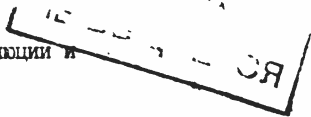


1551446

Московский ордена Ленина , ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени
Государственный Технический Университет
им. Н. Э. Баумана



На правах рукописи

УДК 536.24

Кичатов Борис Викторович

Исследование турбулентного пограничного слоя при вду-
ве газа и создание методики теплового расчета при
сверхкритических параметрах вдува

05.07.05 Двигатели летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1996

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук
профессор В. М. Поляев

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Г. А. Дрейцер
доктор технических наук,
профессор А. А. Шихов

Ведущая организация: РКК "Энергия"
им. С. П. Королёва

Защита диссертации состоится "21" октября 1996г. в
___ час. на заседании специализированного Совета К. 053.1.08
в Московском Государственном Техническом Университете
им. Н. Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, Лефортовская наб.,
д. 1, ф-т "Энергомашиностроение"

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке универси-

та, заверенный печатью,
г. Москва, 2-я Бауманская
ному секретарю Совета

1996г.

И. Н. Кутуков

1551446

м 1 п. л. Тир. 100 экз.

Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований.

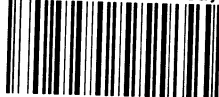
1551446

Защита поверхностей от воздействия теплового потока является одной из наиболее важных проблем, которую приходится решать конструкторам при создании ракетных двигателей, а также различных энергетических установок. Успешное решение этой задачи требует дальнейшего совершенствования существующих и исследования новых методов и способов теплозащиты. В настоящее время известно, что вдув охладителя через проникаемую оболочку обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами тепловой защиты. Протекающий при этом процесс теплообмена на проникаемой поверхности весьма неоднозначен. Тем не менее, известные на сегодня методы анализа этого процесса в ряде случаев не дают исчерпывающих ответов и обоснованных решений, поэтому необходимо дальнейшее исследование проблемы теплообмена при вдуве газа через пористую поверхность в турбулентный поток, которые позволяют более детально изучить физику протекающих процессов и квалифицированно сформулировать практические рекомендации для промышленного использования полученных результатов. Таким образом, исследование вопросов теплообмена на проникаемой поверхности является актуальной задачей.

Цель работы.

Целью настоящей работы является дальнейшее развитие теории теплообмена при вдуве газа через пористую поверхность в турбулентный пограничный слой, определение резервов повышения

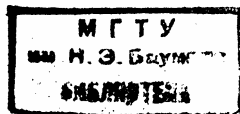
НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1551446

Кичатов Б.В. Исследование

1°



его эффективности работы. Для достижения указанной цели были поставлены задачи: моделирование процесса теплообмена турбулентного потока с пористой поверхностью при докритических параметрах вдува; моделирование процессов теплообмена турбулентного потока с пористой поверхностью при сверхкритических параметрах вдува; экспериментальное моделирование процессов теплообмена при вдуве однородного газа в дозвуковой поток.

Научная новизна.

В результате данных исследований дан вывод предельного относительного закона теплообмена для турбулентного пограничного слоя, который в частных случаях переходит в известные законы Кутателадзе-Леонтьева. Предложена универсальная модель теплообмена турбулентного потока с пористой поверхностью при до- и сверхкритических параметрах вдува. Показано, что явление "расслоения" трения и теплообмена при вдуве газа в турбулентный поток обусловлено нарушением аналогии Рейнольдса.

Практическая значимость исследований.

Предложены методы расчетов процессов теплообмена при вдуве газа набегающий поток через пористую поверхность и выполненные эксперименты дают возможность определить тепловое состояние пористого элемента. Проведенные экспериментальные исследования позволили получить количественные оценки процессов теплообмена при вдуве газа в поток через пористые элементы, а на их основе сформулировать практические рекомендации по повышению эффективности работы пористых вставок. Разработанный автором метод расчета относительного коэффициента теп-

лообмена в зависимости от параметра вдува передан для использования в ракетно-космическую корпорацию "Энергия" им. С. П. Королева.

Апробация работы.

Материалы и результаты выполненных по теме диссертации исследований, докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах в МГТУ им. Н. Э. Баумана, на научном семинаре "Парадоксы и нерешенные задачи теплообмена" под руководством академика А. И. Леонтьева (ИБТ АН).

