

УДК 532.526.4

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПЛАСТИНЕ ПРИ ВДУВЕ ГЕЛИЯ

А. Л. ЕРМАКОВ, В. М. ЕРОШЕНКО, А. А. КЛИМОВ  
В. П. МОТУЛЕВИЧ, Ю. Н. ТЕРЕНТЬЕВ

(Москва)

Представлены результаты экспериментального исследования структуры турбулентного пограничного слоя на пористой пластине при вдуве гелия. Анализируется влияние параметра вдува на осредненные и пульсационные распределения скоростей и концентраций в слое. Описывается последовательность процесса оттеснения и дается параметр оттеснения.

Метод защиты поверхностей различных элементов конструкций, основанный на поперечном подводе вещества в пограничный слой, популярен ввиду своей высокой эффективности. В некоторых приложениях возникает необходимость снижать тепловые потоки к поверхности в десятки раз, а основной поток оттеснять от стенки настолько, чтобы концентрация его на поверхности была ничтожно мала. Это реализуется при так называемом сильном вдуве.

В численных методах расчета взаимодействия ламинарного потока газа с телом при интенсивном подводе массы с поверхности в последнее время достигнуты значительные успехи [1]. При сравнении результатов численного счета с экспериментами [2] обнаружено хорошее согласие.

В этой работе продолжены экспериментальные исследования [3] по изучению структуры турбулентного пограничного слоя при вдуве через пористую пластину.

Эксперименты проводились на газодинамической установке непрерывного действия с интерферометром Маха — Цендера типа ИТ-14 [4].

Исследуемая пористая пластина размерами  $132 \times 40$  мм<sup>2</sup> монтировалась заподлицо в нижнюю стенку канала квадратного сечения  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>. Для устранения отрицательных градиентов давления во внешнем течении, которые возникали при интенсивных вдувах, а также для создания градиентных течений, верхняя крышка канала была сделана подвижной.

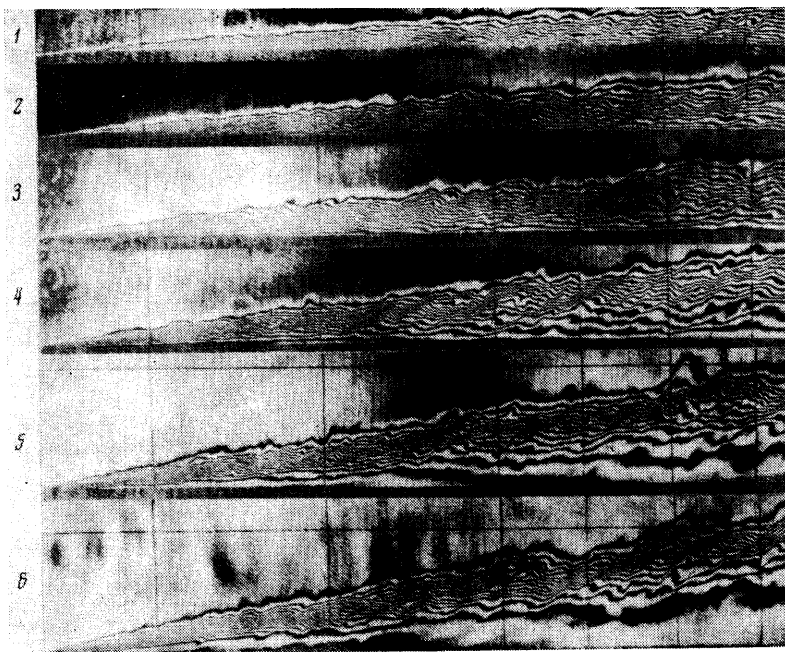
Скорости в пограничном слое пластины измерялись отечественным электротермоанемометром типа ЭТАМ-3А. Профили концентрации при вдуве гелия определялись интерферометрическим методом. Источником света для интерферометра служил импульсный лазер с модулированной добротностью [5] типа Арзни-207.

Эксперименты проводились в изотермических условиях при скорости набегающего потока, обеспечивающей развитый турбулентный пограничный слой по всей длине пластины (число Рейнольдса  $R_x = 2 \cdot 10^5$ ). Некоторые подробности о модели, методиках и предварительных исследованиях пластины при отсутствии вдува содержатся в [3].

