

**Карпик А.А.**

Национальный технический университет  
«ХПИ», Харьков

**Воробьев Ю.С.**

Институт проблем машиностроения им.  
А.Н.Подгорного НАН Украины, Харьков

**ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ СТУПЕНИ  
КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ  
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ПОТОКА**

УДК 621.51

*В данной работе проведен газодинамический расчет течения ступени компрессора в нестационарной трехмерной постановке с помощью программного комплекса F. Определены основные неблагоприятные области течения, влияние радиального зазора, вторичные течения, взаимодействие кромочных следов.*

**Ключевые слова:** лопаточный аппарат, межлопаточный канал, численное моделирование, нестационарность.

Процесс интенсификации сельскохозяйственного производства неразрывно связан с повышением надежности и долговечности техники. Именно повышение долговечности и безотказности деталей и узлов на основе анализа надежности машины, агрегата позволяет повысить технико-экономический показатель и обеспечить необходимую эффективность. Основной задачей при проектировании машин является применение конструктивно-технологических решений, в результате чего возникает необходимость расчета на прочность основных узлов и деталей.

Современный уровень развития вычислительной техники и программных средств для решения задач механики позволяет моделировать напряженно-деформированное состояние при различных воздействиях, провести газодинамический расчет для обеспечения устойчивой работы и т.д. Проведение численных расчетов позволяет снизить затраты на натурные эксперименты, тем самым повысить основные технические показатели установок.

Повышение эксплуатационных показателей транспортных агрегатов и машин является актуальной задачей науки и техники.

В данной работе представлен газодинамический расчет ступени компрессора низкого давления газотурбинного двигателя.

Основным конструктивным элементом осевого компрессора является лопатка. От ее формы, скорости движения и ориентации в пространстве зависит работа, передаваемая потоку. Так как лопатка представляет собой упругую систему с распределенными параметрами, то она имеет бесконечное множество собственных частот и форм колебаний. При совпадении этих частот с частотами газодинамической силы возможно возникновение резонанса, который сопровождается ростом амплитуд колебаний и резким увеличением вибронпряжений в лопатке. Окружная неоднородность газового потока является основной причиной возбуждения колебаний лопаточного аппарата. Для оценки вибрационной прочности и дополнительных потерь, вызванных периодической нестационарностью набегающего потока, необходимо провести газодинамический расчет компрессора, который позволяет оценить основные параметры рабочего тела и определить неблагоприятные зоны течения.

Численное моделирование газа для решения практических инженерных задач, зачастую проводят в стационарной постановке. Однако такой подход не позволяет учесть некоторые важные моменты, такие как статор-ротор взаимодействие, вторичные течения, взаимодействие кромочных следов, которые оказывают существенное влияние на

достоверность полученных результатов моделирования.

Важным этапом при построении модели течения является выбор метода расчета турбулентных явлений. Для моделирования турбулентных течений, реализующихся в большинстве практических приложений, наиболее широко распространенной методикой является применение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), дополняемых определенной моделью турбулентности.

При моделировании турбулентных эффектов применяется двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности  $k-\omega$  SST. Модель  $k-\omega$  SST Ментера описывается путем суперпозиции  $k-\epsilon$  и  $k-\omega$ . Первая модель лучше описывает свойства свободных сдвиговых течений, а модель  $k-\omega$  имеет преимущество при моделировании пристеночных течений. Численное решение системы дифференциальных уравнений проводилось с использованием неявной квазилинейной ENO-схемы второго порядка аппроксимации.

Определив газодинамические параметры потока и неблагоприятные явления, вызывающие дополнительные потери, предоставляется возможность конструктивными способами снизить значения неблагоприятных факторов и повысить эффективность работы конструкции в целом.

Течение в компрессорных решетках характеризуются большими положительными градиентами давления, массивными областями отрыва потока и интенсивными вторичными течениями, которые влияют на энергетические потери компрессора.

