

Численное исследование вибрационных процессов в крупногабаритном стеклопластиковом вентиляторе*

А.Ф. Шмаков, В.Я. Модорский

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

В данной работе представлены результаты численного моделирования процессов деформирования и анализа собственных частот конструкции крупногабаритного стеклопластикового вентилятора градирни. Получены компонент напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом импортированных газодинамических и тепловых нагрузок и формы собственных колебаний. Проведен анализ собственных частоты, по результатам которых были предложены конструктивные решения для уменьшения вероятности возникновения разрушения от действия аэроупругих сил.

Ключевые слова: метод конечных элементов, газовая динамика, ANSYS, ANSYS CFX, градирня, системы охлаждения.

1. Введение

В России градирен насчитывается около 3500 штук. Поиск возможностей значительного (более чем в 2 раза) снижения энергопотребления электроприводов вентиляторов градирен может вестись в направлении оптимального аэродинамического профилирования рабочих лопастей и применения современных материалов. В данной работе представлены результаты численного моделирования лопастей вентиляторов для градирен большого диаметра с точки зрения колебательных процессов.

На сегодняшний день одним из инструментов проектирования современных конструкций является вычислительный эксперимент. Мировой уровень численных исследований в этой области позволяет моделировать колебательные процессы в сложных, крупногабаритных конструкциях с достаточной точностью. Существующие методики проектирования вентиляторов градирен не предусматривают оценки колебательных процессов. Вместе с тем, в настоящее время нет методик, позволяющих моделировать вибрации в крупногабаритных вентиляторах градирен с учетом газодинамических нагрузок [1]. В работе реализованы этапы моделирования напряженно-деформированного состояния крупногабаритной конструкции с учетом газодинамических нагрузок и проводится анализ вынужденных и собственных частот. Однако учет вышеупомянутых факторов является необходимым условием корректного описания колебаний элементов конструкции. Учет газодинамических и деформационных процессов даже в квазистационарной постановке позволит значительно уточнить существующие методики и прогнозировать вибрации в крупногабаритном стеклопластиковом вентиляторе, а значит своевременно, на этапе проектирования, принимать меры для их предупреждения. Кроме того, станет возможным применения вместо традиционных материалов для изготовления лопастей вентилятора перспективных композиционных материалов на основе стеклопластика. Применение стеклопластикового материала позволит создавать аэродинамически эффективные лопасти, уменьшить массу конструкции и энергопотребление приводного двигателя и тем самым повысить на 10-20 % и более КПД градирни.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00877)

2. Описание проблемы

Возникновение вибраций в вентиляторах градирен на сегодняшний день не поддается прогнозированию. При определенных значениях вибраций в действующих градирнях увеличивается вероятность возникновения разрушения вентилятора и, соответственно, останов производственной линии. Это может привести к значительным убыткам предприятия [2].

Для решения задач вибрации и колебаний лопастей существует несколько методов. Первый заключается в определении собственных частот и анализ отклика конструкции на гармоническую нагрузку [3]. В результате можно получить частоты и моды собственных колебаний. Данная информация позволит определить рабочий частотный диапазон конструкции. Частотный метод использует данные стационарного расчета напряженно-деформированного состояния конструкции. Данный подход не учитывает возможность изменения газодинамической нагрузки и поэтому имеет недостаточно высокую точность.

Второй метод оценки параметров колебаний конструкции заключается в решении аэроупругой задачи [4,5]. В этом случае решаются совместно задачи газодинамического расчета и оценки напряженно-деформированного состояния конструкции. Данный подход позволяет получить картину максимально приближенную к реальности и учитывает изменяющиеся нагрузки.

Решение междисциплинарных задач сопряженно со значительными вычислительными сложностями и для упрощения методики расчета крупногабаритных вентиляторов градирен целесообразно использовать первый частотный метод, который и представлен в данной статье.

