

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В УКРЫТИИ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ, ВЕНТИЛИРУЕМОМ ОДНИМ И ДВУМЯ ВЕНТИЛЯТОРАМИ

Введение. Газотурбинные установки (ГТУ) наземного и морского применения часто располагают в шумотеплоизолирующих укрытиях, где организуют их внешнее охлаждение вентиляционным воздухом. Течение воздуха обычно обеспечивается с помощью вентилятора, вращаемого асинхронным электродвигателем. В силу особенностей компоновки охлаждающий воздух не может подаваться строго вдоль оси ГТУ и равномерно обтекать её поверхность. Наличие неработающего резервного вентилятора рядом с работающим основным усугубляет эту проблему. Неравномерное обтекание ГТУ охлаждающим воздухом вызывает изгиб её корпуса, обусловленный разностью температур его поверхностей, что может снизить КПД установки из-за изменения радиальных зазоров между статором и ротором и даже заклинить последний. Поэтому актуальна разработка конструкций укрытий ГТУ и систем их вентиляции, обеспечивающих рациональное потокораспределение, необходимое для эффективного внешнего охлаждения ГТУ на различных режимах её эксплуатации.

Традиционно при проектировании систем вентиляции укрытий и внешнего охлаждения ГТУ использовались простейшие математические модели (ММ) теплового баланса, а при доводке – экспериментальные методы. Это обуславливало большие объёмы испытаний, сроки и стоимость опытно-конструкторских работ. В последнее десятилетие, в связи с развитием методов вычислительной аэродинамики (ВАГД), появилась возможность подробного моделирования физических процессов в формулировке краевых задач. Так, авторами работ [1–4] выполнены численные исследования отдельных аспектов, определяющих тепловое состояние укрытий ГТУ, в трёхмерной постановке. В работе [5] предложен обобщённый подход к математическому моделированию теплового состояния укрытий ГТУ методами ВАГД, в рамках которого могут быть решены ранее не решавшиеся частные задачи, в том числе о потокораспределении при различных способах управления расходом вентиляционного воздуха.

Регулирование расхода воздуха в вентиляционных системах можно осуществлять одним из следующих способов [6]:

- изменением проходного сечения при помощи воздушных клапанов (жалюзи);
- отключением части вентиляторов, если в системе их несколько;
- использованием рабочих колес изменяемого шага;
- изменением частоты вращения вентиляторов.

Первые три способа имеют существенные недостатки. Уменьшение проходного сечения при работающих с полной нагрузкой электродвигателях сопровождается значительными энергетическими потерями. Регулирование включением и выключением вентиляторов сокращает их срок службы за счет пиковых электрических нагрузок на сеть и обмотки двигателя и повышенных механических нагрузок на рабочие колеса при пуске двигателей. Колеса изменяемого шага сложны в изготовлении, дороги и недостаточно надежны.

Самым удобным способом регулирования представляется четвёртый, связанный с изменением частоты вращения рабочего колеса. Реализация данного метода осложняется тем, что частота вращения вала асинхронного электродвигателя достаточно жёстко связана с частотой тока в питающей сети. По данной причине изначально не было устройств, позволяющих регулировать частоту вращения данных двигателей. Ситуация существенно изменилась в конце прошлого века с изобретением инверторов, или преобразователей частоты. Эти устройства, созданные на базе мощных полупроводниковых элементов, позволяют изменять частоту тока на выходе, и, следовательно, частоту вращения вала подключенных к ним асинхронных электродвигателей. Возможность плавного изменения расхода воздуха за счет изменения скорости вращения вентиляторов с асинхронными двигателями обеспечила перспективность внедрения инверторов.

Цель настоящей работы – сформулировать постановку частных задач о потокораспределении в укрытии ГТУ, вентилируемом одним и двумя вентиляторами, путём их численного решения методами ВАГД выяснить характер обтекания ГТУ охлаждающим воздухом, на основе чего разработать предложения, направленные на обеспечение эффективного внешнего охлаждения ГТУ на различных режимах её эксплуатации.

Постановка и решение задач о потокораспределении в укрытии ГТУ. Под потокораспределением в укрытии ГТУ будем понимать распределение скоростей вентиляционного воздуха в пространстве и их изменение во времени. Течение воздуха в укрытии ГТУ обусловлено как перепадом статических давле-

ний, создаваемым вентилятором, так и термогравитационным эффектом плавучести. Последнее обстоятельство потребовало при постановке газодинамической задачи о потокораспределении в укрытии ГТУ привлечения обобщённой ММ его теплового состояния, описанной в [5].