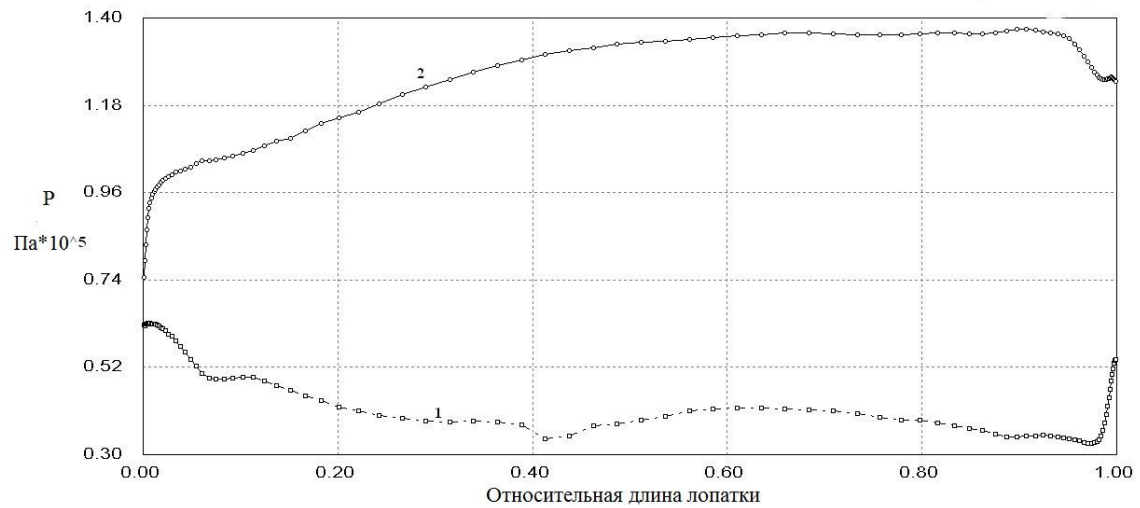
При сложном трехмерном течении в межлопаточном канале радиальный зазор оказывает существенное влияние на характер течения и энергетические потери. Радиальный зазор между торцом рабочей лопатки и корпусом компрессора имеет значительное влияние на КПД, увеличение которого относительно длины лопатки сопровождается увеличением расхода топлива двигателя. Происходит перетекание воздуха из полостей с большим давлением в полость с меньшим. Под воздействием процесса перетекания воздуха на периферии возникает вихревое течение. Уменьшение перепада давления на поверхности профиля приводит к снижению окружного усилия. Эти явления являются причиной снижения адиабатической работы ступени. На рисунке 1 показаны кривые распределения давления у корня (а) и на периферии (б)

Из рисунка (а) видно, что у корня лопатки давление на стороне разрежения ниже, чем на стороне давления. Обратную картину наблюдаем на рисунке (б), где за счет радиальных зазоров происходит перетекание газа, в результате чего давление на спинке лопатки становится выше чем корытца.

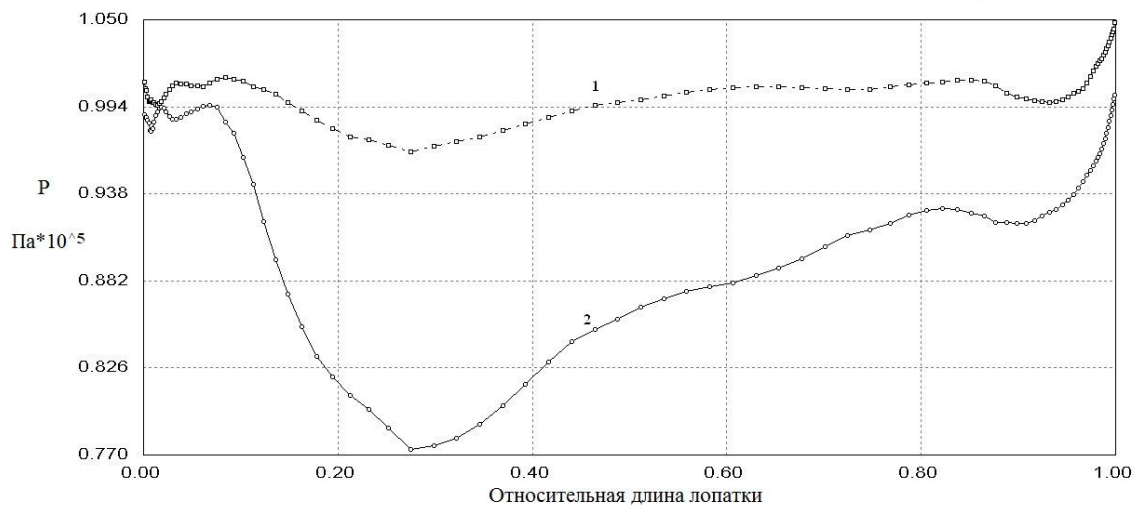
Перетекания через зазор приводит к появлению обратных радиальных составляющих скорости (рис.2). Интенсивность перетекания зависит от многих факторов, основные из которых: распределение аэродинамической нагрузки по высоте лопатки, их парусности и угла установки.

Этот процесс сопровождается образованием мощного вихря, который отесняет основной поток, при этом утолщая пограничный слой на стенке (рис.3).