Публикации.

По результатам приведенных исследований опубликовано 3 печатных работы.

Структура и объем работы.

Данная состоит из введения, пяти тематических глав, выводов, списка литературы и приложения. Она содержит 120 страниц основного текста, 20 рисунков, 10 таблиц, библиография насчитывает 125 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, формулируется цель и задачи исследований, характеризуется научная новизна, достоверность, практическая ценность полученных результатов, указываются вопросы, которые выносятся на защиту.

В первой главе излагается состояние вопроса. Приводятся общие сведения о течении процессов при вдуве. Ставятся цели исследования настоящей работы.

Во второй главе излагаются предпосылки к исследованию данной проблемы. Описываются основные существующие методы расчета гидродинамических и тепловых турбулентных пограничных слоев при вдуве газа. Из анализа сравнения экспериментальных данных по относительному коэффициенту трения в зависимости от параметра вдува с теоретическими результатами сделан вывод, что наиболее адекватной моделью является теория, предложенная Кутателадзе-Леонтьевым, которая основывается на использовании предельного относительного закона трения. Проведенный анализ позволил автору остановить свой выбор на использовании модели турбулентного потока с "исчезающей" вязкостью, предложенной этими авторами. Однако, при анализе экспериментальных данных по теплообмену набегающего потока с проницаемой поверхностью отмечено значительное рассогласование теории и эксперимента, особенно при больших параметрах вдува. Построению адекватной модели теплообмена набегающего турбулентного потока посвящена теоретическая часть данной работы.

Третья глава состоит из двух частей.

В первой части дан вывод предельного относительного закона теплообмена для турбулентного пограничного слоя.

В качестве определяющего соотношения используется модифицированное соотношение впервые предложенное Ландау:

$$\frac{dT}{dy} = \frac{q}{\beta_T \rho C_p \sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

где β_T тепловой характерный линейный масштаб турбулент-

ности, τ, q - касательное напряжение и тепловой поток в данной точке турбулентного пограничного слоя. В том случае, когда $q = q_w$, $\tau = \tau_w$ (индекс "w" означает значения на поверхности) из (1) после интегрирования можно получить логарифмическое распределение температуры по толщине пограничного слоя. Переходя к безразмерным переменным и производя интегрирование по толщине турбулентного пограничного слоя

$$\frac{1}{2} \int_{\bar{\theta}_1}^1 \frac{(\bar{\tau} \bar{f} \bar{\tau}_0)^{1/2}}{\bar{q}} \frac{(C_f C_{f0})^{1/2}}{St} d\bar{\theta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{\bar{y}_1}^1 \frac{\sqrt{C_{f0} \bar{\tau}_0}}{\bar{L}_r} d\bar{y}, \quad (2)$$

где $\bar{\tau} = \tau / \tau_w, \bar{q} = q / q_w$ - безразмерное касательное напряжение и тепловой поток, C_f - коэффициент трения, St - число Стентона, $\bar{\theta} = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w}$ - безразмерная температура, индекс "0" относится к стандартным условиям (безградиентный, несжимаемый турбулентный поток движется вдоль изотермической пластины), $\bar{\theta}_1, \bar{y}_1$ - безразмерная температура и координата, где начинает проявляться вязкость.

Совершая предельный переход по числу Рейнольдса $Re \rightarrow \infty$, и считая при этом, что толщина вязкого и теплопроводного подслоя стремятся к нулю с одинаковой скоростью, будет иметь место следующее соотношение

$$\int_0^1 \frac{(\bar{\tau} \bar{f} \bar{\tau}_0)^{1/2}}{\bar{q}} d\bar{\theta} = \frac{\psi_s}{\sqrt{14}} \quad (3)$$

где $\psi = \frac{St}{St_0}$ - относительный коэффициент теплообмена, $\psi = \frac{c_1}{c_0}$ - относительный коэффициент трения. В случае подобия профилей скорости и температуры, полагая при этом $\bar{t} = \bar{q}$, предельный относительный закон теплообмена (3) переходит в известный закон теплообмена Кутателадзе-Леонтьева

$$\sqrt{\psi_s} = \int_0^1 \frac{(\bar{P} \bar{q}_0)^{1/2}}{\sqrt{\bar{q}}} d\vartheta \quad (4)$$

Если в (3) положить $\bar{q} = \bar{t}$, то получим предельный относительный закон трения Кутателадзе-Леонтьева

$$\sqrt{\psi} = \int_0^1 \left(\frac{\bar{P} \bar{t}_0}{\bar{t}} \right)^{1/2} d\kappa \quad (5)$$

Во второй части третьей главы рассматривается модель теплообмена набегающего турбулентного потока с проницаемой поверхностью.

