

УДК 621.44.533.697

**В.М. Лапотко, Ю.П. Кухтин, А.В. Лапотко***ГП «Ивченко-Прогресс», Украина***ПОЛНЫЙ АНАЛИЗ CLOCKING-ЭФФЕКТОВ В 1.5  
СТУПЕНИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МЕТОДА ОТСЛЕЖИВАНИЯ СТРУЙ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА**

*Выполнен полный анализ явлений clocking-эффекта с использованием метода отслеживания струй течений газа на примере 1.5 ступени газовой турбины. В качестве исследуемых параметров рассмотрены эффективность, акустические свойства турбины, аэромеханические условия эксплуатации рабочих лопаток, а также тепловая нагрузка лопаток второго соплового аппарата. Представленные результаты анализа свидетельствуют о том, что при использовании явлений clocking-эффекта особое внимание следует уделять анализу аэромеханических условий эксплуатации рабочих лопаток турбины.*

**Ключевые слова:** турбомашинa, clocking-эффект, нестационарное аэродинамическое взаимодействие.

**1. Введение**

Аэродинамическое взаимодействие лопаток рабочих колес и лопаток направляющих аппаратов в многоступенчатых турбомашинaх создает нестационарное поле течения газа. Это нестационарное течение становится более упорядоченным, когда в рассматриваемой области течения имеет место наличие несмежных лопаточных венцов с одинаковым или кратным числом лопаток. Известно, что, учитывая эти упорядоченные структуры течения, можно существенно улучшить некоторые характеристики турбомашин. Это явление получило название clocking-эффекта турбомашин.

В отличие от clocking-эффекта, основанного на траекторных характеристиках течения в турбомашинe, оказывающего влияние на эффективность, акустические свойства и тепловую нагрузку конструкции, clocking-эффект аэродинамического нагружения рабочей лопатки определяется ее взаимодействием, как со следовой, так и с потенциальной неравномерностью течения.

Именно возможностью возникновения опасных вынужденных колебаний рабочих лопаток объясняется тот факт, что несмотря на перспективу существенно улучшить некоторые характеристики турбомашин, внедрение явлений clocking-эффекта не получило широкого распространения. Этому способствовало в значительной степени отсутствие достаточно апробированных методов расчета нестационарных течений в турбомашинaх.

Целью представленной работы является оценка возможности использования метода отслежи-

вания струй течений газа в процессе проектирования турбомашин с учетом явлений clocking-эффекта.

**2. Обозначения**

$T_u$  - степень турбулентности;

$p_0^0, T_0^0$  - соответственно, полное давление и полная температура в сечении входа;

$p_a, T_a$  - соответственно, статическое давление, статическая температура в сечении выхода;

$\eta, S$  - соответственно, к.п.д., энтропия;

$P^0(\Delta S)$  - полное давление в сечении выхода, определенное по изменению энтропии;

$k_x, k_\phi$  - количество расчетных элементов, соответственно, в осевом и окружном направлениях для одного межлопаточного канала;

$F_x, F_\phi$  - компоненты газовых сил, действующих соответственно в осевом и окружном направлениях на поверхность лопатки;

$M_t, M_d$  - соответственно момент кручения, вращающий момент на одну лопатку.

**3. Краткое описание метода**

Разработанный нами метод отслеживания струй течений (МОСТ) [1] основан на Эйлерово-Лагранжевом представлении течения газа. В каждый момент времени сеточные поверхности, ориентированные в направлении основного течения, перестраиваются таким образом, чтобы боковые грани расчетных ячеек всегда совпадали с поверхностями контактного разрыва параметров. Это обеспечивает высокую точность расчета при наличии в поле течения границ раздела между областями с различными веществами или раз-

личными температурами, а также при наличии в поле течения произвольно движущихся жестких границ тела.

Процессы теплообмена, обусловленные молекулярным и турбулентным движениями среды воспроизводились потоками субстанции. Определение интенсивностей потоков, обусловленных физической вязкостью, предполагает использование достижений кинетической теории газов. Определение интенсивностей потоков, обусловленных турбулентной вязкостью, предполагает использование основных достижений современных моделей турбулентности.

Используя Эйлерово-Лагранжев подход, нами была реализована схема расчета течения газа в ступени турбомашин в единой системе координат. Тем самым был устранен негативный эффект - «мазание» параметров потока на стыках сеток, что свойственно методам, использующим скользкие сетки.

