

На фиг. 3 пунктирной кривой изображена функция  $C_f \sqrt{R_x}$ , соответствующая локально-автомодельному решению, которое получается при решении уравнений (8) для равных нулю производных  $\partial U / \partial \xi$ ,  $\partial \varphi / \partial \xi$ . Можно сделать вывод, что локально-автомодельное решение весьма мало отличается от точного.

Толщина вытеснения  $\delta^*$  и толщина потери импульса  $\delta^{**}$  вычислялись по формулам

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left( 1 - \frac{u}{u_{\infty}} \right) dy = \frac{x}{\sqrt{R_x}} \int_0^{\infty} (1 - U) d\eta \quad (11)$$

$$\delta^{**} = \int_0^{\infty} \frac{u}{u_{\infty}} \left( 1 - \frac{u}{u_{\infty}} \right) dy = \frac{x}{\sqrt{R_x}} \int_0^{\infty} U(1 - U) d\eta \quad (12)$$

Распределение по длине канала безразмерных функций  $\delta^{\circ} = \delta^* \sqrt{R_x} / x$  и  $\delta^{\circ\circ} = \delta^{**} \sqrt{R_x} / x$  приведено на фиг. 3.

Расчеты показывают, что безразмерная толщина пограничного слоя  $\eta^* = \delta \sqrt{R_x} / x$  не меняется вдоль канала и равняется 10.6. Значение  $\eta^*$  определялось в каждом сечении канала выполнением граничного условия

$$u = u_{\infty} \quad \text{при} \quad y = \delta, \quad \text{или} \quad \left( \frac{\partial u}{\partial \eta} \right)_{\eta = \eta^*} = 0.$$

Институт механики МГУ

Поступило 30 VII 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rossow V. J. On flow of electrically conducting fluids over a flat plate in the presence of a transverse magnetic field NASA TB 1358, 1958.
2. Wu J. C. Growth of magnetohydrodynamic boundary layers. ARS Journal, 1964, vol. 34, No. 4.
3. Jaffe N. A. Effects of a transverse magnetic field and spanwise electric field on the boundary layer of a conducting fluid. AIAA Journal, 1966, vol. 4, No. 10. (Рус. пер.: Ракетная техника и космонавтика, 1966, № 10.)
4. Китанин Э. Л., Соколовский Ю. А. Пограничный слой проводящей среды в магнитном поле. Магнитная гидродинамика, 1966, № 1.
5. Lewis E. The solution of a MHD problem using a numerical method devised by Raetz. Quart. J. Mech. and Appl. Math., 1968, vol. 24, No. 4.
6. Heywood J. B., Moffat W. C. Validity of integral methods in MHD boundary layer analyses. AIAA Journal, 1965, vol. 3, No. 8. (Рус. пер.: Ракетная техника и космонавтика, 1965, № 8.)
7. Dix D. M. The magnetohydrodynamic flow past a non-conducting flat plate in the presence of a transverse magnetic field. J. Fluid Mech., 1963, vol. 15, p. 3.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОГО ВДУВА РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ НА ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

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

(Москва)

Представлены результаты экспериментального исследования влияния вдува различных газов (воздух,  $\text{CO}_2$ ) на турбулентный пограничный слой плоской пластины.

Рассмотрена последовательность деформации осредненных распределений скоростей и концентраций турбулентного пограничного слоя, которая имеет место при варьировании параметра вдува в широком диапазоне. Обнаружен рост толщины ламинарного подслоя при вдуве без его турбулизации, а также увеличение физической толщины пограничного слоя.

Сильный вдув газа в турбулентный пограничный слой привлекает к себе внимание как средство защиты поверхностей различных элементов конструкций главным образом от лучистых тепловых потоков или коррозионного воздействия. При сильном вдуве пограничный слой оттесняется от поверхности, на которой образуется пленка 100%-ной концентрации вдуваемой компоненты. Эта пленка может предохра-