Профиль касательных напряжений по толщине пограничного слоя аппроксимируется в виде

$$\begin{cases} \bar{\tau} = \bar{\tau}_0 \left(1 + \frac{b}{\psi} \kappa \right) \\ \bar{\tau}_0 = 1 - 3\bar{y}^2 + 2\bar{y}^3 \end{cases} \quad (6)$$

где b - параметр вдува.

А распределение теплового потока можно аппроксимировать полиномом

$$\begin{cases} \bar{q} = \bar{q}_0 \left(1 + \frac{\bar{\psi}}{\psi_s} \theta\right), \\ \bar{q}_0 = 1 - 3\bar{y}^2 + 2\bar{y}^3. \end{cases} \quad (7)$$

С учетом такой аппроксимации соотношение (3) примет следующий вид

$$\int_0^1 \bar{y}^{1/2} \frac{\sqrt{\psi + \bar{\psi} \theta}}{\psi_s + \bar{\psi} \theta} d\theta = 1. \quad (8)$$

При некотором значении расхода вдвухаемого газа, который называется критическим, трение и теплообмен набегающего потока с проникаемой поверхностью вырождается $\psi = 0$, $\psi_s = 0$, тогда из (8) следует значение второго критического параметра адува

$$\sqrt{\bar{v}_{кр}} = \int_0^1 \frac{(\bar{y} \theta)^{1/2}}{\theta} d\theta. \quad (9)$$

Критическое значение параметра адува, когда происходит вырождение только трения потока о поверхность, можно выразить по формуле Кутателадзе-Левинсона

$$\sqrt{\bar{v}_{кр}} = \int_0^1 \left(\frac{\bar{y}}{\theta}\right)^{1/2} d\theta \quad (10)$$

Условие, когда отсутствует интервал параметров адува, в

котором отсутствует трение, но все остается конечен теплообмен набегающего потока с поверхностью, выражается соотношением

$$\int_0^1 \frac{(\bar{f} u)^{1/2}}{v} d\vartheta = \int_0^1 \left(\frac{\bar{f}}{u} \right)^{1/2} du \quad (11)$$

Связь между скоростью и температурой, удовлетворяющая (11) выражается как

$$\vartheta = u \quad (12)$$

Таким образом, когда нарушается аналогия Рейнольдса значения b и b' различны. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными.

Возможность режима, когда трение вырождается, а теплообмен имеет конечное значение определяется функциональным неравенством, следующим из сравнения соотношений (9) и (10)

$$\int_0^1 \left(\frac{\bar{f}}{u} \right)^{1/2} du < \int_0^1 \frac{(\bar{f} u)^{1/2}}{v} d\vartheta \quad (13)$$

Считается, что профиль скорости и температуры связаны условием

$$w = \vartheta^m \quad (14)$$

Следует отметить, что соотношение (14) распространяется только на внешнюю часть турбулентного пограничного слоя и неверно, например, для зоны оттеснения. Принимая газ несжимаемым

$\bar{\vartheta} = 1$, условие (13) можно заменить неравенством

$$m < 1. \quad (15)$$

Из (15), следует что профиль скорости должен быть более полным, чем профиль температуры. Нарушение аналогии Рейнольдса при вдуве подтверждается экспериментальными данными. Это происходит благодаря возникновению градиентного течения при вдуве, даже при течении вдоль пластины, благодаря оттеснению пограничного слоя.

С учетом (14) и принимая $\bar{\vartheta} = 1$ из (8) следует

$$b_{2кр} = \frac{4}{m^2}. \quad (16)$$

Из анализа экспериментальных данных можно принять, что $\bar{\vartheta} = 8$, тогда из (16) $m = 0,7$. Принимая, что $m = \text{const}$ и не зависит от b из соотношения (8) следует

$$\int_0^1 \frac{\sqrt{4 + b\vartheta^{9,7}}}{4,5 + b\vartheta} d\vartheta = 1. \quad (17)$$

Расчет по соотношению (17) и сравнение с экспериментальными данными приведен на рис. 1. Там же приведена теоретическая зависимость Кутателадзе-Леонтьева.