Разработанный метод был апробирован на различных типах течений. Получено хорошее соответствие результатов расчета и экспериментальных данных при определении траекторных характеристик нестационарного течения газа в 2.5 ступени турбины экспериментального двигателя [2].

#### 4. Объект исследований

Объектом численных исследований являлось 1.5 ступени турбины, экспериментальные данные которой были получены в Институте реактивных двигателей и турбомашин университета технологий г.Ахен, Германия [3] (см. рис. 1).

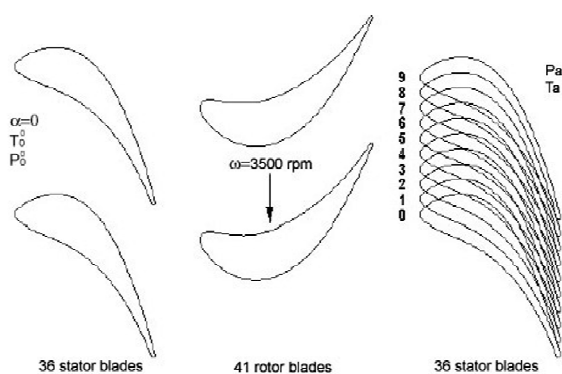


Рис. 1. Исследуемые 1.5 ступени турбины низкого давления

Все величины приводились к безразмерному виду. Эталонной длиной была принята общая протяженность расчетной области, которая составила 232.5 мм. В качестве эталонов давления и температуры принимались соответственно значения  $P_a = 99922.02$  Па,  $T_a = 293.65$  К на выходе турби-

ны. Показатель адиабаты  $K=1.4$ , газовая постоянная  $R=287.0$  Дж/(кг К). Эталонной скоростью служила изотермическая скорость звука  $\sqrt{RT_a}$ . Число Рейнольдса, определенное по общей осевой протяженности расчетной области и физической вязкости газа на выходе из турбины, составило 4350000.0. Заданному расходу газа  $g = 7.2$  кг/сек соответствовало  $P_0^0 = 151300$  Па,  $T_0^0 = 306.87$  К. Турбулентность течения на входе в расчетную область  $T_{U0} = 2\%$ .

В качестве исследуемого интегрального параметра турбины в целом рассматривался к.п.д., который определялся по соотношению:

$$\eta = (P^0(S) - P_a) / (P_0^0 - P_a) \quad (1)$$

При проведении численных расчетов использовались  $H$  – сетки. Каждый межлопаточный канал разбивался с переменным шагом на осевом  $x$ -направлении и с постоянным шагом на левой расчетной границе в окружном  $\varphi$ -направлении: для сопловых аппаратов  $k_x = 68$ ,  $k_\varphi = 88$ ; для рабочего колеса  $k_x = 66$ ,  $k_\varphi = 80$ .

#### 5. Некоторые clocking-эффекты нестационарного взаимодействия

Мгновенные поля параметров ( $T_U$ ,  $S$ ), полученные на установлении нестационарного процесса в 1.5 ступени турбины для 0-ого положения второго статора, представлены на рис. 2. Для сравнения на рис. 3 представлены те же поля параметров, полученные для 4-ого положения второго статора.

Из представленных на рис. 2 и 3 результатов видно, как происходит фрагментация аэродинамических следов, сходящих с лопаток первого статора. И далее, для 0-ого положения второго статора (см. рис. 2), получающиеся фрагменты следов, пройдя межлопаточные каналы рабочего колеса, а также своеобразный коридор, образованный аэродинамическими следами лопаток рабочего колеса, попадают в середины межлопаточных каналов второго статора.