На фиг. 1 приведена последовательность интерферограмм, иллюстрирующая влияние вдува гелия на турбулентный пограничный слой. Исходная настройка интерферометра производилась на бесконечно широкую полосу. Снимки 1—6 сделаны при значениях параметра вдува  $F = (\rho v)_w / (\rho u)_e = 0.269, 0.384, 0.493, 0.596, 0.778$  и  $0.945\%$ , соответственно. Здесь  $\rho$  — плотность;  $u$  и  $v$  — горизонтальная (направление  $x$ ) и вертикальная (направление  $y$ ) составляющие скорости; индекс  $w$  относится к условиям на стенке,  $e$  — к условиям на границе пограничного слоя. На интерферограммах видны вертикальные реперные отметки, обозначающие

различные рабочие сечения пластины. Чтобы уменьшить влияние предвключенного участка [3], исследования полей скорости и концентрации проводились в конце пластины.

Качественно картина поведения диффузионного пограничного слоя при вдуве гелия очень похожа на аналогичную картину при вдуве углекислого газа [3]. Нарастание по длине пластины пограничного слоя при вдуве происходит по закону, близкому к линейному. Толщина слоя в фиксирован-



Фиг. 1

ном сечении с ростом интенсивности вдува увеличивается. При конечных параметрах вдува происходит практически полное оттеснение набегающего потока от стенки, на которой образуется зона 100%-ной концентрации гелия — зона оттеснения.

Если сравнивать по параметру вдува  $F$ , гелий существенно более эффективен, чем  $\text{CO}_2$  [3]. Для достижения аналогичного воздействия на пограничный слой гелия нужно вдувать приблизительно в 6 раз меньше, чем  $\text{CO}_2$ . Это соответствует общепринятым представлениям [6].

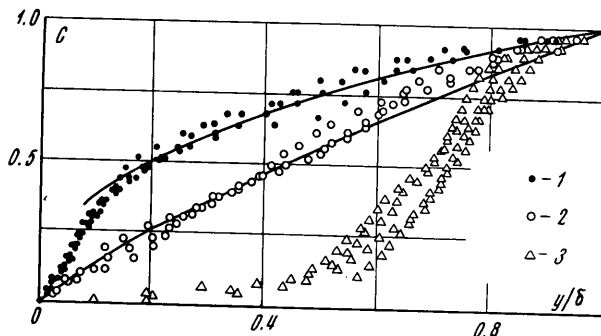
На фиг. 2 изображено распределение объемных концентраций гелия  $c = (C_w - C) / (C_w - C_e)$  для параметров вдува  $F = 0.269, 0.384$  и  $0.945\%$  (снимки 1, 2 и 6 на фиг. 1). Видно, что последовательность деформации профилей, вызванная возрастающей интенсивностью вдува гелия, аналогична таковой при вдуве углекислого газа и воздуха [3] как для концентраций, так и для скоростей; (от профиля типа пограничного слоя (точки 1) через линейное распределение (точки 2) к струйному (точки 3)).

При малой интенсивности вдува профили объемной концентрации гелия в турбулентном ядре деформируются по степенным законам  $c = (y/\delta)^{1/n}$ , где  $n = f(F, R_x)$ . На фиг. 2 построены расчетные профили при  $n = 2.4$  и  $1.2$ .

При слабых вдувах, т. е. до оттеснения пограничного слоя, на стенке имеется неразрушившийся ламинарный диффузионный подслой, в кото-

ром уровень пульсаций концентраций на порядок меньше, чем в турбулентном ядре, и находится на границе чувствительности интерферометрического метода (для конкретных характеристик течения и модели), т. е.  $\sim 1\%$ .

На фиг. 3 приведены увеличенные интерферограммы участка пограничного слоя при исходной настройке интерферометра на бесконечно ши-



Фиг. 2

рокую полосу (а) и вертикальные полосы конечной ширины (б). При настройке интерферометра на вертикальные полосы конечной ширины вся область взаимодействия визуализируется в виде линий, изображающих в определенном масштабе профили концентраций. Параметр вдува соответствует снимку 1 на фиг. 1.

Вблизи стенки виден ламинарный диффузионный подслой, состоящий из невозмущенных турбулентностью интерференционных полос (фиг. 3, а). При движении от стенки вверх отчетливо видно, как нарастает возмущенность полос, а следовательно, и пульсации концентрации. Представление о распределении концентрации в подслое можно получить из рассмотрения интерферограммы на фиг. 3, б. Видно, что в большей части ламинарного подслоя интерференционная полоса представляет собой прямую линию, т. е. профиль объемной концентрации линейен.

