

УДК 621.452.3

Е.С. ГОРЯЧКИН, Г.М. ПОПОВ, Ю.Д. СМИРНОВА*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), Россия*

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В ходе выполнения работы произведена валидация расчетных моделей неохлаждаемых турбин газотурбинной установки. Исследовано влияние размерности расчетной сетки на результаты моделирования характеристик турбин. Также исследовано влияние учета притрактовых полостей при моделировании на расчетные характеристики турбин. В результате выполнения работы выработаны рекомендации по построению расчетных моделей неохлаждаемых осевых турбин газотурбинных двигателей, обоснована возможность использования в оптимизационных расчетах моделей турбин без притрактовых полостей.

Ключевые слова: турбина низкого давления, газовая динамика, стационарная газотурбинная установка.

В настоящее время, одной из наиболее актуальных задач авиационного двигателестроения является повышение эффективности газотурбинного двигателя. Общий уровень эффективности двигателя в значительной степени определяется эффективностью его узлов, в частности турбины [1].

Современный уровень развития методов вычислительной газовой динамики (CFD) позволяет широко использовать данные методы на этапе проектирования турбин для анализа их характеристик. Это позволяет существенно сократить сроки и снизить стоимость разработки.

Данная работа посвящена идентификации расчетных моделей неохлаждаемых турбин: турбины низкого давления (ТНД) и свободной турбины (СТ) стационарной газотурбинной установки НК-36СТ.

В ходе выполнения работы были созданы четыре расчетные модели ТНД и четыре расчетные модели СТ. Расчетные модели отличались друг от друга количеством элементов расчетных сеток и наличием притрактовых полостей. Так, модели первого уровня (модели *ТНД_сетка1* и *СТ_сетка1*) содержали примерно 450 000 элементов на один лопаточный венец (ЛВ). Модели второго уровня (модели *ТНД_сетка2* и *СТ_сетка2*) — примерно 1 000 000 элементов на один ЛВ. Модели третьего уровня (модели *ТНД_сетка3* и *СТ_сетка3*) — примерно 2 000 000 элементов на один ЛВ.

Описанные выше модели не учитывали и не содержали притрактовые полости. Модели четвертого уровня (модели *ТНД_сетка2_бандаж* и *СТ_сетка2_бандаж*) были построены на основе моделей 2-го уровня и содержали притрактовые полости.

Необходимость создания не одной, а четырех расчетных моделей для каждой из турбин была продиктована следующими соображениями:

1. Обоснованием выбора достаточного количества элементов расчетной сетки в межлопаточных каналах для численного моделирования рабочего процесса в турбинах (исследование так называемой сеточной сходимости);

2. Обоснованием возможности использования в оптимизационных исследованиях моделей турбин без притрактовых полостей для упрощения расчетных моделей и снижения расчетного времени.

При построении всех численных моделей использовались следующие допущения.

1. Течение в каждом ЛВ соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК), а также в притрактовых полостях обладает свойством циклической симметрии. Иными словами, течения во всех межлопаточных каналах в пределах одного ЛВ одинаковы, поэтому каждый ЛВ можно моделировать одним межлопаточным каналом с наложенными на его боковые поверхности условиями периодичности.

2. Характер течения в турбине не является сугубо нестационарным: отсутствуют крупные вихри, пульсации и т.д. Поэтому расчет можно выполнять в стационарной постановке.

3. Деформации лопаток турбины под действием газовой нагрузки не учитываются при расчете. Учет деформаций лопаток и дисков под действием центробежной и тепловой нагрузок выполняется путем использования «горячего» тракта турбины. Также выполняется учет монтажных деформаций рабочих лопаток из-за наличия на рабочем колесе бандажного пояса.

4. Свойства рабочего тела описываются моделью идеального газа с учетом переменности теплоемкости и вязкости в зависимости от температуры рабочего тела.

5. Турбулентность изотропна по всем направлениям. Данное допущение позволяет использовать при расчетах более простые, а, следовательно, менее затратные с точки зрения вычислительных ресурсов одно- и двухпараметрические модели турбулентности, такие как *Spalart-Allmaras*, $k-\varepsilon$ и *SSTk- ω* .

