

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗМУЩАЮЩИХ НАГРУЗОК ПРИ ОЦЕНКЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН

Описываются существующие модели нагружения лопаток турбомашин. Предлагается новая модель нагружения. Сравняются модели нагружения с экспериментальными данными. Показана необходимость учета дополнительных факторов при моделировании нагрузок. Предложен вариант доработки схемы программы для оценки усталостной прочности лопаток турбомашин.

Ключевые слова: возмущающая динамическая нагрузка, модель нагружения, лопатка, турбомашин.

R.N. Gorbunov
O.V. Repetskiy

IMPROVING THE ACCURACY OF SIMULATING DYNAMIC PRESSURES WHEN EVALUATING FATIGUE LIMIT OF ROTOR BLADES OF TURBO-MACHINERY

The article describes current mathematical models of loading rotor blades of turbo-machinery. The authors propose a new pressure model, compare the pressure models with the experiment data, and prove the necessity of taking into account extra factors when modeling the loads. They also propose a way of improving the algorithm of the program for estimating fatigue limit of rotor blades of turbo-machinery.

Keywords: dynamic pressures, pressure model, rotor blade, turbo-machinery.

В процессе эксплуатации рабочие лопатки турбомашин подвергаются воздействию разного рода динамических нагрузок. Динамические нагрузки весьма опасны, поскольку даже незначительные изменяющиеся нагрузки, воздействующие в течение длительного периода, приводят к усталости материала. Также при совпадении частоты возмущающей нагрузки с одной из собственных частот колебания лопатки возникает явление резонанса, приводящее к многократному увеличению нагрузки, что может негативно сказаться на прочностных характеристиках рабочего колеса. Как уже отмечалось в [1], исследование таких процессов является актуальной проблемой.

Рассмотрим существующие виды динамических нагрузок. Основной нагрузкой, воздействующей на лопатки, является сопловая нагрузка, возбуждаемая силой газового потока. Для описания этой нагрузки можно использовать несколько подходов.

Первый подход предполагает мгновенное нагружение и разгрузку лопатки (рис. 1а), при этом возмущающая сила пропорциональна:

$$f_l \sim \frac{2P_z}{\pi} \cdot \frac{\sin \nu \mu \pi}{\nu},$$

где P_z — периодическая нагрузка; ν — номер гармоники возбуждения; μ — ширина сопла.

Этот подход является недостаточно реалистичным, поскольку лопатка попадает под действие сопловой нагрузки постепенно, а, значит, и нагрузка не будет мгновенной.

Согласно [2] более реалистичным будет являться подход, при котором нагружение-разгрузка происходит по линейной зависимости (рис. 1б). При этом возмущающая сила пропорциональна:

$$f_l \sim \frac{2P_z}{\pi} \cdot \sin(v\mu\pi) \cdot \frac{\sin\left(\pi \frac{v}{z}\right)}{\pi \frac{v}{z}},$$

где z — количество сопел.

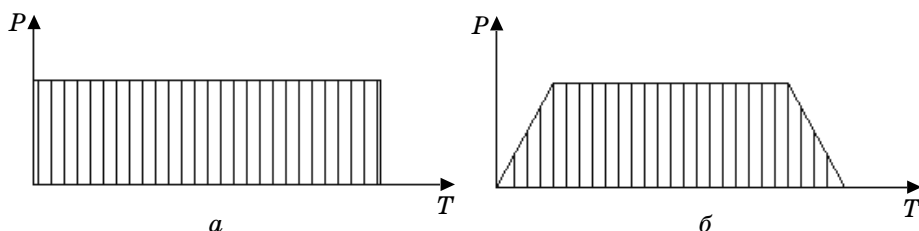


Рис. 1. Нагружение и разгрузка лопатки сопловой нагрузкой: мгновенное (а) и линейное (б)

Если рассматривать лопатки в виде стержня переменного поперечного сечения, закон нагружения-разгрузки может быть доработан, поскольку начальная и завершающая фазы (1 и 3 на рис. 2) нагружения и разгрузки происходят с меньшей скоростью.

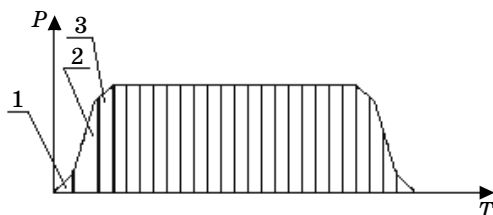


Рис. 2. Нагружение и разгрузка с учетом переменного поперечного сечения

Такой график сочетает в себе 4 участка линейной зависимости. Говоря про нагружение лопатки, следует помнить, что вся лопатка нагружена сопловой нагрузкой только на четвертом участке. На первом, втором и третьем участках часть лопатки скрыта за лопастью статора и не подвергается воздействию сопловой нагрузки, что приводит к возникновению маятниковых колебаний лопатки. Для большей реалистичности первые три участка линейной нагрузки могут быть заменены сплайн-линией, варьирующей свои характеристики в зависимости от конфигурации лопатки.

