

ЗАДАЧИ ОБТЕКАНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ТЕЛ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Н. Ф. Воробьев

(Новосибирск)

При обтекании сверхзвуковым потоком ($M > 1$) тел пространственной конфигурации, слабовозмущающих набегающий поток, уравнения газовой динамики могут быть сведены к волновому уравнению для потенциала скоростей возмущения в виде [1, 2]

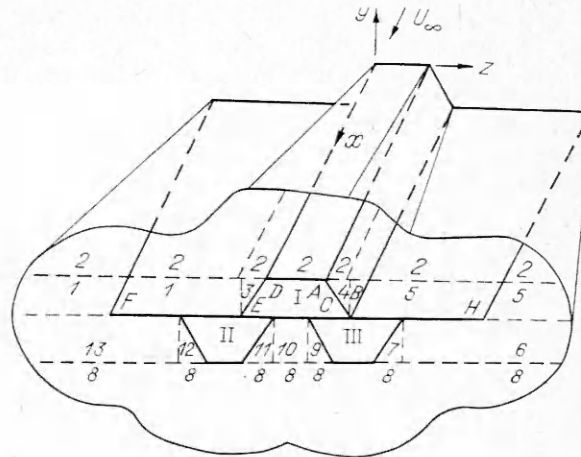
$$F(\Phi) = \Phi_{xx} - \Phi_{yy} - \Phi_{zz} = 0,$$

где ось x компланарна с вектором скорости набегающего потока. Область возмущенного потока ограничена поверхностью тела и головной характеристической поверхностью, являющейся огибающей характеристических конусов, вершины которых лежат на сверхзвуковой части передней кромки тела.

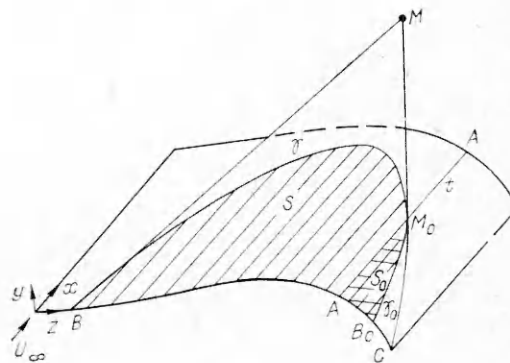
При рассмотрении задачи обтекания изолированного крыла конечного размаха в линейной постановке условия на поверхности крыла сносятся на базовую поверхность, которая представляет собой малоотклоняющуюся от поверхности крыла плоскость [3]. При рассмотрении обтекания тел самолетной конфигурации (крыло — фюзеляж — воздухозаборники) в качестве базовой конфигурации следует выбрать цилиндрические поверхности, в частности призматические конфигурации с ребрами, параллельными набегающему потоку, такие, что грани этих призматических конфигураций мало отклоняются от слабоизогнутых конструкций лета-

тельного аппарата (фиг. 1). Базовая поверхность, на которую сносятся граничные условия на теле, является поверхностью временно-ориентированного типа. Значение потенциала в точке $M(x, y, z)$ в возмущенной области потока зависит от исходных данных только той части граничного многообразия (головной характеристической поверхности σ и базовой поверхности S), которая находится внутри характеристического конуса $\Gamma: (x - \xi) - [(y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2]^{1/2} = 0$.

Если область зависимости D точки M обладает свойством видимости (любая точка области зависимости может быть соединена с точкой M прямой, целиком принадлежащей области зависимости), то линия пересечения характеристического конуса Γ с граничным многообразием σ, S опре-



