

УДК 593.3

О. В. Дорош, В. П. Семененко, С. В. Тарасов

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг»

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАСТИ ТРУБЧАТОЙ КОНСТРУКЦИИ ТРАВЕРСЫ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОЭНЕРГОУСТАНОВОК

Проведено розрахунок сил, моментів, напружень і переміщень у лопаті. Подано порівняльний аналіз у підходах і результатах розрахунків, одержаних за допомогою програмних комплексів і на основі інженерних методів.

Ключові слова: ротор, траверса, лопать, труба, трубчатая конструкция, сила, момент, напруження.

Проведен расчет усилий, моментов, напряжений и перемещений в лопасти. Дан сравнительный анализ в подходах и результатах расчетов, полученных с помощью программных комплексов и на основе инженерных методов.

Ключевые слова: ротор, траверса, лопасть, труба, трубчатая конструкция, усилия, момент, напряжения.

The computation of forces, moments, stresses and displacements in a blade has been carried out. A comparative analysis in approaches and the results of computation obtained with the help of program complexes and based on engineering techniques has been introduced.

Keywords: rotor, cross-piece, blade, tube, spacing tube, forces, moment, stresses.

В [1] проведено исследование напряженно-деформированного состояния элементов Н-ротора Дарье. Такие конструкции роторов использовались на первых стадиях проектирования вертикально-осевых (ВО) ветроэнергетических установок (ВЭУ).

Конструкция Н-ротора Дарье состояла из двух элементов: лопасти и траверсы. Конструкция Н-ротора Дарье отличалась от других конструкций роторов для ВО ВЭУ своей простотой. При проектировании конструкций лопасти и траверсы преследовалась цель минимизации их веса. В результате их конструкции состояли из многообразных элементов и были сложны в проектировании, расчетах и изготовлении.

Опыт эксплуатации ВО ВЭУ показал целесообразность использования трубчатых элементов в конструкции траверс.

Целью настоящего этапа исследований являлось исследование напряженно-деформированного состояния лопасти с траверсой, конструкция которой состоит из трубчатых элементов.

Объектом исследований была выбрана трехлопастная ВО ВЭУ. Конструкция ротора и основные размеры его элементов показаны на рис. 1.

