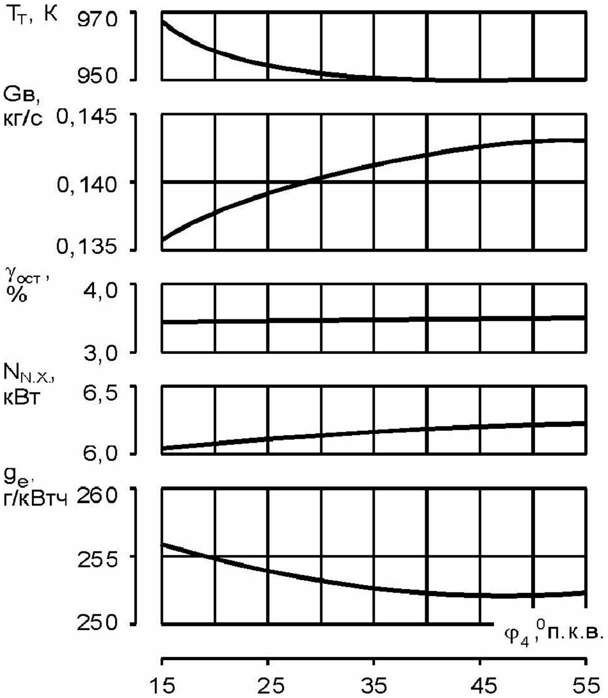

Рис. 4. Влияние угла закрытия впускного клапана на параметры дизеля 4ДТНА2 на номинальном режиме

Уменьшение $\varphi_3 < 15^0$ п.к.в. нежелательно из-за сокращения времени-сечения впускного клапана, что приводит к увеличению потерь мощности на насосные хода.

Закрытие впускного клапана после НМТ (т.е. с запаздыванием) увеличивает расход воздуха вследствие дозарядки цилиндра свежим зарядом. Из рис. 4 видно, что дозарядка цилиндра заканчивается практически при закрытии впускного клапана $\varphi_4 \approx 45^0$ п.к.в. после НМТ. Т.к. влияние запаздывания закрытия впускного клапана свыше 35^0 п.к.в. на параметры дизеля незначительное (в пределах 0,4 %), то из условий лучшего запуска дизеля закрытие клапана принимаем равным 35^0 п.к.в. после НМТ.

Итак, анализируя полученные результаты расчетного исследования по выбору фаз газораспределения для нового четырехтактного быстроходного дизеля 4ДТНА2, можно сделать следующее заключение: в целях наиболее рациональной регулировки фаз газораспределения, обеспечивающей наилучшие выходные показатели работы дизеля, рекомендуется устанавливать:

- начало открытия выпускного клапана 60^0 п.к.в. до НМТ;
- закрытие выпускного клапана 10^0 п.к.в. после ВМТ;
- начало открытия впускного клапана 15^0 п.к.в. до ВМТ;
- закрытие впускного клапана 35^0 п.к.в. после НМТ.

УДК 629.7: 519.63: 536.21

А.М.Пашаев, д-р физ.-мат. наук, Д.Д. Аскеров, инж., Р.А.Садыхов, д-р техн. наук, А.С.Самедов, канд. техн. наук

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ОБТЕКАНИЯ ПЛОСКИХ РЕШЕТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Тепловые и газодинамические процессы в газотурбинных двигателях во многом определяются распределением скоростей потока, которые влияют на условия теплообмена и газодинамику в лопаточном аппарате турбины [1, 3, 8, 9]. Более приспособленными к расчету при этом считаются методы, основанные на решениях интегральных уравнений.

Рассматривается задача обтекания прямой плоской решетки двумерным установившимся безвихревым (потенциальным) потоком несжимаемой жидкости в плоскости действительных координат. Исходя из общих представлений аналитических функций для решетчатых областей, задача, как известно, решается с использованием интегральных формул Коши, связывающих аналитические функции внутри (вне) области с ее контурными значениями [2, 4, 5]. Обобщение интеграла типа Коши для бесконечносвязной решетчатой области размером $0 \le z \le \infty$ (рис.1) получается простым и наглядным, если рассматриваемую область z предварительно конформно отобразить в плоскость ζ. При этом область течения в плоскости z с периодом, равным шагу t, отображается на область ζ с периодом, равным 2π, называемую бесконечнолистной поверхностью Римана (рис.2) [2, 4]. Выражение для комплексного потенциала течения $W(z)$ имеет вид, в котором можно выделить действительную и мнимую части:

$$W(z) = \varphi(z) + i\psi(z) =$$
$$= V_\infty\left(x\cos\alpha_\infty + y\sin\alpha_\infty\right) + \frac{1}{2\pi}\int_{S+}\overline{V}(z)_k\,\theta dz_k +$$
$$+ i\left[V_\infty\left(y\cos\alpha_\infty - x\sin\alpha_\infty\right) - \frac{1}{2\pi}\int_{S+}\overline{V}(z)_k\ln\rho dz_k\right]$$