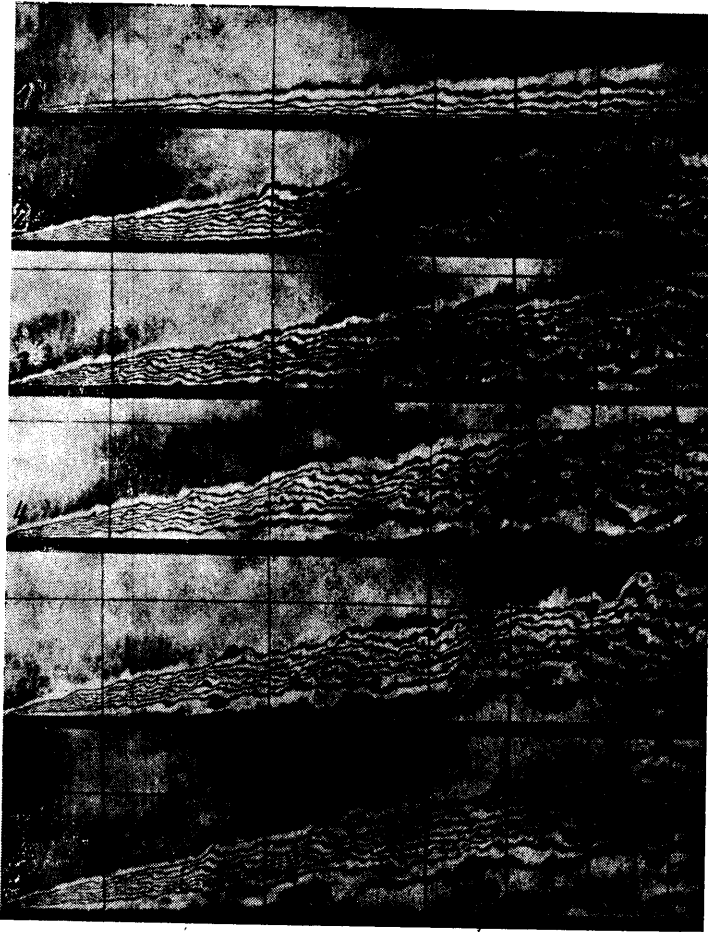
нить поверхность от химически активных веществ основного потока. Вдвуглощающих сред может существенно снизить лучистые тепловые потоки со стороны внешнего течения.

В настоящее время отсутствуют надежные методы расчета динамического взаимодействия тел с турбулентным потоком газа при интенсивном подводе массы с поверхности даже для простейшего случая течения ( $M_e = 0$ ,  $dp/dx = 0$ ,  $T_e/T_w = 1$ ). Существующие экспериментальные данные весьма малочисленны и во многом противоречивы.

В данной работе экспериментально исследуется влияние равномерного вдува различных газов на распределения осредненных характеристик турбулентного пограничного слоя в широком диапазоне параметра вдува  $F = (\rho v)_w / (\rho u)_e$  (индекс  $w$  относится к условиям на стенке,  $e$  — к условиям на границе пограничного слоя).

Эксперименты были проведены на газодинамической установке с интерферометром Маха — Цендера типа ИТ-14 [1].

Исследуемая модель представляла собой канал квадратного сечения  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>. Боковыми стенками канала служили стекла интерферометрической чистоты. Поле



Фиг. 1

наблюдения составляло  $184 \times 42.5$  мм<sup>2</sup>. В нижнюю стенку канала монтировалась заодно пористая вставка-пластина, имеющая размеры  $132 \times 40$  мм<sup>2</sup> (материал — пористый никель, пористость 69%).