3. Физическая модель

Для проведения исследований была разработана физическая модель, описывающая колебательные процессы в крупногабаритном стеклопластиковом вентиляторе [1,2,8]:

- материал лопастей вентилятора принят ортотропным;
- поле газодинамических нагрузок экспортируется в расчет напряженно-деформированного состояния конструкции и учитывается при расчете собственных частот;
- колебательные процессы в конструкции рассматриваются в трехмерной постановке;
- рассматриваются первые три моды собственных колебаний, т.к. возникновение резонанса на них наиболее опасно для конструкции.

4. Математическая модель

Определение собственных частот колебаний конструкции крупногабаритного вентилятора, осуществлялось с помощью математической модели, базирующейся на использовании дифференциальных уравнений Лагранжа II-го рода [6]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} \quad (1)$$

где: T - кинетическая энергия системы, Π - потенциальная энергия системы, i - обобщенная координата, x_i - перемещение i -го элемента ($i = 1, 2, 3$), Φ - диссипативная функция, t - время.

Кинетическая энергия системы:

$$T = \sum_{i=1}^3 T_i \quad (2)$$

Потенциальная энергия системы:

$$\Pi = \sum_{i=1}^3 \Pi_i \quad (3)$$

Диссипативная функция пропорциональна скорости перемещения центра масс системы:

$$\Phi = \sum_{i=1}^3 \Phi_i \quad (4)$$

$$\Phi_i = \frac{1}{2} \beta_i \dot{x}_i \quad (5)$$

где β_i - коэффициент затухания.

5. Алгоритм численного моделирования

Для проведения численных расчетов в программном пакете инженерных исследований ANSYS Workbench на основе проведенных газодинамических расчетов [2] была создана геометрическая и расчетная модели для прочностного и модального анализа (рис. 1). Расчетная модель состоит из четырех основных элементов: ступицы вентилятора, трубчатого лонжерона, нервюры и обшивки лопасти. В силу имеющийся симметрии в расчетах достаточно рассматривать лишь одну лопасть.

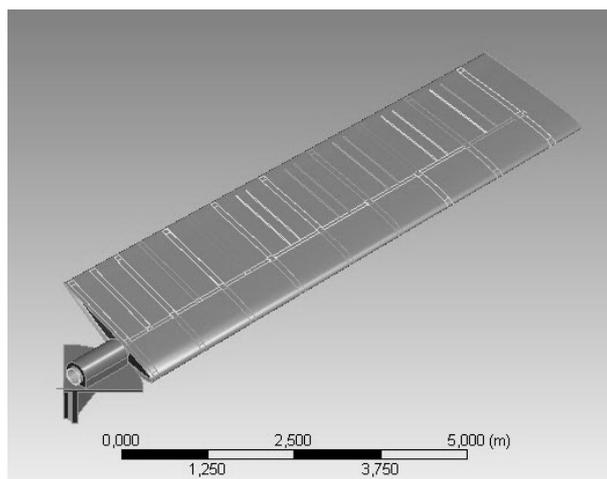


Рис. 1: Расчетная геометрия лопасти крупногабаритного вентилятора.

Для проведения частотного анализа было спроектировано два варианта расчетных конструкции лопасти крупногабаритного вентилятора. Конструкция первого варианта (Конструкция 1) состоит из трубчатого лонжерона, нервюры и обшивки. Материал всех элементов лопасти стеклопластик. Данная конструкция имеет низкую массу и высокую удельную жесткость. Но в данной конструкции наблюдаются высокие прогибы на краю лопасти, что негативно может сказаться на работоспособности лопасти и клеевых соединений.

Второй вариант (Конструкция 2) представляет собой усиленную конструкцию. В трубчатый лонжерон установлена стальная труба для увеличения жесткости. Для уменьшения прогиба центр лопасти подкреплена тросом.

На основе расчетной модели построена конечно-элементная сетка (рис. 2). Время построения модели на высокопроизводительном вычислительном комплексе ПНИПУ [7] после отладки расчетной геометрии составляло от 20 до 60 минут в зависимости от количества ячеек. Сетка состояла из 216169 расчетных ячеек. Для построения сеточной модели использовался встроенный в Ansys Workbench инструмент Meshing.