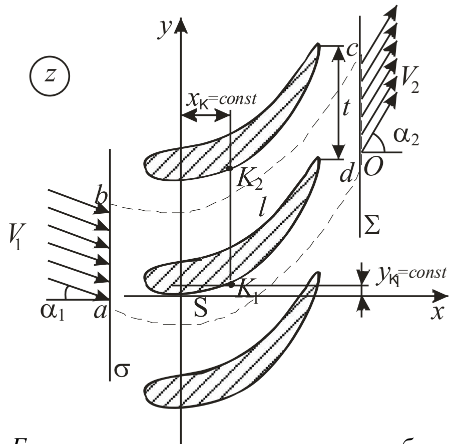

Рис. 1. Бесконечносвязная решетчатая область

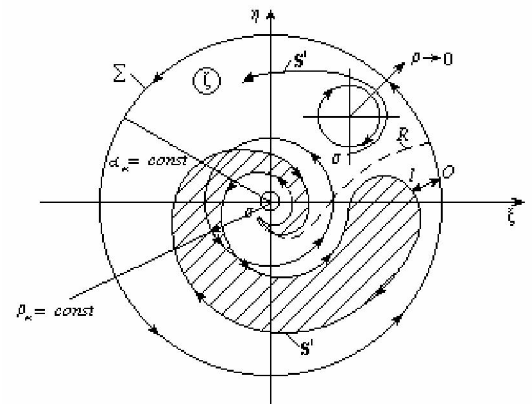

Рис. 2. Бесконечнолистная поверхность

Тогда для потенциала скорости $\varphi(z)$ и функции тока $\psi(z)$ можно записать:

$$\varphi(z) = V_\infty\left(x\cos\alpha_\infty + y\sin\alpha_\infty\right) + \frac{1}{2\pi}\int_{S+}\overline{V}(z)_k\,\theta \quad dz_k \quad (1)$$

$$\psi(z) = V_\infty\left(y\cos\alpha_\infty - x\sin\alpha_\infty\right) - \frac{1}{2\pi}\int_{S+}\overline{V}(z)_k\ln\rho \quad dz_k \quad (2)$$

Известно, что в уравнении (1) для определения потенциала скорости φ, выражение для аргумента θ имеет вид [1, 3, 5]:

$$\theta = arctg\frac{tg\frac{\pi}{t}(y-y_k)}{th\frac{\pi}{t}(x-x_k)} \quad (3)$$

Потенциалы скорости, выраженные через функцию (3), при обходе остаются непрерывными, тогда как сама многозначная функция (3) при этом обходе разрывна со скачком, равным π. Устранение указанного разрыва во всех точках профиля, кроме точки выходной кромки (x_B, y_B) авторами работ [3, 5] осуществляется путем соответствующей нормировки этой функции. Кроме того, при решении интегрального уравнения (1) с ядром (3) авторами [3,5] используется свойство суперпозиции, т.к. приходиться трижды решать интегральное уравнение (1) в частном виде для определения значений потенциалов скорости по координатным осям x, y и по циркуляции Γ. Такой путь таит в себе некоторые неудобства и не позволяет использовать в ходе решения уравнения (1) высокоточные формулы численного интегрирования, о чем также отмечено в [7]. В отличие от [5-7] для расчета предлагается более удобное уравнение, полученное путем несложных преобразований:

$$\varphi = V_\infty\left(x\cos\alpha_\infty + y\sin\alpha_\infty\right) +$$
$$+\frac{1}{2\pi}\oint_{S+}\overline{V}(z)_k\arcsin\frac{ch\left[\frac{\pi}{t}(x-x_k)\right]\sin\left[\frac{\pi}{t}(y-y_k)\right]}{\sqrt{sh^2\left[\frac{\pi}{t}(x-x_k)\right]+\sin^2\left[\frac{\pi}{t}(y-y_k)\right]}}dz_k \quad (4)$$

где

$$\theta = \arcsin \frac{ch\left[\frac{\pi}{t}\left(x-x_k\right)\right]\sin\left[\frac{\pi}{t}\left(y-y_k\right)\right]}{\sqrt{sh^2\left[\frac{\pi}{t}\left(x-x_k\right)\right]+\sin^2\left[\frac{\pi}{t}\left(y-y_k\right)\right]}}$$

При решении уравнения (4) в предлагаемом авторами статьи подходе, не требуется соответствующая нормировка функции θ. Кроме того, ядро уравнения (4) не определено только при совпадении бегущей точки с фиксированной, тогда как уравнение (1) с ядром (3) не определяется также при совпадении координаты x точек выпуклой (спинка) и вогнутой (корыто) сторон контура профиля. Указанный недостаток устраняется непосредственно при численном интегрировании уравнения (4).