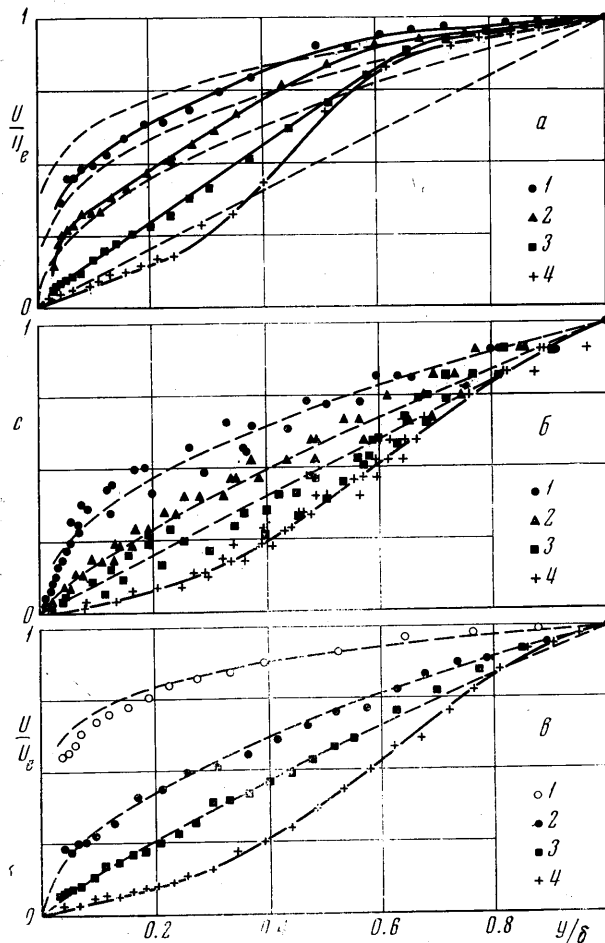
Для устранения нелинейных продольных градиентов давления, которые возникали при интенсивных вдувах, верхняя крышка канала была сделана гибкой. Необходимое положение гибкой стенки находилось при каждом режиме течения экспериментально, путем подбора. Для этого при каждом вдуве измерялась скорость датчи-

ком при движении его в продольном направлении. Удовлетворительным считалось такое положение верхней стенки, когда скорость внешнего течения изменялась по длине пористой пластины не более чем на 3%.

В качестве вдуваемых жидкостей использовались две — воздух и углекислый газ, которые подавались в модель из баллонов высокого давления. Погрешность определения расхода составляла 2—3%.

Измерение скоростных полей в пограничном слое пластины производилось отечественным электротермоанемометром типа ЭТАМ-3А. При измерениях в неоднородных пограничных слоях проводилась тарировка насадка термоанемометра по смесям. Расшифровка рабочих показаний выполнялась по методике, описанной в работе [2]. Погрешность определения скорости при однородном вдуве равнялась 2%, при неоднородном — 5%.

Профили концентраций при вдуве углекислого газа определялись интерферометрическим методом. В качестве источника света для интерферометра использовался рубиновый лазер [3] с модулированной добротностью типа Арзни-207 с дли-



Фиг. 2

тельностью вспышки  $\sim 50$  нсек. Высокая интенсивность лазерного света позволила вести съемку изучаемого объекта на широкоформатную 19 см аэрофотопленку почти без его уменьшения, что значительно повысило точность получаемых результатов. Профиль осредненной концентрации получался в результате расшифровки 3—4 интерферограмм, каждая из которых давала мгновенный профиль концентрации. Погрешность определения концентрации по интерферограммам не превышала 1%.

Все эксперименты выполнялись в изотермических условиях при нулевом продольном градиенте давления. Течение было существенно дозвуковое.

Предварительные эксперименты, проведенные на пористой пластине при отсутствии вдува, показали, что на пластине имеется развитый турбулентный пограничный слой (профили скорости удовлетворительно совпадают с законом степени  $1/7$  для распределения скорости). Число Рейнольдса, построенное по длине, с учетом эффективного предвключенного участка (который оказался равным  $x_n \approx 150$  мм) менялось в пределах  $R_x = 2 \cdot 10^5 \div 3.6 \cdot 10^5$ .

Измерения профилей скоростей и концентраций производились в сечении, достаточно удаленном от начала пористой пластины, где гидродинамика полностью определялась интенсивностью вдува.

На фиг. 1 приведено несколько интерферограмм турбулентного пограничного слоя при варьировании интенсивности вдува углекислого газа в широких пределах и исходной настройке интерферометра на бесконечно широкую полосу. Снимки 1—6 сделаны при значениях  $F = 1.61, 3.58, 4.20, 5.30, 5.83, 6.31\%$  соответственно. На интерферограммах каждая горизонтальная линия является изоконцентрационной линией. По плотности изоконцентрационных линий, приходящейся на единицу поперечного измерения пограничного слоя, представляется возможным визуально, без расшифровки судить о градиентах концентрации в поперечном направлении.

