

**АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
В УЗЛАХ РОТОРОВ ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ**

Е.Ю. Русский

Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Рабочие колеса (РК) крупных шахтных осевых вентиляторов подвержены нестационарному воздействию со стороны воздушного потока, который вызывает дополнительные динамические напряжения в лопастях решеток. Уровень этих напряжений в большой степени определяет ресурс и надежность вентиляторов, так как под действием циклических нагрузок возможен резонанс с возбуждающими силами и усталостные разрушения.

Сдвоенные листовые лопатки РК представляют собой сложную пространственную конструкцию (рис. 1а Сдвоенная листовая лопатка) с переменными параметрами сечений, радиусов кривизны и крутки. В теории проектирования лопаток заложен ряд важных требований, одно из которых решает задачу расположения центров масс лопастей M_1 и M_2 так, чтобы общий центр масс, точка M , находился на оси поворота лопатки z и центробежный момент инерции всей лопатки относительно этой оси должен равняться нулю. Это особенно важно для вентиляторов с поворотными на ходу лопатками РК, т.к. позволяет существенно снизить нагрузки на механизм поворота лопаток. Конструкция сдвоенной листовой лопатки представлена на рис. 1б.

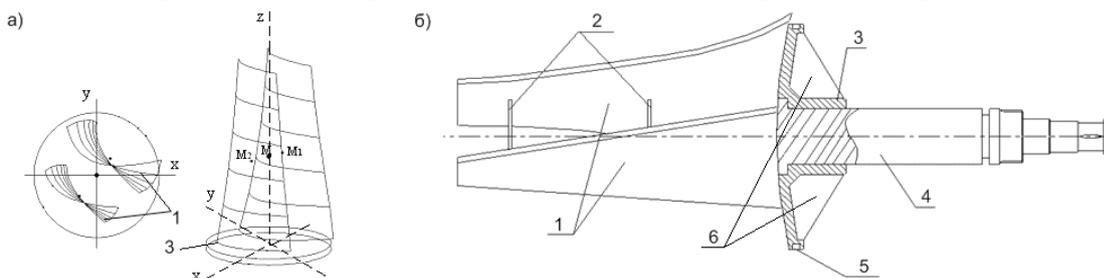


Рис. 1. Сдвоенная листовая лопатка: а) общий вид; б) конструктивное исполнение; 1 – листовые лопасти; 2 – бандажные перемычки; 3 – поворотное основание; 4 – хвостовик; 5 – паз для манжеты; 6 – ребра жесткости

На лопатку действуют инерционные и аэродинамические нагрузки, соответствующие частоте вращения ротора 600 об/мин (62.83 c^{-1}) и углу установки лопаток $+20^\circ$ в сторону увеличения углов атаки. Расчет нагрузок, действующих на сдвоенную листовую лопатку, рассмотрен в [1].

В результате расчетов получены следующие значения основных сил и моментов, действующих на сдвоенную листовую лопатку вентилятора ВО-36К: подъемная сила $R_a = 572 \text{ Н}$; момент от силы тяги (от подъемной силы) $M_a = 380 \text{ Н} \cdot \text{м}$; сила сопротивления $R_u = 527 \text{ Н}$; момент от сопротивления вращению

$M_u = 351 \text{ Н} \cdot \text{м}$; нормальная сила инерции $P_z = 543266 \text{ Н}$.

Лопатки, помимо постоянных нагрузок, испытывают действие циклически изменяющихся во времени возмущающих нагрузок, которые вызывают дополнительные динамические напряжения в лопастях. При совпадении частоты возмущающей силы с одной из собственных частот лопатки наступает явление резонанса, характеризуемое значительным увеличением амплитуд колебаний. Резонансные явления наблюдаются также, когда собственная частота не равна, но кратна частоте возмущающей силы. Единственной причиной, ограничивающей амплитуды колебаний лопаток при резонансе (а, следовательно, и уровень динамических напряжений), является наличие в колеблющейся системе демпфирующих сил, преобразующих в тепловую энергию работу, совершаемую при перемещениях колеблющихся лопаток.

Затухание колебаний (демпфирующая способность) характеризуется логарифмическим декрементом колебаний, который представляет собой натуральный логарифм отношения двух смежных амплитуд V , взятых через период колебаний

$$L = \ln\left(\frac{V(y, t)}{V(y, t + T)}\right)$$

где $V(y, t)$ – амплитуда колебаний в момент времени t ; $V(y, t + T)$ – амплитуда колебаний в момент времени $t + T$; T – период колебаний.

Выражение (1) можно использовать для экспериментального определения декремента по виброграмме свободных затухающих колебаний. Замерив амплитуды колебаний в моменты времени, отличающиеся на период колебаний T , по формуле можем найти декремент затухания колебаний L .