Произведя интегрирование по частям интеграла в (4) можно получить уравнение для потенциала скорости в плоскости действительных координат, пригодное для численного решения.

$$\begin{aligned}&\varphi\left(x_k, y_k\right)= \\ &=V_\infty\left(x_k\cos\alpha_\infty + y_k\sin\alpha_\infty\right) \pm \tfrac{1}{2\pi}\Gamma\theta_B \mp \tfrac{1}{2\pi}\oint_{S+}\varphi\left(S\right)d\theta\end{aligned} \tag{5}$$

где:

$$\theta = \arcsin \frac{ch\left[\frac{\pi}{t}\left(x-x_k\right)\right]\sin\left[\frac{\pi}{t}\left(y-y_k\right)\right]}{\sqrt{sh^2\left[\frac{\pi}{t}\left(x-x_k\right)\right]+\sin^2\left[\frac{\pi}{t}\left(y-y_k\right)\right]}};$$

$$\theta_B = \arcsin \frac{ch\left[\frac{\pi}{t}\left(x_B-x_k\right)\right]\sin\left[\frac{\pi}{t}\left(y_B-y_k\right)\right]}{\sqrt{sh^2\left[\frac{\pi}{t}\left(x_B-x_k\right)\right]+\sin^2\left[\frac{\pi}{t}\left(y_B-y_k\right)\right]}}\quad x_B,$$

y_B - координаты выходной кромки профиля.

В свою очередь, в некотором отличии от [2,4], уравнение (2) для функции тока $\psi\left(z\right)$ в плоскости действительных координат можно записать следующим образом

$$\begin{aligned}&\psi = V_\infty\left(y\cos\alpha_\infty - x\sin\alpha_\infty\right)\mp \\ &\mp\frac{1}{2\pi}\oint_{S+}V\ln\sqrt{sh^2\tfrac{\pi}{t}\left(x-x_k\right)+\sin^2\tfrac{\pi}{t}\left(y-y_k\right)}ds\end{aligned}, \tag{6}$$

воспользовавшись соотношением для модуля ρ в виде:

$$\ln\rho = \ln\sqrt{sh^2\alpha + \sin^2\beta},$$

где обозначено $\frac{\pi}{t}\left(x-x_k\right)=\alpha$, $\frac{\pi}{t}\left(y-y_k\right)=\beta$.

Граничные интегральные уравнения (5) и (6) сведены к системам линейных алгебраических уравнений, для решения которых разработаны соответствующие алгоритмы и компьютерные программы на объектно-ориентированном языке Delphi 5.

При расчетах контур профиля лопатки разбивается на n участков, так, что нечетными цифрами обозначены середины сдвоенных участков, а четными – их границы. Присвоив серединам сдвоенных участков порядковый индекс $i = 1,2,3...,n$ уравнения (5) и (6) приведены к следующему алгебраическому виду:

$$\begin{aligned}&\varphi_j \pm \sum_{i=1}^{n}\varphi_i\left(\theta_{j,i+1}-\theta_{j,i-1}\right)= \\ &=V_\infty\left(x_{k_j}\cos\alpha_\infty + y_{k_j}\sin\alpha_\infty\right)\pm\frac{1}{2\pi}\Gamma\theta_{j,B}\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}&\psi = \psi_\infty \mp \frac{1}{2\pi}\times \\ &\sum_{i=1}^{n}V_i\ln\left\{\sqrt{sh^2\left[\frac{2\pi}{t}\left(x-x_k\right)\right]-\sin^2\left[\frac{2\pi}{t}\left(y-y_k\right)\right]}\right\}\Delta s_i\end{aligned} \tag{8}$$

где $\psi_\infty = V_\infty\left(y\cos\alpha_\infty - x\sin\alpha_\infty\right)$

Из соотношения (7) получена следующая система n линейных алгебраических уравнений:

$$\left\{\begin{aligned}&\varphi_1 \pm \varphi_1\left(\theta_{1,2}-\theta_{1,0}\right)\pm\varphi_2\left(\theta_{1,4}-\theta_{1,2}\right)\pm\ldots\pm\varphi_n\left(\theta_{1,2n}-\theta_{1,2n-2}\right)= \\ &=V_\infty\left(x_{k1}\cos\alpha_\infty + y_{k1}\sin\alpha_\infty\right)\pm\tfrac{1}{2\pi}\Gamma\theta_{1,0} \\ &\varphi_2 \pm \varphi_1\left(\theta_{3,2}-\theta_{3,0}\right)\pm\varphi_2\left(\theta_{3,4}-\theta_{3,2}\right)\pm\ldots\pm\varphi_n\left(\theta_{3,2n}-\theta_{3,2n-2}\right)= \\ &=V_\infty\left(x_{k3}\cos\alpha_\infty + y_{k3}\sin\alpha_\infty\right)\pm\tfrac{1}{2\pi}\Gamma\theta_{3,0} \\ &\varphi_3 \pm \varphi_1\left(\theta_{5,2}-\theta_{5,0}\right)\pm\varphi_2\left(\theta_{5,4}-\theta_{5,2}\right)\pm\ldots\pm\varphi_n\left(\theta_{5,2n}-\theta_{5,2n-2}\right)= \\ &=V_\infty\left(x_{k5}\cos\alpha_\infty + y_{k5}\sin\alpha_\infty\right)\pm\tfrac{1}{2\pi}\Gamma\theta_{5,0} \\ &------------------------------ \\ &\varphi_n \pm \varphi_1\left(\theta_{2n-1,2}-\theta_{2n-1,0}\right)\pm\varphi_2\left(\theta_{2n-1,4}-\theta_{2n-1,2}\right)\pm\ldots \\ &\ldots\pm\varphi_n\left(\theta_{2n-1,2n}-\theta_{2n-1,2n-2}\right)= \\ &=V_\infty\left(x_{k2n-1}\cos\alpha_\infty + y_{k2n-1}\sin\alpha_\infty\right)\pm\tfrac{1}{2\pi}\Gamma\theta_{2n-1,0}\end{aligned}\right. \tag{9}$$

Из решения системы (9) определяются значения потенциала скорости φ в n точках профиля. Распределение скоростей $V\left(s\right)$ в указанных точках определяется дифференцированием потенциала скорости φ по контуру s с использованием следующих формул численного дифференцирования [10]:

$$V_i = \frac{1}{12\Delta s}\left(3\varphi_{i+1} + 10\varphi_i - 18\varphi_{i-1} + 6\varphi_{i-2} - \varphi_{i-3}\right)$$

для выходной и входной кромок;

$$V_i = \frac{1}{12\Delta s}\left((\varphi_{i-2} - \varphi_{i+2}) - 8(\varphi_{i-1} - \varphi_{i+1})\right)$$

для спинки и корыта.

При численном решении уравнения (8), для получения замкнутой системы вводится дополнительное соотношение, используя постулат Жуковского – Чаплыгина о характере обтекания выходной кромки [2]. Выражение для функции тока невозмущенного потока ψ_∞ преобразуется к более удобному для расчетов виду следующим образом:

$$\begin{aligned}\psi_\infty &= V_\infty\left(y\cos\alpha_\infty - x\sin\alpha_\infty\right) = \\ &= V_1\left(y\cos\alpha_1 - x\sin\alpha_1\right) - \frac{\Gamma}{2t}x = \\ &= V_1\left(y\cos\alpha_1 - x\sin\alpha_1\right) \mp \frac{x}{2t}\int\limits_{2t} V ds\end{aligned} \qquad (10)$$

Подынтегральное выражение в формуле (8) обозначим через коэффициент $\alpha_{i,j}$

$$\alpha_{i,j} = \ln\left\{\sqrt{sh^2\left[\frac{2\pi}{t}\left(x_i - x_j\right)\right] - \sin^2\left[\frac{2\pi}{t}\left(y_i - y_j\right)\right]}\right\} \qquad (11)$$

Переписав соотношение (8) используя (10) и (11), и написав (8) для середин сдвоенных участков, получается следующая система линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases}\psi = V_1\left(y_1\cos\alpha_1 - x_1\sin\alpha_1\right) \mp \frac{x_1}{2t}\sum\limits_{i=1}^{n} V_i\Delta s_i \mp \frac{1}{4\pi}\sum\limits_{i=1}^{n} V_i a_{i,1}\Delta s_i \\ \psi = V_1\left(y_2\cos\alpha_1 - x_2\sin\alpha_1\right) \mp \frac{x_2}{2t}\sum\limits_{i=1}^{n} V_i\Delta s_i \mp \frac{1}{4\pi}\sum\limits_{i=1}^{n} V_i a_{i,2}\Delta s_i \\ \psi = V_1\left(y_3\cos\alpha_1 - x_3\sin\alpha_1\right) \mp \frac{x_3}{2t}\sum\limits_{i=1}^{n} V_i\Delta s_i \mp \frac{1}{4\pi}\sum\limits_{i=1}^{n} V_i a_{i,3}\Delta s_i \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \psi = V_1\left(y_n\cos\alpha_1 - x_n\sin\alpha_1\right) \mp \frac{x_n}{2t}\sum\limits_{i=1}^{n} V_i\Delta s_i \mp \frac{1}{4\pi}\sum\limits_{i=1}^{n} V_i a_{i,n}\Delta s_i\end{cases} \qquad (12)$$

И как отмечено выше, заключительное уравнение для этой системы будет:

$$\psi = V_1\left(y_0\cos\alpha_1 - x_0\sin\alpha_1\right) \qquad (13)$$

Индекс «0» определяет точку выходной кромки.