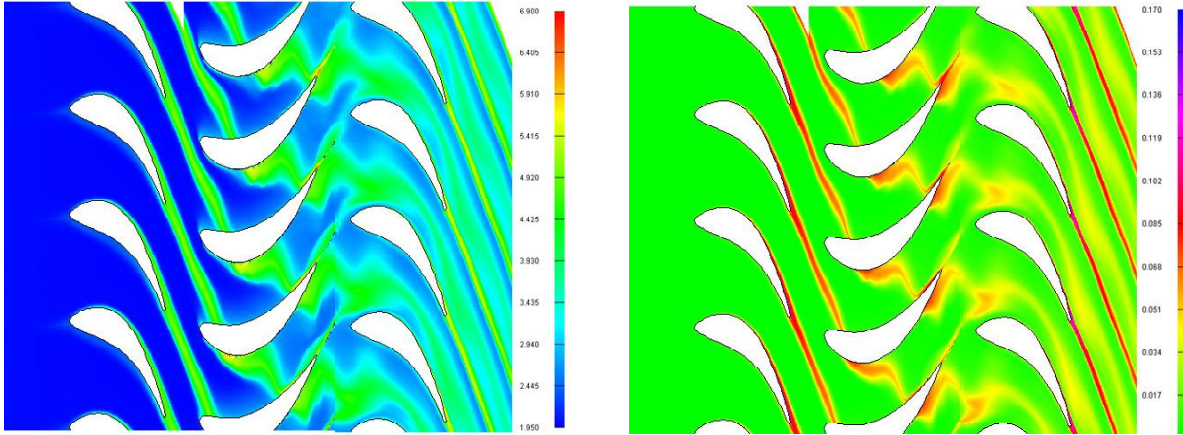
Однако для 4-ого положения второго статора (см. рис.3), образующиеся фрагменты следов попадают на входные кромки лопаток второго статора. Таким образом, развитие пограничного слоя вблизи лопаток второго статора для его 0-ого положения (см. рис. 2) обусловлено взаимодействием с поверхностью лопаток потока, обладающего низкой степенью турбулентности. Развитие же пограничного слоя вблизи лопаток второго статора для его 4-ого положения (см. рис. 3) обусловлено взаимодействием с поверхностью лопаток потока, обладающего высокой степенью турбулентности. А в этом случае наблюдается интенсификация теплообмена, и, как след-

стве, рост потерь, рост толщины пограничного слоя, возрастание степени турбулентности.

Во всех остальных положениях второго статора, отличных от 0-го и 4-ого, имеет место частичное воздействие фрагментов аэродинамических следов от лопаток первого статора на лопатки второго статора.

Для сопоставления с экспериментальными данными работы [3] расчетные значения к.п.д. 1.5 ступени турбины, полученные по формуле (1), приводились к среднему арифметическому значению к.п.д.:

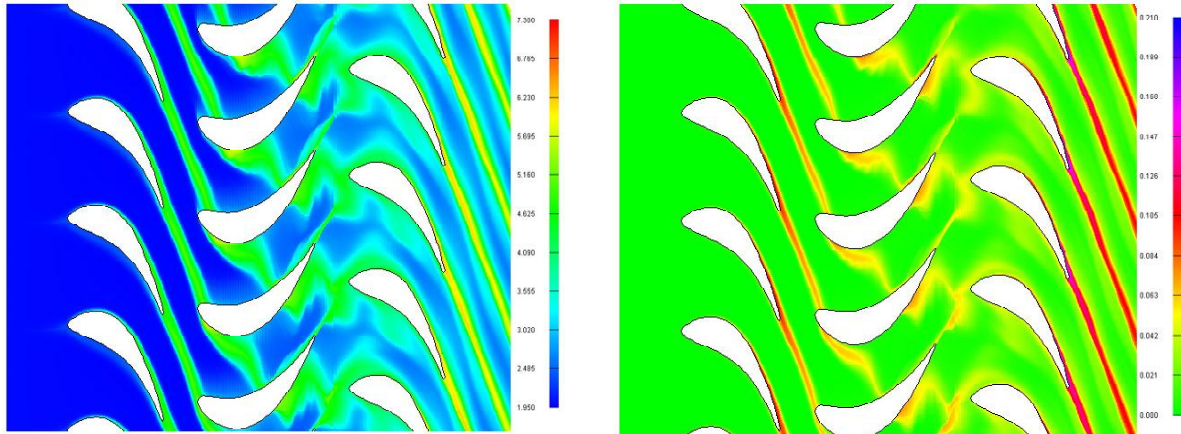
$$\eta_{i,rel} = \frac{\eta_i}{\bar{\eta}}; \quad \bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i. \quad (2)$$



а) параметр  $T_U$

б) параметр  $S$

Рис. 2. Мгновенное поле течения в 1.5 ступени турбины для 0-ого положения второго статора



а) параметр  $T_U$

б) параметр  $S$

Рис. 3. Мгновенное поле течения в 1.5 ступени турбины для положения 4 второго статора

Относительные значения к.п.д. 1.5 ступени турбины для всех взаимных ориентаций статора при  $T_{U0} = 2\%$  представлены на рис. 4. Там же нанесены экспериментальные значения. Наблюдается по праву хорошее соответствие.