6. Теплообмен между стенками проточной части и потоком отсутствует. Данное допуще-

ние позволяет исключить из расчета уравнения теплообмена и за счет этого увеличить скорость расчета.

На основе указанных допущений в программном комплексе *Numeca AutoGrid5* были построены геометрии расчетных областей моделей ТНД и СТ. На рисунке 1 для примера показана геометрия расчетной области ТНД без притрактовых полостей (модели *ТНД_сетка1*, *ТНД_сетка2* и *ТНД_сетка3*), а на рисунке 2 геометрия расчетной области СТ с притрактовыми полостями (модель *СТ_сетка2_бандаж*).

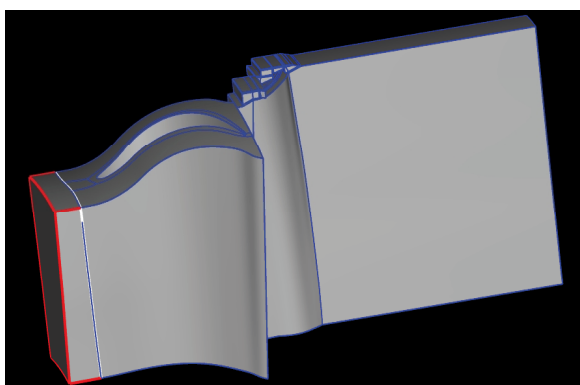


Рис. 1. Геометрия расчетной области ТНД с притрактовыми полостями

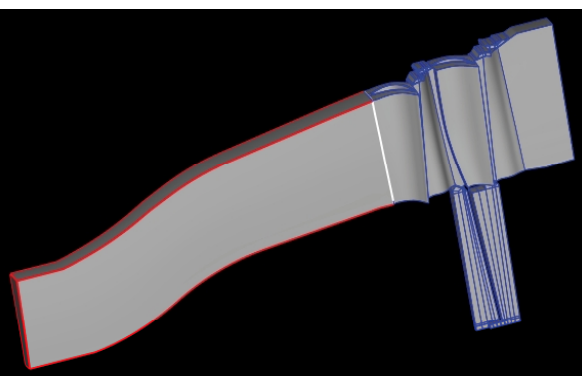


Рис. 2. Геометрия расчетной области СТ с притрактовыми полостями

Построение сеток также выполнялось в программном комплексе *Numeca AutoGrid5*. Как было отмечено выше, сетки моделей первого уровня содержали около 450 000 элементов, второго и четвертого 1 000 000 элементов, третьего 2 000 000 элементов.

При настройках расчетных моделей турбин в программном комплексе *Numeca Fine Turbo* в качестве рабочего тела использовался идеальный газ со свойствами продуктов сгорания. Газовая постоянная составляла:

$$R = 287,335 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Зависимость теплоемкости от температуры определялась при помощи следующего полинома:

$$c_p = 829,2 + 0,5068 \cdot T - 0,00019254 \cdot T^2 + 0,000000027364 \cdot T^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Вязкость рабочего тела описывалась уравнением Сазерленда:

$$\mu = 1,49 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{273 + 200}{200 + T} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}.$$

Расчеты выполнялись в стационарной постановке с использованием модели турбулентности *Spalart-Allmaras*.

При расчетах турбин учитывалось вращение доменов РК. Скорость вращения определялась режимом работы турбины и составляла 5005 об/мин для ТНД и 5000 об/мин для СТ.

В качестве интерфейса между доменами лопаток СА и РК использовался интерфейс *Full Non Matching Mixing Plane*, усредняющий при передаче данных параметры потока в окружном направлении.

В качестве граничных условий на входе в турбины были заданы эпюры распределения по высоте проточной части полного давления, полной температуры, угла потока и турбулентной вязкости в соответствующем сечении проточной части ГТУ. Для ТНД данные эпюры были получены в результате расчета турбины среднего давления (ТСД) (эпюры параметров на выходе из ТСД), для СТ – в результате расчета ТНД.

На выходе из турбин задавалось статическое давление на втулке.

