, а зависимость для CO₂ показывает линейный рост.

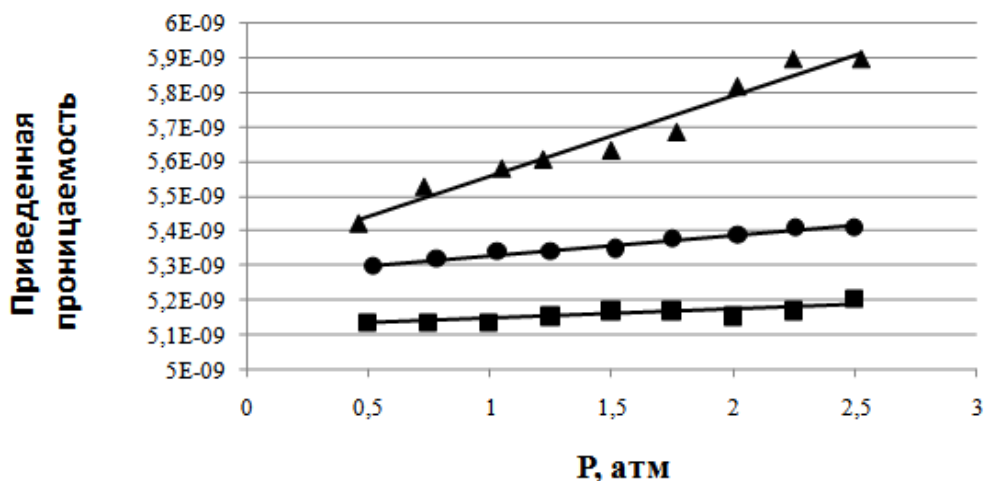


Рис. 4. Приведенная проницаемость при обратной подаче газа через МА-30/50-2·10⁹ в зависимости от давления в расчете на одну пору: о – He, Δ – N₂, □ – CO₂

Из рис. 3 и 4 видно, что проницаемости при разных направлениях подачи газа отличаются, т.е. наблюдается анизотропия проницаемости. Кроме того, различен порядок расположения газов (на рис. 4 ниже других находится не слабосорбируемый He, а сильносорбируемый CO₂).

На рис. 5 представлена зависимость отношения проницаемостей газов (проницаемость при прямой подаче к проницаемости при обратной) от давления для образца МА-30/50-2·10⁹.

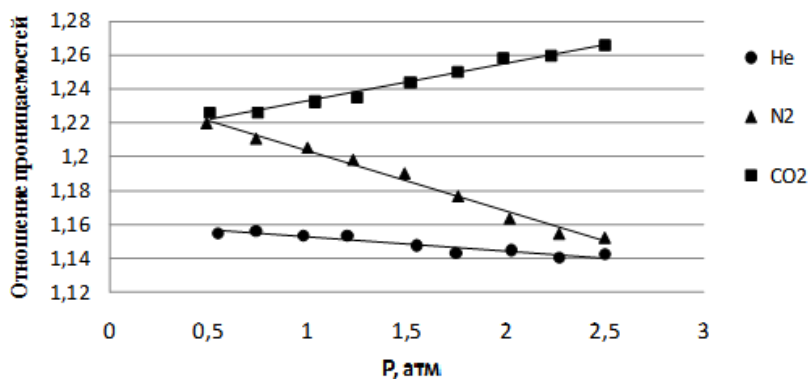


Рис. 5. Анизотропия проницаемости образца МА-30/50-2·10⁹: о – He, Δ – N₂, □ – CO₂

Видно, что анизотропия проницаемости для азота и гелия уменьшается с увеличением давления, в то время как для углекислого газа она увеличивается. Во всем интервале давлений анизотропия проницаемости больше единицы.

На других образцах трековых мембран получены данные, полностью согласующиеся с вышеприведенными результатами.

Типичные результаты измерений мембран из ПВТМС представлены на рис. 6. Представлены данные двух образцов по газам азот и гелий, нижние кривые соответствуют подаче газа на пористую подложку, а верхние – на селективный слой.