По внешнему виду диффузионного пограничного слоя можно делать заключения и о гидродинамическом пограничном слое, поскольку они в первом приближении совпадают. Видно, что нарастание по длине пластины турбулентного пограничного слоя при вдуве происходит строго по линейному закону, отклонение от которого свидетельствует о наличии продольного градиента давления. Высокая чувствительность турбулентного пограничного слоя к продольным градиентам давления давала возможность проверять по уже снятой интерферограмме наличие или отсутствие градиентов, т. е. контролировать тщательность подбора положения гибкой стенки.

С возрастанием параметра вдува физическая толщина пограничного слоя в фиксированном сечении начинает увеличиваться. Анализ результатов экспериментов показывает, что рост толщины пограничного слоя связан линейно с параметром вдува. Этот вывод согласуется с результатами работы [4].

На фиг. 2, а приведены безразмерные профили скорости, а на фиг. 2, б — безразмерные профили концентрации в зависимости от параметра вдува углекислого газа; точки 1, 2, 3, 4 соответствуют  $F = 1.59, 2.36, 2.98, 4.10\%$ . Из этой фигуры видно, что вдув существенно перераспределяет осредненные характеристики турбулентного пограничного слоя. При увеличении параметра вдува профили скоростей и концентраций проходят последовательно три весьма характерные стадии.

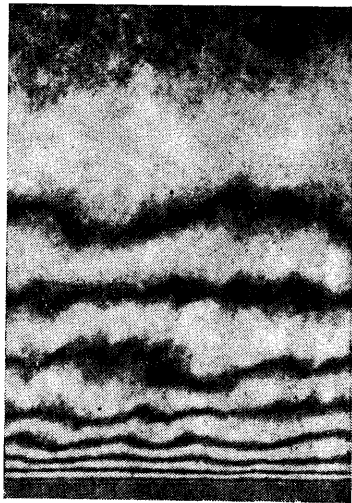
Профили на первой стадии деформации типа пограничного слоя (точки 1) характеризуются сравнительно высокой заполненностью и большими значениями производных скоростей и концентраций на стенке. Заполненность профилей, а также значения производных на стенке уменьшаются с увеличением вдува.

Ламинарный подслои с присутствующими ему линейными распределениями характеристик пограничного слоя значительно утолщаются, но пока еще окончательно не разрушаются. На фиг. 3 показана интерферограмма участка турбулентного пограничного слоя, снятая при исходной настройке интерферометра на бесконечно широкую полосу. Интерферограмма сильно увеличена, что позволяет видеть течение в пристеночной области. Около стенки наблюдается значительное сгущение изоконцентрационных линий, что свидетельствует о больших градиентах концентрации в этой области. Соответствующее распределение концентрации углекислого газа дано на фиг. 2, б (точки 1).

По возрастанию возмущенности изоконцентрационных линий при удалении от поверхности можно видеть как молекулярный механизм обмена постепенно (не скачком) сменяется развитым молярным.

На фиг. 4 приведен профиль концентрации в пристеночной области  $c = (C_w - C) / (C_w - C_e)$ . Видно, что концентрация меняется по линейному закону.

Отождествление этой пристеночной области с ламинарным подслоем основано на том, что, во-первых, эта область непосредственно прилегает к поверхности; во-вторых, в относительном представлении мала ( $\delta / \delta_1 \sim 10^{-2}$ ); в-третьих, градиент концентрации в ней существенно больше, чем в остальной части зоны смешения;



Фиг. 3

в-четвертых, механизм обмена в этой области близок к молекулярному (об этом можно судить по слабой возмущенности изоконцентрационных линий и как следствие этого по тому, что расшифровки различных интерферограмм укладываются на одну кривую — (фиг. 4) точки 1 и 2).