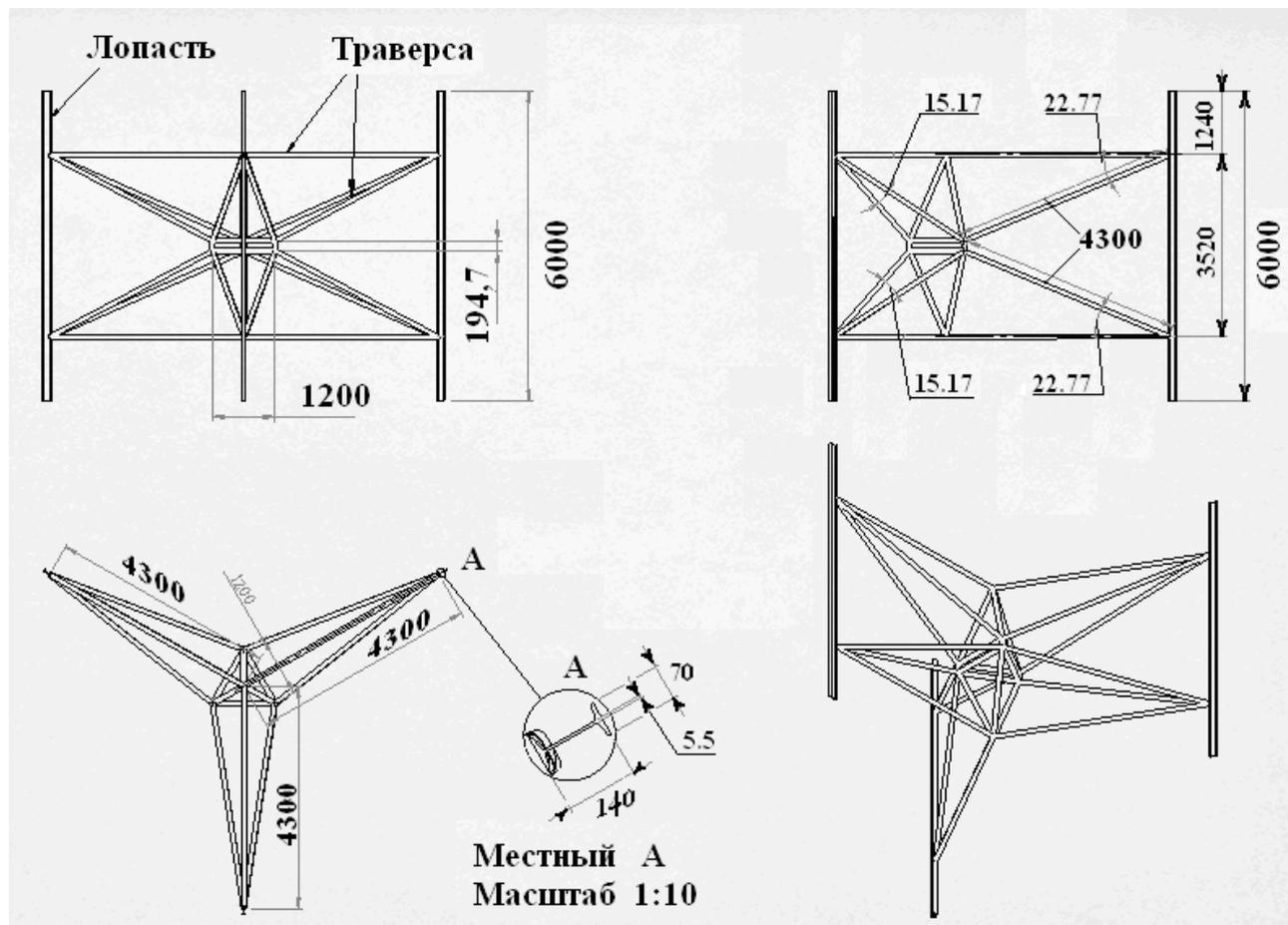


Рис. 1. Конструкция ротора ВО ВЭУ-30 и основные параметры ее подсистем

Лопасть крепится к траверсе в двух точках. Причем, точки крепления лопасти располагались на расстоянии друг от друга, обеспечивающем минимальное напряженное состояние в лопасти. На основании ранее проведенных теоретических исследований [2] эти две точки должны находиться на расстоянии $0,207L$ от краев лопасти, где L – длина лопасти. Расстояние между опорами при этом критерии оптимальности составило $0,586 L$. Для $L=6$ м расстояние между опорами лопасти должно быть $3,516$ м. Следует отметить, что условием оптимальности в данном расчетном случае являлось равенство максимальных уровней напряженного состояния: один из них находится под опорой, второй – в центре лопасти. В конечном итоге, благодаря применению двух опор, расположенных на оптимальном расстоянии, теоретически возможно снизить максимальный уровень напряжений в лопасти в $5,8$ раза, по сравнению с максимальным уровнем напряжений при использовании одной центральной точки опоры лопасти.

При снижении максимальных уровней напряжений уменьшается вес лопасти, ее материалоемкость, а, следовательно, стоимость ВО ВЭУ в целом.

Основным расчетным случаем являлось нагружение ротора и его подсистем центробежными силами, обусловленные вращением ротора. Величины центробежных сил задавались значениями перегрузки, которая могла достигать десятка и более единиц. Центробежные силы имеют горизонтальное направление. Для их восприятия лучше всего использовать горизонтально расположенные трубы.

Конструкция траверсы также должна воспринимать собственный вес и вес лопасти. Для восприятия этих сил, направленных вниз, необходимо применять вертикально расположенные трубы.

Компромиссом между двумя вышеприведенными случаями нагружения элементов траверсы является использование наклонных труб. Конструкцию траверсы, использующую только горизонтальные трубы, а восприятия веса проводить за счет тросов, было признано не рассматривать. Исходя из опыта эксплуатации конструкций, использующих тросы, было учтено, что с течением времени натяжение тросов ослабевает и его периодически необходимо восстанавливать.

Таким образом, на данном этапе исследований конструкция траверсы должна состоять из горизонтальных и наклонных труб.

При проектировании конструкции траверсы преследовалась цель минимизации ее веса. Предполагалось, что такой оптимальной конструкцией является та, в которой ее подсистемы, составляющие элементы равно напряжены. Равномерного распределения напряжений в элементах можно добиться, если они имеют одинаковые характеристики. Для трубы это ее диаметр, толщина и длина. Кроме того, если во внешнем нагружении просматривается равномерное распределение нагрузки или она обладает симметрией, то в конструкции траверсы желательно обеспечить симметричность относительно действия внешних сил.

Каждая траверса представляет собой пространственную трубчатую конструкцию. Трубчатая конструкция содержит шесть труб. Все трубы имеют: диаметр – 88,32 мм, толщина стенки трубы – 3,2 мм, длина – 4300 мм. Конструкция траверсы симметрична относительно центральной части лопасти (горизонтальная ось). Три трубы находятся в верхней части лопасти, три – в нижней части лопасти.

Из шести труб две (верхняя и нижняя) имеют горизонтальное направление, остальные четыре наклонены под углом $\alpha=22,77^\circ$ по отношению к горизонтальным трубам. Этот угол α показан на виде сбоку (рис. 1). Он располагается в вертикальной плоскости. Горизонтальные и две наклонные трубы крепятся к лопасти в одном и том же ее поперечном сечении на расстоянии 1240 мм от края лопасти. Горизонтальная труба крепится к лопасти посередине ее поперечного сечения. Наклонные трубы крепятся по краям поперечного сечения лопасти. Благодаря такой схеме крепления труб к лопасти предполагалось, что горизонтальные трубы воспринимают перегрузки, а наклонные трубы препятствуют возможному повороту лопасти вокруг ее продольной оси. Наклонные трубы в основании ротора крепятся не в одной точке. Их точки крепления разнесены на расстоянии 1200 мм друг от друга. В итоге, две наклонные

трубы крепятся к лопасти на расстоянии $e = 140$ мм, а в основании ротора – на расстоянии 1200 мм. Угол между этими наклонными трубами $2\beta = 15,17^\circ$. Он располагается в плоскости, образованной двумя этими наклонными трубами. Сама плоскость наклонена по отношению к горизонтально расположенной трубе под углом α .

Кроме возможного поворота вокруг продольной оси лопасти, она может испытывать некоторый поворот вокруг двух горизонтальных осей. Возможность поворота лопасти вокруг трех осей может возникнуть при неравномерном распределении аэродинамических сил по поверхности лопасти. Повороту лопасти вокруг одной из осей препятствуют четыре наклонных трубы, поворот вокруг второй оси – все шесть труб.

Таким образом, в рассматриваемой пространственной конструкции траверсы предполагалось, что основную нагрузку от центробежных сил воспринимают горизонтальные трубы, а собственный вес – наклонные трубы. Препятствие поворотам траверсы вокруг трех ее осей осуществляется за счет совместного участия всех шести труб, путем разнесения точек их крепления по длине и ширине лопасти, а в основании ротора – по его высоте и ширине.

Расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) лопасти и подсистем траверсы проводились при следующих исходных данных.

Материал лопасти и траверсы – алюминий. Плотность $\rho = 2,78 \cdot 10^{-3}$ кг/см³, модуль упругости $E = 7,3 \cdot 10^5$ кг/см², допускаемое напряжение $[\sigma] = 1600$ кг/см². Поперечное сечение лопасти выполнено в виде двутавра, близкого по своим параметрам к двутавру № 14. При этом, вес лопасти $G_{л} = 31,44$ кг, площадь поперечного сечения $F_{л} = 18,85$ см², момент инерции поперечного сечения $I_{л} = 603,5$ см⁴, момент сопротивления поперечного сечения $W_{л} = 86,21$ см³.

Основные размеры труб траверсы указаны на рис. 1. Вес одной трубы составлял $G_{т} = 10,7$ кг, площадь поперечного сечения $F_{т} = 8,94$ см², момент инерции поперечного сечения $I_{т} = 88,95$ см⁴, момент сопротивления поперечного сечения $W_{т} = 19,9$ см³.