Из рассмотрения уравнения диффузии в пограничном слое, записанного для условий на стенке, следует, что при вдуве на кривой распределения массовой концентрации должна существовать точка перегиба, в которой  $\partial^2 C / \partial y^2 = 0$ . При этом не на стенке, а в слое находится точка перегиба должна. Экспериментально зафиксировано, что при малой интенсивности вдува точка перегиба находится в ламинарном диффузионном подслое вблизи стенки.

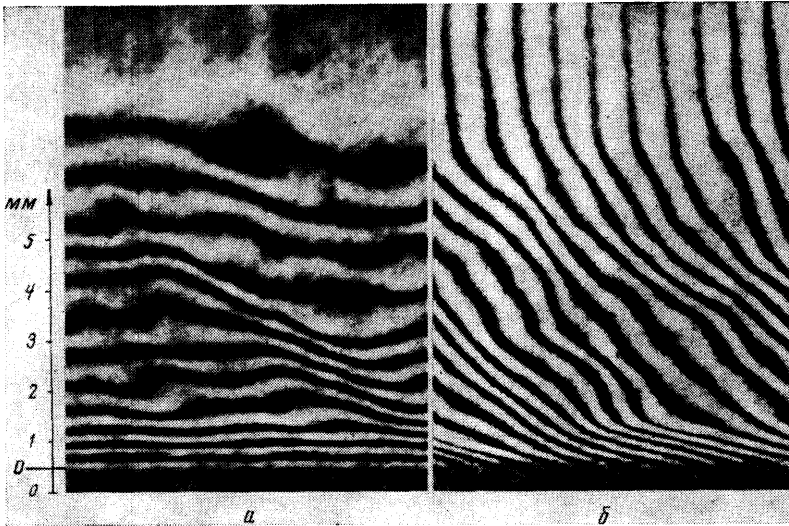
Аналогичное линейное распределение объемной концентрации в ламинарном диффузионном подслое ранее было обнаружено [3] при вдуве тяжелого газа —  $\text{CO}_2$ . Это позволяет сделать вывод о том, что линейный профиль концентрации, устанавливающийся в большей части диффузионного ламинарного подслоя при слабых вдувах различных газов, не является случайным следствием свойств газов или их близкого совпадения (как, например, в случае вдува углекислоты), а закономерен и представляет собой результат действия различных видов переноса.

За счет того что при слабых вдувах на стенке имеется ламинарный диффузионный подслой, значение концентрации на поверхности не пульсирует, а постоянно и соответствует сечению по длине пластины и вдуву. За пористой пластиной подслоя сразу же разрушается, и на стенке имеют место значительные (порядка нескольких процентов) пульсации концентрации (по аналогии скоростей и температур).

При некоторой (критической) интенсивности вдува происходит оттеснение (отрыв) диффузионного пограничного слоя. В точке оттеснения (реально это некоторая область) выполняется условие

$$j_w = -\rho D(\partial C / \partial y)_w = 0 \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  — плотность,  $D$  — коэффициент диффузии,  $C$  — концентрация.



Фиг. 3

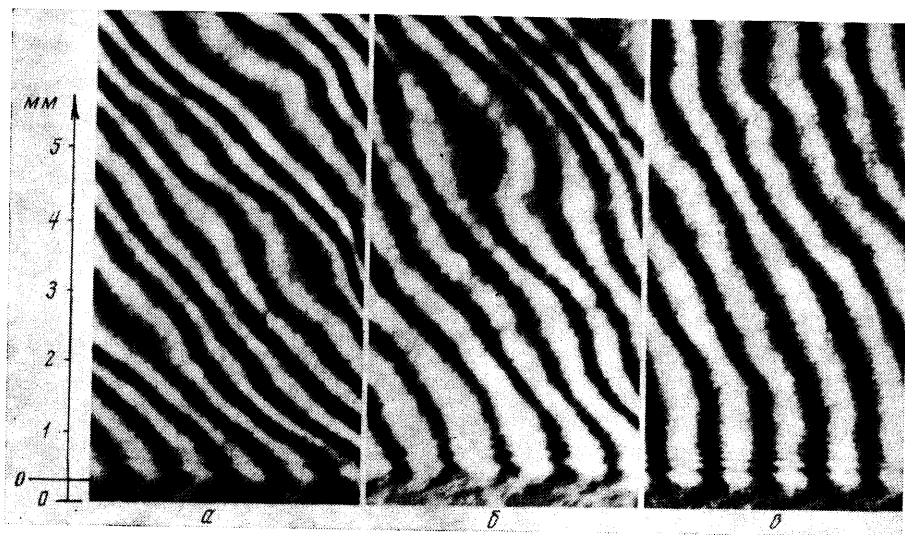
В работе с помощью интерферометрического метода с достаточно высокой точностью зафиксировано оттеснение диффузионного пограничного слоя, т. е. выполнение условия (1), при вполне конечных параметрах вдува (см. снимки на фиг. 1).