На начальном этапе работы были произведены расчеты характеристик турбин с использованием моделей первых трех уровней (без

учета притрактовых полостей). По результатам расчета характеристик с использованием каждой из моделей были построены следующие зависимости:

1. Пропускной способности турбины:

$$A = \frac{G\sqrt{T_{\text{ВХ}}^* R}}{P_{\text{ВХ}}^*},$$

в зависимости от параметра:

$$\frac{n^*}{c_{\text{эф}}^*} : A = f\left(\frac{n^*}{c_{\text{эф}}^*}\right)$$

(рисунок 3 для ТНД, рисунок 7 для СТ);

2. КПД турбины η^* в зависимости от параметра:

$$\frac{n^*}{c_{\text{эф}}^*} : \eta^* = f\left(\frac{n^*}{c_{\text{эф}}^*}\right)$$

(рисунок 4 для ТНД, рисунок 8 для СТ);

3. Степени понижения давления в ТНД π_T^* в зависимости от параметра:

$$\frac{n^*}{c_{\text{эф}}^*} : \pi_T^* = f\left(\frac{n^*}{c_{\text{эф}}^*}\right)$$

(рисунок 5 для ТНД, рисунок 9 для СТ);

4. Угла потока в абсолютном движении на выходе из ТНД α_6 в зависимости от параметра:

$$\frac{n^*}{c_{\text{эф}}^*} : \alpha_6 = f\left(\frac{n^*}{c_{\text{эф}}^*}\right)$$

(рисунок 6 для ТНД, рисунок 10 для СТ).

Полученные зависимости были сравнены между собой и с характеристиками турбин, используемыми на ОАО «Кузнецов» в математической модели ГТУ НК-36СТ (для каждой из турбин соответственно).

Из анализа полученных графиков 3 – 10 можно сделать следующие выводы:

1. Модели всех трех уровней ТНД и СТ позволяют оценивать характер изменения основных параметров, несмотря на некоторую погрешность в предсказании абсолютных величин параметров;

2. Созданные модели трех уровней ТНД и СТ отличаются друг от друга, главным образом, предсказанием величины КПД турбин. При этом, значения КПД турбин, получаемые при расчете с использованием моделей второго уровня и третьего отличаются друг от друга незначительно. Следовательно, при исследованиях достаточно использовать модели второго уровня, как обеспечивающие ту же точность, но имеющие меньшее количество элементов расчетной сетки по сравнению с моделями третьего уровня.

Для оценки влияния притрактовых полостей на расчетные характеристики турбин был произведен расчет характеристик турбин с использованием моделей четвертого уровня (модели *ТНД_сетка2_бандаж* и *СТ_сетка2_бандаж*). Как было отмечено выше, данные модели были созданы на основе моделей 2-го уровня и содержали притрактовые полости турбин.

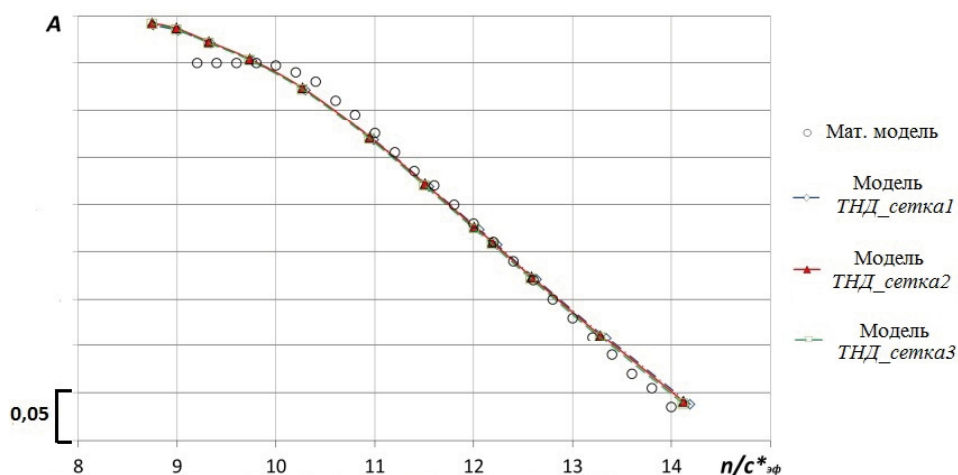


Рис. 3. Зависимость $A = f\left(\frac{n^*}{c_{\text{эф}}^*}\right)$ для ТНД при $n = 5005$ об/мин