Расчеты НДС (перемещений и напряжений) ротора и его подсистем были проведены с помощью специализированного программного комплекса типа Cosmos Works.

Рассматривались два расчетных случая. В обоих центральная часть ротора жестко закреплена.

Первый случай: нагрузка на лопасть от центробежных сил. Перегрузка приложена горизонтально.

Второй случай: нагружение ротора собственным весом. Перегрузка направлена вертикально вниз.

При вращении ротора в его подсистемах возникают центробежные силы. Их учет в расчетах производится путем введения перегрузки. На рис. 2 показано направление перегрузки при вращении ротора вокруг вертикальной оси.

Результаты расчетов НДС лопасти при действии горизонтальной нагрузки $\eta = 10$ представлены на рис. 3–6.

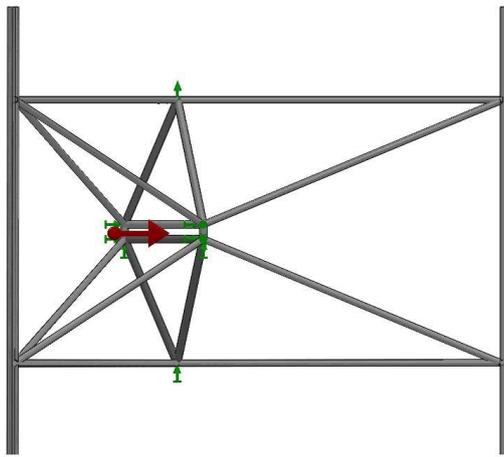


Рис. 2. Горизонтальное направление действия перегрузки

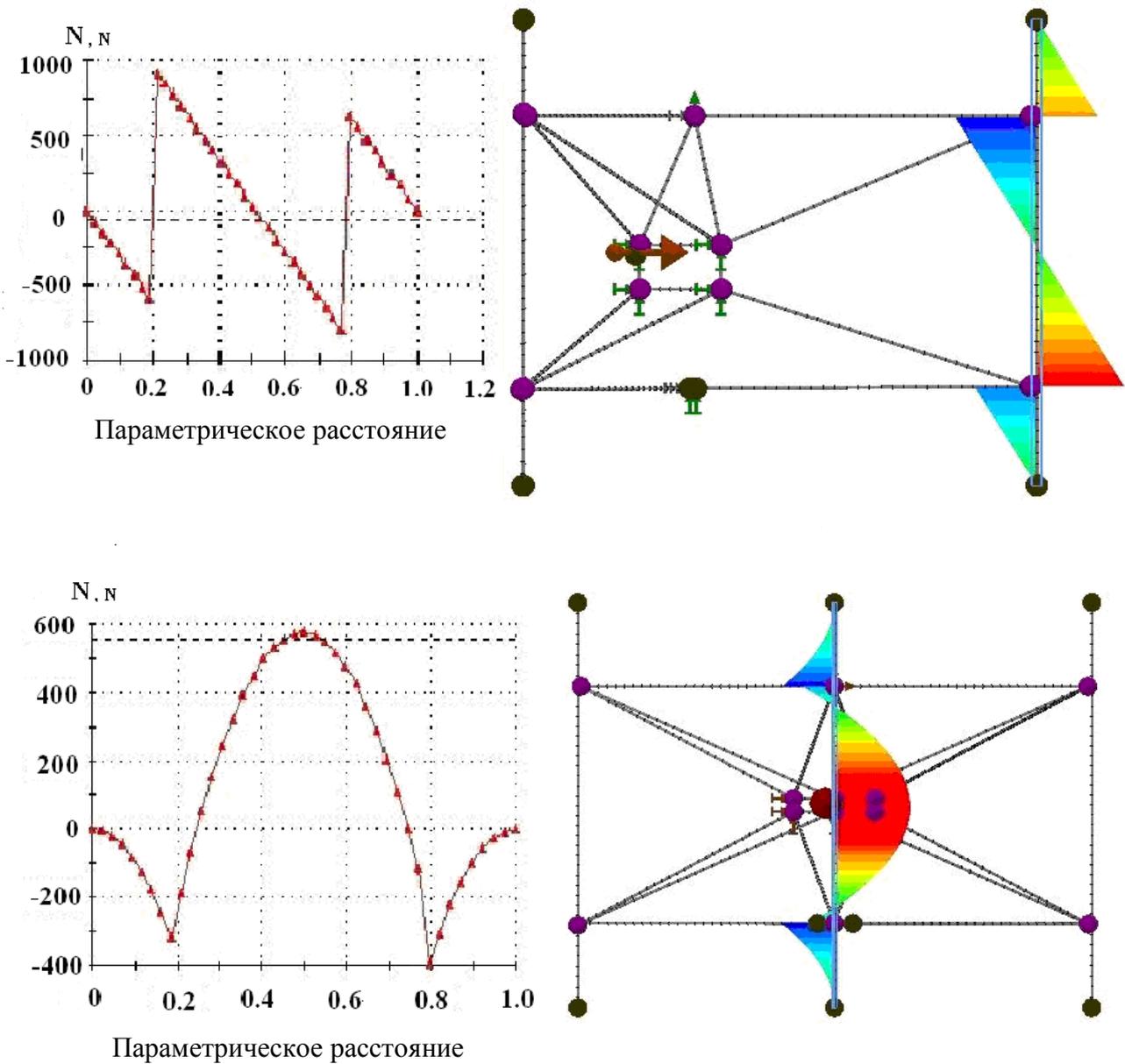


Рис. 3. Эпюры перерезывающих сил и изгибающих моментов в поперечном сечении лопасти