При обтекании решеток профилей реальным воздухом имеют место значительные потери, обусловленные трением. При обтекании поверхности лопатки газом возникает пограничный слой, который характеризуется изменением скорости от нуля (на поверхности лопатки) до скорости основного потока на внешней границе. Кроме нормальных сил при обтекании воздухом, на лопатку действуют и касательные силы, которые вызывают прилипание потока к обтекаемым поверхностям и, как следствие, происходит наращивание пограничного слоя. Такие явления могут повлечь за собой отрыв слоя, что может привести к возникновению дополнительных потерь.



а)



б)

Рис.1. – Распределение давления на стороне давления (2) и стороне разрежения (1):  
 а- у корня; б – на периферии

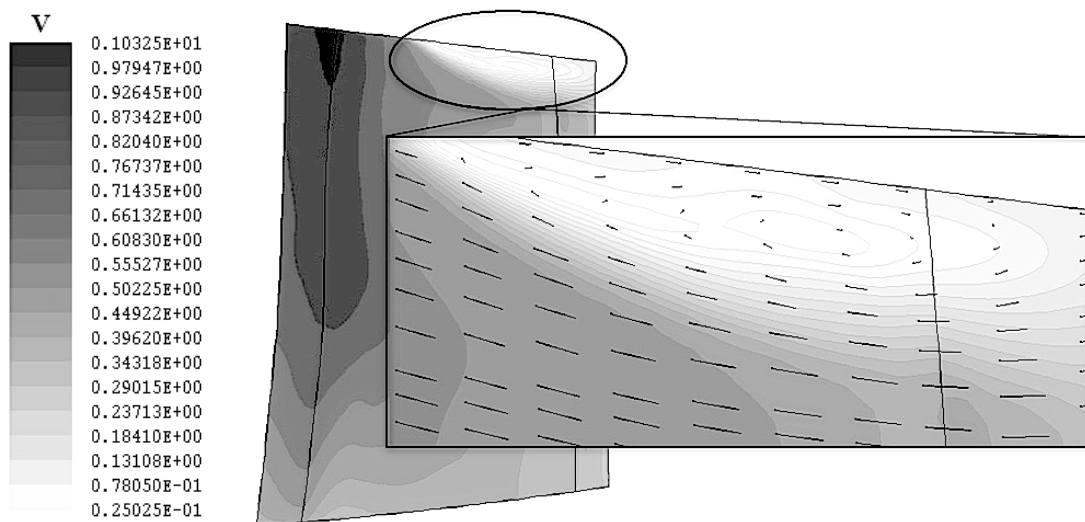


Рис.2. – Рециркуляционная зона на периферии лопатки

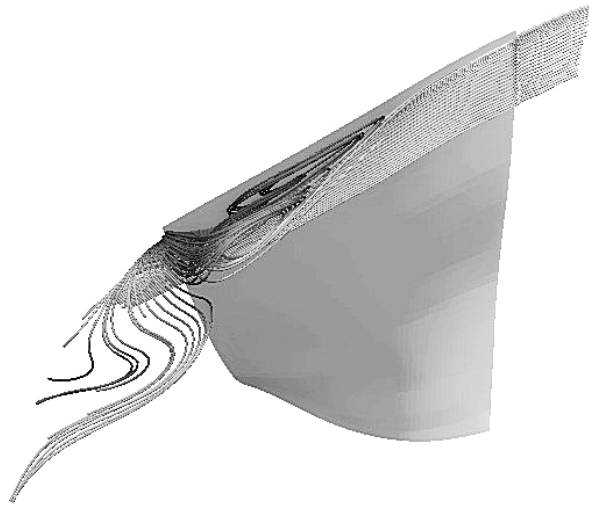


Рис.3. – Вихрь на выходной кромке

На рисунке 4 показаны основные энергетические потери  $E_k$  венце рабочих лопаток.