Для определения декремента затухания колебаний был проведен натурный эксперимент на станции метро “Маршала Покрышкина”, г. Новосибирск. В станционной вентиляционной камере установлены два вентилятора ВО-21К со сдвоенными листовыми лопатками РК. На лопатку вентилятора крепился датчик виброускорений. Колебания лопатки возбуждались ударным молотком и снимались показания, которые записывались в память компьютера. Было сделано шесть замеров.

Рассчитанное среднее значение декремента затухания колебаний – 0.25

Как показано в [2], уровень возбуждающих сил от лопаток направляющего и спрямляющего аппаратов

незначителен, и совпадение частот возмущающих сил и собственных частот лопатки не приводит к резонансу, так как энергии возмущений недостаточно для поддержания колебаний. Вынужденные колебания лопаток РК возбуждаются набегающим неравномерным потоком воздуха. Уровень возбуждающих сил составляет не более 0.1 от величины аэродинамических сил [3].

Для анализа параметров колебаний лопаточного узла с учетом декремента затухания, при приближении частоты возмущающей силы к собственным частотам лопатки, сделана серия расчетов в программе Ansys. В процессе расчета к лопастям лопаточного узла, кроме аэродинамической нагрузки, прикладывалась дополнительная возмущающая нагрузка, описываемая выражением:

$$T(t) = 0.1 A \cos(\omega t + \alpha),$$

где $T(t)$ – амплитуда возмущающей силы; A – амплитуда аэродинамической силы, $A = 66$ Н; ω – частота возмущающей силы (варьируемый параметр); t – время.

Частота возмущающей нагрузки изменялась в диапазоне от 61.5 Гц до 183.2 Гц. Исследовалась зависимость напряжений от частоты возмущающей силы.

Как показано в [4], высшие формы колебаний значительно менее возбудимы, чем низшие. Поэтому рассматриваем первые три собственные формы колебаний.

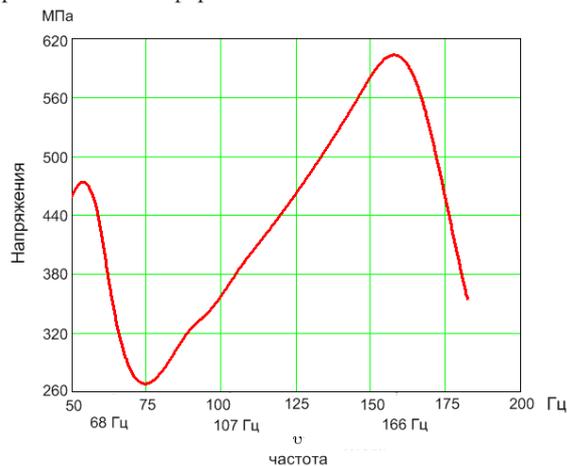


Рис. 2. Зависимость напряжений от частоты возмущающей силы; 68 Гц, 107 Гц, 166 Гц – частоты собственных колебаний (соответственно по 1й, 2й, 3й формам)

По рис. 2. видно, что при совпадении частоты возмущающей силы и первой собственной частоты лопатки напряжения составляют 462 МПа, что на 70 % больше допускаемых напряжений (270 МПа), но на 6 % меньше, чем предел текучести (490 МПа). При совпадении частоты возмущающей силы и второй собственной частоты напряжения составляют 306 МПа, что на 12.5 % больше допускаемых напряжений, и на 38 % меньше, чем предел текучести. При совпадении частоты возмущающей силы и третьей собственной частоты напряжения составляют 600 МПа, что в 2.2 раза больше допускаемых напряжений, и на 22% больше, чем предел текучести.

Таким образом, когда частота воздействия возмущающей силы совпадает с соответствующей собственной частотой лопатки, возникает резонанс. Но учет декремента колебания показал, что напряжения не возрастают бесконечно, а имеют определенный предел.

Для колебаний по третьей форме, даже в случае, если частота вынуждающей силы приблизиться к третьей собственной частоте, нарушения работоспособности не произойдет (предел прочности $\sigma_A = 900$ МПа), если длительность действия возмущающей силы не приведет к усталостному разрушению конструкции.

Литература

1. Красюк А.М., Русский Е.Ю. Динамика и прочность сдвоенных листовых лопаток осевых вентиляторов // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. -№ 7. - с. 52-56.
2. Попов Н.А. Разработка реверсивных осевых вентиляторов главного проветривания шахт // Диссертация на соискание уч. степени д.т.н. – Институт горного дела СО РАН – Новосибирск-2001. Колебания рабочих лопаток турбомашин // Учебное пособие, - Санкт – Петербург, 1995г.
3. Левин А.В. Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин / А.В. Левин, К.Н. Боришанский, Е.Д. Консон / Л.: Машиностроение, 1981.