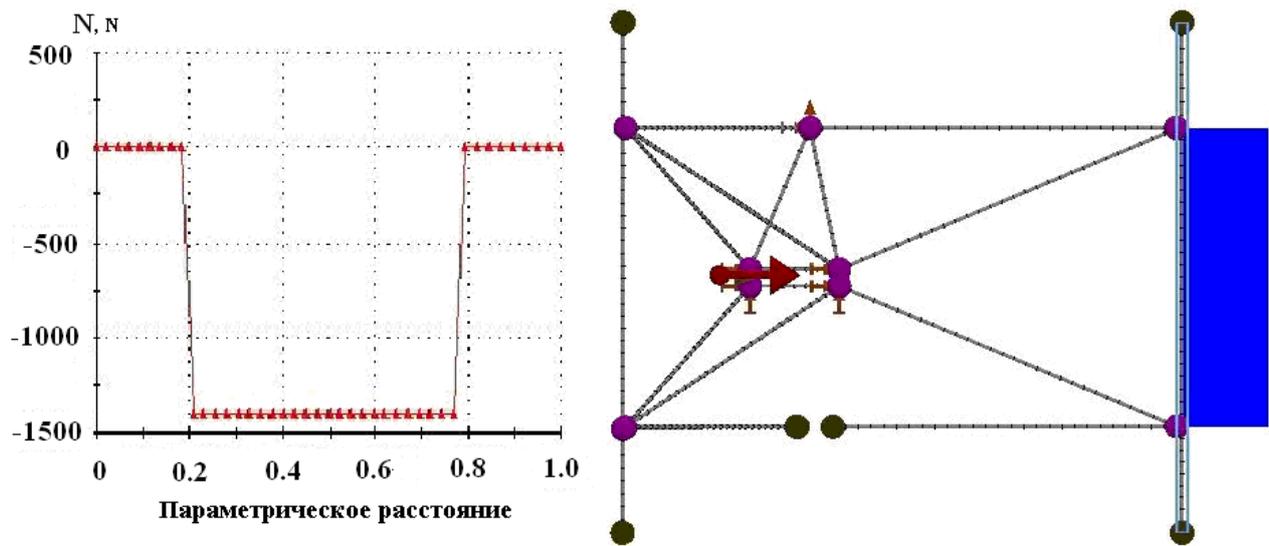


Рис. 4. Эпюры продольных сил в поперечном сечении

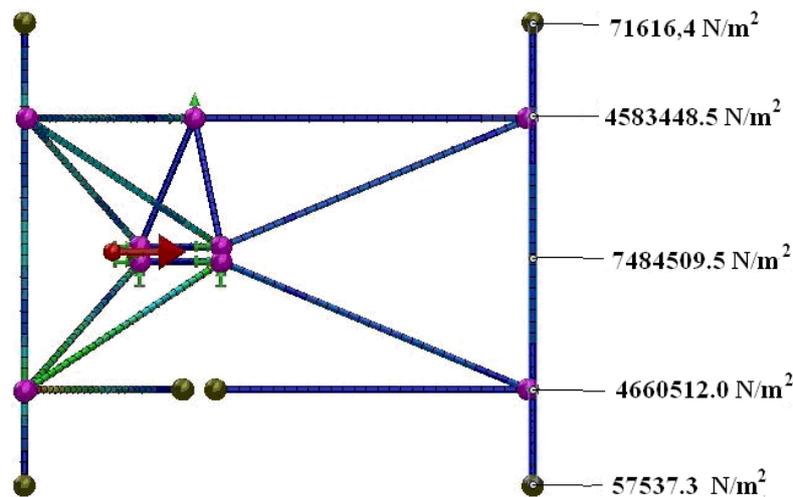


Рис. 5. Напряженное состояние лопасти, значение напряжений в поперечном сечении лопасти

На рис. 3 даны эпюры перерезывающих сил и изгибающих моментов в поперечном сечении лопасти.

Эпюры перерезывающих сил качественно имеют антисимметричную картину относительно середины лопасти. Это подтверждает тот факт, что в симметричной системе, которая в данном случае характеризуется симметричностью конструкции ротора и однородностью действия внешней нагрузки, несимметричный компонент НДС должен иметь антисимметричную картину. В количественном отношении величина реакций опор по результатам расчетов с помощью программных комплексов равна $R_1=R_2=153,57$ кг. Сумма реакций равна 307,14 кг. Внешнее нагружение определяется весом лопасти, умноженной

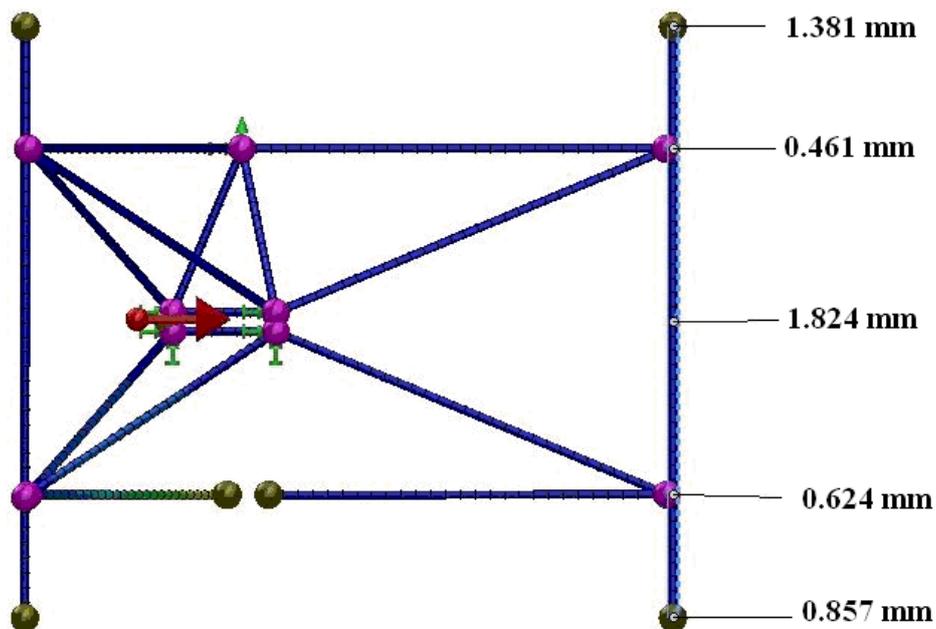


Рис. 6. Деформированное состояние лопасти, значение перемещений точек оси лопасти

на перегрузку $G_{л} \cdot \eta = 314,4$ кг. Разница между суммой реакции и величиной внешней нагрузки на основе исходных данных равна 7,26 кг. Погрешность в определении величин реакций влияет на точность нахождения максимальных значений перерезывающих сил в поперечном сечении лопасти. Максимальное значение перерезывающей силы по данным расчета $Q_{\max} = 92,86$. При построении эпюры перерезывающих сил инженерными методами $Q_{\max} = 92,22$. Погрешность в определении максимальных значений перерезывающих сил в поперечном сечении лопасти не превосходит одного процента.