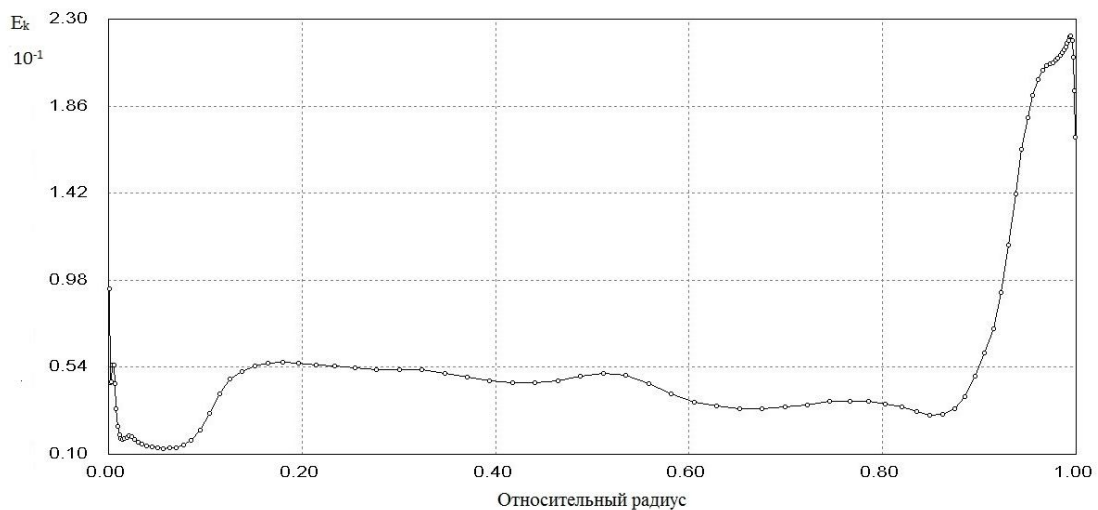


Рис. 4. – График энергетических потерь в венце

В работе приведено численное моделирование вязкого несжимаемого газа в многоступенчатом осевом компрессоре. Выполнен анализ структуры течения в межлопаточном канале, определены основные газодинамические параметры. На примере венца рабочих лопаток выявлены основные факторы, вызывающие дополнительные потери кинетической энергии. Влияние радиального зазора, вихревых следов, обратных течений позволяют получить реальную картину течения в проточной части турбомашины.

### Литература

1. Ершов, С. В. Развитие комплекса программ для расчета трехмерных течений вязкого газа / С. В. Ершов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №5(92). – С. 89–94.
2. Ершов, С. В. Развитие метода расчета трехмерных отрывных течений в проточной части компрессора / С. В. Ершов, Д. А. Козырец // Вестн. НТУ «ХПИ». Энерг. и теплотехн. процессы и оборудование. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2012. – № 7. – С. 16 – 23.

3. Карпик А.А. Анализ газодинамической структуры потока в решетках профилей осевого компрессора газотурбинного двигателя / А.А. Карпик, В.А. Яковлев, Ю.С. Воробьев // ISSN 0131–2928. Проблемы. Машиностроения. – 2015. - Т. 18, № 4/2. – С. 18 – 23.

### Summary

**A.A. Karpik, Y.S. Vorobyov.** Factors determining the loss of energy of compressor stage gas turbine engine based on flow parameters

*In this work numerical modeling of a three-dimensional viscous current in blade cascade of the axial compressor of low pressure of the gas-turbine engine is executed. Gasdynamic computation of a flow in the first step of the compressor in non-stationary three-dimensional statement by means of a program complex F is carried out. For modeling of the turbulent flows which are realized in the majority of practical applications, the most widespread technique is application of Reynolds-averaged Navier–Stokes equations (RANS) supplemented by a certain model of turbulence. The two-equation differential  $k-\omega$  SST Menter's turbulence model is used. The initial equations are integrated in number by means of the iterative obvious and implicit differential scheme of the second order of approximation which obvious operator is based on the ENO scheme of Harten, and implicit approximation is realized by means of the scheme of Bina-Uorminga-Stegera. The structure of a stream in the axial compressor is analyzed. The gas-dynamic structure of a flow has changeable character on blade height from a root to the periphery. Effect of radial clearance, vortex wake, back-flow allow to receive real flow pattern.*

**Keywords:** *blading, blade chanel, numerical simulation, unstationarity.*

### References

1. Yershov, S. V. Development of a complex of programs for calculation of three-dimensional flow of viscous gas / S. V. Yershov//Aerospace equipment and technology. – 2012. – No. 5(92). – Page 89-94.
2. Yershov, S. V. Development of software system for computations of 3D viscous compressible flow in turbomachinery blade rows / S. V. Yershov, D. A. Kozyrets//Vestn. NTU "HPI". Energ. and heat technology processes and equipment. – Kharkiv: NTU "HPI". – 2012. – No. 7. – Page 16 – 23.
3. Karpik A.A. The analysis of gas-dynamic structure of stream in grates of profiles of axial compressor of turbo-engine / A.A. Karpik, V.A. Yakovlev, Yu.S. Vorobyov//ISSN 0131–2928. Problems. Mechanical engineering. – 2015. - Т. 18, No. 4/2. – Page 18 – 23.