Для вычислений особых коэффициентов типа a_{jj}, т.е. при совпадении фиксированной точки с «бегущей», было использовано следующее известное соотношение [2]:

$$a_{j,j} = 2*\left(\ln\frac{\Delta s_j}{t} - 0,202\right) \qquad (14)$$

С использованием представленных методик проведен численный эксперимент и выполнены расчеты распределения потенциалов скорости и скоростей вокруг различных профилей.

Расчеты первоначально были выполнены для обвода контура профиля сопловой лопатки, представленной на рис.3, который получен путем аналитического профилирования с помощью степенных полиномов [1,3,9].

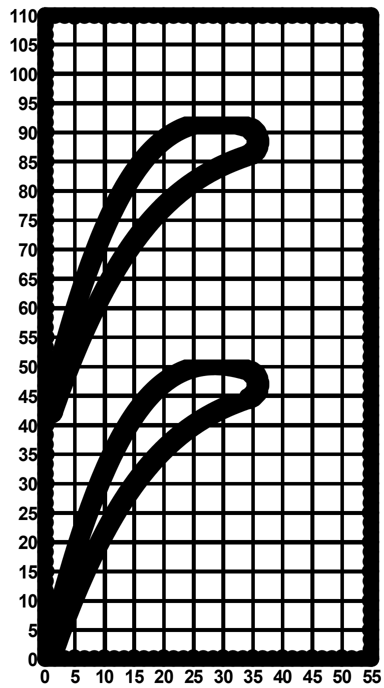

Рис 3. Решетка профилей сопловых лопаток турбины высокого давления

Графики распределений относительного потенциала $\bar{\varphi}$ и скорости V вдоль обвода такого профиля представлены, соответственно на рис.4 и рис.5. При этом были использованы следующие геометрические и режимные параметры: шаг решетки - $t = 41{,}5 мм$; скорость газа на входе в решетку - $V_1 = 156 м/с$, на выходе из решетки $-V_2 = 512 м/с$; температура и давление газа: на входе в ступень - $T_г^* = 1333\ K$, $p_г^* = 1{,}2095 \cdot 10^6\, Па$, на выходе из ступени - $T_{г1} = 1005\ K$, $p_{г1} = 0.75 \cdot 10^6\, Па$; относительная скорость газа на выходе из решетки - $\lambda_{1ад} = 0{,}891$. Анализ распределений $\overline{\varphi}$ и V по обводу показывает вполне удовлетворительное согласование результатов расчетов с имеющимися представлениями о классическом распределении скорости вокруг турбинного профиля [1-7, 11].

Для апробации представленных алгоритмов, в расчетах также были использованы профиля лопаток газовой турбины, полученные приближенным графоаналитическим способом (рис.6). Графики распределения скоростей вокруг обвода профилей сопловых и рабочих лопаток представлены, соответственно на рис.7 и рис.8. Несмотря на рассогласование полученных профилей с имеющимися представлениями о конфигурации турбинных решеток, отметим, что распределения скоростей соответствуют кривизне линий спинки и корыта лопаток, а также полученной конфигурации межлопаточного канала. Данное обстоятельство и подтверждает корректность приведенных в статье алгоритмов и полученных результатов.