Из сопоставления полученных зависимостей с данными других

авторов и экспериментов видно, что построенная теория дает хорошие результаты, особенно при больших параметрах вдува. В частности она дает принципиальный ответ на возможность сверхкритического теплообмена в диапазоне параметров вдува $4 < v < v_{кр}$.

В четвертой главе дано описание экспериментального исследования теплообмена при вдуве газа в дозвуковой высокотемпературный газовый поток.

Экспериментальная установка состояла из компрессора, камеры дожига и рабочего участка. Воздух подавался при помощи компрессора и проходил через стабилизационную трубу в которой происходило выравнивание профиля скорости потока. Далее воздух подогревался в камере дожига, путем сгорания керосина. Для организации надежного горения в камере дожига была установлена форкамера со шнековой форсункой. Поджигание горячей смеси по всему объему камеры осуществлялось стабилизаторами. Далее горячий поток поступал через сопло в стабилизационную трубу, которая не имела специального охлаждения во избежание тепловых потерь и нарушения неравномерности температурного поля газового потока. За стабилизационной трубой крепилась испытуемая модель. В конце стабилизационной трубы перед моделью производился замер поля температур с помощью трех равномерно расположенных по окружности платино-родиевых термопар.

Эта установка позволяла получить следующие параметры газового потока: скорость потока $U_0 = 815 \frac{м}{с}$; температура торможения $T_0 = 2050 K$; давление в потоке $P_0 = 1,3 \cdot 10^5 Pa$.

Для исследования теплообмена потока с проницаемой поверхностью использовалась модель, которая состоит из двух основных

частей: пористого цилиндра (диаметром 193 мм, толщиной 5 мм и длиной мм) с приваренными по торцам кольцами из стали марки 1Х18Н9Т и внешнего корпуса. Пористый цилиндр был изготовлен из нихрома. Внешний корпус модели представлял из себя свернутую обечайку из листовой нержавеющей стали с приваренными фланцами. В обечайку вваривались два штуцера для подачи в коллектор охладителя, а также девять штуцеров для уплотнения термопар (по три хромель-алюмелевые термопары в каждом из трех рядов), расположенных под углом 40° .

На исследуемой модели, помимо параметров горячего газового потока измерялись:

1) Расход охладителя, необходимый для поддержания определенной температуры стенки при заданном режиме работы установки - по перепаду давления на шайбе связанной с дифманометром.

2) Температуру охладителя на входе в пористый образец с помощью термометра сопротивления.

3) Температуру горячих стенок пористого материала с помощью хромель-алюмелевых термопар и потенциометра ЭПП-09.

При постановке эксперимента определялась температура горячей стенки образца в зависимости от удельного расхода охладителя, при постоянном числе газового потока. На рис. 2 приведена полученная опытная зависимость.

По замерам температуры горячей стенки из уравнения теплового баланса вычислялось значение числа Стентона. Зависимость относительного коэффициента теплообмена от параметра вдува изображена на рис. 3.

В пятой главе проведен анализ полученных результатов. Проведено сопоставление полученных опытных результатов с данными других авторов, а также с теоретической зависимостью автора рис. 4. Из сопоставления результатов видно, что построенная теория адекватно описывает имеющиеся и полученные автором опытные данные.

В качестве физического обоснования построенной теории можно привести следующее рассуждение. При сильных вдувах основным слагаемым в уравнении баланса энтальпии, переносщим тепло в поперечном направлении является конвективный член $j_{ct} \frac{\partial h}{\partial y}$, где j_{ct} — массовая скорость вдуваемого охладителя. Так как в построенной теории был произведен отказ от аналогии Рейнольдса и профиль температур менее полный, чем при допущении о подобии профилей скорости и температуры, то и градиент температуры, при отказе от гипотезы подобия будет меньше. А это значит, что один и тот же поток вдуваемого газа будет переносить меньше тепла в ускоренном течении, чем при пренебрежении этим обстоятельством. Вот почему теория Кутателадзе-Леонтьева, использующая допущение о наличии аналогии Рейнольдса, дает заниженные значения относительного коэффициента теплообмена по сравнению с теорией автора и экспериментальными данными.

