

K 90

P-P

460/-

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР
КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМЕНИ А.М. ГОРЬКОГО

На правах рукописи

С. И. КУЛИКОВСКИЙ

ВЛИЯНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ПОЛЯ НА ПРОХОЖДЕНИЕ
ГАЗА ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ДИФФУЗАТОРЫ

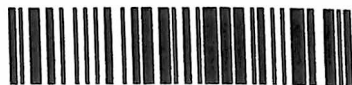
Специальность: 01.04.16- молекулярная физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Киев

1976

НБ НПУ
імені М.П. Драгоманова



100313249

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР

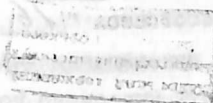
КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМЕНИ А.М. ГОРЬКОГО

На правах рукописи

С. И. КУЛИКОВСКИЙ

ВЛИЯНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ПОЛЯ НА ПРОХОЖДЕНИЕ
ГАЗА ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ДИФФУЗАТОРЫ

Специальность: 01.054 - молекулярная физика



А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Киев

1976

Работа выполнена на кафедре физики Криворожского государственного педагогического института.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Недвига П.Я.

Официальные оппоненты:

- Полак Д.С. - доктор физико-математических наук, профессор. Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева АН СССР, г.Москва.
- Луценко В.П. - кандидат физико-математических наук, в.о. профессора Киевского государственного пединститута им. А.М.Горького.
- Ведущее предприятие: Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова АН БССР, г.Минск.

Автореферат разослан "14" 1978 1976 г.
Защита диссертации состоится "16" 1978 1976 г. на заседании Совета по присуждению учёных степеней физико-математического факультета Киевского государственного педагогического института им. А.М.Горького.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института. Просим Вас принять участие в работе Совета или прислать свои отзывы, заверенные печатью, в двух экземплярах по адресу г. Киев, ул. Пирогова, 9, пединститут, Учёному секретарю.

Общая характеристика работы.

Актуальность проблемы. Большой прогресс в интенсификации тепло-энергетических и химико-технологических процессов связан с развитием науки о переносе энергии и вещества. Многочисленные и разнообразные приложения теории тепломассообмена делают исследования в этих областях весьма актуальными.

В связи с интенсификацией современного производства более высокие требования предъявляются к скорости и эффективности многих технологических процессов, например, разделения газовых смесей, сушки, очистки и т.п. Общим, что объединяет эти проблемы, есть необходимость отделения одних компонент от других. Способы для достижения этого результата могут быть различными, но обязательным остается условие эффективности и экономичности. Способ центрифугирования, который широко используется для интенсификации процессов седиментации, очистки, сушки и др., заслуживает в этом отношении особого внимания.

В то же время при решении многих технологических задач, как, например, очистка и сушка, используется явление фильтрации. Применение центрифугирования для интенсификации этих процессов необходимо знать, как будет протекать процесс фильтрации в центробежном поле. Кроме того, процесс фильтрации может быть при определенных условиях использован и для решения задач разделения. Если учесть, что до настоящего времени не проводилось теоретических и экспериментальных исследований по влиянию псевдогравитационного поля на процессы течения жидкости и газа через пористые вещества, то понятен интерес к проблеме, рассматриваемой в работе.

Цель работы — провести теоретические и экспериментальные ис-

следования влияния центробежного поля на прохождение газа через твердые капиллярно-пористые тела.

Научная новизна. Проведены исследования течения газа через пористые твердые вещества в псевдогравитационном поле при вязкостном со скольжением и молекулярном режимах.

Установлен характер влияния поля на распределение давления, концентрации, скорости течения, величину дроссельных эффектов при различных направлениях пропускания газа и различных значениях величин, характеризующих пористое вещество. Осуществлена оценка разделительных свойств центрифуг, заполненных пористым веществом.

Практическая ценность. Полученные в работе уравнения могут быть использованы на практике для расчетов давления, концентрации и других параметров газового потока в произвольной точке пористого вещества, находящегося в псевдогравитационном поле при разных режимах течения. Оценка разделительных свойств центрифуг, заполненных пористым телом, показывает, что разделение становится особенно эффективным при пропускании газа против действия поля. Разработанные и усовершенствованные приборы для определения концентрации газовых компонент - шестишпечные слитые электрические мосты - имеют высокую чувствительность и обеспечивают меньшие погрешности измерений по сравнению с четырехшпечными мостами.