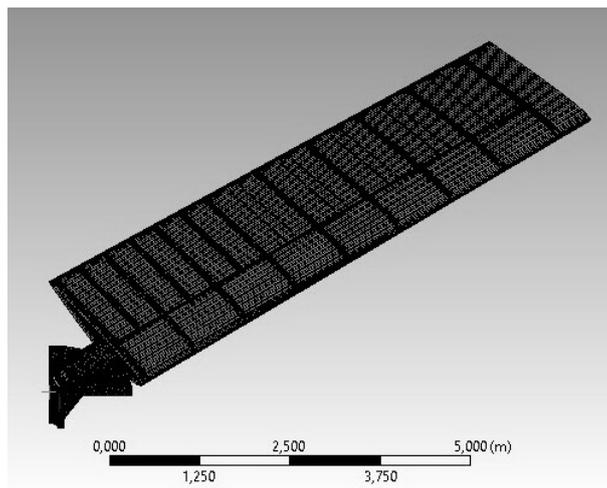


Рис. 2: Конечно-элементная модель лопасти крупногабаритного вентилятора.

Для определения собственных частот (модальный анализ) конструкции лопасти вентилятора учитывалось действия аэродинамических, гравитационных и инерционных нагрузок (рис. 3). В качестве граничных условий задавалось ограничение перемещений в месте установки ступицы на вал двигателя (редуктора) и наложение условия симметрии на границы разреза.

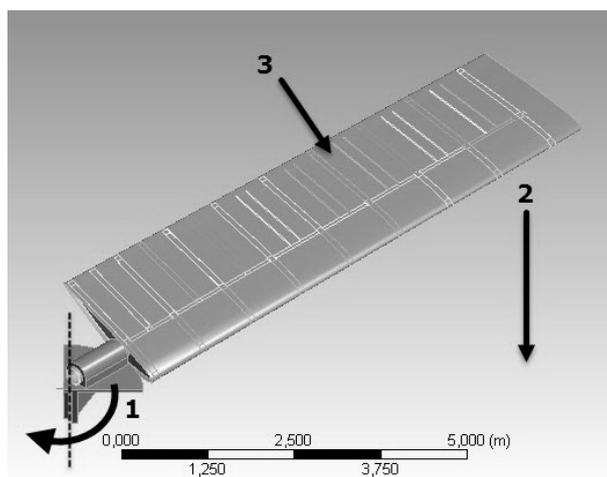


Рис. 3: Нагрузки для оценки напряженно-деформированного и модального преднапряженного анализа: 1 – направления вращения вентилятора градирни; 2 – направление действия гравитации Земли; 3 – поверхность приложения аэродинамической нагрузки.

6. Результаты численного моделирования

На рис. 4 показаны первые моды колебания конструкции лопасти крупногабаритного вентилятора. На частоте 1.99 Гц наблюдаются собственные колебания в плоскости вращения вентилятора. Данная частота максимальна близка к рабочей частоте вращения вентилятора, что может привести к возникновению резонанса и разрушению лопасти. На второй моде при частоте 3.23 Гц наблюдаются собственные колебания в вертикальной плоскости. В данной плоскости возможно возникновение колебаний, вызванных аэродинамическими и гравитационной силами. Возможно возникновение так называемого флаттера - самозбуждающиеся незатухающие автоколебания.