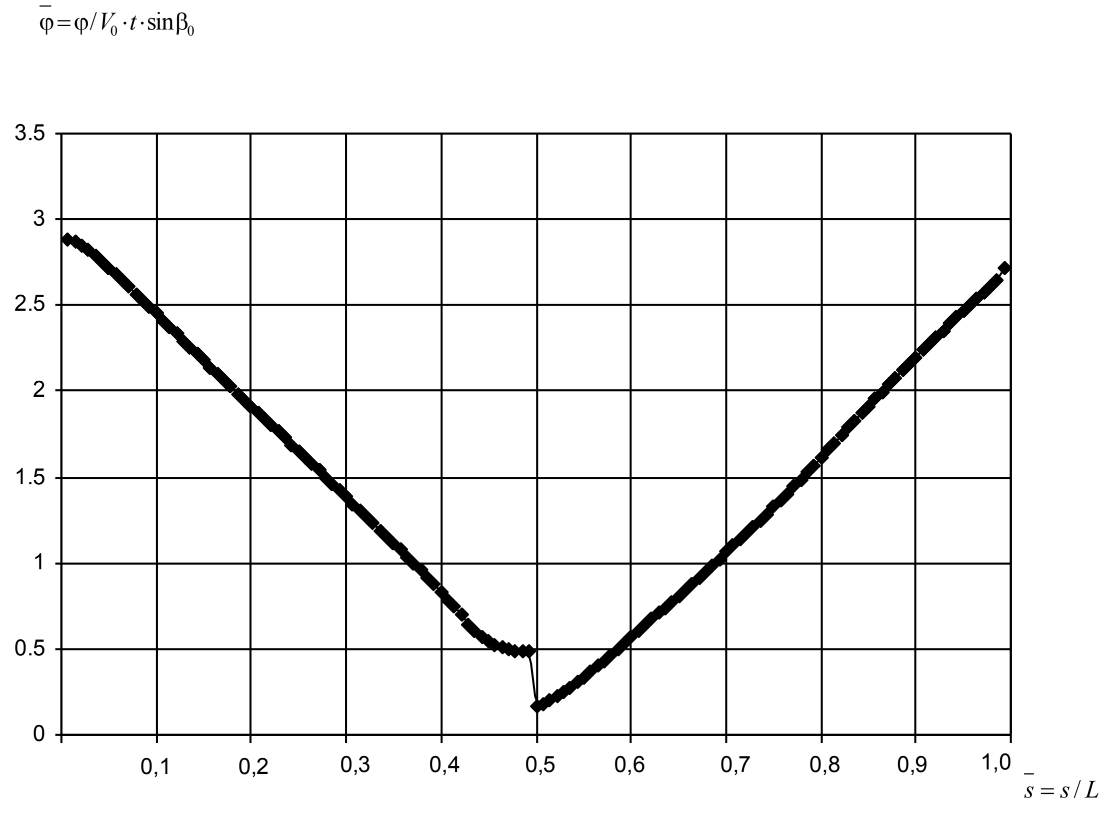

Рис. 4. Расчетное распределение относительного потенциала скорости по обводу профиля лопатки газовой турбины

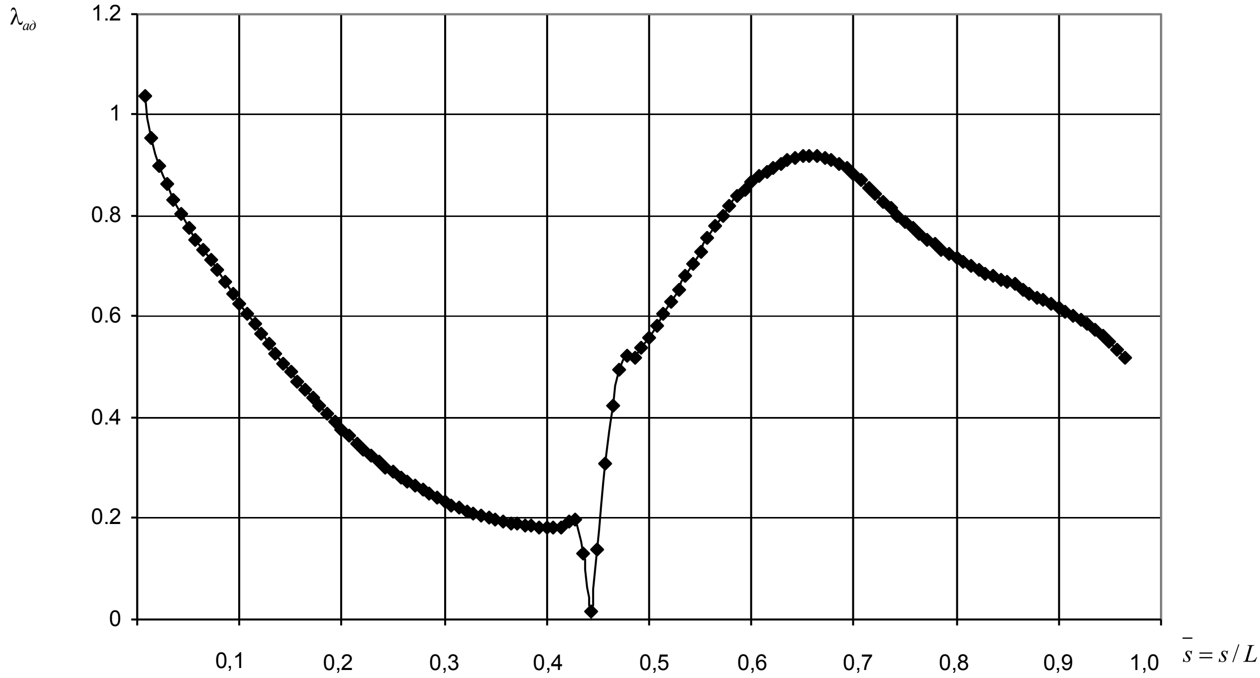

Рис. 5. Расчетное распределение скорости газового потока по обводу профиля лопатки газовой турбины