Результаты исследований можно использовать при оценке эффективности применения метода центрифугирования для тех процессов, в которых происходит фильтрация газа и жидкости. Полученные уравнения дают возможность оценить условия и параметры максимальной эффективности разделения.

Увеличение разделительного эффекта при пропускании газа через пористое тело против действия центробежного поля может быть использовано в отраслях промышленности, занятых разделением смесей.

Реализация результатов работы. Полученные в работе теоретические результаты в дальнейшем были использованы совместно с Киеворожским филиалом Киевского института автоматизации для расчетов и определения параметров газового потока, вдвигаемого через пористые тела в процессе десульфатации чугуна.

Апробация работы. Диссертационная работа и ее отдельные разделы докладывались и обсуждались:

1. На V научной конференции молодых математиков Украины, Киев, 1970 г.

2. На научном семинаре кафедры тепло- и массообмена при Днепропетровском госуниверситете им. 300-летия Воссоединения Украины с Россией, 1970 г.

3. На семинаре отделов реофизики и математической теории переноса института тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова АН БССР, Минск, 1971, 1972, 1973 гг.

4. На II Всесоюзной конференции по истории физико-математических наук, Тамбов, 1974 г.

Публикация. По результатам выполненных исследований опубликовано десять работ.

Объем работы. Полный объем диссертации составляет 107 страниц машинописного текста, содержит 38 рисунков, четыре таблицы и список литературы из 96 наименований. Диссертационная работа содержит введение, три главы и выводы.

Состояние вопроса и задачи исследования.

Исследованию процессов фильтрации посвящено большое число работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Благодаря работам Лейбензона Л. С., Лыкова А.В., Минского Б.М., Атавина В.И., Адзуми Г., Кармана Т. и многих других исследователей была созда-

дана стройная теория фильтрации газа и жидкости в пористых средах. Исследования Яценко П.В., Фигуровского Н.А., Гиббса Д.В., Брандта Г., Гротца В., Когена К., и др. дали возможность построить эффективные центрифуги и подробно описать процесс центрифугирования. Но фильтрация жидкости и газа в центробежном поле оставалась не изученной.

Сведения об особенностях процесса фильтрации в центробежном поле могут быть получены при определении величин давления, концентрации и скорости фильтрации. Для определения этих величин необходимо задание внешних параметров и структуры пористого вещества. При описании процесса течения возможен выбор нескольких моделей пористых тел. Результаты, полученные на различных моделях, не всегда согласуются между собой. По этой причине одним из важных условий успешного решения поставленных задач является обоснование выбора модели пористого вещества.

В процессе исследований определение параметров газового потока в центробежном поле наталкивается на ряд технических трудностей, связанных с быстрым и точным измерением при наличии больших полей.

В связи с изложенным в настоящей работе основные задачи были:

1. Определить основные закономерности течения газа и жидкости через пористое вещество в псевдогравитационном поле:

а/ провести сопоставление различных структурных моделей пористого тела;

б/ вывести уравнение для распределения давления, скорости течения концентрации в пористом теле определенной структуры при вязкостном, вязкостном со скольжением и молекулярном режиме течения.

2. Провести оценку разделительной способности центрифуг, заполненных пористым телом.

3. Проверить полученные результаты экспериментально и сделать соответствующие обобщения.

К защите представлены следующие тезисы:

1. При исследовании процесса течения газа через цилиндрический диффузитор целесообразно использовать модель пористого тела как определенную систему капилляров переменного сечения. В этой модели пористое тело может быть представлено в виде образца тесной же формы и размеров с N капиллярами эффективного диаметра d . Уравнение для расхода газа при прохождении его через такое вещество может быть получено при учете коэффициента пористости вещества и его размеров из уравнения расхода газа при прохождении по отдельному капилляру.

2. При вязкостном режиме течения и большой проницаемости пористого тела распределение давления соответствует экспоненциальному закону. Определенное соотношение между сопротивлением пористого вещества и величиной центробежного поля может привести к появлению как точек максимума и минимума давления / в зависимости от направления вдува газа /, так и точек перегиба, где вырабатываются градиенты давления, вызванные наличием пористого вещества и центробежного поля.