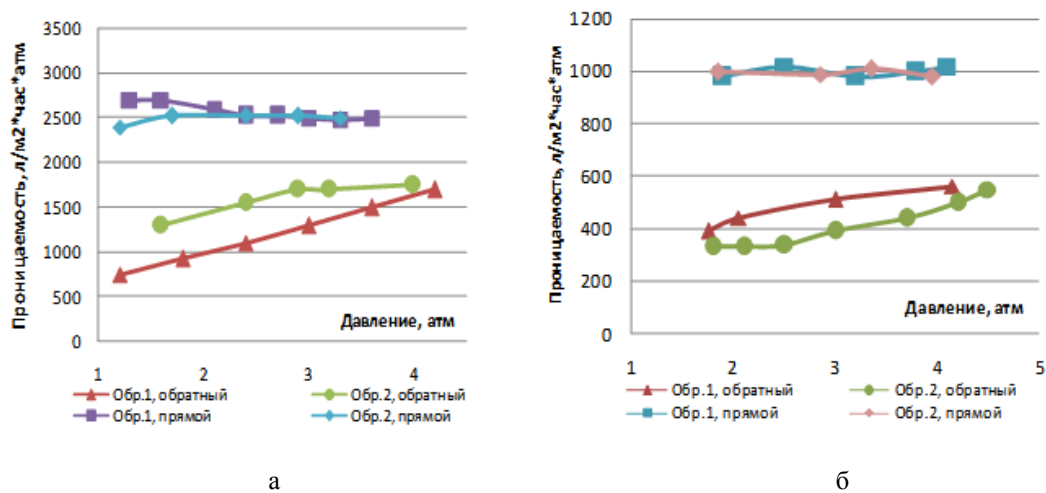


Рис. 6. Проницаемость мембраны ПВТМС: а – по гелию, б – по азоту

На рис. 6 видна гигантская анизотропия проницаемости газов (1,6÷3,3 раза) при подаче на разные стороны образцов мембраны. Отметим, что с увеличением давления отношение проницаемостей уменьшается. Также видно, что эффект практически одинаков для различных образцов данного типа. Исследование нескольких образцов необходимо, поскольку технология производства мембран не позволяет получать образцы с идентичными параметрами.

На рис. 7 представлена зависимость анизотропии проницаемости от давления, видно, что для азота величина анизотропии больше, чем для гелия. Интересно отметить, что зависимости имеют линейный характер.

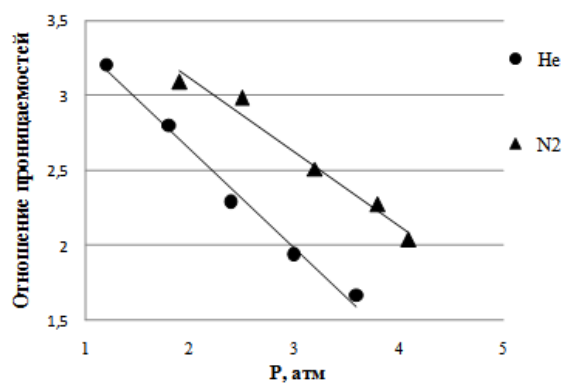


Рис. 7. Анизотропия проницаемости образца из ПВТМС: о – He, Δ – N₂

При исследовании проницаемости образцов было обнаружено, что зависимости проницаемости, измеренные при различных направлениях изменения перепада давления, не совпадают, т.е. наблюдается «гистерезис» проницаемости. Типичная зависимость представлена на рис. 8.

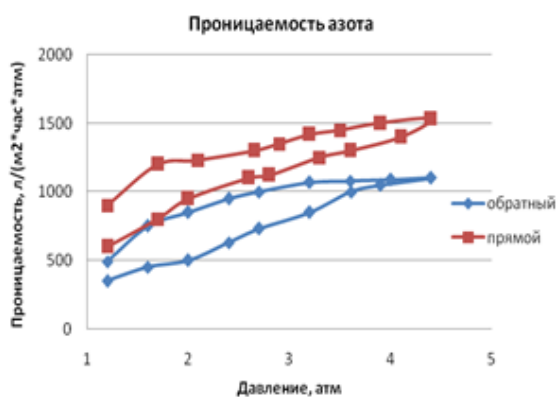


Рис.8. Гистерезисные зависимости проницаемости азота на мембране из ПВТМС

Гистерезис проницаемости, вероятно, возникает в результате различных характерных временах установления стационарных концентраций газа вдоль мембраны. При увеличении внешнего давления концентрация газа в поровом пространстве и на поверхности быстро приходит в равновесие с внешним давлением, а при уменьшении внешнего давления время установления равновесия значительно больше.