Эпюра изгибающих моментов построена в соответствии с классической теорией сопротивления материалов. Там, где перерезывающая сила отрицательна, величина изгибающего момента уменьшается, и наоборот. При $Q=0$ наблюдаются максимальные значения изгибающего момента. Следует отметить несколько отличий полученной эпюры моментов с помощью программных комплексов от традиционных эпюр моментов, которые обычно представлены в справочниках по сопротивлению материалов. На графике величин изгибающих моментов нет скачка в изменении значений моментов (рис. 3,б слева), который можно отметить на эпюре моментов (рис. 3,б справа) в районе опор. При свободном или шарнирном оперании такого скачка в значениях моментов быть не должно. Очевидно, программные комплексы учитывают реальные жесткостные характеристики в месте соединения лопасти и трубы траверсы. Кроме того, на графике, отражающем значения моментов, нет симметрии относительно центральной части лопасти. Значение момента под одной опорой $M_1 = 30$ кг·м, под второй $M_2 = 40$ кг·м. Значение момента в центре лопасти $M_{ц} = 60$ кг·м. Если усреднить значения под опорами, то $M_{оп} = 35$ кг·м. Значение моментов в центре лопасти и под опорами не равны между собой. Расстояние между опорами вы-

биралось, исходя из критерия равенства величин моментов в центре лопасти и в районе опор. Учет реальных жесткостных параметров в месте соединения лопасти и трубы траверсы, наверное, привел к появлению сосредоточенного момента под опорами. В результате этого эпюра моментов как бы «сместилась» на постоянную величину. По цветной эпюре моментов этот скачок можно оценить как $M_c=15$ кг·м. Если приводить результаты расчетов, полученные с помощью программных комплексов, к результатам, найденным по инженерной методике, то следует из значений моментов в центре лопасти вычесть величину скачка $M_{ц} - M_c = 60 - 15 = 45$ кг·м. Среднее значение между средним значением момента под опорой будет $M_{оп}=35$ кг·м и значением момента в центре лопасти $M_{ц}=45$ кг·м. При расчетах на основе инженерных методов $M=40,55$ кг·м. Погрешность составляет менее 1,5%.

Проведенный выше анализ эпюры моментов показал, что при учете реальных жесткостных характеристик подсистем ротора и при их совместном рассмотрении необходимо выработать иные критерии оптимальности, чем те, которые обычно применяются в инженерных методиках, когда НДС элементов ротора определяется отдельно друг от друга.

На рис. 4 представлена эпюра продольных сил в поперечном сечении лопасти. В качественном отношении – это равномерное сжатие между опорами, а края лопасти свободны от усилий. Нагружение пролета лопасти между опорами происходит за счет проекции усилий в наклонных трубах на продольную ось лопасти. Величина продольного усилия, согласно расчетам, с помощью программных комплексов составила $N_{д}=140$ кг.

При инженерном подходе определения усилий в лопасти получались иные значения продольного усилия в лопасти. В первом приближении оценку усилий в трубах и лопасти можно провести следующим образом.

Вес лопасти с перегрузкой равен 314,4 кг. Этот вес воспринимают все шесть труб. В предположении, что вес лопасти между трубами распределяется равномерно, получается, что на одну трубу приходится усилие $N_{т}=52,4$ кг. От двух наклонных труб с учетом угла $\alpha=22,75^\circ$ на лопасть будет приходиться усилие $N_{д}=40,94$ кг.

Решение задачи в более полной постановке приводит к необходимости рассматривать системы уравнений в виде:

$$\begin{aligned} N_{Г} + 2N_{Н} \cos \beta \cdot \cos \alpha &= R, \\ N_{Н} &= C\Delta_{Н}, \quad N_{Г} = C\Delta_{Г}, \\ \Delta_{Н} &= \Delta_{Г} \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha, \end{aligned} \tag{1}$$

где $N_{Г}$, $N_{Н}$ – усилия в горизонтальных и наклонных трубах; R – величина реакции в опорах лопасти; $\Delta_{Г}$, $\Delta_{Н}$ – удлинения в горизонтальной и наклонной трубах; C – коэффициент жесткости на растяжение-сжатие трубы.

Система (1) является разрешающей системой статически неопределенной задачи о распределении суммарной величины R между горизонтальной и на-

клонными трубами. Принято предположение, что усилия в наклонных трубах равны между собой. Одно уравнение статики, два неизвестных N_G , N_H . Задача один раз статически неопределима. Дополнительным уравнением служит условие совместности деформаций – последнее уравнение в (1). Связь между усилиями и перемещениями через коэффициент жесткости C получена на основании закона Гука.

Решение системы уравнений (1) представилось в виде:

$$N_G = \frac{R}{1 + 2\cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta}; \quad N_H = \frac{R \cos \alpha \cdot \cos \beta}{1 + 2\cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta}. \quad (2)$$

Численные значения усилий в трубах при $R = 157,2$ кг, $\alpha = 22,7^\circ$, $\beta = 15,17^\circ$ были $N_G = 61$ кг, $N_H = 54$ кг. На лопасть действуют усилия от двух наклонных труб с усилием $2 \cdot N_H = 104$ кг. Продольное усилие в лопасти от этих двух сил $N_{\text{д}} = 2N_H \cdot \sin \alpha = 42,2$ кг. По расчетам с помощью программных комплексов $N_{\text{д}} = 140$ кг.

Разницу почти в 100 кг можно объяснить так же, как и при сравнении эпюр изгибающих моментов, полученных с помощью программных комплексов и на основе инженерных методов – неадекватностью расчетных схем.

В инженерных методах расчетной схемой нагружения ротора принято считать нагрузки, приходящиеся на траверсу только от веса лопасти, умноженные на перегрузку.