Необходимо отметить, что оттеснение турбулентного пограничного слоя (равно как и ламинарного [2]) происходит плавно и не сопровождается какой-либо резкой перестройкой течения, свойственной отрыву пограничного слоя в диффузорах (образование обратного движения жидкости, вихрей, перебрасывание течения от одной стенки к другой). В этом смысле процесс оттеснения пограничного слоя посредством вдува не имеет ничего общего с отрывом при положительном градиенте давления, кроме условия отрыва (1), записанного для продольной составляющей скорости. Картина течения при возрастании параметра вдува как в момент оттеснения, так и после него остается все время устойчивой, и поэтому мгновенные снимки, представленные на фиг. 1, полностью характерны для процесса.

Определим параметр оттеснения в виде  $b_k = 2F / c_{f0}$ , где  $c_{f0}$  — локальный коэффициент поверхностного трения на пластине при отсутствии вдува. Если пренебречь предвключенным участком, т. е. предположить, что на оттеснение диффузионного пограничного слоя он влияет слабо, и считать локальный коэффициент поверхностного трения от начала вдува, то значение  $b_k$  находится где-то в пределах  $1.3 \div 1.6$ . Теоретическое значение параметра оттеснения при вдуве гелия равно  $1.2$  [6].

Интересно отметить, что при критическом параметре вдува, который реализует начало оттеснения (условие (1)), профиль безразмерной объемной концентрации гелия хорошо аппроксимируется прямой линией (точки 2 на фиг. 2). Таким образом в момент оттеснения  $(C_w - C) / j(C_w - C_e) \approx y / \delta$ .

Возможность оттеснения, а также последовательность развития процесса хорошо иллюстрируется интерферограммами пристеночной области на фиг. 3, б и фиг. 4. Параметры вдува на фиг. 4 соответствуют снимкам 2, 3 и 4 (фиг. 1). Последовательность развития процесса оттеснения происходит следующим образом. При малых интенсивностях вдува на стенке имеется ламинарный диффузионный подслой с линейным распределением



Фиг. 4

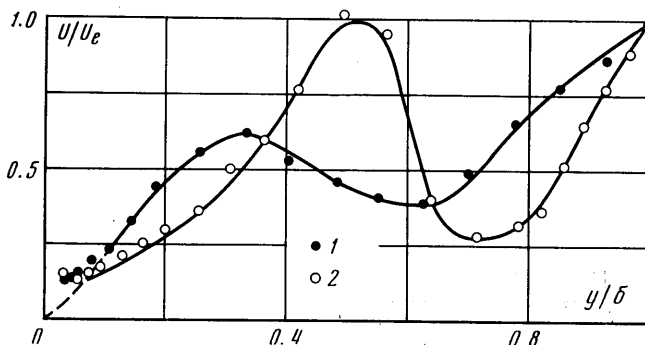
объемной концентрации в нем. В турбулентном ядре профили объемной концентрации аппроксимируются степенными функциями. По мере увеличения интенсивности вдува участок с линейным распределением концентрации в ламинарном подслое сужается, а сам подслой вырождается в зону оттеснения. При этом профили концентрации все более деформируются, приближаясь к струйным, а пограничный слой оттесняется от стенки.

После оттеснения всю область течения можно разбить на две характерные зоны, которые отчетливо видны на снимках 5 и 6 (фиг. 1), — зону оттеснения и зону смещения вдуваемого газа и набегающего потока. В зоне оттеснения концентрация гелия практически равна 100%, а компонента градиента концентрации в поперечном направлении пренебрежимо мала (точки 3 на фиг. 2). Зона смещения характеризуется резким уменьшением концентрации вдуваемого газа с постоянным градиентом  $dc/dy$ .