Ф и г. 1



Ф и г. 2

деляет область зависимости точки M на этом многообразии. Условие видимости в области зависимости D выполняется в случае, когда для точек возмущенной области течения на поверхности тела нет точек, расположенных в зоне тени, т. е. когда прямая пучка, проходящего через точку M внутри характеристического конуса, пересекает поверхность тела не более чем в одной точке. Если же существует касательная к поверхности тела плоскость T , проходящая через точку M , которая разделяет в пространстве для точки M зону видимости и зону тени, то в этом случае область зависимости точки M перестает обладать свойством видимости. На поверхности тела границей зоны видимости и зоны тени для точки M является линия t касания плоскости T поверхности тела (образующая AA на цилиндрической базовой поверхности, фиг. 2). Область зависимости точки M на теле в зоне видимости ограничена линией γ пересечения поверхности характеристического конуса Γ с поверхностью тела, а в зоне тени ограничена винтовой линией γ_0 , имеющей на поверхности тела всюду характеристическое направление. Винтовая линия γ_0 (M_0B_0) проходит через точку M_0 пересечения линии γ и линии t . Область зависимости точки M в зоне видимости лежит внутри поверхности характеристического конуса Γ , а в зоне тени — внутри поверхности Γ_0 , которая является огибающей конусов с вершинами на винтовой линии γ_0 . Поверхность Γ_0 касается поверхности Γ по линии, лежащей в плоскости границы тени T . Значение потенциала в точке M зависит от исходных данных только той части граничного многообразия (поверхности тела и головной характеристической поверхности), которая находится внутри характеристической поверхности Γ в зоне видимости и внутри поверхности Γ_0 в зоне тени. Часть граничного многообразия в зоне тени, расположенная между поверхностями Γ и Γ_0 , не влияет на значение потенциала в точке M . На теле это область M_0B_0C , ограниченная передней кромкой тела, винтовой линией M_0B_0 и линией пересечения характеристического конуса Γ с поверхностью тела в зоне тени M_0C . Для призматической конфигурации, представляющей двугранный угол $\pi \leq \leq \gamma \leq 2\pi$, поверхность Γ_0 есть характеристический конус с вершиной в точке M_0 [4]. В [5, 6], где рассматривается обтекание тел с зонами тени, решение в точке M представлено зависящим от краевых значений на части поверхности тела в зоне тени, лежащей вне действительной области зависимости точки M . В [7] отмечено это несоответствие, не указан способ решения дифракционной задачи.

Для области зависимости D , обладающей свойством видимости, используя формулу Грина

$$(1) \quad \int \int \int_D [wF(\Phi) - \Phi F(w)] d\tau = I_{\Gamma+\sigma+S}^{w, \Phi'_N, \Phi, w'_N},$$

$$I_{\Gamma+\sigma+S}^{w, \Phi'_N, \Phi, w'_N} = \int \int_{\Gamma+\sigma+S} \left(w \frac{\partial \Phi}{\partial N} - \Phi \frac{\partial w}{\partial N} \right) dS,$$

$$w = \ln \frac{(x - \xi) - \sqrt{(x - \xi)^2 - (y - \eta)^2 - (z - \zeta)^2}}{\sqrt{(y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}},$$

можно получить интегральное представление решения в форме Вольтерра [8, 1, 2, 9]

$$(2) \quad \Phi(M) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} I_{\Gamma+\sigma+S}^{w, \Phi'_N, \Phi, w'_N},$$

где w — фундаментальное решение Вольтерра; $\partial/\partial N$ — кономальная производная ($\Phi'_N = \partial\Phi/\partial N$, $w'_N = \partial w/\partial N$); Γ — часть поверхности характеристического конуса с вершиной в точке M до ее пересечения с граничным многообразием; S, σ — часть поверхности соответственно тела и головной поверхности характеристического конуса, вырезаемая характеристическим конусом Γ .

Формально можно записать для области зависимости D , не обладающей свойством видимости, интегральное представление значения потенциала в точке M в форме Вольтерра, применяя формулу Грина (1) к этой области зависимости:

$$(3) \quad \Phi(M) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} I_{\Gamma+\Gamma_0+\sigma+\sigma_0+S+S_0}^{w, \Phi'_N, \Phi, w'_N}.$$

Здесь Γ, Γ_0 — часть поверхности характеристического конуса с вершиной в точке M в зоне видимости и часть поверхности огибающей конусов с вершинами на винтовой линии γ_0 ; σ, σ_0 — часть головной характеристической поверхности, вырезаемая конусом Γ и поверхностью Γ_0 ; S, S_0 — области зависимости на теле в зоне видимости и в зоне тени.