Фактически же лопатка обладает сложной геометрией и представляет собой пластину с переменным поперечным сечением, закрученную под определенным углом, что говорит о том, что в реальности нагружение и разгрузка происходит нелинейно (рис. 3).

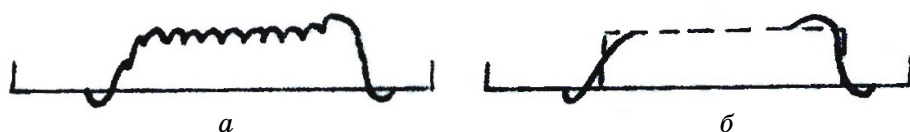


Рис. 3. Экспериментальные значения нагружения лопатки с учетом кромочных следов (а) и без учета кромочных следов (б)

Совместив все три вида вариантов моделирования нагрузки с экспериментальными данными можно отметить, что третий вариант дает большую идентичность, чем первые два (рис. 4).

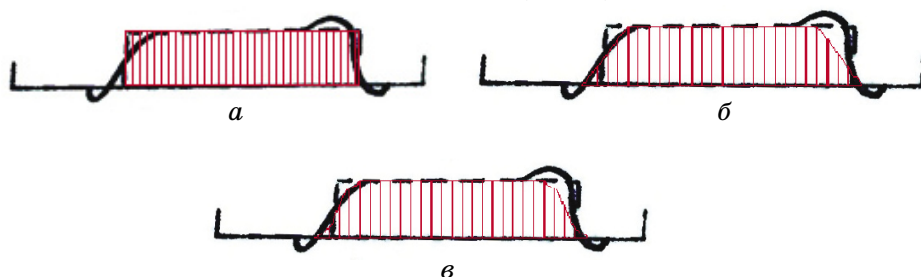


Рис. 4. Совмещение моделей нагрузок

Данные нагрузки представлены для случая работы двигателя в одном режиме, в то время как режим работы двигателя может меняться во время полета [1]. При этом не во всех двигателях это осуществляется исключительно за счет изменения угла атаки лопастей. Моделирование нагрузки в переходных режимах требует внесения корректировок в закон (рис. 5).

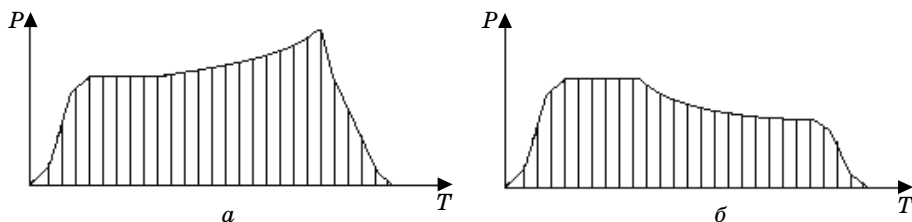


Рис. 5. Нагружение и разгрузка лопатки сопловой нагрузкой в переходном режиме с увеличением нагрузки (а), со снижением нагрузки (б)

Так же переходный режим можно рассматривать дискретно, т.е. используется схема нагружения, представленная на рис. 2, только меняется ее высота. Такой подход более рационален в плане вычислительных мощностей.

В работе [3] дан обобщенный алгоритм программы для анализа повреждаемости и долговечности деталей ГТД. Доработав его, получим алгоритм, представленный на рис. 6.

Геометрические характеристики лопатки зависят от типа двигателя, модели и места расположения лопатки в турбине (разные ступени). Закрутка лопатки задает угол атаки газовых сил, мгновенная нагрузка, воздействующая на лопатку, неодинаково действует на всей площади лопатки (рис. 7).

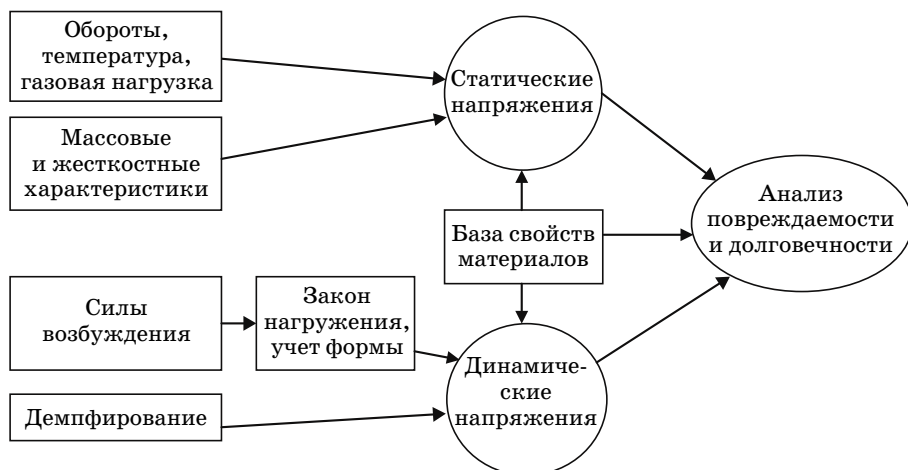


Рис. 6. Диаграмма расчета повреждаемости и долговечности деталей ГТД с учетом схемы нагружения