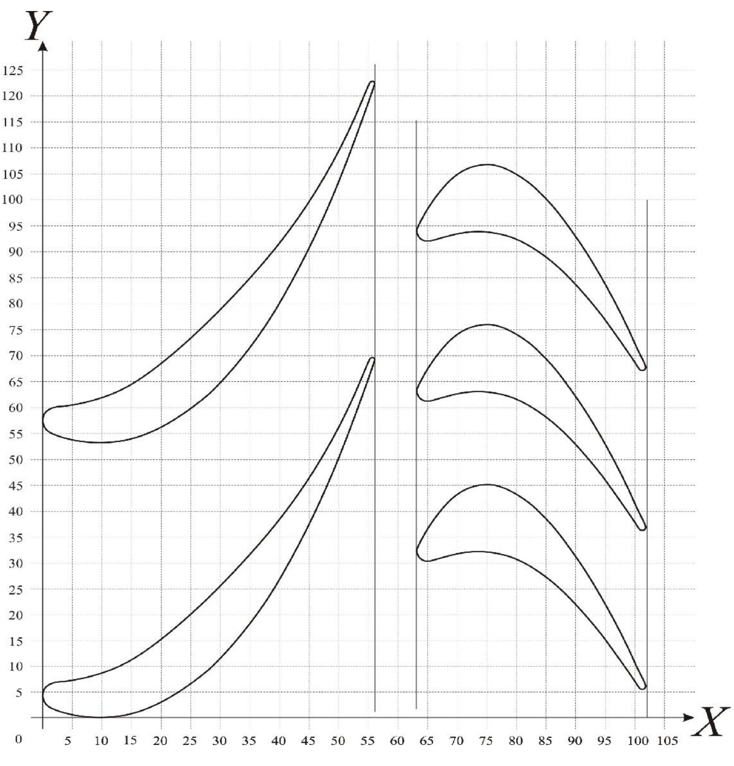

Рис 6. Решетка профилей сопловых и рабочих лопаток газовой турбины высокого давления

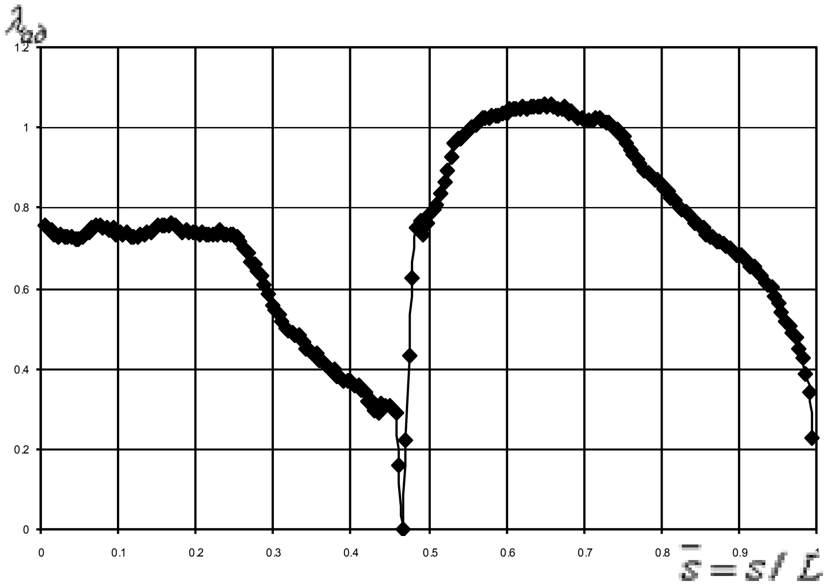

Рис. 7. Расчетное распределение скорости газового потока по обводу профиля сопловой лопатки газовой турбины