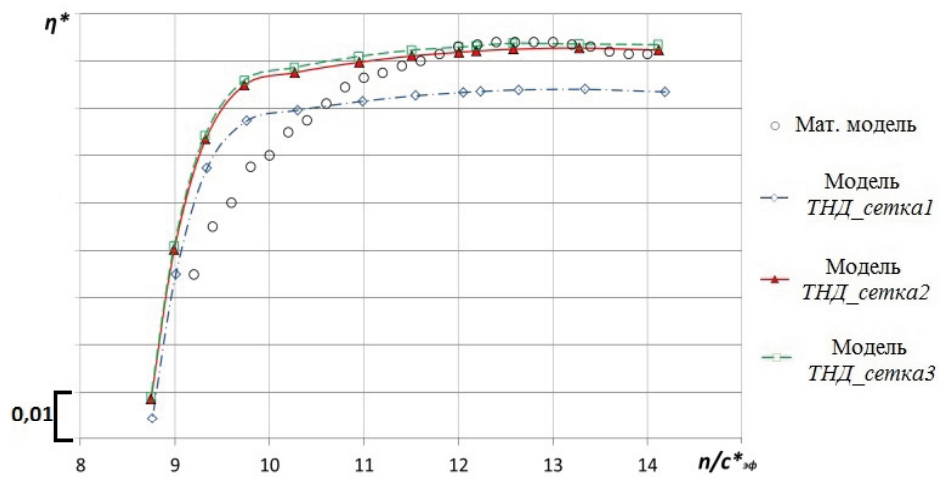


Рис. 4. Зависимость $\eta^* = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$ для ТНД при $n = 5005$ об/мин

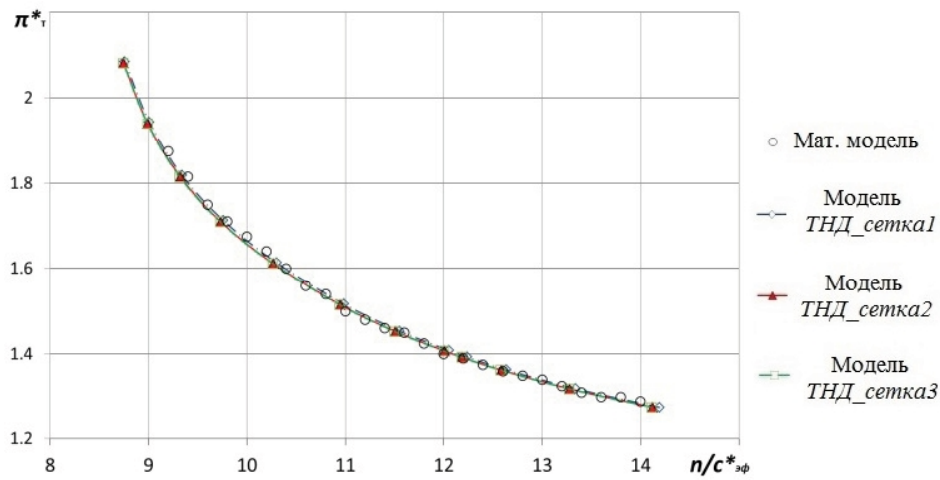


Рис. 5. Зависимость $\pi_T^* = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$ для ТНД при $n = 5005$ об/мин

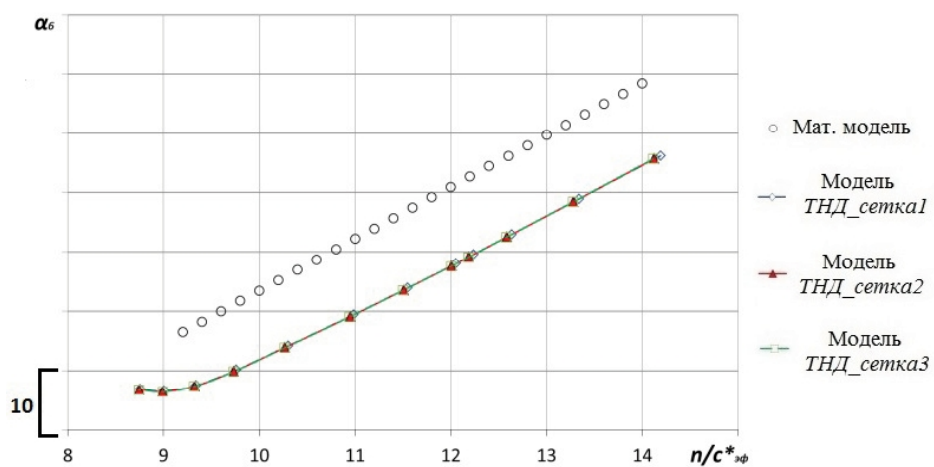


Рис. 6. Зависимость $\alpha_6 = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$ для ТНД при $n = 5005$ об/мин