В программных комплексах, кроме указанного выше нагружения подсистем траверсы, сами трубы траверсы испытывают нагружение от собственного веса, умноженного на перегрузку. Здесь действие центробежных сил моделировалось перегрузкой $\eta = 10$, равномерно распределенной по всей длине трубы. Вес одной трубы $G_T = 10,7$ кг. При наличии одновременно горизонтальной и наклонных труб их вес с перегрузкой может оказывать действие на лопасть. Наклонные трубы препятствуют перемещению лопасти, как жесткого целого, которое может быть от деформации при наличии только горизонтальных труб. Суммарная сила от двух наклонных труб $2G_T = 21,4$ кг. С перегрузкой $\eta = 10$ это 214 кг. Составляющая этого усилия на лопасть $214 \cdot \sin 22,77^\circ = 82$ кг. Сумма продольных усилий в лопасти, приходящаяся на нее от действия собственного веса и от веса наклонных труб с учетом перегрузки $\eta = 10$, была $42,2 + 82 = 142,2$ кг. Погрешность по сравнению с 140 кг не превосходит 2%.

Ранее было отмечено, что на эпюре изгибающих моментов для лопасти в районе ее опор наблюдается скачок в их значениях. Предполагалось, что это является следствием учета местных жесткостных характеристик при соединении труб и лопасти. После анализа нагружения лопасти инерционными силами от труб появляется еще одно объяснение указанным выше скачкам. Действие нагрузок от наклонных труб передается не только в виде усилий, но и моментов. В самом грубом приближении можно инерционные силы по трубе привести к равнодействующей. Ее точка приложения будет не на конце трубы, в районе соединения с лопастью, а на определенном расстоянии от лопасти. Так

как труба наклонена, то перенос этой равнодействующей будет сопровождаться дополнительным моментом. Для лопасти это будет сосредоточенный момент в районе опоры.

На рис. 5 представлено напряженное состояние лопасти. Если подходить с позиции классической теории сопротивления материалов, то напряжения в лопасти должны определяться по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{F} \pm \frac{M}{W}, \quad (3)$$

где N – продольное усилие в поперечном сечении лопасти; F – площадь поперечного сечения лопасти; M – изгибающий момент в поперечном сечении лопасти; W – момент сопротивления поперечного сечения лопасти.

Первое слагаемое в (3) соответствует напряжениям сжатия, второе – изгибным напряжениям. При $N=140$ кг, $F=18,85$ см², напряжения сжатия $\sigma_c=7,43$ кг/см². Для максимального значения момента $M_1=60$ кг·м и $W=86,21$ см³, $\sigma_{и}=69,9$ кг/см². Напряжения от изгибающего момента в 9,4 раза превышают напряжения от сжимающей силы.

Ранее было проведено сравнение по усилиям и моментам, по результатам, полученным с помощью программных комплексов, с результатами, полученными инженерными методами. При приведении в соответствие расчетных схем погрешность в определении значений моментов не превосходила 1,5%, при нахождении величины усилий – 2%. Так как при определении значений напряжений доминируют напряжения от изгибающего момента, то можно принять, что погрешность в вычислении напряжений при сравнении результатов, полученных по указанным выше методам, будет порядка 1,5%.

На рис. 6 показаны значения перемещений точек оси лопасти в характерных точках.

Максимальное значение перемещений наблюдается в центре лопасти $Y_{ц}=0,1824$ см. По краям лопасти, в силу симметрии конструкции ротора и внешнего нагружения, значения перемещений должны быть равны. У верхнего края лопасти $Y_{в,к}=0,138$ см, у нижнего $Y_{н,к}=0,0857$ см. Нет симметрии. Прогиб в верхней точке лопасти в 1,6 раза больше, чем в ее нижней части. Среднее значение прогиба лопасти по ее краям $Y_{к,ср}=0,112$ см.

Максимальное значение прогиба лопасти в центре и значение прогибов по краям являлось суммой чисто изгибных прогибов и перемещений лопасти как жесткого целого за счет деформации труб. Значения перемещений концов труб за счет их деформации можно оценивать по перемещениям в районе опор. На верхней опоре $Y_{о,в}=0,0461$ см, на нижней $Y_{о,н}=0,0624$ см. Нет симметрии. Среднее значение перемещения в опорах лопасти $Y_{о,ср}=0,0524$ см.

Значение чисто изгибных перемещений в центре лопасти было получено путем вычитания из общего перемещений $Y_{ц}=0,1824$ см средней величины перемещений в опорах $Y_{о,ср}=0,0524$ см и составило $Y_{ц}=0,13$ см.

Для получения значений чисто изгибных перемещений на краях лопасти, кроме перемещения лопасти как жесткого целого параллельно самой себе (оно

характеризуется $U_{o,ср}$), необходим учет поворота лопасти, как жесткого целого вокруг ее центра. Это обусловлено разными значениями перемещений в верхней и нижней опорах. Величина перемещения за счет поворота лопасти, как жесткого целого, составила 0,0128 см. Это значение необходимо добавить к значению перемещения в верхней части лопасти и отнять для значений перемещений в нижней части лопасти. В итоге изгибные перемещения в верхней части лопасти имели значения $U_{в,и}=0,0728$ см, в нижней – $U_{н,и}=0,0461$ см.

По инженерной методике прогиб в центре лопасти $U=0,096$ см. Расхождение с результатом, полученным с помощью программных комплексов, составило 26%. По краям лопасти ее изгибные перемещения равнялись $U_k=0,032$ см. Сравнивать это значение со значениями перемещений, полученными с помощью программных комплексов, очевидно, не совсем корректно. Последние не отличаются симметрией. Среднее значение перемещения по краям лопасти $U_{к,ср}=0,06$ см. Это в 1,86 раза больше, чем получено при инженерном подходе. Разницу, и довольно существенную, в значениях перемещений, как в центре, так и по краям лопасти, можно объяснить не учетом еще какой-то постоянной. Здесь целесообразно рассматривать погрешность не в процентах, а абсолютную разницу. Разница в перемещениях в центре лопасти составила 0,034 см, а по краям лопасти – 0,028 см. Причем, значения перемещений, полученные по программным комплексам, превосходили значения перемещений, полученные с помощью инженерных методов.