В правой части формул (2), (3) интеграл по поверхности Γ в силу свойств функции Вольтерра обращается в нуль. На головной характеристической поверхности σ, σ_0 значение потенциала возмущений Φ без ограничения общности можно положить равным нулю ($\Phi|_{\sigma} = 0$), а так как на поверхности σ, σ_0 направления производной $\partial/\partial N$ совпадают с направлением касательной к линии $z = \text{const}$ этой поверхности, то значит, что на поверхности σ, σ_0 вместе со значением Φ определено значение $\partial\Phi/\partial N$, также равное нулю, и, таким образом, интеграл по поверхности σ, σ_0 в формулах (2), (3) обращается в нуль. Если в случае формулы (2) остается только интеграл по поверхности тела S , то в формуле (3), кроме интеграла по поверхности тела $S+S_0$, остается интеграл по поверхности Γ_0 , который в силу свойств функции Вольтерра не обращается в нуль. Значит, в формуле (3) потенциал в точке M определяется не только через значения Φ, Φ'_N на теле, но и через задаваемые на поверхности Γ_0 значения Φ, Φ'_N , и интегральное представление (3) не есть представление решения краевой задачи, аналогичное представлению в виде формулы (2) для зоны зависимости, обладающей свойством видимости.

Задача обтекания тела с областями зависимости, не обладающими свойством видимости, относится к числу дифракционных задач: характер воздействия на точку M точек влияния, лежащих в зоне тени, отличается от характера воздействия точек влияния, лежащих в зоне видимости. Если для решения задач обтекания в зоне видимости используется решение в форме Вольтерра, отражающее характер прямодействия точки влияния на точку зависимости, то для решения дифракционной задачи необходимо найти такое решение волнового уравнения, которое отражало бы дифракционный характер воздействия точки влияния на точку зависимости. Для случая произвольного двугранного угла $\pi \leq \gamma \leq 2\pi$ в работе [4] найдено фундаментальное решение v_0 , учитывающее дифракционный характер явления.

В формуле (2) для области зависимости, обладающей свойством видимости, в силу сделанного без ограничения общности предположения $\Phi|_{\sigma} = 0$ и свойств функции Вольтерра потенциал в точке выражается только через интегралы по поверхности тела S :

$$(4) \quad \Phi(M) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} I_S^{w, \Phi'_n, \Phi, w'_N}.$$

Причем, так как условия на поверхности тела сносятся на базовые поверхности временно-ориентированного типа, где конормальная производная потенциала Φ'_N с точностью до малых второго порядка совпадает с нормальной производной Φ'_n , формула (4) дает представление потенциала возмущения через значения $\Phi|_S$ и $\Phi'_n|_S$.

На временно-ориентированных поверхностях существует зависимость между значением потенциала $\Phi|_S$ и его нормальной производной $\Phi'_n|_S$, определяемая в общем случае цилиндрической базовой поверхности интегродифференциальным соотношением, которое получается из формулы (4) при предельном переходе точки M на поверхность S (см., например, [2]).

В случае области, базовые поверхности которой представляют собой произвольный двугранный угол $0 < \gamma < \pi$, когда $\gamma \neq \pi/n$ ($n = 1, 2, \dots$), задаваемые в прямой задаче (задаче определения потенциала скорости по геометрии тела) на поверхностях граней значения $\Phi|_S$ определяются через значения $\Phi'_n|_S$ из системы двух интегродифференциальных уравнений методом последовательных приближений [10].

Для некоторых призматических областей возможно нахождение методом компенсирующих особенностей суперпозиции фундаментальных решений (функции Грина), когда в формуле (4) для потенциала скорости исключены в прямой задаче члены, содержащие значения $\Phi|_S$ на гранях, и значение потенциала выражается только через значения нормальной производной потенциала $\Phi'_n|_S$ на гранях или когда в формуле (4) для потенциала скорости исключены в обратной задаче члены, содержащие значения $\Phi'_n|_S$ на гранях.