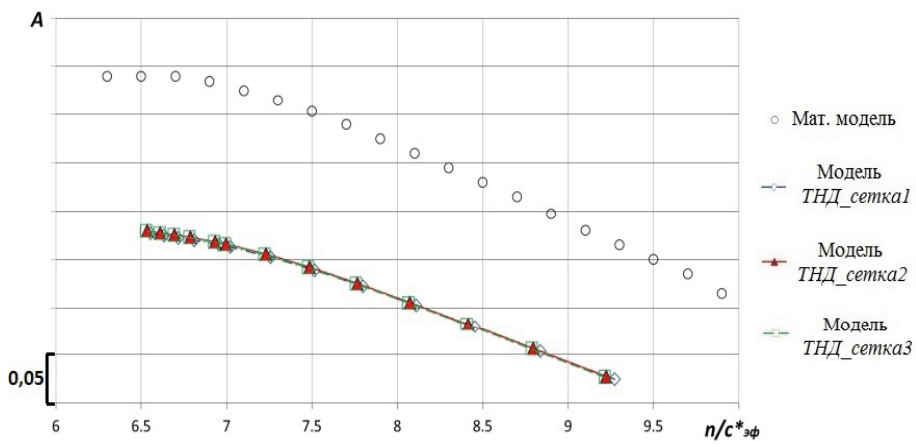


Рис. 7. Зависимость $A = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$ для СТ при $n = 5000$ об/мин

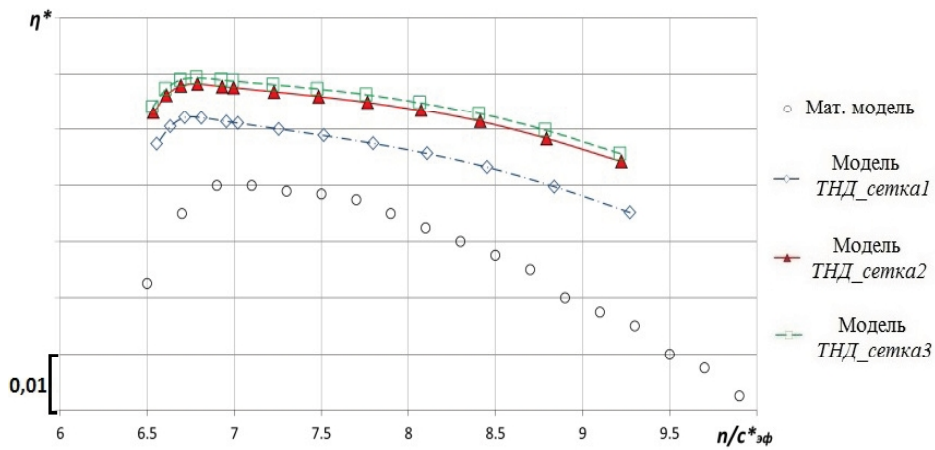


Рис. 8. Зависимость $\eta^* = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$ для СТ при $n = 5000$ об/мин