С помощью упрощённого варианта обобщённой ММ решены две задачи о вязком квазистационарном трёхмерном турбулентном течении двух однокомпонентных сред переменной плотности (вентиляционного воздуха и выхлопных газов) в проточных частях укрытия и улитки соответственно, отделённых друг от друга и атмосферы непроницаемыми стенками, с учётом смешанного конвективного теплообмена, лучистого теплообмена и теплопроводности через стенки ГТУ при работе одного вентилятора в стандартных атмосферных условиях и двух вентиляторов при высокой температуре атмосферного воздуха. Введение дополнительного допущения о близости теплофизических свойств воздуха и газов позволило исключить из анализа явление их смешения. Учёт того обстоятельства, что массовая доля трёхатомных газов в выхлопных газах меньше массовой доли двухатомных газов на порядок величины, позволил принять дополнительное допущение о диатермичности не только воздуха, но и выхлопных газов. Для замыкания системы уравнений использована модель турбулентности Лаундера–Сполдинга [7], учитывающая силы плавучести. Исходя из дополнительного допущения об относительной малости толщин стенок, твердотельная теплопроводность в них полагалась одномерной. На входах в проточные части укрытия и улитки задавались направление течения, параметры турбулентности, массовые расходы и температуры, на выходах – статическое давление газов. На стенках задавалось условие «прилипания» с использованием эмпирических пристеночных функций в модели турбулентности. На наружной поверхности корпуса ГТУ задавались кусочно-постоянные распределения температуры. На наружных стенках укрытия задавались температура атмосферы и коэффициенты теплоотдачи. Для стенок задавались их толщины, степень черноты поверхности и коэффициенты теплопроводности. Интегрирование континуальных уравнений выполнялось методом контрольного объёма [8]. Уравнение переноса излучения решалось методом дискретных ординат [9]. Относительный подогрев вентиляционного воздуха определялся как отношение фактического подогрева к максимальному.

Результаты численного моделирования (рис. 1,2) показали, что в обеих задачах течение охлаждающего воздуха внутри укрытия имеет сложную несимметричную пространственную структуру с множеством застойных зон. Из рис. 1 видно, что асимметрия течения и количество застойных зон при работе двух вентиляторов меньше, чем при работе одного вентилятора. Воздух, проходя по укрытию и обтекая ГТУ, нагревается от горячих наружных поверхностей её корпуса и облучаемых им деталей и поднимается вверх вследствие термогравитационной конвекции. Аналогичные процессы происходят вокруг улитки.

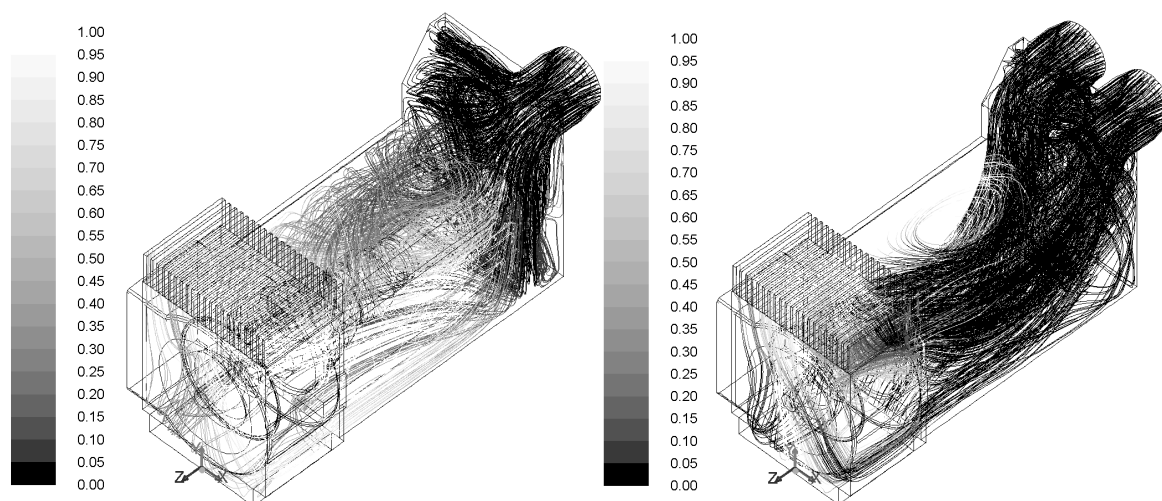


Рисунок 1 – Линии тока вентиляционного воздуха в укрытии ГТУ, окрашенные в соответствии с относительным подогревом воздуха при работе одного (сверху) и двух (снизу) вентиляторов

Из рис. 2 видно, что при работе одного вентилятора скорости воздуха, омывающего ГТУ, имеют максимальные значения в районе корпуса компрессора низкого давления, тогда как при работе двух вентиляторов зона максимальных скоростей смещается по направлению к корпусу компрессора высокого давления. В последнем случае характер обтекания воздухом проставки и корпуса компрессора низкого давления, близок к зеркально симметричному относительно вертикальной плоскости uOz , проходящей через

ось вращения ротора ГТУ. В целом при работе двух вентиляторов скорости охлаждающего воздуха более равномерно распределены по корпусу ГТУ, чем при работе одного вентилятора.