Гистерезисная зависимость наблюдается для всех исследуемых газов – гелия, азота и диоксида углерода, при этом при обратной подаче газа наблюдается гистерезис по величине значительно больше.

Эффекты анизотропии и гистерезиса проницаемости были также обнаружены на третьем объекте исследования – на композиционной мембране из нитрида бора. На рис. 9 представлена зависимость анизотропии проницаемости водорода от давления. Видно, что величина анизотропии при малых давлениях достигает двух и линейно уменьшается с увеличением давления.

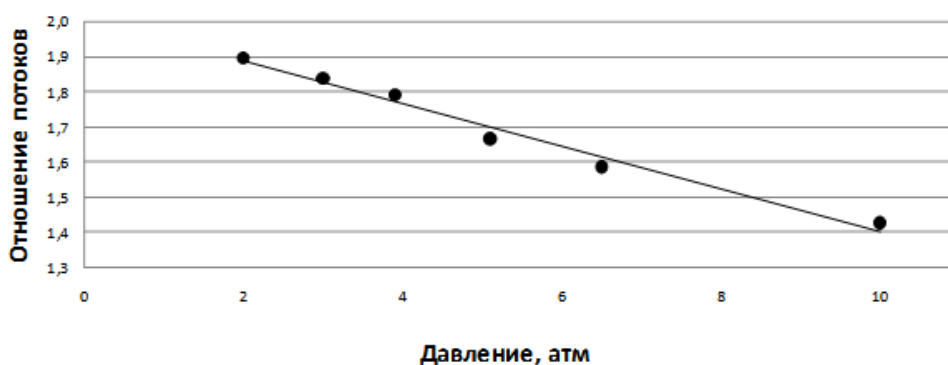


Рис.9. Зависимость анизотропии проницаемости композиционной мембраны на основе нитрида бора от давления.

На рис. 10 представлена зависимость плотности потока газа от давления, причем нижняя часть зависимости снята при повышении давления газа, верхняя – при снижении давления. Экспериментальные точки на участках зависимости параллельных оси ординат снимались при поддержании постоянного перепада давления с интервалом 2 минуты (плотность потока монотонно уменьшается со временем).

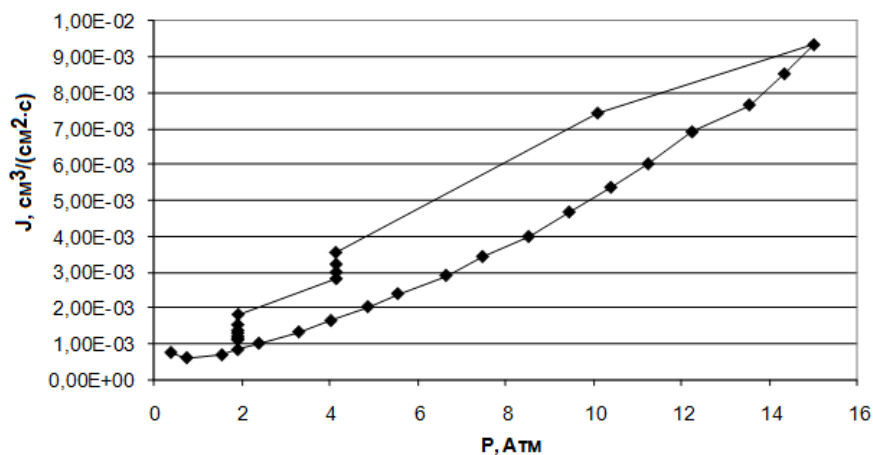


Рис. 10. Зависимость плотности потока водорода через образец СВС-мембраны

Необходимо отметить, что в исследуемом образце режим течения газа в подложке (размер пор 50 нм) меняется от свободномолекулярного до вязкого, число Кнудсена $Kn=1$ при давлении около 5 атм.

Для анализа эффекта гистерезиса проницаемости была исследована зависимость проницаемости водорода от времени. На рис. 11 представлена зависимость проницаемости образца от времени при перепаде давления 0,5 атм.