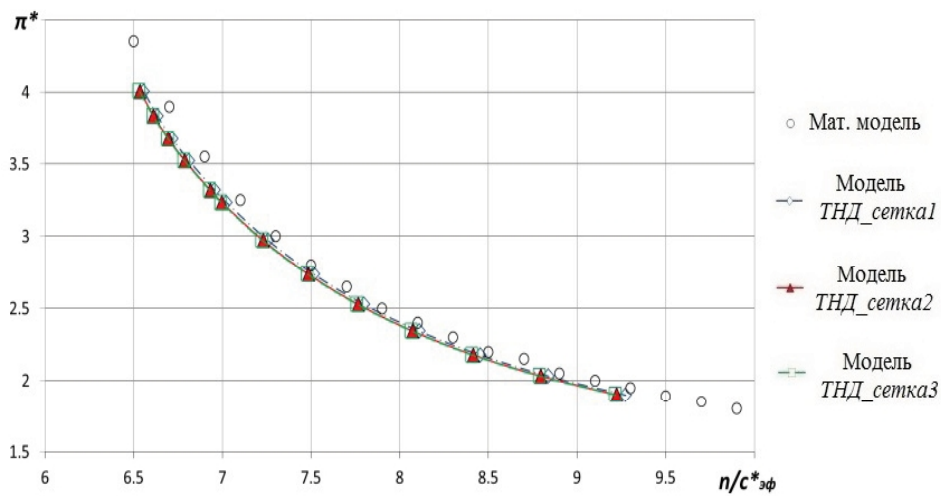


Рис. 9. Зависимость $\pi_T^* = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$ для СТ при $n = 5000$ об/мин

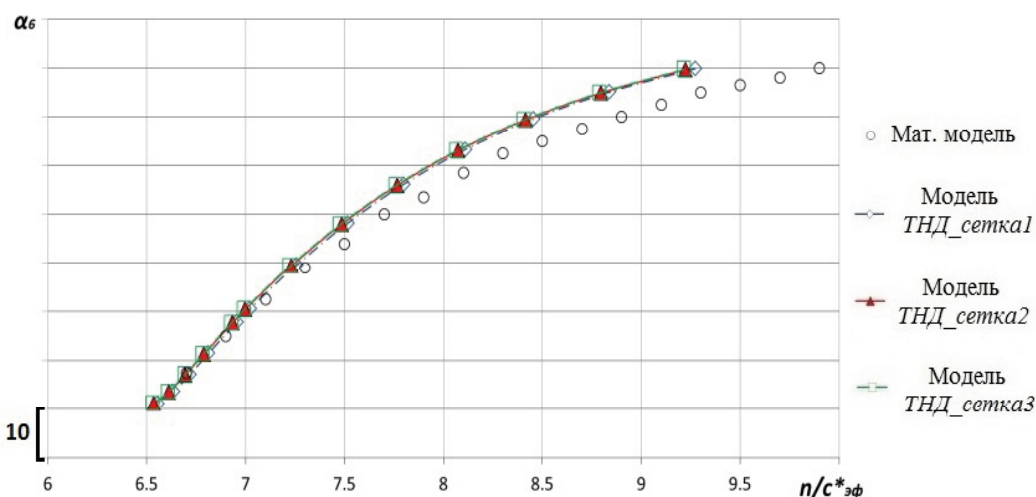


Рис. 10. Зависимость $\alpha_6 = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$ для СТ при $n = 5000$ об/мин

1. По результатам расчетов были построены следующие зависимости:

Пропускной способности турбины A в зависимости от параметра:

$$\frac{n}{c_{эф}^*} : A = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$$

(рисунок 11 для ТНД и 13 для СТ);

2. КПД турбины η^* в зависимости от параметра:

$$\frac{n}{c_{эф}^*} : \eta^* = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$$

(рисунок 12 для ТНД и 14 для СТ);

Полученные зависимости были сравнены с характеристиками турбин, используемыми на ОАО «Кузнецов» в математической модели НК-36СТ, а также с характеристиками турбин, полученными с использованием моделей второго уровня.