Выводы. Численное решение двух задач о потокораспределении в укрытии ГТУ, вентилируемом одним и двумя вентиляторами, с использованием упрощенного варианта обобщенной ММ его теплового состояния позволило выяснить условия внешнего охлаждения ГТУ. При работе двух вентиляторов охлаждающий воздух более равномерно обтекает поверхность корпуса ГТУ, чем при работе одного вентилятора. Это снижает риск термических деформаций корпуса ГТУ. Поэтому для обеспечения эффективного внешнего охлаждения ГТУ целесообразно всегда держать два вентилятора постоянно включенными, регулируя инвертором частоту их вращения на различных режимах эксплуатации.

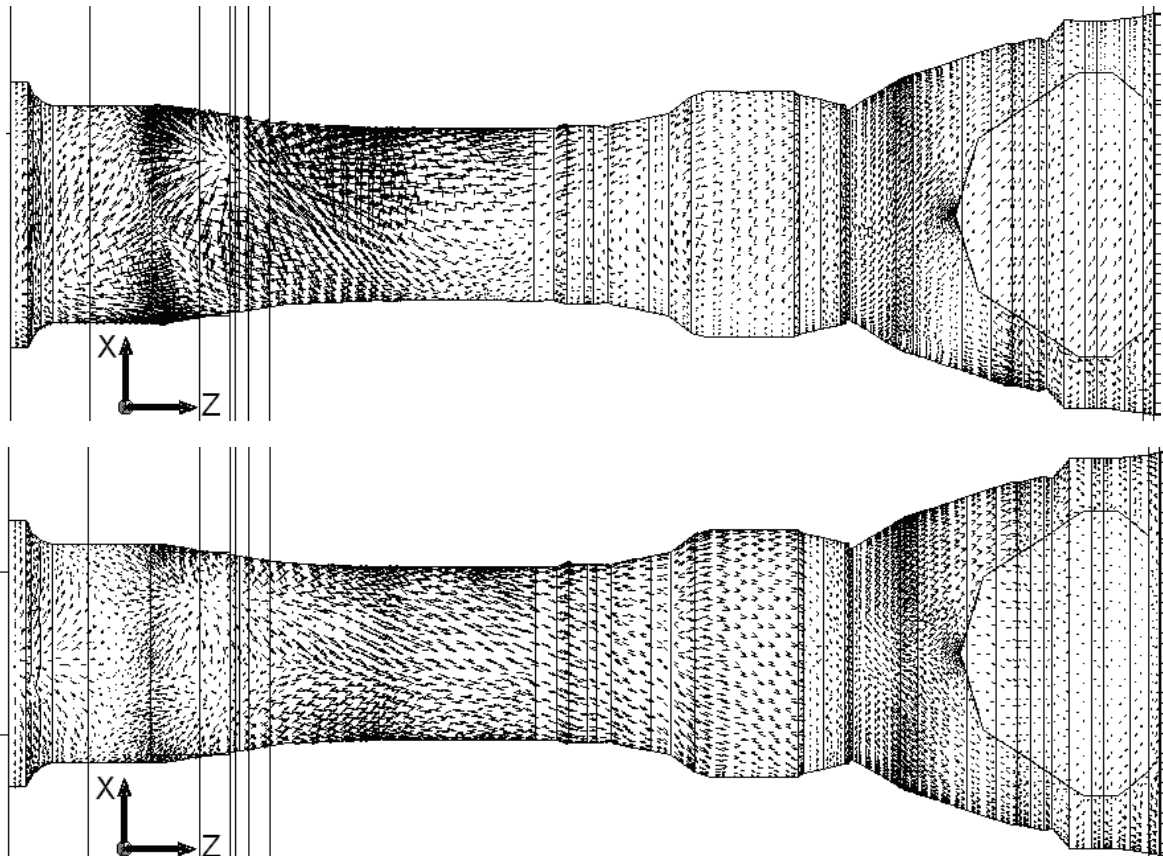


Рисунок 2 – Векторы скорости вентиляционного воздуха, омывающего корпус ГТУ, при работе одного (сверху) и двух (снизу) вентиляторов (вид сверху)

Направления дальнейших исследований автор видит в численном моделировании воздушного и теплового режимов укрытий ГТУ при различных способах управления расходом и потокораспределением вентиляционного воздуха.