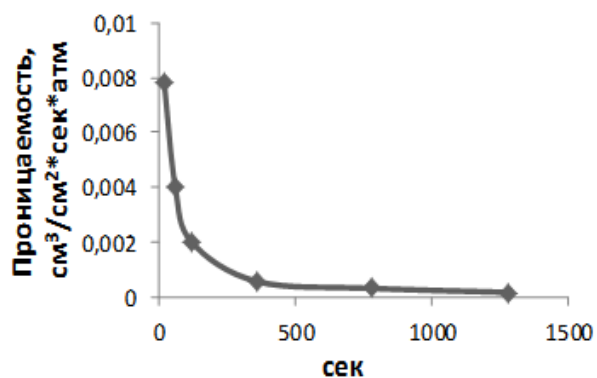


Рис.11. Зависимость проницаемости образца СВС-среды от времени при перепаде давления 0,5 атм.

Предварительно через образец пропускался водород при перепаде давления 10 атм., через 1 мин начиналось измерение проницаемости. Видно, что проницаемость сильно зависит от времени – за время наблюдения (около 20 мин) проницаемость уменьшилась на 2 порядка.

При постоянном перепаде давления поток должен оставаться постоянным, а наблюдается монотонное убывание, что указывает на десорбцию водорода из пористой среды. Таким образом, рис. 11 указывает на «захват» водорода в пористой среде.

В проведенных экспериментальных исследованиях в каналах мембран могут реализоваться несколько режимов течения: свободномолекулярное течение, поверхностный поток, вязкий поток со скольжением. В зависимости от числа Кнудсена реализуется то или иное течение газа, либо два режима могут идти параллельно. В диапазоне давлений, при которых проводились исследования, течение газа пропорционально градиенту давления (для всех режимов течения кроме вязкого), поэтому при разных направлениях течения газа создаются одинаковые перепады на слоях мембраны. В случае реализации вязкого режима течения анизотропия проницаемости не превышает 5%. В переходном режиме течения зависимость потока от давления может иметь минимум, это позволяет объяснить анизотропию проницаемости до 10%, в то время как исследовании асимметричных мембран ПВТМС и СВС отношение проницаемостей достигало двух и более. С точки зрения современного представления это означает, что сопротивление пористой подложки становится сравнимым с сопротивлением непористого полимерного слоя. Поскольку в работе использовались сильно и слабосорбируемые газы можно утверждать, что сорбционные явления не оказывают определяющего влияния на возникновение анизотропии проницаемости.

Таким образом, объяснение анизотропии проницаемости в рамках существующих теоретических представлений о течении газа в канале невозможно.

Третья глава посвящена определению возможной природы несимметрических эффектов переноса газа.

В результате экспериментального исследования показано, что в различных по природе и строению нанопористых средах наблюдаются несимметрические эффекты переноса газа. При этом общим для этих объектов является градиентная структура, т.е. наличие градиента пористости и радиусов пор. Установлено, что эти эффекты возникают при $Kn \geq 1$. Необходи-

мо также отметить, что наличие гистерезиса проницаемости указывает на увеличение сорбции и времени жизни молекул в пористой среде.

Анализ показал, что общим для эффектов несимметрического переноса газа является, то, что они наблюдаются в области давлений и размеров пор, в которой реализуется близкий к свободномолекулярному режим течения газа, при котором молекулы испытывают соударения со стенками пор чаще, чем друг с другом. Это дает основание полагать, что несимметрические эффекты газопереноса связаны с характером взаимодействия молекул газа с поверхностью пор.

Логично предположить, что при взаимодействии молекул газа с поверхностью может меняться распределение их по скоростям. Распределение Максвелла можно представить в виде произведения распределения молекул по направлениям движения, умноженное на распределение по модулю скорости. При изотремическом течении газа распределение по модулю скорости не меняется, поэтому меняться может только распределение по направлениям движения.

Используя методы стохастической динамики, показано, что распределение молекул по направлениям может быть неизотропным, а вероятность вылета молекул с поверхности перпендикулярно ей будет наибольшей. Имея такое распределение, легко найти выражение для потока газа.

Рассмотрено течение газа в двухслойной мембране, первый слой которой – пористая среда с неизотропным распределением молекул газа по направлениям движения. Для оценки потоков газа через такую мембрану выведены уравнения баланса на границах слоев.