Так, для базовых поверхностей, представляющих собой двугранный угол $\gamma = \pi/n$ ($n = 1, 2, \dots$), интегралы в формуле (4) от членов, содержащих значения потенциала $\Phi|_S$, можно исключить, используя метод отражений от граней двугранного угла для компенсирующих особенностей типа Вольтерра [1, 2, 11], и получить в конечном виде выражение для потенциала Φ в возмущенной области потока только через задаваемые на гранях двугранного угла значения $\Phi'_n|_S$:

$$(5) \quad \Phi_1(M) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left(I_{S_1+S_2}^{w, \Phi'_n} + \sum_{i=1}^{2n-1} I_{S_{i_1}+S_{i_2}}^{w_i, \Phi'_n} \right),$$

$$I_{S_1+S_2}^{w, \Phi'_n} = \iint_{S_1+S_2} w \Phi'_n dS, \quad I_{S_{i_1}+S_{i_2}}^{w_i, \Phi'_n} = \iint_{S_{i_1}+S_{i_2}} w_i \Phi'_n dS.$$

Здесь w, w_i — функции Вольтерра точки M и компенсирующей точки M_i ; $S_1, S_2, S_{i_1}, S_{i_2}$ — области зависимости точек M, M_i на гранях 1, 2 двугранного угла. Или для тех же базовых поверхностей, представляющих собой двугранный угол $\gamma = \pi/n$ ($n = 1, 2, \dots$), можно также с помощью метода отражений (опять используя свойства четности функций w, w_i и нечетности функций w'_N, w'_{iN} относительно соответствующей грани двугранного угла) исключить в формуле (4) члены, содержащие значения $\Phi'_n|_S$, и получить в конечном виде выражение для потенциала Φ в возмущенной области потока только через значения $\Phi|_S$ на гранях двугранного угла:

$$(6) \quad \Phi_2(M) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left(I_{S_1+S_2}^{w'_N, \Phi} - \sum_{i=1}^{2n-1} I_{S_{i_1}+S_{i_2}}^{w'_{iN}, \Phi} \right),$$

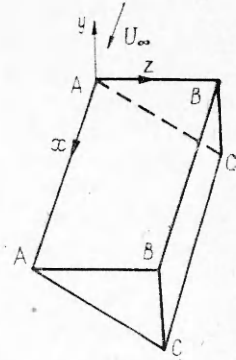
$$I_{S_1+S_2}^{w'_N, \Phi} = \iint_{S_1+S_2} w'_N \Phi dS, \quad I_{S_{i_1}+S_{i_2}}^{w'_{iN}, \Phi} = \iint_{S_{i_1}+S_{i_2}} w'_{iN} \Phi dS.$$

Здесь w'_N, w'_{iN} — конормальные производные функций Вольтерра точки M и компенсирующей точки M_i .

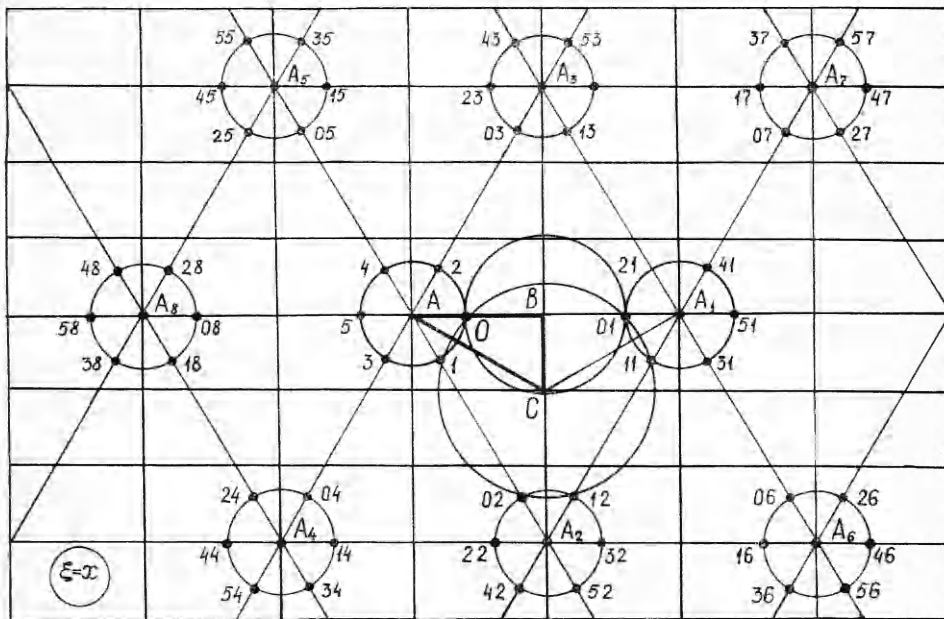
Если провести операцию дифференцирования по x интегральных операторов I (в формуле (6) предварительно необходимо проинтегрировать по частям по переменной ξ), то можно убедиться, как это сделано в работе [12] для случая изолированного крыла ($n = 1$), что формула (5) дает решение прямой задачи определения потенциала скорости по заданным на поверхности тела нормальным производным Φ'_n , а формула (6) дает решение обратной задачи определения потенциала скорости по заданному на поверхности тела распределению давления Φ'_ξ .