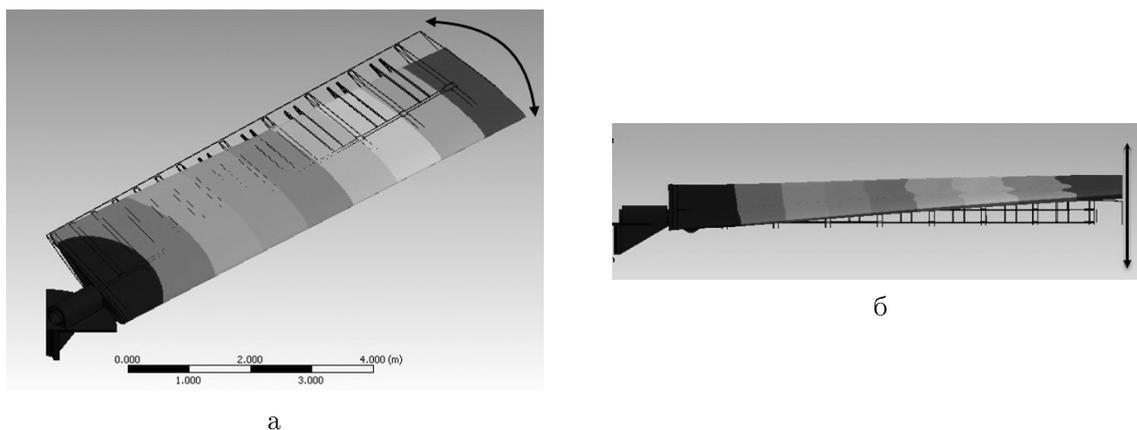


Рис. 4: Моды собственных колебаний конструкции лопасти крупногабаритного вентилятора градирни на частоте 1.99 Гц (а) и 3.23 Гц (б).

Для более точного анализа работы крупногабаритного вентилятора градирни построены резонансные диаграммы для первых двух-трех мод собственных колебания в рабочем диапазоне вращения (рис. 5). На этих модах распределения энергии максимально и при возникновении резонанса возможно разрушение лопасти. Как видно по диаграмме, наблюдаются пересечения линии первой собственной частоты со второй и выше гармоникой. Точки пересечения находятся в рабочем диапазоне, что является критическим для работоспособности вентилятора градирни.

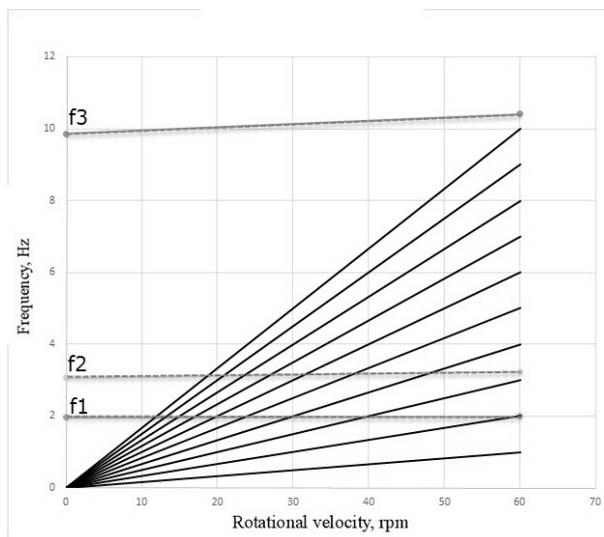


Рис. 5: Резонансная диаграмма лопасти крупногабаритного вентилятора градирни Конструкции 1.

Для увеличения собственной частоты был проведен частотный анализа для лопасти Конструкции 2 и построена резонансная диаграмма (рис. 6). Как видно по диаграмме, наблюдаются пересечения линии первой собственной частоты со девятой и выше гармоникой. Данные гармоники являются не опасными для работоспособности вентилятора.

В соответствии с проведенными расчетами была изготовлена лопасть конструкции 2. Для изготовления поверхности лопасти на гравировально-фрезерном станке «Центра инновационных технологий машиностроения» ПНИПУ по расчетным данным была подготовлена мастер-модель участка лопасти. После создания мастер-модели была изготовлена форма для выкладки оболочки участка лопасти. Силовая конструкция лопасти состоит из несущей