3. При вязкостном со скольжением режиме течения существенно проявляется нелинейное соотношение между тензором напряжения и тензором скорости деформации. Эффект Рейнера имеет место и при течении газа через пористое тело.

4. При молекулярном режиме течения происходит сначала быстрое повышение давления в периферийных областях. Дальнейший характер распределения зависит от соотношения между характеристиками пористого вещества и величиной центробежного поля. Отклонение величины расхода с изменением сечения столкновения молекул, которое меняется обратно пропорционально относительной скорости молекул,

5. При дросселировании газа возникает дополнительное изменение температуры $-\Delta T_g$ эффект, вызванный наличием дополнительного сопротивления вращающегося ротора.

6. Разделительная способность пористого ротора выше разделительной способности такой же неподвижной пористой мембраны, изготовленной из идентичного материала. Если разделение в неподвижном пористом веществе возможно только при молекулярном режиме течения, то во вращающемся возможно и при других режимах при соответствующей величине центробежного поля и направлении хода газа. Наиболее эффективно разделение при вдуве газа против действия центробежного поля.

7. Шестиплечие слитые электронические мосты дают при измерении газовых компонент погрешности меньше, чем четырехплечие при использовании одинаковых датчиков.

Содержание работы.

В первой главе проведен краткий анализ работ, посвященных описанию особенностей фильтрации газа и разделительных свойств центрифуг. Сопоставляются различные теории течения через пористое тело. Отмечается, что лучшее соответствие с экспериментальными данными дает модель образца севинного типа. Многие авторами экспериментальными исследованиями показали, что значение эффективного диаметра для этой модели равно:

$$d = 4 \sqrt{\frac{2K_F}{\sigma}}, \quad / I /$$

где K_F - коэффициент проницаемости пористого тела, σ - коэффициент пористости. В этом случае график функциональной зависимости гидродинамического сопротивления от числа Рейнольдса Re в логарифмических координатах представляет собой прямую линию независимо от пористости и проницаемости образца. Это доказывает,

что при таком диаметре в уравнении расхода можно опустить член, учитывающий инерциальные потери. Сопоставляются данные экспериментальных и теоретических исследований течений газа через капилляры и пористые вещества. При этом учитывается предположение Адзумы, что закон течения через пористое тело может быть молибдакшей закон течения через капилляр.

Анализируя состояние вопроса о влиянии центробежного поля на равновесие в системах, можно говорить, что уже на конец XIX столетия было твердо установлено: если изолированную систему, находящуюся в равновесии, в принудительном порядке подвергнуть внешнему воздействию, то наступает пространственное смещение концентраций составляющих частей. Это явление используется для разделения смесей. Обсуждаются преимущества и недостатки различных по типу центрифуг - "качающихся", постивоточных, центрифуг, использующих термосифонный метод, метод деления полых пространства ротора на камеры. Более подробно рассмотрен метод деления полого пространства ротора на камеры, поскольку в данном методе возможно достижение практически любой степени обогащения. Разделительный эффект δ в данном методе пропорционален числу камер Z , на которое разделено полое пространство ротора. Для достижения заданной степени обогащения при этом безразлично, будет ли проводиться увеличение количества камер посредством добавления новых или данное общее пространство будет разделено на многие камеры. Поскольку пористое вещество можно представить как систему из очень большого числа камер, то становится понятной идея замены ротора, разделенного на камеры, пористым телом / авторское свидетельство № 319326 от 5.01.72 г. /. Однако, как показал еще Мартин Г. и Кун В., с увеличением числа камер происходит огромное увеличение затрат времени τ , необходимого для установления стационарного состояния. Величина τ оказывается пропорциональ-

ной ξ^2 . Но разделительные процессы, которые требуют огромных затрат времени, практически не имеют никакой ценности. В связи с этим возникает необходимость оценки влияния параметров пористого вещества и поля, а также параметров потока газа, вводимого в пор, на разделительный эффект пентофут, заполненного пористым телом.