Для двугранного угла $\gamma = \pi/n$ ($n = 1, 2, \dots$) число компенсирующих точек в суперпозиции для области взаимодействия граней не зависит от глубины расположения рассматриваемой точки вниз по потоку и для точки, не лежащей на грани, равно $(2n - 1)$.

Для области в виде полосы, ограниченной комбинацией из двух параллельных граней, для области в виде полуполосы с углами $(\pi/2, \pi/2)$, ограниченной комбинацией из трех граней, для внутренней области трехгранных призм $(\pi/2, \pi/4, \pi/4)$, $(\pi/3, \pi/3, \pi/3)$, $(\pi/2, \pi/3, \pi/6)$ и внутренней области четырехгранной призмы $(\pi/2, \pi/2, \pi/2, \pi/2)$ также возможно построение методом компенсирующих особенностей функции Грина [2, 13]. Причем число компенсирующих точек для этих суперпозиций увеличивается вниз по потоку в зависимости от числа отражений от граней характеристических поверхностей исходной точки M и компенсирующих точек M_i . Принцип построения функции Грина в зависимости от числа отражений для прямой задачи в полосе приводится в [2]. Аналогично проводится нахождение компенсирующих точек и построение функции Грина в прямой и обратной задачах для других указанных выше призматических областей с большим числом отражающих граней. Проиллюстрируем это на примере прямой задачи внутри трехгранной призмы $(\pi/6, \pi/3, \pi/2)$, ребра которой параллельны скорости набегающего потока (фиг. 3). Для этой призмы на фиг. 4 приведена схема расположения компенсирующих точек в плоскости $\xi = x$ для точки $M(x, 0, z)$, расположенной на грани AB вблизи двугранного угла $\gamma_A = \pi/6$. В случае, когда на точку M еще не сказывается влияние грани BC , компенсирующие точки для двугранного угла γ_A расположены на окружности радиуса $r = z$ с центром в точке $A(x, 0, 0)$. Сама точка M обозначена цифрой 0, а компенсирующие точки угла $\gamma_A = \pi/6$ — цифрами 1—5. Когда на точку M начинает влиять грань BC , для компенсации отражений от грани BC зеркально окружности с центром в точке A располагается окружность с центром в A_1 ($A - BC$) с соответствующими компенсирующими точками 01—51. Когда характеристические конусы точек 01—51 начнут пересекать грань AC , то для компенсации в формуле Вольтерра для прямой задачи членов с Φw_N от этих точек на грани AC производится зеркальное отражение окружности с центром в A_1 относительно линии AC в окружность с центром в точке A_2 ($A_1 - AC$), A_3 ($A_2 - AB$), A_4 ($A_3 - AC$), A_5 ($A_4 -$