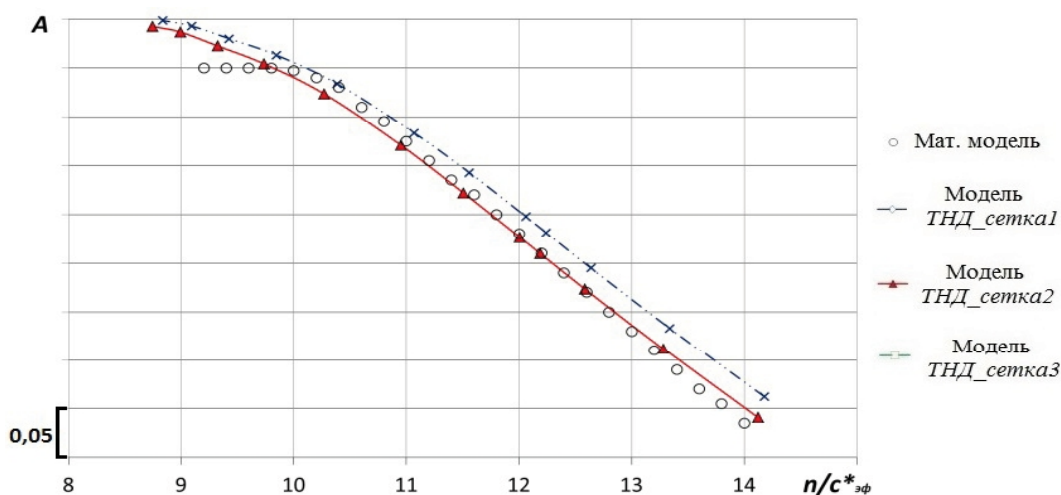


Рис. 11. Зависимость $A = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$ для ТНД при $n = 5005$ об/мин

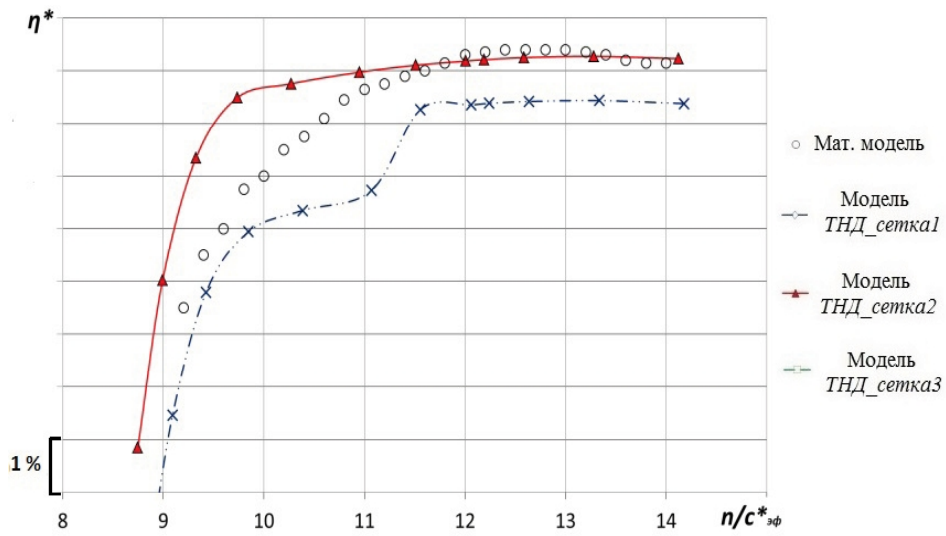


Рис. 12. Зависимость $\eta^* = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$ для ТНД при $n = 5005$ об/мин

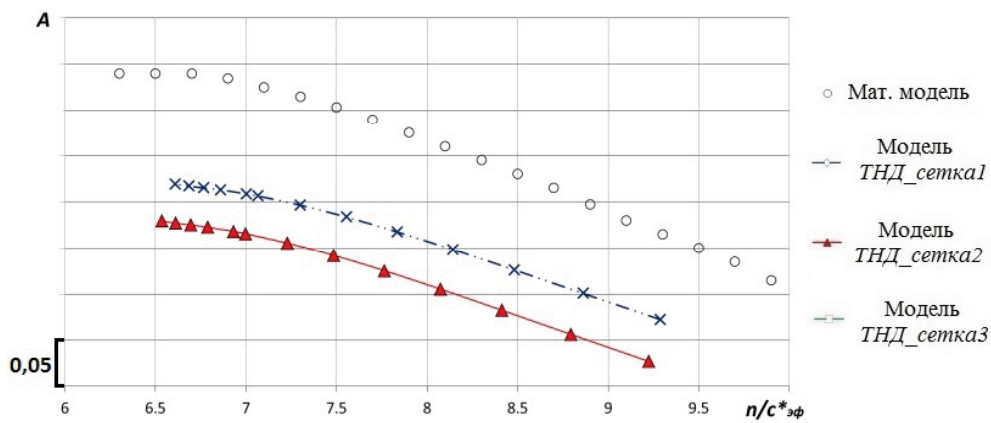


Рис. 13. Зависимость $A = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$ для СТ при $n = 5000$ об/мин