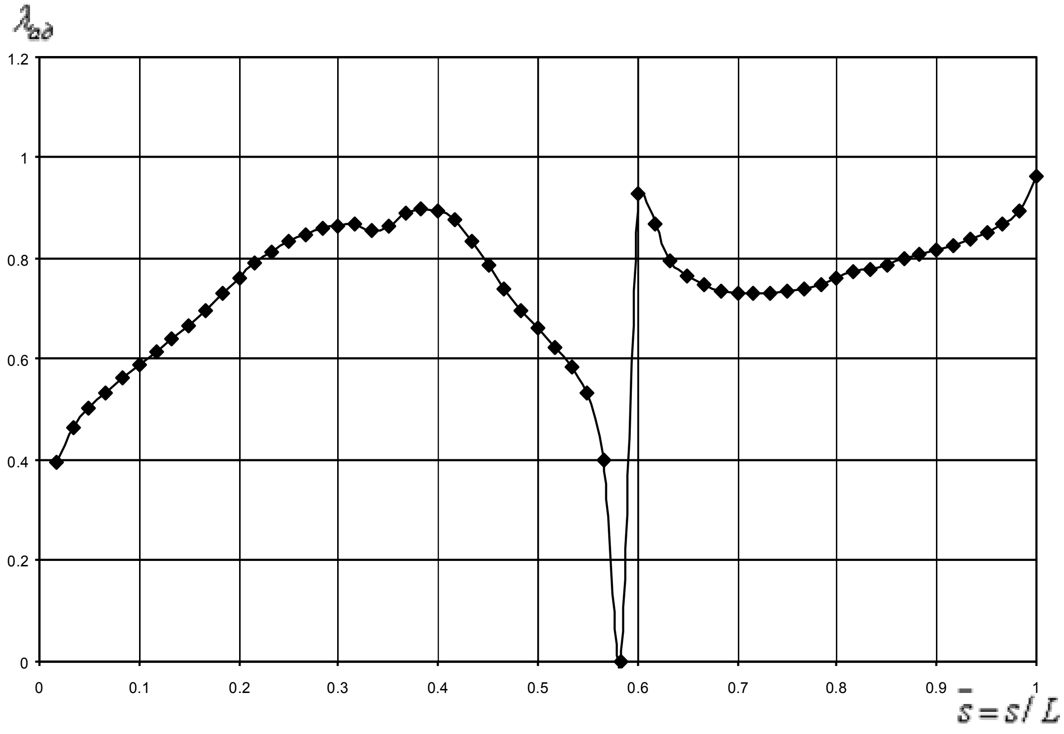

Рис. 8. Расчетное распределение скорости газового потока по обводу профиля рабочей лопатки газовой турбины

Список литературы:

1. Аронов Б.М., Жуковский М.И., Журавлев В.А. Профилирование лопаток авиационных газовых турбин. М.: Машиностроение, 1975, 191с. 2. Бекнев В.С., Епифанов В.М., Леонтьев А.И., Осипов М.И., Панков О.М., Шабаров А.Б., Янсон Р.А. Газовая динамика.

Механика жидкости и газа. Под общей ред. А.И.Леонтьева. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997, 671с. 3. Бойко А.В. Оптимальное проектирование проточной части осевых турбин. Харьков, "Вища школа", 1982, 151с. 4. Епифанов В.М., Малышев Г.П. К расчету методами интегральных уравнений обтекания плоских решеток турбомашин. Изв. вузов, сер. Машиностроение, 1968, №8, с.88-95. 5. Жуковский М.И. Аэродинамический расчет потока в осевых турбомашинах. Л.: Машиностроение, 1967, 286с. 6. Исаков С.Н. Разработка программ расчета на ЭВМ поля скоростей и профильных потерь в решетках профилей компрессорных и турбинных лопаток. /Отчет №0285.0002946. Свердловск, Уральск. политехн. институт (УПИ), 1984, 84с. 7. Исаков С.Н., Пирогова И.Н., Тугушев Н.У. Комбинированный метод решения прямой задачи гидродинамики решеток профилей турбомашин. / Изв. вузов, сер. Энергетика, 1984, №8, с.65-72. 8. Пашаев А.М., Аскеров Д.Д., Садыхов Р.А., Самедов А.С. Эффективные методы расчета элементов авиационных газовых турбин. / Авиационно-космическая техника и технология. Посвящено 75-летию Национального Аэрокосмического Университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт». Харьков, ХАИ, №3/19, 2005, с.25-32. 9. Самедов А.С. Разработка эффективных систем охлаждения на основе моделирования элементов газовых турбин. Диссертация на соиск. канд. техн. наук. Баку. 2002 г. 10. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Корн Г., Корн Т. М.: Наука, 1984, 831 с. 11 Холщевников К.Е., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1986, 432 с.

УДК 621.431

В.А. Жуков, канд. техн. наук, А.Е. Ратнов, инж., Н.П. Жукова, инж.

КРИТЕРИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИСАДОК К ОХЛАЖДАЮЩИМ ЖИДКОСТЯМ

Введение

Экспериментальные исследования процессов теплообмена в системах охлаждения ДВС при использовании теплоносителей различного состава показали, что состав теплоносителя и его свойства существенно влияют на тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы, протекание рабочего цикла, экономические и экологические показатели работы двигателя [1].

Формулирование проблемы

Однако, все представленные ранее результаты были получены в процессе моторных испытаний на двигателях определенных моделей (ЯМЗ-840, ВАЗ-2108) для обобщения результатов необходимо их представление в форме критериальных уравнений. Поставленная задача решается в настоящей работе.

Обобщенные критериальные уравнения

Для стационарных процессов конвективного теплообмена в однофазной несжимаемой жидкости с постоянными (кроме плотности) физическими свойствами характерны следующие безразмерные числа: Нуссельта, Стантона, Рейнольдса, Прандтля, Пекле, Грасгофа, Архимеда [4, 5].