Во второй главе показано, что уравнение распределения давления в пористом веществе

$$\frac{P_1^2 - P_2^2}{\ell} = \frac{2\xi RT \gamma}{\mu S K (1 + \frac{K}{P})} + \beta \frac{\gamma^2}{S^2}, \quad / 2 /$$

есть модификацией уравнения течения газа через отдельный капилляр с учетом трения и инерциальных потерь: P_1 и P_2 - давления на разные стороны перегородки, ξ - коэффициент динамической вязкости, R - универсальная газовая постоянная, T - абсолютная температура, ℓ - толщина образца, μ - молекулярная масса, S - площадь сечения, K - коэффициент проницаемости, P - давление, γ - весовой фильтрационный расход, β - константа, зависящая от режима фильтрации.

Рассмотрены условия, при выполнении которых можно пренебречь инерционными потерями. Далее последовательно рассмотрены вязкостный, вязкостный со скольжением и молекулярный режимы.

При вязкостном режиме, подчиняющемся закону Дарси / $K\mu \rightarrow 0, f \rightarrow 1$ / наличие псевдогравитационного поля приводит к появлению дополнительного давления $\Delta p = \rho \omega^2 \Delta x$, где ρ - плотность, x - координата рассматриваемой точки, ω - угловая скорость вращения. Распределение давления в этом случае подчиняется закону

$$P^2 = P_0^2 \exp[-K(r^2 - x^2)] - \exp(Kx^2) \int \frac{2\xi B}{x} \exp(-Kx^2) dx, \quad / 3 /$$

где P_0 - давление на входе, K - параметр, характеризующий величину центробежного поля, B - параметр, характеризующий пористое тело.

Приняв K или B равными нулю, можно получить выражение для распределения давления в неподвижном пористом веществе / диффузоре / или в полом роторе. В работе приведены значения параметров B и K для различных веществ и угловых скоростей вращения. Существенное влияние на характер распределения давления и концентрации в этом случае оказывает кроме величины B и K направление пропускания газа. При прохождении газа вдоль направления центробежного поля изменение происходит в основном за счет изменений j_0 - плотности входящего потока. По этой причине происходит смещение кривых распределения давления / при $K=const$ в область больших значений сопротивления ротора. Характерным является возникновение пиков давления внутри пористого тела при определенном значении P_0 . Значение ординаты максимума зависит от величины центробежного поля и параметров диффузора.

Особенности сопротивления вращающегося, цилиндрического потока показаны на рис. I

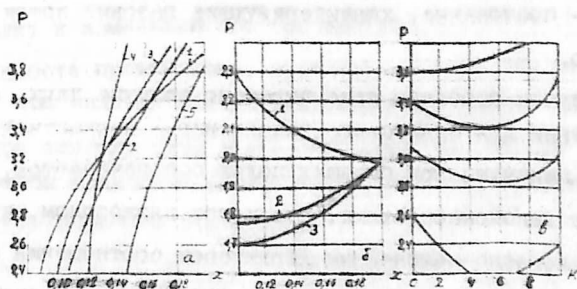


Рис. I. Особенности сопротивления цилиндрического, вращающегося диффузора: а/ при подаче газа вдоль радиуса против действия поля $P_0 = 4 \cdot 10^5$; 1, 2, 3 - $B = 5 \cdot 10^7$; 4, 5 - $B = 10^6$; 1, 4 - $K=0$; 2 - $K=5$; 3, 5 - $K=10$.

б/ при подаче газа в направлении действия поля

$$P_0 = 2 \cdot 10^5; K = 10; 1 - B = 2 \cdot 10^{10}; 2 - B = 2 \cdot 10^9; 3 - B = 2 \cdot 10^7$$

в/ изменение давления в точке, расположенной на расстоянии от оси ротора с изменением числа его оборотов

1/ $x = 0,10$; 2/ $x = 0,12$; 3/ $x = 0,14$; 4/ $x = 0,16$.

При движении газа вдоль радиуса по направлению действия поля на кривой распределения возможно появление плато, причиной которого есть равенство градиентов давления, вызванных центробежным полем и наличием пористого тела.

Главная особенность вязкостного режима со скольжением $\beta = \nu a r$. $\beta = 0$, $(1 + \frac{\beta}{r}) = const$ / состоит в том, что скорость частиц возле стенок порового канала не равна нулю. Этим обусловлено то, что в уравнении течения через отдельный капилляр нельзя пренебречь членом $\frac{8(2-f)}{f} \frac{\lambda}{a}$, где f - коэффициент отражения, λ - средняя длина свободного пробега молекул. Следовательно, выражение для распределения давления в цилиндрическом, вращающемся диффузоре принимает вид

$$\ln P = \frac{Kx^2}{2} + \int_x^r \frac{F dx}{P(B_1 x P + B_2 x)} \quad /4/$$

F, B_1, B_2 - постоянные, характеризующие газовый поток и пористое вещество.