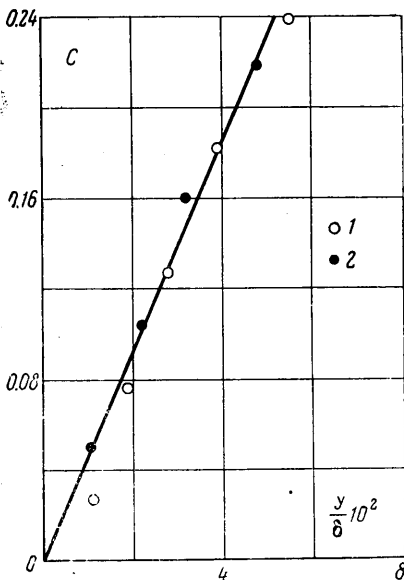
Рефракционные ограничения при типичных углах рефракции, возникающих, когда на стенке имеется ламинарный подслоя толщиной  $0.4 \div 0.5$  мм, позволяли при расшифровке интерферограмм приблизиться к поверхности на расстояние  $\sim 0.1$  мм. Увеличение толщины ламинарного подслоя или перемещение зоны больших градиентов концентрации со стенки в ядро потока давали возможность подойти к поверхности еще ближе.

Данные эксперименты опровергают распространенное в литературе мнение, что вдув газа в турбулентный пограничный слой турбулизирует ламинарный подслоя.

По-видимому, это происходит не всегда и зависит от размера пор проникаемой поверхности. В данных экспериментах пластина изготавливалась из пористого никеля с размером пор  $\sim 1$  м.

Если сравнить относительную толщину гидродинамического ламинарного подслоя при отсутствии вдува, которая имела расчетное значение  $2 \cdot 10^{-2}$ , с относительной толщиной диффузионного ламинарного подслоя (которая должна совпадать с гидродинамической, так как для газов число Шмидта  $S \approx 1$ ) при параметре вдува  $F = 1.61 \cdot 10^{-2}$  (фиг. 4), то видно, что она увеличилась приблизительно в три раза. Это область слабых вдувов.

При существенном увеличении вдува профили скоростей и концентраций принимают S-образный (напоминающий струйный) вид и сохраняют его до очень сильных вдувов (точки 4 на фиг. 2а, б). Характерной особенностью профилей на этой третьей стадии деформации является, то, что они имеют точку перегиба и состоят из двух частей. Первая часть дает профиль вблизи стенки и отличается весьма малыми значениями градиентов (скоростей и концентраций) в поперечном направлении. В этой зоне малых градиентов (которую удобно назвать зоной оттеснения) по термоанемометрическим замерам около стенки обнаружено течение, близкое к ламинарному.



Фиг. 4

При удалении от стенки фиксируются отдельные крупномасштабные пульсации, проникающие из ядра течения. Вторая часть дает профиль в зоне смешения вдуваемого газа и набегающего потока. В зоне смешения градиенты существенно больше, чем в зоне оттеснения. Здесь происходит интенсивный обмен за счет хорошо развитой турбулентности. Интересно отметить, что в основной части зоны смешения  $\partial C / \partial y$  и  $\partial u / \partial y$  сохраняют постоянные значения, которые уменьшаются при увеличении вдува. Это, очевидно, область сильных вдувов.

Зона оттеснения, отошедшая зона смешения, а также отдельные крупномасштабные пульсации, проникающие в зону оттеснения, хорошо видны на фиг. 1 (снимки 5 и 6).

Рассмотренные две стадии деформации профилей скоростей и концентраций (типа пограничного слоя и струи) разделены промежуточной стадией деформации, характеризующейся постоянными значениями градиентов скоростей и концентраций на протяжении всей зоны смешения как вблизи стенки, так и в ядре зоны (линейный профиль — точки 3 на фиг. 2, а и б).

Сравнение профилей скоростей с соответствующими профилями концентраций (фиг. 2а, б) показывает, что аналогия Рейнольдса для переноса импульса и массы нарушена как при слабых (пограничный слой), так и при сильных (струя) вдувах. Профили скоростей более заполнены при слабых и имеют больший градиент в зоне смешения при сильных вдувах. Между тем уравнения количества движения и диффузии (если оставаться в рамках теории пограничного слоя) тождественны при одинаковых граничных условиях.

На фиг. 2, в представлены безразмерные профили скорости при однородном вдуве (воздух — воздух). Точки 1, 2, 3, 4 соответствуют  $F = 0, 1.32, 1.99, 3.54\%$ .

Как видно, имеет место отмеченная последовательность деформации профилей, а именно от профиля типа пограничного слоя через линейное распределение к струйному.