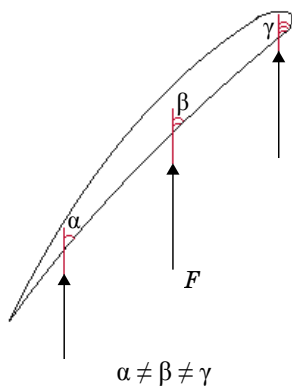


Рис. 7. Распределение нагрузки, воздействующей на лопатку

Учет угла закрутки лопатки позволит увеличить точность моделирования возмущающей сопловой нагрузки. Возможность выбора схемы нагружения позволяет быстро изменять точность и скорость расчетов в зависимости от требований. Кроме того, неравномерное распределение нагрузки говорит о возможности возникновения крутильных колебаний лопатки.

Кроме сопловой нагрузки, лопатка подвержена центробежным нагрузкам, которые могут приводить к возникновению изгибно-крутильного флаттера. Флаттером называют сочетание самовозбуждающихся колебаний в горизонтальной плоскости с крутильными колебаниями. Не смотря на то, что лопатка обладает достаточной жесткостью, явление флаттера, согласно [4], может возникнуть при определенных условиях.

При моделировании нагружения было исключено воздействие кромочных следов, поскольку их величина была незначительной относительно сопловой нагрузки. Однако колебания лопатки, возникшие в результате воздействия кромочных следов, в сочетании с флаттером, могут привести к резонансным явлениям [4].

Дальнейшим направлением исследований должно стать точное описание третьей схемы нагружения как в рабочем, так и в переходных ре-

жимах и ее программная реализация, а также исследования факторов, которые могут возбуждать крутильные колебания.

Кроме того, программное моделирование нагрузок от кромочных следов может быть полезным для исследований возможности возникновения резонансных явлений.

Список использованной литературы

1. Горбунов Р.Н. К проблеме математического моделирования демпфирования и динамических нагрузок при оценке усталостной прочности деталей турбомашин [Электронный ресурс] / Р.Н. Горбунов, О.В. Репецкий // Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права) (электронный журнал). — 2012. — № 1. — URL: <http://eizvestia.isea.ru/reader/article.aspx?id=11861>. (Идентификац. номер статьи в НТИЦ «Информрегистр» 0421200101\0051).
2. Репецкий О.В. Компьютерный анализ динамики и прочности турбомашин / О.В. Репецкий. — Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999.
3. Федоров И.М. Численный анализ математических моделей динамической устойчивости и оптимизация лопаток турбомашин / И.М. Федоров. — М.: МГТУ, 2008.
4. URL: <http://gendocs.ru> (дата обращения: 10 июня 2012 г.).

Referenses

1. Gorbunov R.N. K probleme matematicheskogo modelirovaniya dempfirovaniya i dinamicheskikh nagruzok pri otsenke ustalostnoi prochnosti detalei turbomashin [Elektronnyi resurs] / R.N. Gorbunov, O.V. Repetskii // Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii (Baikal'skii gosudarstvennyi universitet ekonomiki i prava) (elektronnyi zhurnal). — 2012. — № 1. — URL: <http://eizvestia.isea.ru/reader/article.aspx?id=11861>. (Identifikats. nomer stat'i v NTTs «Informregistr» 0421200101\0051).
2. Repetskii O.V. Komp'yuternyi analiz dinamiki i prochnosti turbomashin / O.V. Repetskii. — Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 1999.
3. Fedorov I.M. Chislennyy analiz matematicheskikh modelei dinamicheskoi ustoichivosti i optimizatsiya lopatok turbomashin / I.M. Fedorov. — M.: MGTU, 2008.
4. URL: <http://gendocs.ru> (data obrashcheniya: 10 June 2012 g.).

Информация об авторах

Горбунов Роман Николаевич — аспирант, кафедра информатики и кибернетики, Байкальский государственный университет экономики и права, г. Иркутск, e-mail: gorbunow@list.ru.

Репецкий Олег Владимирович — доктор технических наук, профессор, проректор по международной деятельности, Восточно-Сибирский институт экономики и права, г. Иркутск, e-mail: repetskiy@esiel.ru.

Authors

Gorbunov Roman Nikolaevich — post-graduate student, Chair of Computer Science and Cybernetics, Baikal State University of Economics and Law, Irkutsk, e-mail: gorbunow@list.ru.

Repetskiy Oleg Vladimirovich — Doctor of Science in Engineering, Professor, Vice-Rector for International Affairs, East-Siberian Institute of Economics and Law, Irkutsk, e-mail: repetskiy@esiel.ru.