Опираясь на акустические исследования, представленные в работе [4], которые получили экспериментальное подтверждение, можно утверждать вполне обоснованно, что в 0-ом положении второго статора будет регистрироваться более низкий уровень шума турбины низкого давления в широкополосной области по сравнению с ситуацией, которая будет развиваться, когда второй статор находится в 4-ом положении. Более высокий уровень турбулентности, развивающийся

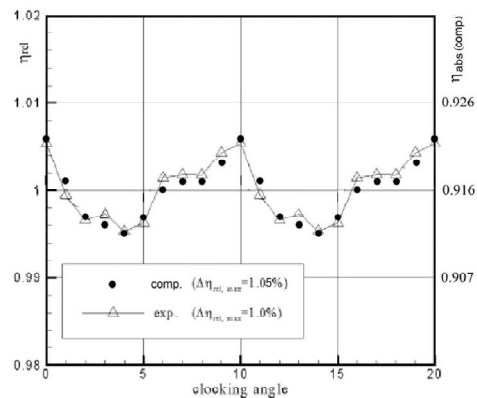


Рис. 4. Изменение относительных значений к.п.д. 1.5 ступени турбины при изменении взаимной ориентации статоров

вблизи второй статорной решетки, находящейся в 4-м положении по сравнению с уровнем турбулентности вблизи второй статорной решетки, находящейся в 0-м положении, подтверждает это.

Совершенно противоположное решение может быть принято при реализации clocking-эффекта для ступеней турбин высокого давления, для которых особую важность представляет решение проблемы обеспечения охлаждения статорных решеток.

Вследствие, как правило, пленочного охлаждения, спутные струи от лопаток первой статорной решетки являются заложенными по сравнению со струями ядра течения [5]. Таким образом, для турбин высокого давления «кильватерное» расположение лопаток второго соплового аппарата по отношению к заложенным аэродинамическим следам лопаток первого соплового аппарата, несмотря на возрастание аэродинамических потерь, является весьма целесообразным в смысле обеспечения их благоприятного теплового состояния.

#### 6. Аэромеханические исследования 1.5 ступени турбины

Рабочая лопатка турбомашин, при своем движении, испытывает периодические воздей-

ствия от следовой и потенциальной неравномерностей течения, порождаемого неподвижными решетками статора. Разработанный метод позволяет поставить задачу оптимизации взаимного расположения статорных венцов с целью снижения амплитуд возбуждающих нагрузок, приводящих к вибрациям рабочих лопаток. Однако, для проведения Фурье-анализа возбуждающих сил, необходимо проведение «глубоких по времени» (в течение 1.5 – 2 оборотов ротора) численных расчетов всей турбины в целом при различной взаимной ориентации статоров.

Расчеты, проведенные для 0-ого, 2-ого, 4-ого, 6-ого и 8-ого положений второго статора показали, что 2-ое и 6-ое положения статора представляют наибольший интерес в смысле получения экстремальных динамических нагрузок, действующих на рабочую лопатку. Это следует из результатов Фурье-анализа изменения по времени осевой (рис. 5) и окружной (рис. 6) компонент сил, а также вращающего (рис. 7) и скручивающего (рис. 8) моментов, действующих на лопатки рабочего колеса.

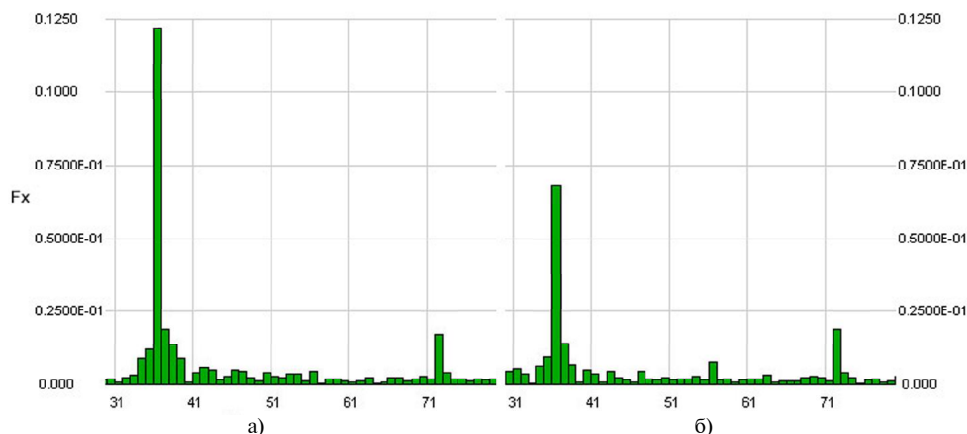


Рис. 5. Результаты Фурье-анализа осевого компонента сил, приложенных к рабочим лопаткам, при различных взаимных положениях сопловых аппаратов:  
а) – положение 2; б) – положение 6