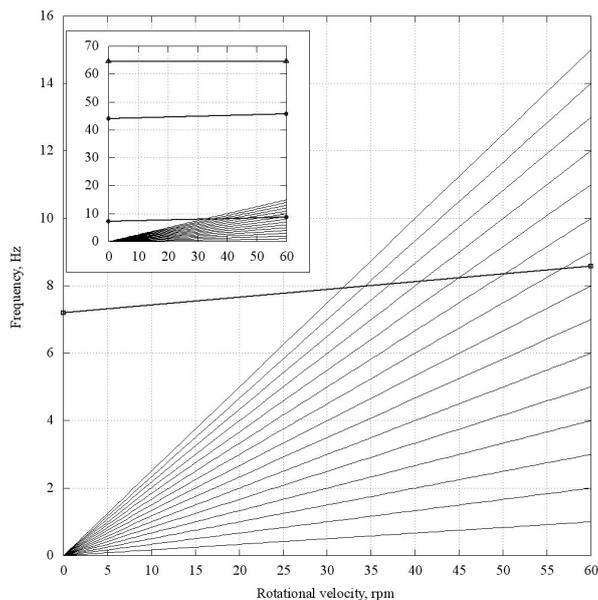


Рис. 6: Резонансная диаграмма лопасти крупногабаритного вентилятора градирни Конструкции 2.

го трубчатого лонжерона и установленных на ней нервюр. На конечном этапе производится сборка обшивки лопасти и силовой конструкции. Изготовленная лопасть представлена на рис. 7. После изготовления лопастей и соединения их со ступицей производится установка вентилятора непосредственно на градирню. В ходе пробной эксплуатации опытного образца вентилятора достигнуты следующие характеристики: потребляемая мощность составила менее 200 кВт, вместо проектной 450 кВт; температурный перепад оборотной воды на градирне увеличился с 4 °С при использовании аналога-предшественника до 8 °С, на опытном образце.



а



б

Рис. 7: Сборка (а) и установка (б) крупногабаритного вентилятора в градирню.

7. Выводы

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Для исключения резонансных эффектов при проектировании конструкции крупногабаритного вентилятора градирни необходимо рассчитывать резонансные диаграммы и обеспечивать отсутствие собственных колебаний в рабочем диапазоне частот.
2. Разработана методика численных экспериментов, позволяющая учитывать газодинамические и гравитационные нагрузки при расчете вибрации элементов конструкции крупногабаритного вентилятора.
3. На базе разработанной методики в результате численного моделирования была спроектирована конструкция лопасти крупногабаритного вентилятора градирни, которая обеспечивает необходимые прочностные, расходные и энергетические характеристики.

Литература

1. Модорский В.Я., Шмаков А.Ф., Бутымова Л.Н., Гайнутдинова Д.Ф., Мехоношина Е.В., Калюлин С.Л. Параллельный расчет газодинамического процесса в крупногабаритном нагнетателе. В сборнике: Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров Труды Международной суперкомпьютерной конференции. Российская академия наук Суперкомпьютерный консорциум университетов России. Москва, 2014. С. 258-262.
 2. Shmakov A.F., Modorskii V.Ya. Energy Conservation in Cooling Systems at Metallurgical Plants. Metallurgist Volume 59, Issue 9, pp 882-886. January. 2016 (Russian Original Nos. 9-10. Sept.-Oct.. 2015)
 3. Modorskiy V.Y., Shmakov A.F. Numerical Modeling of Gasdynamic Processes and Processes of Deformation in Compressor of Model Test Bench of the Gas-Distributing Unit. Applied Mechanics and Materials, Vols. 799-800, pp. 865-869, Oct. 2015
 4. Mekhonoshina E.V., Modorskiy V.Ya. On a phase-shift of waves at the medium interface. [In Russian]. Computer Optics, vol. 39, no. 3, pp. 385-391. 2015.
 5. Mekhonoshina E.V., Modorskii V.Ya., Petrov V.Yu. Numeric simulation of the interaction between subsonic. Proceedings of International Conference Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2015), Samara, Russia, June 29 - July 1, 2015. . Volume 1490, pp 211-218. Nov. 2015
 6. A. Klepikovskiy, Y. Timofeev, A. Shaiko-Shaikovsky, The refined mathematical models of estimation natural frequency systems with several degrees of freedom, Nika (2011) (URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/utochnyonnaya-matematicheskaya-model-otsenki-sobstvennyh-chastot-kolebaniy-sistem-s-neskolkimi-stepenyami-svobody>)
 7. Решение инженерных задач на высокопроизводительном вычислительном комплексе ПНИПУ моногр./ под ред. В.Я. Модорского. –Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. - 314 с.
 8. Модорский В.Я., Соколкин Ю.В. Газоупругие процессы в энергетических установках. / Под ред. Ю.В. Соколкина. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 176 с.
-