Анализ показал, что поток со стороны слоя мембраны, в котором реализуется неизотропное распределение молекул по направлениям движения, может быть в несколько раз ниже, чем поток, подаваемый со стороны малопроницаемого слоя.

Оценки показали, что неизотропное распределение молекул по направлениям может приводить к увеличению частоты соударений молекул с поверхностью и, как следствие, к

интенсификации гетерогенно-каталитических реакций, а в градиентных средах – к анизотропии каталитической активности.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Экспериментально обнаружены эффекты анизотропии и впервые гистерезиса проницаемости в нанопористых средах с градиентом радиусов пор и пористости в объектах различной природы и геометрии – трековых мембранах с асимметричной формой пор, промышленных газоразделительных мембранах из ПВТМС с непрерывным изменением размеров пор по толщине мембраны и пористых композиционных мембранах, изготовленных методом СВС, имеющих резкое изменение размеров пор и пористости по толщине.

2. На основе анализа известных моделей течения через градиентные пористые среды, показано, что они не позволяют объяснить гигантскую анизотропию.

3. Установлены закономерности несимметричного переноса газа через градиентные среды и показано, что отношение проницаемостей (величина анизотропии проницаемости) может достигать нескольких раз. Анизотропия проницаемости, как правило, линейно уменьшается с увеличением давления.

4. Показано, что в пористых средах зависимости приведенных проницаемостей (проницаемость, умноженная на корень из молярной массы) газов могут отличаться от общеизвестных, в частности, по взаиморасположению кривых для газов с различной сорбционной способностью.

5. На основе анализа экспериментальных зависимостей гистерезиса проницаемости установлено, что в пористой среде может наблюдаться «захват» молекул водорода.

Основные публикации по теме диссертации

1. И.М. Курчатов, Н.И. Лагунцов. Исследование массопереноса газа в пористых средах. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2006, т. 9, с. 24-25.
2. I.M. Kurchatov, N.I. Laguntsov, G.I. Pisarev, V.N. Tronin, V.I. Uvarov Peculiarities of Gas Transfer through the Composite Membranes. In Proc. of the XXIth International Symposium on Physico-Chemical Methods of Separation “ARS SEPARATORIA 2006”, July 2-5, 2006, Torun, Poland, pp. 55-56.
3. А.В. Крюков, И.М. Курчатов, Н.И. Лагунцов, В.И. Уваров. К вопросу определения параметров пористой структуры мембран методом распознавания образов. – В сб.: Труды научной сессии МИФИ--2007, т. 9, с. 24-25
4. I.M. Kurchatov, N.I. Laguntsov, V.N. Tronin, V.I. Uvarov. Using the “White Noise” Model for Description Gas Permeability through the Composite Membranes. – In Proc. of the XXIInd International Symposium on Physicochemical Methods of Separation “ARS SEPARATORIA 2007”, June 10-14, 2007, Szklarska Poreba, Poland, pp. 137-138.
5. I.M. Kurchatov, N.I. Laguntsov. Gas Transfer Asymmetric Phenomena in Multilayer Composite Membranes. – In Abstracts of the Membrane Science and Technology Conference of Visegrad Countries “PERMEA 2007”, September 2 - 6, 2007, Siofok, Hungary, p. 26
6. И.М. Курчатов, Н.И. Лагунцов, В.Н. Тронин, В.И. Уваров. Моделирование эффектов несимметрического газопереноса в пористых средах. – В сб. тезисов докладов XVIII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Том 2. Химия материалов, наноструктуры и нанотехнологии. Москва, 23-28 сентября 2007 г., с. 351
7. И.М. Курчатов, Н.И. Лагунцов, В.Н. Тронин. Неизотропные эффекты в пористых средах. – В сб. тезисов докладов Всероссийской научной конференции «МЕМБРАНЫ-2007», Москва, 1-4 октября 2007 года, стр. 198