Литература

1. Клочков А.В. Обеспечение взрывозащиты газотурбинного оборудования [Текст] / А.В. Клочков, Е.С. Корнилова, А.А. Снитко // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 8. – С. 20–22.
2. Results and Experience from Ge Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation [Text] / M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanobini, P. Pecchi // ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005. GT2005-68053. – 9 pp.
3. Месропян А.В. Численное моделирование газодинамики и тепломассопереноса в системе охлаждения бокса ГТД [Текст] / А.В. Месропян, И.И. Мухамедзянова // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14, № 1. – С. 25–31.
4. Трусов П.В. Численное моделирование теплового состояния шумотеплозащитного кожуха газотурбинной установки [Текст] / П.В. Трусов, Д.А. Чарнцев // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. – 2010. – № 4 (78). – С. 117–126.

5. Костюк В.Е. Обобщённая математическая модель теплового состояния укрытий газотурбинных установок [Текст] / В.Е. Костюк, Е.И. Кириллш, А.Л. Кравчук // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2013. – № 1. – С. 22–26.
6. Авраменко Р.Л. Внедрение частотно-регулируемого привода для вентиляционного и теплообменного оборудования газокomppressorных станций / Р.Л. Авраменко, Р.В. Белянкин, Е.В. Устинов [Текст] // МегаПаскаль. – 2010. – № 5. – С. 28–33.
7. Launder, B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [Text] / B.E. Launder, D.B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.
8. Лоханский Я.К. Основы вычислительной гидромеханики и тепломассообмена [Текст] / Я.К. Лоханский. – М.: МГИУ, 2008. – 80 с.
9. Суржиков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы [Текст] / С.Т. Суржиков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 544 с.

Bibliography (transliterated)

1. Klochkov A.V. Obespechenie vzryvozashhity gazoturbinnogo oborudovaniya [Tekst] A.V. Klochkov, E.S. Kornilova, A.A. Snitko Gazoturbinye tehnologii. – 2005. – # 8. – p. 20–22.
2. Results and Experience from Ge Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation [Text] M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanobini, P. Pecchi ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. GT2005-68053. – 9 pp.
3. Mesropjan A.V. Chislennoe modelirovanie gazodinamiki i teplomassoperenosa v sisteme ohlazhdenija boksa GTD [Tekst] A.V. Mesropjan, I.I. Muhamedzjanova Vestnik UGATU. – 2010. – T. 14, # 1. – p. 25–31.
4. Trusov P.V. Chislennoe modelirovanie teplovogo sostojaniya shumoteplozashhitnogo kozhuha gazoturbinoj ustanovki [Tekst] P.V. Trusov, D.A. Charncev Vestnik SamGU – Estestvennonauchnaja serija. – 2010. – # 4 (78). – p. 117–126.
5. Kostjuk V.E. Obobshhjonnaja matematicheskaja model' teplovogo sostojaniya ukrytij gazoturbinyh ustanovok [Tekst] V.E. Kostjuk, E.I. Kirilash, A.L. Kravchuk Integrirovannye tehnologii i jenergosbe-rezhenie. – 2013. – # 1. – p. 22–26.
6. Avramenko R.L. Vnedrenie chastotno-reguliruемого привода dlja ventiljacionnogo i teploobmen-nogo oborudovaniya gazokompessornyh stancij R.L. Avramenko, R.V. Beljankin, E.V. Ustinov [Tekst] MegaPaskal'. – 2010. – # 5. – p. 28–33.
7. Launder, B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [Text] B.E. Launder, D.B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.
8. Lohanskij Ja.K. Osnovy vychislitel'noj gidromehaniки i teplomassоobmena [Tekst] Ja.K. Lohanskij. – М.: МГИУ, 2008. – 80 p.
9. Surzhikov S.T. Teplovoe izluchenie gazov i plazmy [Tekst] S.T. Surzhikov. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 544 p.

УДК [517:536]:621.452

Кириллш О.І.

**ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОКОРОЗПОДІЛУ В УКРИТТІ ГАЗОТУРБІННОЇ
УСТАНОВКИ, ЩО ВЕНТИЛЮЄТЬСЯ ОДНИМ І ДВОМА ВЕНТИЛЯТОРАМИ**

Сформульовано постановку задач про потокорозподіл в укритті ГТУ, що вентилюється одним і двома вентиляторами. Числове розв'язання двох задач з використанням варіанту узагальненої математичної моделі теплового стану укриття дозволило виявити умови зовнішнього охолодження ГТУ та надати відповідні пропозиції.

Kirilash Ye.I.

**NUMERICAL INVESTIGATION OF FLUX-DISTRIBUTION IN GAS-TURBINE ENCLOSURE
VENTILATED BY ONE AND TWO FANS**

Statement of the problem of flux-distribution in gas-turbine enclosure ventilated by one and two fans is defined. Numerical solution of the two problems using version of the enclosure heat state generic mathematical model made possible to find out the conditions of gas-turbine external cooling and to give appropriate propositions.