Исследование динамического поля с помощью термоанемометра оказалось технически весьма сложным из-за существенного различия в физических свойствах пары воздух — гелий. Если при вдуве углекислого газа [3] пренебрежение отличиями свойств  $\text{CO}_2$  и воздуха давало при измерении профиля скорости ошибку всего в несколько процентов, то при вдуве гелия можно было ошибаться в десятки раз. Поэтому нахождению профиля скорости турбулентного пограничного слоя со вдувом гелия с приемлемой точностью ( $\sim 8 \div 10\%$ ) предшествовала тщательная тарировка насадка термоанемометра по смесям на специальной установке, и большой комплекс вычислительно-графической работы [7].

На фиг. 5 изображены профили безразмерной скорости для вдувов гелия, соответствующих снимкам 4 и 6 (фиг. 1). Видно, что поведение про-

дольной составляющей скорости не совсем обычно и принципиально отличается от устанавливающегося профиля скорости при сильном вдуве других газов — воздуха и  $\text{CO}_2$  [3]. Хорошо заметен максимум скорости, расположенный в зоне оттеснения, т. е. имеет место разгон газа. При этом,



Фиг. 5

чем интенсивней вдув, тем до больших скоростей разгоняется газ (точки 1 соответствуют меньшему параметру вдува, точки 2 — большему).

Причина, объясняющая ускорение газа, состоит в наличии продольного отрицательного градиента давления. Поскольку во внешнем течении градиент давления устранялся верхней гибкой стенкой, а его отсутствие проверялось каждый раз экспериментально термоанемометрическими измерениями, то отрицательный градиент давления в продольном направлении, по-видимому, возникал в самом пограничном слое при вдуве. Он-то и разгонял легкий газ в зоне оттеснения.

Продольный отрицательный градиент давления может возникнуть в пограничном слое из-за скачкообразного прекращения вдува за пористым участком. Это аналогично эффекту, наблюдаемому при обтекании потоком клина конечных размеров, за которым происходит его резкое расширение.

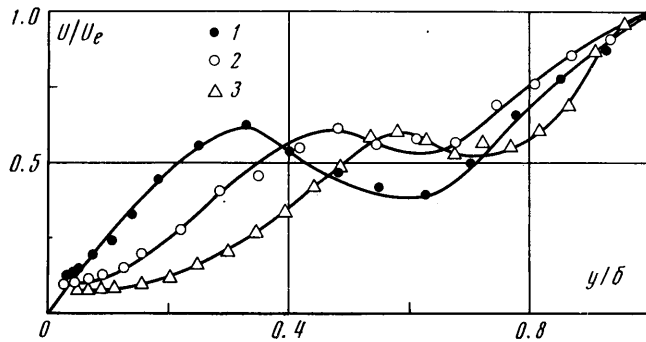
Была предпринята попытка создать во внешнем течении с помощью подвижной верхней стенки такой положительный градиент давления, который бы компенсировал отрицательный градиент давления в слое. В этом случае ожидалось, что в зоне оттеснения не будет иметь место разгон газа, а на профиле скорости при вдуве гелия не будет ярко выраженного максимума. Для этого было организовано течение в слаборасширяющемся канале с углами раствора  $\alpha = 0, 4, 10^\circ$ .

Однако создать положительный градиент давления во внешнем потоке с помощью верхней гибкой стенки для исследуемого параметра вдува не удалось. По мере увеличения угла раствора зона смешения дальше отходила от стенки, полностью компенсируя подъем крышки, и скорость на границе пограничного слоя оставалась постоянной. На фиг. 6 изображены полученные при этом распределения скоростей для параметра вдува  $F = 0.596\%$ . Точки 1, 2, 3 соответствуют  $\alpha = 0, 4, 10^\circ$ . Из фиг. 6 видно, что частично таким образом удалось повлиять на профиль скорости, уменьшив на нем провалы. Однако по величине максимумы на профиле оставались без изменения, сместившись из зоны оттеснения в зону смещения. Картина течения за все время эксперимента оставалась полностью устойчивой.

Разбиение всей области течения при сильном вдуве на две характерные зоны можно производить не только на основании рассмотрения поведения осредненных распределений концентрации (фиг. 2). Зоны отлича-

ются уровнем пульсаций концентраций, которые были измерены интерферометрическим методом.

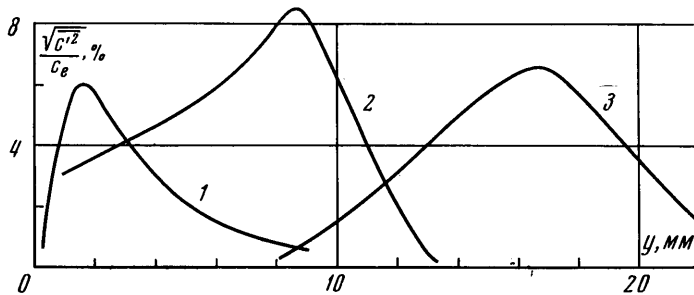
Несмотря на то, что турбулентность представляет собой пространственное явление, при определенных условиях [8] интегральная оптическая



Фиг. 6

картина должна быть идентична картине турбулентного течения в продольном сечении.