При сравнении величин изгибающих моментов улучшение погрешности было достигнуто путем учета приложения сосредоточенных моментов в районе опор. Учет этих моментов при определении перемещений дал дополнительный прогиб: в центре лопасти – 0,013 см, на краю лопасти – 0,05 см. С учетом этих добавок значения перемещений, полученные инженерным методом, в центре лопасти – 0,108 см, на краю – 0,05 см. При таком учете погрешность в сравнении со значениями перемещений, полученными с помощью программных комплексов, не превысила 17%.

Следует отметить, что если взять значение сосредоточенного момента на опорах не $M_{оп}=15$ кг·м, а больше, то погрешность при сравнении результатов, полученных указанными выше методами, будет еще меньше.

Уменьшение погрешности в результатах расчетов по перемещениям было достигнуто при дальнейшем анализе и рассмотрении дополнительных расчетных схем, но существенных уменьшений значений погрешности в этом направлении достичь не удалось.

Анализ зависимости максимальных значений перемещений в центре лопасти от величин расстояний между опорами проведен [2]. Из него следует, что значения перемещений в центре лопасти в значительной степени зависят от расстояния между опорами. При изменении значений этого расстояния на величину порядка одного процента значения перемещений в центре лопасти изменяются на десятки процентов. При изменении расстояния между опорами порядка 5% прогиб в центре лопасти меняется качественно: из положительного значения переходит в отрицательное значение. Возможно, на значения максимальных величин в центре лопасти существенное влияние оказывает точность

задания координат расположения опор, которая теоретически предполагает симметричность их нахождения относительно центральной части лопасти.

На рис. 7 показано направление действия собственного веса. На рис. 8 представлена эпюра продольных сил в лопасти от действия собственного веса.

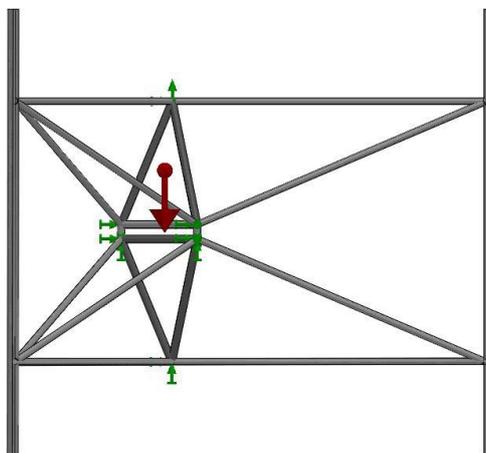


Рис. 7. Вертикальное направление действия собственных весов лопасти и траверсы

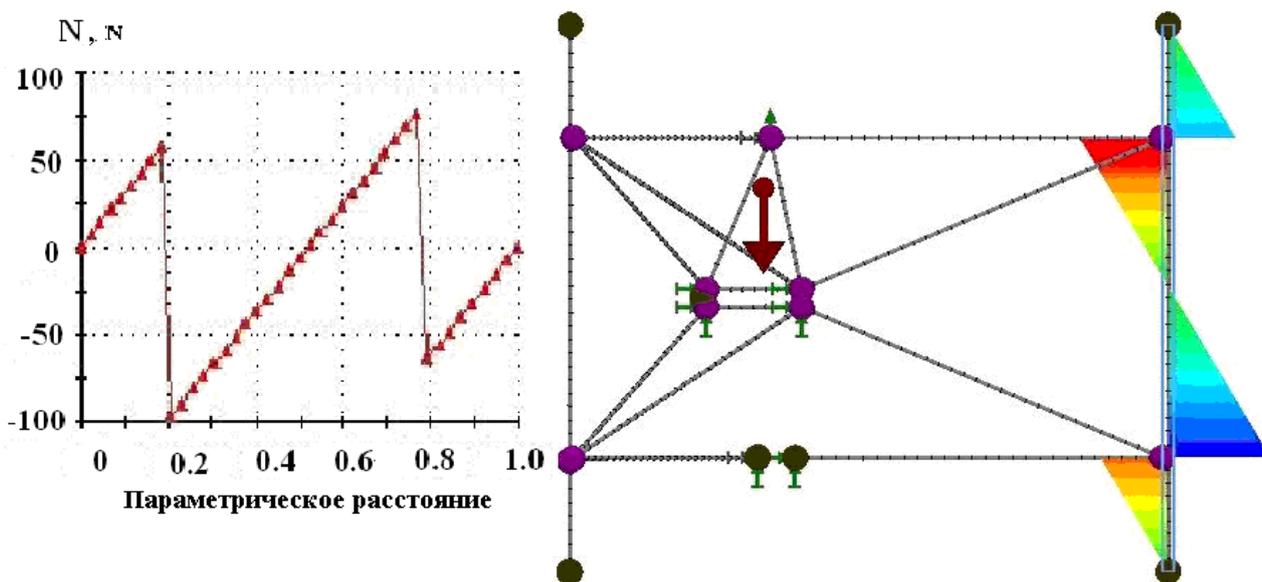


Рис. 8. Эпюра продольной силы в поперечном сечении лопасти

Скачки величин в районе опор – это реакции опор. В верхней опоре $R_{\text{в}}=158,33$ кг, в нижней – 141,6 кг. В сумме они равны 300 кг. Вес лопасти – 314,4 кг. Погрешность в 4,6% можно объяснить погрешностью снятия результатов с эпюры.

Максимальные напряжения от продольных сил в районе верхней опоры – 9,5 кг/см², в районе нижней – 7,7 кг/см². При использовании инженерной мето-

дики величина напряжений – $8,34 \text{ кг/см}^2$. При среднем значении напряжений, полученных при помощи программных комплексов, – $8,6 \text{ кг/см}^2$, погрешность вычислений не превосходит 3%.

Деформированное состояние лопасти и траверсы можно охарактеризовать как симметричное, в отличие от поперечного нагружения относительно горизонтальной оси, проходящей через центральную часть лопасти. Максимальный уровень перемещений имеет порядок 0,28 см.