8. И.М. Курчатов, Н.И. Лагунцов, В.Н. Тронин, В.И. Уваров. Несимметрические эффекты гетерогенного катализа в композиционных каталитических мембранах. Альтернативная энергетика и экология. №5 (49), 2007, стр. 134-139.
9. I.M. Kurchatov, N.I. Laguntsov, G.I. Pisarev, V.N. Tronin, V.I. Uvarov, A.Yu. Okunev. Anisotropic Gas Transfer Through The Composite Membranes. *Ars Separatoria Acta* 5 (2007) pp. 45-54
10. Курчатов И.М., Лагунцов Н.И., Тронин В.Н., Уваров В.И., Боровинская И.П. О механизме несимметрического газопереноса в анизотропных пористых средах. Доклады академии наук. Серия: физика, 2008, том 419, №1, с. 38-40
11. И.М. Курчатов, Н.И. Лагунцов, М.В. Цодиков, А.С. Федотов, И.И. Моисеев. Природа анизотропии проницаемости и каталитической активности. *Кинетика и катализ*, 2008, т. 49, №1, с. 129-135.
12. Курчатов И.М., Лагунцов Н.И. Несимметрическая диффузия в градиентных пористых средах. – В сб. тезисов докладов 5^{ой} Всероссийской цеолитной конференции «Цеолиты и мезопористые материалы: достижения и перспективы». Звенигород, 8-11 июня 2008 г., с.248-249
13. I.M. Kurchatov, N.I. Laguntsov, V.V. Pirogov, B.V. Mchedlishvili, P.Yu. Apel, V.V. Volkov. Anisotropic Gas Transfer Phenomenon in Nanoporous Nuclear Track Membranes. – In Proc. of the XXIII International Symposium on Physico-Chemical Methods of Separation “ARS SEPARATORIA 2008”, July 6-9, 2008, Torun, Poland, pp. 285-287
14. Н.И. Лагунцов, А.В. Крюков, И.М. Курчатов, В.Н. Тронин, В.И. Уваров. Несимметрический транспорт газов в нанопористых мембранах. – В сб. тезисов докладов научно-технологических секций Международного форума по нанотехнологиям «Rusnanotech 08», Москва 3-5 декабря 2008 с. 613-615.
15. И.М. Курчатов, Н.И. Лагунцов, В.Н. Тронин. Моделирование эффекта «газового диода» в асимметричных нанопористых мембранах. – В сб. тезисов докладов II Всерос-

- сийская конференция «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях». М.: МИФИ, 2009, с. 234-235.
16. I.Kurchatov, A.Krukov, N. Laguntsov, V.Trinin, V.Volkov. Anisotropic gas transfer phenomena in asymmetric membranes. “Euromembrane 2009”, Sept. 6–10., 2009, Montpellier-France, – In Book of Abstracts, p.295
 17. И.М. Курчатов, А.В. Крюков, В.Н. Тронин, В.И. Уваров, Н.И. Лагунцов. О возможности использования эффектов несимметрического газопереноса для интенсификации гетерогенно-каталитических реакций. – В сб. тезисов докладов участников Второго Международного форума по нанотехнологиям «Rusnanotech 09», Москва 6-8 октября 2009 с. 128-129.
 18. А.В. Крюков, Н.И. Лагунцов, И.М. Курчатов. Математическое моделирование течения газа в нанопористой среде с шероховатыми стенками. – В сб. тезисов докладов участников Второго Международного форума по нанотехнологиям «Rusnanotech 09», Москва 6-8 октября 2009 с. 203-204.
 19. I.Kurchatov. Anisotropy and Hysteresis of Permeability in Asymmetric Membranes. – In Book of Abstract. Network Young Membranes 2009 (NYM 2009), Meze-France, Sept. 3–4., 2009, pp.133-134
 20. И.М. Курчатов, А.В. Крюков, В.В. Волков, Н.И. Лагунцов, Б.В. Мchedlishvili, Асимметрия транспорта газов через трековые мембраны с конусной геометрией пор // Мембраны. №3 (43), 2009, с. 3-8
 21. Н.И. Лагунцов, А.В. Крюков, И.М. Курчатов, В.Н. Тронин, В.И. Уваров. Несимметрические эффекты газопереноса в мембранах: течение разреженного газа в 3d-канале с неоднородной поверхностью. // Мембраны. №1 (41), 2009, с. 33-38
 22. Курчатов И.М., Лагунцов Н.И., Тронин В.Н. Механизм возникновения неизотропного распределения при свободномолекулярном движении частиц в канале с шероховатыми стенками. // ПЖТФ, 2010, том 36, выпуск 2, с.39-45