В этом случае особенно ярко выражено наличие двух составляющих в уравнении для сдвигового напряжения - вязкостной и упругой. Максимумы и минимумы при больших полях обеспечиваются, в основном, теми же закономерностями, что и при вязкостном режиме. Их наличие обусловлено нелинейным характером соотношений между тензором напряжения и тензором скорости деформации. Главное отличие состоит в том, что эта нелинейная связь видна уже и при небольших полях, а также и в неподвижном потоке, уравнение распределения в котором имеет вид:

$$P^2 + 2BP = P_0^2 + 2BP_0 + 2F \ln \frac{r}{a} \quad /5/$$

При молекулярном режиме течения / $Kn \rightarrow \infty$ / поток становится

тся эффузионным, и общее уравнение для распределения давления в псевдогравитационном поле принимает вид

$$P = P_0 \exp[-K(z^2 - x^2)] - B \exp(Kx^2) \int \frac{\exp(-Kx^2)}{x} dx. \quad (6)$$

В этом случае резко выражен логарифмический рост расхода с изменением давления при отсутствии поля. С увеличением числа оборотов становится четко выраженной экспоненциальная зависимость парциального давления как функции расстояния от оси вращения. Некоторые искажения при очень больших полях или больших значениях B обусловлены наличием скольжения у стенок капилляров.

Для определения величины скорости газовых потоков проводилось решение уравнения Навье-Стокса с учетом вышесказанных замечаний на ЭЦМ. Сопоставление полученных значений скорости течения с экспериментальными данными позволило проверить выведенные ранее уравнения для распределения давления.

Известно, что реальный газ при расширении через пористую перегородку выполняет работу за счет своей внутренней энергии, что приводит к изменению его температуры.

В работе проверялось, насколько велики эти изменения температуры при наличии псевдогравитационных полей. Было обнаружено, что при течении газа вдоль действия поля по обе стороны пористого ротора создается определенная разность давлений, а, значит, существует разность температур.

$$\Delta T = \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H dP, \quad (7)$$

где H - энтальпия. Здесь мы имеем дело с эффектом Джоуля-Томсона.

При пропускании газа против действия поля сопротивление диффузора возрастает, что приводит к возникновению дополнительной разности температур $-\Delta T_g$. Величина дополнительного скачка температуры существенно зависит от числа оборотов и сопротивления в диффузоре. Так, при $n = 100$ об/с и $B = 2 \cdot 10^6 \frac{H^2}{M}$; $\Delta T_g = 0,02^\circ$, при

$$B = 2 \cdot 10^8 \frac{H^2}{M^2} \text{ и том же } n - \Delta Tg = 0,2^\circ.$$

Рассматривая разделительные свойства центрифуг, заполненных пористым телом, необходимо иметь в виду, что при неподвижном роторе разделение возможно только при $\lambda \gg d / K_{\text{и}} \rightarrow \infty$. Поэтому, если выполнены данные условия, в центробежном поле при подаче вдоль радиуса и в направлении поля будем иметь дело с обыкновенным диффузионным разделением. Разность давлений создается или увеличивается в этом случае вращением. Совершенно иная картина в случае подачи газа против действия поля. Противоположность сил, обусловленных наличием центробежного поля и разностью давлений по обе стороны пористого тела, приводит к увеличению разделительного эффекта. Псевдогравитационное поле создает на входе в диффузатор определенный потенциальный барьер для потока молекул газа. Этот барьер преодолеть легче / при той же средней кинетической энергии / молекулам меньшей массы. Зависимость концентрации N определенной газовой компоненты на выходе ротора описывается выражением

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\mu_i}{RTp} \frac{\partial p_i}{\partial x} (u_c - u) - \frac{D \mu_i}{RTp} \frac{\partial^2 p_i}{\partial x^2} \cdot 18 /$$

D - коэффициент диффузии, u_c - скорость, обусловленная наличием центробежного поля, u - скорость, обусловленная наличием перепада давлений. Для диффузатора с эффективным диаметром $d = 1,4 \cdot 10^{-5}$ м при $n = 100$ об/с наблюдалось уменьшение концентрации в воздухе кислорода $\sim 1,2\%$. Следует учесть, как уже отмечалось, при таком диаметре пор разделение за счет диффузии невозможно. При большом сопротивлении диффузатора эффект разделения более значительный.