Ф и г. 3



Ф и г. 4

AB), $A_6(A_4 - BC)$, $A_7(A_6 - AB, A_5 - BC)$, $A_8(A_5 - AC)$. На фиг. 4 приведено построение компенсирующих точек до момента получения окружности с центром в точке $A_{8(6+2)}$, когда повторяется расположение компенсирующих точек $08-58$, соответствующее начальному с центром в точке A . После этого построение компенсирующих точек начинается в той же последовательности, как в цикле $A - A_8 : A_9(A_8 - BC)$ и т. д. Аналогичная периодичность наблюдается и у других призм, например, у трехгранной призмы ($\pi/4, \pi/4, \pi/2$) повторение ситуации, соответствующей начальному расположению точки M вблизи угла $\pi/4$, начинается с момента достижения отражения ситуации $A_{6(4+2)}$.

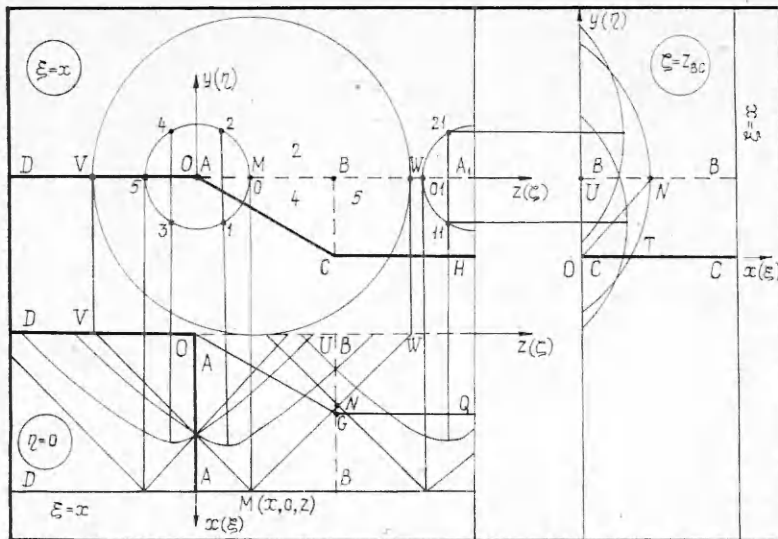
Для областей, обладающих свойством видимости, граница которых представляет собой двугранный угол $\gamma = (m/n)\pi$, метод компенсирующих особенностей непосредственно применить нельзя, так как в этом случае одна из компенсирующих точек попадает в область двугранного угла $\gamma = (m/n)\pi$. В этом случае двугранный угол $\gamma = (m/n)\pi$ разбивается на $l \leq m$ двугранных углов $\gamma_k = \pi/k$ ($k \leq n$), в каждом из которых применим метод компенсирующих особенностей. На плоскостях разбиения двугранного угла на подобласти γ_k производится склейка решений из условий непрерывности потенциала и его нормальной производной. Решение прямой задачи в этом случае сводится к решению системы обобщенных уравнений Абеля [14].

При решении задач обтекания сложных областей, не обладающих свойством видимости, когда имеют место явления прямодействия и дифракций, можно применять метод разбиения сложной области на подобласти, каждая из которых обладает свойством видимости, и последующего склеивания решений на границах разбиения этих областей из условий непрерывности потенциала и нормальной производной потенциала. В случае призматических базовых конфигураций обычно проводятся плоскости, являющиеся продолжением граней базовой призматической конфигурации, затем на части этих плоскостей, лежащих в возмущенной области потока («щелях») проводится операция склеивания решений.

В задачах о концевых эффектах изолированного крыла [3], крестообразных крыльев при двугранных углах между крыльями $\gamma = \pi/n$ [11], параллельных крыльев [2] и двугранных углов $\gamma = (m/n)\pi$ [14] склеивание проводится на щелях, являющихся продолжением базовых плоскостей крыльев.

В задаче обтекания призматической конфигурации, представляющей собой базовую поверхность самолетной конфигурации типа крыло — фюзеляж — воздухозаборники, когда грани базовой конфигурации лежат в разных в общем некомпланарных плоскостях, разбиение на подобласти, обладающие свойством видимости, может быть проведено не единственным способом. Это разбиение следует проводить так, чтобы число плоскостей склеивания было минимальным и чтобы подобласти были просты в смысле нахождения суперпозиции фундаментальных решений Вольтерра.