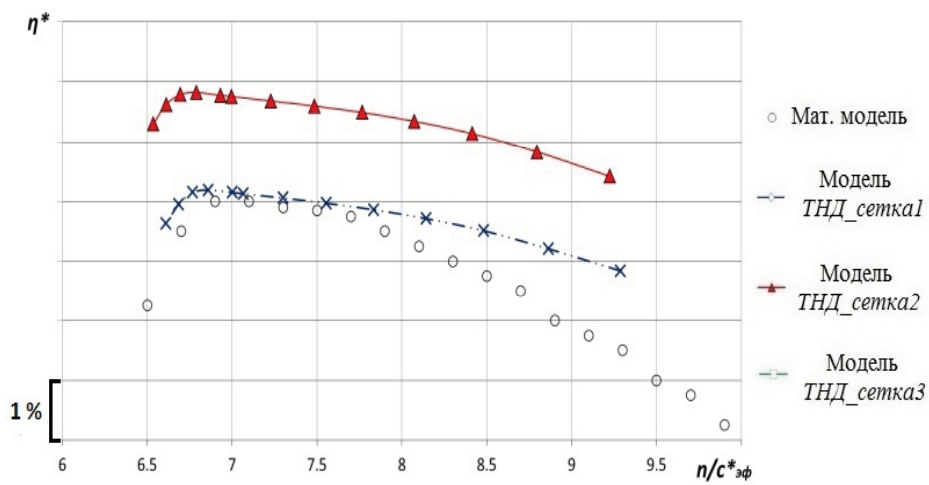


Рис. 14. Зависимость $\eta^* = f\left(\frac{n}{c_{эф}^*}\right)$ для СТ при $n = 5000$ об/мин

Из анализа полученных зависимостей был сделан вывод о том, что при проведении оптимизационных исследований возможно использование моделей второго уровня. Они позволяют предсказывать поведение характеристик турбин с достаточной точностью, хоть и имеют некоторую погрешность в предсказании абсолютных значений параметров. Однако для проверки результатов оптимизации рекомендуется использовать модели, учитывающие притрактовые области. Также, наличие утечек через притрактовые полости снижает КПД турбин на 1-2% и увеличивает их пропускную способность.

В общем, в результате выполнения работы были достигнуты следующие результаты:

Выработаны рекомендации по созданию расчетных сеток для неохлаждаемых турбин ГТД.

Установлено, что учет притрактовых полостей уменьшает расчетный КПД турбин на 1-2%.

Доказана возможность проведения оптимизационных и предварительных расчетов с использованием моделей, не учитывающих притрактовые полости. Поверочный расчет необходимо проводить с использованием моделей, учитывающих притрактовые полости.

Литература

1. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок [Текст]: учеб. для вузов / В.В. Кулагин — М.: Машиностроение, 2003. — 616 с.

Поступила в редакцию 31.05.2014

Е.С.Горячкин, Г.М.Попов, Ю.Д.Смирнова. Ідентифікація математичних моделей турбін газотурбінних двигунів

У ході виконання роботи проведена валідація розрахункових моделей неоохолоджуваних турбін газотурбінної установки. Досліджено вплив розмірності розрахункової сітки на результати моделювання характеристик турбін. Також досліджено вплив обліку притрактових порожнин при моделюванні на розрахункові характеристики турбін. В результаті виконання роботи вироблено рекомендації з побудови розрахункових моделей неоохолоджуваних осьових турбін газотурбінних двигунів, обґрунтовано можливість використання в оптимізаційних розрахунках моделей турбін без притрактових порожнин.

Ключові слова: турбіна низького тиску, газова динаміка, стаціонарна газотурбінна установка.

E.S.Gorachkin, G.M.Popov, Y.D.Smirnova. Mathematical models identification of turbines of gas turbine engines

In the course of the work carried out validation of computational models of uncooled turbine gas turbine installation. The influence of the dimension of the computational grid on the results of the simulation characteristics of turbines. Influence of turbine cavities on the turbines characteristics of has been studied. As a result, performance recommendations on building computational models of uncooled axial turbines turbine motors, justified the use of models in the optimization calculations without turbine cavities.

Key words: low-pressure turbines, fluid dynamics, stationary gas turbine power plant.