Numerical study vibration processes in large-sized fiberglass fan

A.F. Shmakov, V.Ya. Modorskii

Federal State-Funded Budgetary Educational Institution of Higher Education
Perm National Research Polytechnic University

This paper presents the results of numerical modeling of deformation processes and the analysis of the fundamental frequencies of the construction of large-size fiberglass cooling tower fan. Obtain the components of the stress-strain state structure based on imported gas dynamic and thermal loads and the form of fundamental vibrations. The analysis of fundamental frequencies, the results of which have been proposed constructive solutions to reduce the probability of failure of the action of aeroelastic forces.

Keywords: finite element method, gasdynamic, ANSYS, ANSYS CFX, cooling tower, cooling system.

References

1. Modorskii V.Ya., Shmakov A.F., Butymova L.N., Gaynutdinova D.F., Mekhonoshina E.V., Kalyulin S.L. Parallel'nyy raschet gazodinamicheskogo protsessa v krupnogabaritnom nagnetatele [Parallel calculation of dynamic processes in large-sized blower]. V sbornike: Nauchnyy servis v seti Internet: mnogoobrazie superkomp'yuternykh mirov Trudy Mezhdunarodnoy superkomp'yuternoy konferentsii. Rossiyskaya akademiya nauk Superkomp'yuternyy konsortsium universitetov Rossii [In: Scientific service on the Internet: the variety of supercomputing worlds Proceedings of the International Supercomputer Conference. Russian Academy of Sciences Supercomputing Consortium of Russian Universities]. Moscow, 2014. pp. 258-262
2. Shmakov A.F., Modorskii V.Ya. Energy Conservation in Cooling Systems at Metallurgical Plants. Metallurgist Volume 59, Issue 9, pp 882-886. January. 2016 (Russian Original Nos. 9-10. Sept.-Oct.. 2015)
3. Modorskii V.Y., Shmakov A.F. Numerical Modeling of Gasdynamic Processes and Processes of Deformation in Compressor of Model Test Bench of the Gas-Distributing Unit. Applied Mechanics and Materials, Vols. 799-800, pp. 865-869, Oct. 2015
4. Mekhonoshina E.V., Modorskii V.Ya. On a phase-shift of waves at the medium interface. [In Russian]. Computer Optics, vol. 39, no. 3, pp. 385-391. 2015.
5. Mekhonoshina E.V., Modorskii V.Ya., Petrov V.Yu. Numeric simulation of the interaction between subsonic. Proceedings of International Conference Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2015), Samara, Russia, June 29 - July 1, 2015. . Volume 1490, pp 211-218. Nov. 2015
6. A. Klepikovskiy, Y. Timofeev, A. Shaiko-Shaikovsky, The refined mathematical models of estimation natural frequency systems with several degrees of freedom, Nika (2011) (URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/utochnyonnaya-matematicheskaya-model-otsenki-sobstvennyh-chastot-kolebaniy-sistem-s-neskolkimi-stepenyami-svobody>)
7. Reshenie inzhenernykh zadach na vysokoproizvoditel'nom vychislitel'nom komplekse PNIPU [The Solution of Engineering Problems on a High-Capacity Computer Complex at

the PNIPU]. / Ed. V.Ya. Modorskii.- Publishing of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, 2014.- 314 p.

8. Modorskiy V.Ya., Sokolkin Yu.V. Gazouprugie protsessy v energeticheskikh ustanovkakh [Elastic Gas Processes in Power Plants]. / Ed. Yu Sokolkin. FIZMATLIT, Moscow (2007) - 176 p.