На фиг. 7 показано изменение распределения степени турбулентных пульсаций объемной концентрации гелия  $\varepsilon = \sqrt{\overline{c'^2}}/c_e$  по слою в зависимости от интенсивности вдува. Кривые 1, 2, 3 соответствуют  $F = 0.269$ ,



Фиг. 7

0.493 и 0.945%. Среднее квадратическое отклонение (пульсация) объемной концентрации гелия находилось по методу малых выборок. Кривые на фиг. 7 проведены в середине доверительного интервала надежности 0.684. Наибольшая величина доверительного интервала находится в области  $\varepsilon_{\max}$ . Для кривой 1 она равна, например,  $[0.060 - 0.021, 0.060 + 0.021]$ . Кривые 1—3 являются типичными для исследуемого диапазона параметров вдува (0.270 ÷ 0.945%).

При слабом вдуве степень турбулентной пульсации концентрации имеет в непосредственной близости от стенки резко выраженный максимум. Этот максимум с увеличением интенсивности вдува сдвигается приблизительно в середине зоны смешения и вместе с зоной смешения отселяется от поверхности. При движении из зоны смешения по направлению к поверхности пульсации концентрации плавно падают и в зоне отселевания стремятся к весьма малой величине. Граница между зонами отселевания и смешения по уровню пульсаций резко не обозначена. Таким образом, зона смешения — это не только область больших градиентов осредненного параметра, но и область наибольших турбулентных пульсаций concentra-

ции. В работе [9] аналогичный качественный вывод был получен с помощью термоанемометра для турбулентных пульсаций скорости при сильном вдуве воздуха, фреона и гелия.

Для фиксированного сечения были найдены зависимости  $\varepsilon = f(y)$ , аналогичные представленным на фиг. 7, для шести параметров вдува, соответствующих снимкам 1—6 (фиг. 1). Следует отметить, что величина максимума степени пульсаций в слое  $\varepsilon_{\max}$  вначале с ростом вдува несколько увеличивается, т. е. имеет место турбулизация диффузионного пограничного слоя вдувом. При дальнейшем увеличении интенсивности вдува наблюдается тенденция к уменьшению  $\varepsilon_{\max}$ .

Поступило 12 IV 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гершбейн Э. А. Ламинарный многокомпонентный пограничный слой при больших вдувах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1970, № 1.
2. Ерошенко В. М., Ермаков А. Л., Климов А. А., Мотулевич В. П., Терентьев Ю. Н. Экспериментальное исследование профилей скорости и концентрации в бинарных зонах смешения. Сб. «Термоаэродинамика», Минск, 1970.
3. Ерошенко В. М., Ермаков А. Л., Климов А. А., Мотулевич В. П., Терентьев Ю. П. Экспериментальное исследование влияния интенсивного вдува различных газов на турбулентный пограничный слой. Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, № 1.
4. Ерошенко В. М., Морозов М. М., Мотулевич В. П., Петров Ю. Н., Пушкин В. С. Газодинамическая установка с интерферометром ИТ-14. Сб. «Физическая газодинамика и теплообмен», М., Изд-во АН СССР, 1961.
5. Баскарев Б. Н., Ерошенко В. М., Мушинский А. А., Терентьев Ю. Н. Лазеры как источники света для интерферометра Маха — Цендера. Инж.-физ. ж., 1969, т. 17, № 2.
6. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. Новосибирск, 1964.
7. Ерошенко В. М., Ермаков А. Л., Климов А. А., Терентьев Ю. Н. Термоанемометрический метод определения профиля скорости в бинарных зонах смешения. Сборник расширенных рефератов законченных научно-исследовательских работ Энергетического института им. Г. М. Кржижановского, М., «Информ-энерго», 1970.
8. Хинце И. О. Турбулентность. Ее механизм и теория. М., Физматгиз, 1963.
9. Дружинин С. А., Зеленгур А. А., Мамонов В. Н., Миронов Б. П. Оттеснение в турбулентном пограничном слое на проницаемой поверхности при сверхкритическом вдуве. ПМТФ, 1969, № 1.