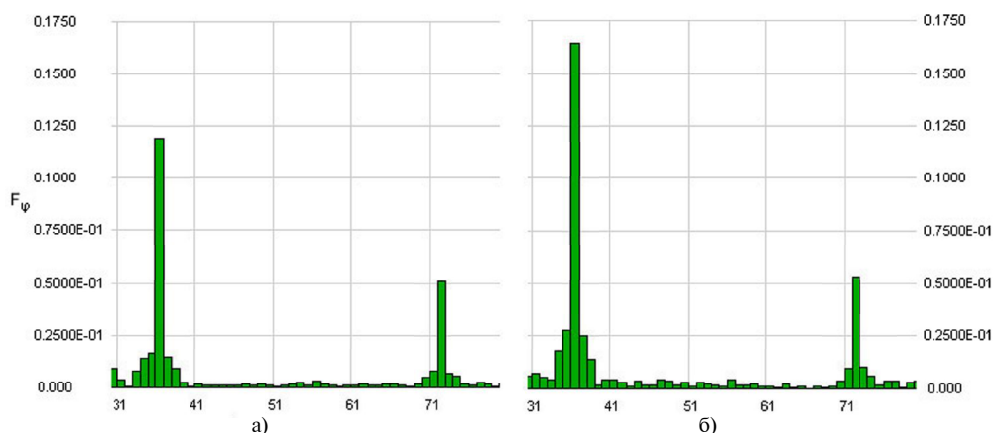


Рис. 6. Результаты Фурье-анализа окружного компонента сил, приложенных к рабочим лопаткам, при различных взаимных положениях сопловых аппаратов:  
а) – положение 2; б) – положение 6

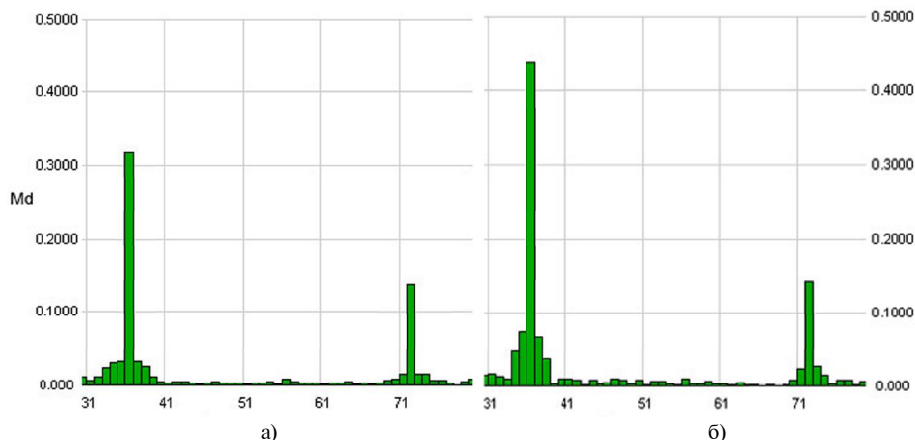


Рис. 7. Результаты Фурье-анализа вращающего момента, действующего на одну рабочую лопатку относительно оси двигателя, при различных взаимных положениях сопловых аппаратов: а) – положение 2; б) – положение 6

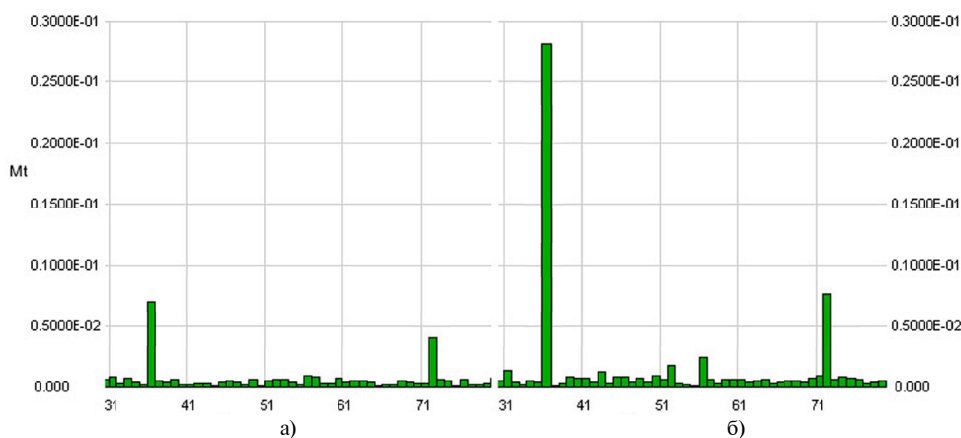


Рис. 8. Результаты Фурье-анализа момента кручения, приложенного к рабочим лопаткам, при различных взаимных положениях сопловых аппаратов: а) – положение 2; б) – положение 6