Известно [6], что в развитом турбулентном пограничном слое на пластине распределение скорости может быть аппроксимировано степенной функцией

$$u/u_e = (y/\delta)^{1/n}$$

где  $n = 7$  в большом диапазоне чисел Рейнольдса  $R$ . Найдено [6], что в изотермическом однородном турбулентном пограничном слое слабый вдув таким образом перераспределяет профили скоростей, что в показателе степени  $n \rightarrow 1$ . На фиг. 2, *в* по точкам 1, 2, 3 проведены пунктирные линии, соответствующие расчетным степенным профилям с показателем степени  $n = 7, 1.9$  и  $1.2$ . После того как  $n$  в показателе степени примет значение, равное единице, на профиле скорости появляется точка перегиба и аппроксимировать его простой степенной зависимостью не удастся.

Интересно отметить, что профили концентрации при слабых вдувах углекислого газа также деформируются по степенным законам. Это хорошо видно из фиг. 2, *б*, где пунктирными линиями проведены расчетные профили при  $n = 2.1, 1.3, 1.0$ . Из этого следует, что можно отыскать критерии, при равенстве которых профили скоростей при слабых вдувах воздуха будут совпадать с профилями концентраций при вдувах углекислого газа. В качестве таких критериев выбраны

$$R_x = \text{idem}, \quad K = (\rho v^2)_w / (\rho u^2)_e = \text{idem}.$$

Соответственные кривые на фиг. 2, *б* и *в* нанесены с учетом этих критериев (некоторое несовпадение кривых имеет место из-за нестрогого соблюдения условия  $K = \text{idem}$ ). Отмеченное подобие профилей удалось обнаружить только при слабых вдувах.

На фиг. 2, *а* пунктирными линиями нанесены расчетные степенные профили при  $n = 1, 2, 3, 5$ . Видно, что профили скорости при деформации, вызванной вдувом углекислого газа, не следуют степенным законам.

Таким образом, анализируя кривые на фиг. 2, можно сказать, что неподобие профилей скоростей и концентраций при слабых вдувах углекислого газа, по-видимому, вызывается наличием профиля плотности поперек пограничного слоя —  $\rho_w / \rho_e = 1.5$  (кроме плотностей газа весьма близки по свойствам). Если это так, то безразлично, каким образом создается профиль плотности (например, он может быть получен при однородном вдуве, но при наличии теплообмена). Идея моделирования в изотермических условиях гидродинамики течения в пограничном слое при вдуве холодного газа в горячий набегающий поток высказывается в работе [7].

Окончательный вывод о влиянии профиля плотности на нарушение подобия полей скоростей и концентраций может быть сделан после проведения экспериментов со вдувом холодного воздуха в горячий набегающий поток (температурный фактор должен быть равен  $T_e/T_w = 1.5$ ). При этом должна быть рассмотрена последовательность деформации профилей температур (которые так же, как и профили концентраций, более консервативны к различного рода динамическим возмущениям) и скоростей. Кроме того, должно быть проверено совпадение профилей скоростей с профилями, замеренными в изотермических условиях при одинаковых параметрах вдува.

Поступило 22 IV 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ерошенко В. М., Морозов М. Г., 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.
2. Ерошенко В. М., Ермаков А. Л., Климов А. А., Мотулевич В. П., Терентьев Ю. Н. Термоанемометрический метод определения профиля скорости в бинарных зонах смешения. Сб. расширенных рефератов законченных работ ЭНИИа, М., «Информэнерго», 1970.
3. 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.
4. Hacker D. S. Interferometric investigation of the stability of a turbulent boundary layer with mass addition. Paper Amer. Soc. Mech. Engrs, 1958, No. A-249.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., «Наука», 1969.
6. Мугалев В. П. Экспериментальное исследование дозвукового турбулентного пограничного слоя на пластине со вдувом. Изв. вузов, МВО СССР. Сер. авиационная техника, 1959, № 3.
7. Мугалев В. П. Экспериментальное изучение турбулентного пограничного слоя на пластине при вдувании воздуха и углекислого газа в сверхзвуковом потоке. Тр. Моск. физ.-техн. ин-та, 1959, вып. 4.