Выводы

Рассматривалась конструкция ротора, состоящая из двух подсистем: траверсы и лопасти. Траверса представляла собой трубчатую конструкцию, состоящую из горизонтальных и наклонных труб. Исследования проводились для двух случаев нагружения: собственный вес ротора и действие центробежных сил.

В результате расчетов были определены значения перерезывающих и продольных сил, изгибающие моменты, напряжения и перемещения в поперечных сечениях лопасти.

Апробация результатов расчетов НДС лопасти, полученных с помощью модернизированных прикладных методов, проводилась путем их анализа и сравнения с результатами, полученными другими методами, в частности, инженерными методами.

Прежде всего, были отмечены различия в подходах к определению НДС в лопасти. В инженерных методах НДС каждого элемента рассматривалось отдельно от других элементов. Исследуемый элемент выделялся, взаимодействие с соседними элементами заменялось реакциями взаимодействия. Реакция взаимодействия в инженерных методах и в модернизированных определялась по различным расчетным схемам. В инженерных методах, как правило, выбирался один вид реакций (усилия или моменты). Выбор вида реакций определялся опытом расчетчика и его интуицией. В прикладных методах, благодаря возможности проводить расчеты с учетом совместной работы соседних элементов, возможно наличие одновременно нескольких видов реакций. Для того чтобы привести результаты расчетов, полученные по разным методам, к приемлемому их совпадению в инженерных методах использовалась не одна расчетная схема, а несколько простых расчетных схем и результаты расчетов их суммировались.

К другим отличительным особенностям между двумя подходами можно отнести следующие.

При первоначальном выборе конструкции траверсы предполагалось, что горизонтальные трубы будут воспринимать нагрузки от центробежных сил, а наклонные трубы – нагрузку от собственного веса ротора.

Использование такого предположения в инженерных методах давало возможность при определении эпюры изгибающих моментов в поперечном сечении лопасти находить реакции от труб только от действия горизонтальных труб, т.е. перерезывающие силы. При этом в эпюре изгибающих моментов не должно быть никаких скачков в величинах моментов (нет внешнего сосредоточенного момента).

При опоре в виде сосредоточенных сил расстояния между опорами назначались на основе критерия оптимальности. Он выражал условия равенства максимальных значений изгибающих моментов, которые располагались в центре лопасти в районе опор.

Анализ эпюры изгибающих моментов в лопасти, полученной при помощи прикладных методов, показал наличие скачков в значениях моментов в районе соединения лопасти и труб. Действие реакций от труб на лопасть происходило не только за счет сосредоточенных сил, но и за счет сосредоточенных моментов. Последний фактор обусловил наличие скачков в эпюре изгибающих моментов в поперечном сечении лопасти в районе опор. Максимальная величина изгибающего момента в районе опор осталась такой же, как и без внешнего сосредоточенного момента. В центральной части лопасти максимальная величина изгибающего момента увеличилась на величину скачка. В центре лопасти величина момента в 1,7 раза превосходила значение момента в районе опор. Равенство максимальных величин изгибающих моментов нарушилось. Ранее применяемый критерий оптимальности в этом случае не дает минимальных значений максимальных величин изгибающего момента. Необходима выработка новых критериев оптимальности.

Погрешность при сравнении результатов расчетов, полученных по прикладным методам, с результатами расчетов, которые дал инженерный метод при использовании расчетной схемы, в которой реакции опор были представлены только усилиями (без сосредоточенных моментов), составила в районе опор 13,7%, а в центре лопасти – 48%.

Для приведения расчетной схемы, используемой в инженерных методах, в соответствии со схемой нагружения лопасти, которая реализовалась в прикладных методах, была дополнительно рассмотрена лопасть без внешней распределенной нагрузки на двух опорах, на которых были приложены сосредоточенные моменты. После суммирования результатов расчетов, полученных по двум расчетным схемам, погрешность в сравнении результатов, полученных по двум методам, не превышала 1,5%.

Аналогичным образом был проведен анализ для остальных компонентов НДС в лопасти. Путем последовательного применения расчетных схем, анализа расхождения результатов расчета была достигнута приемлемая для инженерных расчетов величина погрешности. Наименьшая величина погрешности, менее одного процента, наблюдалась в определении перерезывающих сил в поперечном сечении лопасти. Максимальное расхождение составило 17%. Оно отмечено при анализе перемещений лопасти. Уменьшение этого значения возможно при дальнейшем анализе и рассмотрении дополнительных расчетных схем, но существенных уменьшений значений погрешности в этом направлении достичь не удалось. Дополнительный анализ зависимости максимальных величин перемещений в центре лопасти показал, что они в значительной степени зависят от расстояния между опорами. При изменении значений этого расстояния на величину менее процента, значение перемещений изменяется на десятки процентов. При изменении расстояния между опорами порядка 5% прогиб в

центре лопасти меняется качественно, из положительного значения переходит в отрицательное значение.

Практические рекомендации

1. Использование программных комплексов дает картину НДС лопасти, более приближенную к реальным условиям эксплуатации ротора по сравнению с инженерными методами расчета.

2. Уточнение НДС лопасти приводит к необходимости разработки иных критериев оптимальности, чем те, которые использовались в инженерных методах.

3. Критерий оптимальности необходимо разрабатывать на основе комплексного анализа НДС не только в лопасти, но и в трубах траверсы.

Направления дальнейших исследований. Будут проведены исследования напряженно-деформированного состояния в элементах траверсы – горизонтальных и наклонных трубах.

Библиографические ссылки

1. Китова О. В. Применение программных комплексов к исследованию напряженно-деформированного состояния Н-ротора Дарье / О. В. Китова, В. П. Семенов, С. В. Тарасов // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: *зб. науков. праць*. – Д.: Пороги, 2011. – Т. IX. – С. 89–101.
2. Дегтярев Д. А. Исследования напряженно-деформированного состояния лопасти ротора вертикально-осевой ветроэлектрической установки/ Д. А. Дегтярев, О. В. Китова, В. П. Семенов, С. В. Тарасов // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: *зб. науков. праць*. – Д.: Пороги, 2011. – Т. IX. – С. 28–42.

Надійшла до редколегії 03.04.13