Во второй части пятой главы проведена оценка эффективности транспирационного охлаждения по сравнению с конвективным (рубашечным). Так при увеличении энтальпии набегающего потока потребный расход охладителя идущий на поддержание определенной температуры стенки уменьшается в транспирационном охлаждении по сравнению с рубашечным.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предложен предельный относительный закон теплообмена для турбулентного пограничного слоя с "исчезающей" вязкостью на основе модифицированного соотношения, впервые предложенного Ландау. При допущении о подобии профилей скорости и температуры полученный закон переходит в известные предельные относительные законы трения и теплообмена Кутателадзе-Леонтьева.

2. На основе выведенного единого предельного относительного закона теплообмена выполнено математическое моделирование теплообмена набегающего турбулентного потока с проницаемой поверхностью при вдуве однородного газа. Получены теоретические зависимости относительного коэффициента теплообмена как при докритических, так и при сверхкритических параметрах вдува. Дан вывод второго критического параметра вдува, определяющего вырождение теплообмена.

3. Показано, что при нарушении подобия профилей скорости и температуры, вырождение теплообмена набегающего потока с поверхностью происходит при параметрах вдува больших чем те, которые соответствуют вырождению трения, когда профиль скорости более полный, чем профиль температуры.

4. Проведены экспериментальные исследования вдува газосодержащего охладителя в высокотемпературный газовый поток. Получена экспериментальная зависимость относительного коэффициента теплообмена в зависимости от параметра вдува, достаточно хорошо согласующимися с экспериментальными данными других авторов и с полученной теоретической зависимостью.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кичатов В.В., Поляев В.М. Предельный относительный закон трения и теплообмена в турбулентном пограничном слое

//Деп.рук. ВИНТИ.-1996.-N1416-B96. - 4с.

2. Кичатов В.В., Поляев В.М. Турбулентный теплообмен на проницаемой поверхности в области сверхкритических вдувов газа // п.рук. ВИНТИ.-1996.-N1417-B96. - 13с.

3. Поляев В.М., Кичатов В.В. Экспериментальные исследования турбулентного теплообмена на проницаемой поверхности при вдуве газа в сверхзвуковой поток //Деп.рук. ВИНТИ.-1996.-N1418-B96.- 11с.

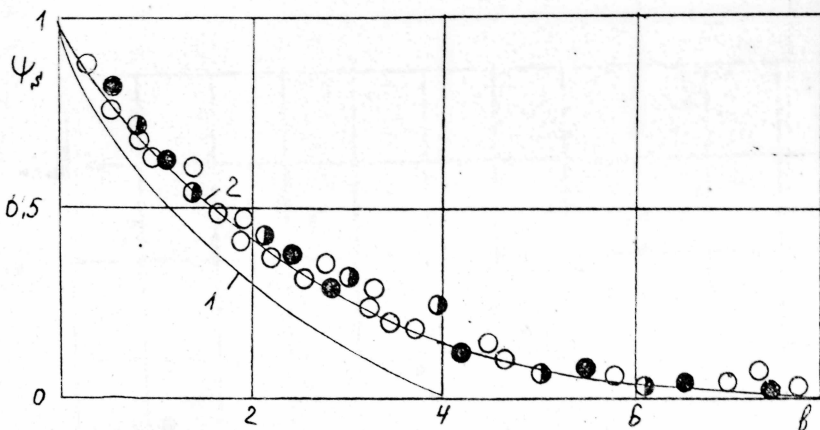


Рис. 1. Влияние вдува газа на коэффициент теплоотдачи на проникаемой пластине: 1 - расчет по формуле Кутателадзе-Леонтьева; 2 - расчет автора; точки - опытные данные: $\circ$ - Мислей; $\bullet$ - Романенко; $\bullet$ - Леонтьев