В третьей главе описана методика проведения экспериментов и установки для экспериментальных исследований. Подробно описано устройство, погрешности и чувствительность электрических шести-

плечих слитых мостов. Показано, что при одинаковой чувствительности датчиков погрешности шестиплечих мостов на порядок ниже погрешностей четырехплечих.

В конце диссертации приведены выводы по проведенной работе.

В ы в о д ы

1. При исследовании проницаемости пористых веществ в псевдогравитационных полях применима модель пористого тела севинного типа.

2. Выражение для эффективного диаметра $d = 4 \sqrt{\frac{2K_F}{G}}$ применимо только в том случае, если инерционные потери отсутствуют или пренебрежительно малы.

3. Получены хорошо согласующиеся с экспериментальными данными уравнения для вязкостного, вязкостного со скольжением и молекулярного режимов, которые позволяют определить парциальное давление и концентрацию газовых компонент в произвольной точке вращающегося пористого ротора.

4. При течении газа через пористый вращающийся ротор имеет место эффект центроостремительного нагнетания воздуха, обусловленный нелинейным соотношением между тензором напряжений и тензором скорости деформации.

5. В процессе дросселирования газа через вращающийся пористый ротор имеет место / при течении газа против центробежного поля / дополнительное изменение температуры газа ΔT_g - эффект.

6. Разделительный эффект центрифуги, заполненной пористым телом можно увеличить только путем пропускания газа против действия центробежного поля.

7. Локальные скорости течения газа в пористом роторе при наличии псевдогравитационного поля могут быть найдены из уравнения

Нэвье-Стокса, если вместо парциальных давлений подставить их значения, найденные из полученных выражений. Характер распределения локальных скоростей фильтрации существенно зависит от направления пропускания газа и параметров диффузора.

8. Для точной оценки величины скорости течения, давления во вращающемся роторе хорошие результаты дает использование электрических шестишпичных слитых мостов.

Основное содержание работы изложено в следующих работах:

1. Недвига П.Я., Куликовский С.И., Сопротивление газовому потоку вращающегося диффузора, ИФЖ, т.ХVI, № 5, 902, 1969.

2. Куликовский С.Г. Проницаемость пористых оборотных диффузоров, Тезисы докладов У научной конференции молодых математиков Украины, К., 1970.

3. Недвига П.Я., Куликовский С.Г. Выведения терморезисторов как датчиков, сборник "Актуальні питання фізики твердого тіла", К., 1970, стр.164.

4. Куликовский С.Г., Недвига П.Я. До питання про проникну здатність диффузорів, там же, стр.118.

5. Куликовский С.И., Гридасов Г.Я. Исследование проницаемости твердых диффузоров, сборник "Актуальные вопросы физики твердого тела", К., 1973, стр.78.

6. Куликовский С.И. Распределение давления газа в цилиндрическом диффузоре, Известия вузов СССР, физика, №4, 143, 1972.

7. Недвига П.Я., Гридасов Г.Я., Куликовский С.И. "Логометрическая схема уравнивания", в республиканском межвузовском сборнике "Прибостроение", вып. 15, 57, 1973.

8. Куликовский С.И. Из истории исследования влияния центробежного поля на состояние термодинамического равновесия в гомогенных и гетерогенных смесях. Вопросы истории физико-математических наук. Тамбов, 1974, стр. 157.

9. Куликовский С.И. Особенности сопротивления вращающихся пористых тел. Статья депонирована в ВИНТИ, рег. № 3217-74 Деп.

10. Куликовский С.И. Особенности фильтрации газа в центробежном поле. ИФЭ, т. XXIX, № 5, 787, 1975.

Ротапринт ин-та Механообчермет, заказ 289
тираж 200 экз. № Б.Т. 82617

II мая 1976 г.

г.Кривой Рог