На фиг. 1 приведен пример призматической базовой конфигурации для крыла с надстройками I—III типа фюзеляж — воздухозаборники с разбиением области внешнего течения на 13 простых подобластей, обладающих свойством видимости, грани которых образуют двугранные углы π/n и для каждой из которых можно построить функцию Грина. Рассмотрим прямую задачу. Функция Грина определяет потенциал в некоторой точке подобласти через значения нормальных производных потенциала на гранях, являющихся границами подобласти. На гранях, являющихся гранями базовой конфигурации, значения Φ'_n известны, а на гранях-щелях значения $\Phi'_n = \theta$ определяются из условий склейки. В качестве иллюстрации составим условие склейки для точки, лежащей на грани AB , разделяющей подобласти 2 и 4 (фиг. 1). Подобласть 2 ограничена головной характеристической поверхностью σ и плоскостью $y = 0$, проходящей через грань DA надстройки I, подобласть 4 представляет собой внутреннюю область трехгранной призмы ABC (пусть $\gamma_A =$



Ф и г. 5

$= \pi/6, \gamma_B = \pi/2, \gamma_C = \pi/3$). Потенциал в точке M , лежащей на границе AB , может быть представлен для подобласти 2 в виде

$$\Phi(M_+) = \frac{1}{\pi} \iint_{S_M} \Phi'_n r_0^{-1/2} dS.$$

Здесь r_0 — гиперболическое расстояние точки $M(x, 0, z)$ до точек области S_M , которая представляет собой область на плоскости $\eta = 0$, ограниченную линией пересечения характеристического конуса точки M с плоскостью $\eta = 0$ и линией $\xi = 0$ (треугольник MVW , фиг. 5). Потенциал в той же точке M для подобласти 4 можно, используя построение функции Грина для подобласти 4, представить в виде

$$(7) \quad \Phi(M_-) = \frac{1}{\pi} \sum_{S_{ijk}} \iint \Phi'_n r_{ij}^{-1/2} dS.$$

Здесь r_{ij} — гиперболическое расстояние от компенсирующей точки M_{ij} до точек области S_{ijk} , которая представляет собой область на одной из граней призмы ABC , ограниченную линией пересечения характеристического конуса компенсирующей точки M_{ij} с k гранью призмы, ребрами этой грани и линией $\xi = 0$ на этой грани. На фиг. 5 приведена ситуация, когда на точку M , лежащую на грани AB в сфере взаимодействия угла $\gamma_A = \pi/6$, уже влияет грань BC и в построении функции Грина, кроме самой точки M (точка O) и компенсирующих точек $M_1 - M_5$ (точек 1—5), участвуют еще точки M_{01}, M_{11}, M_{21} (точки $O1, 11, 21$). На фиг. 5 в левом нижнем углу изображены линии пересечения характеристических конусов с вершинами в точках $M_0 - M_5, M_{01} - M_{21}$ с плоскостью $\eta = 0$ (области S_{ij} на грани AB), в правом верхнем углу изображены линии пересечения характеристических конусов с вершинами в точках $M, M_1, M_2, M_{01}, M_{11}, M_{21}$ с плоскостью $\zeta = z_{BC}$ (области S_{ij} на грани BC). На гранях AD, AC , являющихся гранями базовой конфигурации, значения Φ'_n известны, а на гранях-щелях AB, BC значение $\Phi'_n = \theta$ подлежит определению из условия $\Phi(M_+) = \Phi(M_-)$, которое представляет собой для $\theta|_{AB}$ обобщенное уравнение Абеля вида [14]:

$$(8) \quad A(\theta|_{AB}) + \sum B_{ij}(\theta|_{AB}) = F_1(\Phi'_n|_{AD}, \Phi'_n|_{AC}) + F_2(\theta|_{BC}).$$

Здесь член $A(\theta)$ — оператор Абеля и соответствует в формуле (7) члену для области S_M на грани AB с ядром $r_0^{-1/2}$ для точки M ; член $B_{ij}(\theta)$ соответ-