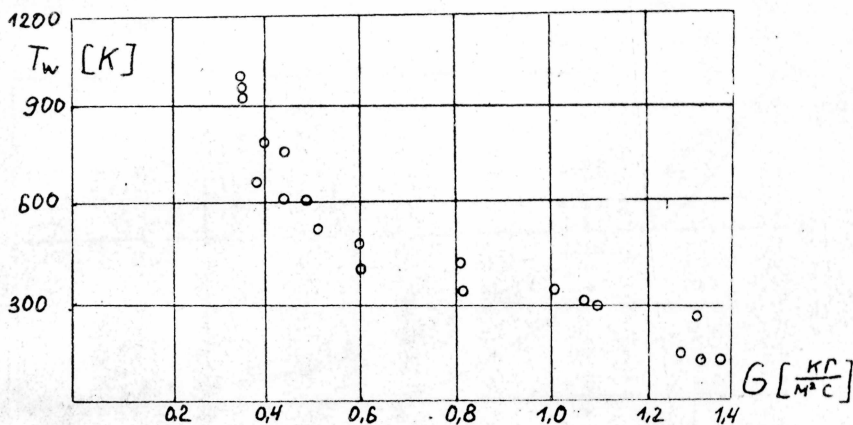


Рис. 2. Зависимость температуры горячей стенки пористого цилиндра от расхода охладителя

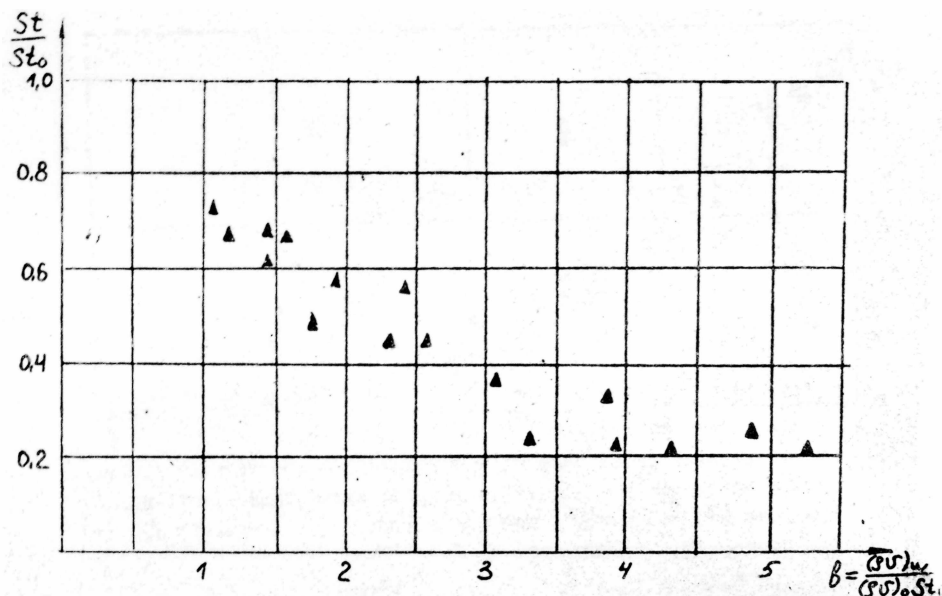


Рис. 3. Экспериментальные данные автора по влиянию вдува на коэффициент теплоотдачи

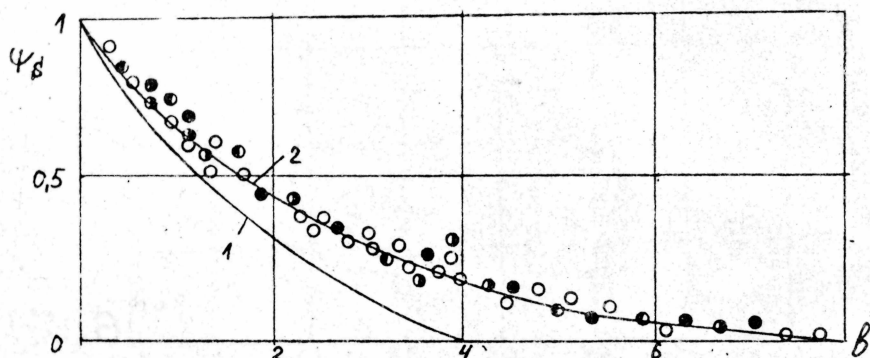


Рис. 4. Влияние вдува газа на коэффициент теплоотдачи на проницаемой пластине: 1 - расчет по формуле Кутателадзе-Леонтьева; 2 - расчет автора; точки - опытные данные: $\circ$ - Мислей; $\bullet$ - Романенко; $\bullet$ - Леонтьев; $\bullet$ - автор