Здесь необходимо принять во внимание, что в положении 6 второго статора достигается наибольший вращающий момент  $M_d$ , снимаемый рабочим колесом, при минимальной осевой нагрузке  $F_x$ . В то время как в положении 2 второго статора достигается минимальный момент кручения  $M_t$  рабочей лопатки относительно ее оси.

## 7. Выводы

Многочисленные исследования показали, что положения аэродинамических следов лопаток, расположенных выше по течению по отношению к ниже расположенным профилям лопаток, зависят от рассматриваемой геометрии аэродинамических поверхностей, оборотов ротора и заданного режима течения.

Параметрами, которые зависят от окружной ориентации несмежных венцов лопаток, являются аэродинамическая эффективность турбомашин, ее акустические и аэромеханические свойства, а также тепловое состояние конструкции. Оптимизация турбомашин по какому-либо па-

раметру может ухудшить другие ее качества. Поэтому, при учете этого явления, требуется комплексный, взвешенный подход.

## Перечень ссылок

1. Лапотко В.М., Кухтин Ю.П. «Эйлера-Лагранжев подход при численном моделировании нестационарных течений идеального газа», в научно-техническом журнале: *Авиационно-космическая техника и технология*, Харьков: ХАИ, 2007, №7(43), С.12-17.
2. Кравченко И.Ф., Лапотко В.М., Кухтин Ю.П. «Определение траекторных характеристик нестационарного потока газа в турбине авиационного двигателя», в научно-техническом журнале: *Авиационно-космическая техника и технология* Харьков: ХАИ, 2008, №10(57), С.93-95.
3. Volmar, T., Brouillet, B., Benetschik, H., Gallus H.E.: Test Case 6: 1-1/2 Stage Axial Flow Turbine – Unsteady Computation, in: *ERCOFTAC Turbomachinery Seminar and Workshop*. (1998)
4. Муравченко Ф.М., Лапотко В.М., Кухтин Ю.П., Резник С.Б., Попуга А.И.

«Оценка акустического взаимодействия венцов турбины вентилятора двигателя Д-18Т», в научно-техническом журнале: Вестник двигателестроения, Запорожье: Мотор Сич, №1/2006, С.8-13.

5. Лапотко В.М., Кухтин Ю.П. «Анализ пленочного охлаждения лопаток турбин в нестационарном потоке газа», в научно-техническом журнале: Вестник двигателестроения, Запорожье: Мотор Сич, №3/2005, С.90-96.

*Поступила в редакцию 01.06.2011*

**В.М. Лапотко, Ю.П. Кухтин, А.В. Лапотко. Полный анализ clocking-эффектов в 1.5 ступени газовой турбины с использованием метода отслеживания струй течений газа**

*Виконано повний аналіз явищ clocking-ефекту з використанням методу відстеження струменів плинів газу на прикладі 1.5 ступенів газової турбіни. В якості досліджуваних параметрів розглянуто ефективність, акустичні властивості турбіни, аеромеханічні умови експлуатації робочих лопаток, а також теплове навантаження лопаток другого соплового апарату. Представлені результати аналізу свідчать про те, що при використанні явищ clocking-ефекту особливу увагу варто приділяти аналізу аеромеханічних умов експлуатації робочих лопаток турбіни.*

**Ключові слова:** турбомашинна, clocking-ефект, нестационарна аеродинамічна взаємодія.

**V.M. Lapotko, Y.P. Kukhtin, A.V. Lapotko. Full Analysis of Clocking-effectes in 1.5 Stage of Gas Turbine by Using a Metod of Gas Flow Jet Tracking**

*A complete analysis of clocking-effect phenomena was performed by using a method of gas flow jet tracking, with the gas turbine stages 1.5 taken as examples. The turbine effectiveness, acoustic features, aeromechanical conditions of blade operation, and also a temperature loading of the turbine second NGVs were chosen as the parameters to be studied. The analysis results show that, while using the clocking-effect phenomena a special attention should be given to the analysis of aeromechanical conditions of the turbine blade operation.*

**Key words:** Turbomachine, clocking-effect, unsteady aerodynamic interaction.