стует в формуле (7) члену для области S_{ij} на грани AB с ядром $r_{ij}^{-1/2}$ для точки M_{ij} , причем области S_{ij} вложены в область S_M . В правой части уравнения (8), кроме члена F_1 , являющегося функцией от известных величин $\Phi'_n|_{AD}$, $\Phi'_n|_{AC}$, присутствует член F_2 , являющийся функцией неизвестной заранее величины $\theta|_{BC}$ на грани BC . Для определения величины $\theta|_{BC}$ используется также соотношение $\Phi(M_+) = \Phi(M_-)$, записанное для точки M , лежащей на грани BC , являющейся границей подобластей 4 и 5. В общем случае условия склейки всех подобластей образуют замкнутую систему обобщенных уравнений Абеля типа (8) для определения величин θ на гранях-щеелях конфигурации. Определение величин θ на гранях-щеелях идет последовательно вниз по потоку, начиная с областей простых течений до областей, где сказываются эффекты многократных отражений от граней и дифракции на углах. На гранях-щеелях AB и BC , например, есть области на каждой из этих граней, где поток еще не возмущен, $\theta|_{AB} = \theta|_{BC} = 0$ (линия OGQ — след головной характеристической поверхности в плоскости $\eta = 0$); далее вниз по потоку на грани AB идет область дифракции на двугранном угле γ_A , где еще не сказывается отражение от грани CH и значение $\theta|_{AB}$ может быть определено как эффект элементарного воздействия дифракции на угле и т. д. В этом процессе включаются последовательно вниз по потоку новые области на щелях с еще не определенными значениями θ_{ij} , которые определяются через известные на гранях базовой конфигурации величины Φ'_n и через уже определенные в вышележащих областях щелей значения θ_{ij} . Принцип последовательного определения значений θ_{ij} вниз по потоку описан в работах [3, 2, 14].

Поступила 27 XI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Фалькович С. В. К теории крыла конечного размаха в сверхзвуковом потоке. — ПММ, 1947, т. 11, № 3.
2. Воробьев Н. Ф. Обтекание сверхзвуковым потоком двух пересекающихся и двух [параллельных крыльев. — Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук, 1969, № 8, вып. 2.
3. Красилицыкова Е. А. Крыло конечного размаха в сжимаемом потоке. М.—Л.: Гостехиздат, 1952.
4. Воробьев Н. Ф., Федосов В. П. Обтекание сверхзвуковым потоком пересекающихся поверхностей. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1975, № 1.
5. Михайлов В. Н. Применение метода Вольтерра к расчету интерференции между телами вращения и крыльями в сверхзвуковом потоке. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1969, № 1.
6. Суркова Е. М. К задаче об обтекании сверхзвуковым потоком тонкого заостренного тела с хвостовым оперением. — Вести. МГУ. Математ., механ., 1974, № 6.
7. Михайлов В. Н., Уткин А. И. О применении метода Вольтерра к решению смешанных задач волнового уравнения. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1970, № 1.
8. Гурса Э. Курс математического анализа. Т. 3, ч. 1. М.—Л.: Гостехиздат, 1933.
9. Уткин А. И. Исследование сверхзвуковых течений с помощью интеграла Вольтерра. — ДАН СССР, 1957, т. 116.
10. Воробьев Н. Ф. К задаче обтекания сверхзвуковым потоком пересекающихся крыльев. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1974, № 1.
11. Фридлиндер Б. И. Крестообразное крыло конечного размаха в сжимаемом потоке. — ДАН СССР, 1963, т. 151, № 6.
12. Воробьев Н. Ф. О решении задач обтекания крыла конечного размаха в линейной постановке. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 5.
13. Воробьев Н. Ф. Задача обтекания сверхзвуковым потоком тел призматической конфигурации. — ЧММСС, 1979, т. 10, № 3.
14. Воробьев Н. Ф. Концевой эффект при обтекании сверхзвуковым потоком двугранного угла. — Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук, 1970, № 2, вып. 1.