

## **Об усталостной прочности лопасти несущего винта вертолета при действии ветровых нагрузок**

А.И. Братухина

*Статья посвящена рассмотрению вопроса о напряжениях в невращающейся лопасти и втулке несущего винта вертолета под действием ветровых нагрузок. Сделано допущение, что вертолет находится на стоянке и его винт не вращается. Расчет проводился для несущего винта с шарнирным креплением лопастей. Решена задача о собственных и вынужденных колебаниях лопасти вертолета. Определены деформации и внутренние усилия (изгибающие моменты и напряжения в лонжероне лопасти). Проведен анализ результатов и оценено влияние швартовки лопасти в наземных условиях эксплуатации.*

В данной работе рассмотрены случаи нагружения элементов конструкции лопасти и втулки в наземных условиях. Потребность в подобных расчетах всегда существует, в связи с постоянно встречающимися в эксплуатации повреждениями винтов при работе вертолета на земле.

Необходимость рассматривать наземные случаи нагружения вертолета подтверждена в «Нормах летной годности гражданских вертолетов», а также требованиями по сертификации, предъявляемыми за рубежом.

Рассматривается задача определения деформаций и внутренних усилий (изгибающих моментов и напряжений) в лонжероне лопасти несущего винта вертолета под действием ветровых нагрузок. Предполагается, что вертолет находится на стоянке и его винт не вращается. В некоторый момент времени на лопасть действует порыв ветра. Под действием порыва ветра на лопасти возникает аэродинамическая подъемная сила, которая в зависимости от направления ее действия, поднимает лопасть вверх или прижимает вниз. В результате этого лопасть совершает вынужденные колебания в вертикальной плоскости, а лонжерон нагружается изгибающим моментом, действующим в основном в плоскости наименьшей жесткости.

Расчет проводился для несущего винта с шарнирным креплением лопастей.

Движение лопасти относительно горизонтального шарнира происходит свободно до некоторого положения, характеризуемого углом ограничителя свеса  $\alpha_{yn}$  (рис. 1а). После этого перемещение лопасти может происходить только за счет ее упругих деформаций. Таким образом, если колеблющаяся под действием внешней нагрузки лопасть находится выше линии OR, то ее движение описывается расчетной схемой, показанной на рис. 1б. После того, как точка А комля

лопасти достигла упора ограничителя свеса, ее дальнейшее движение должно быть описано схемой, изображенной на рис. 1в. Для зашвартованной лопасти расчетная схема соответствует рис. 1г.

Малые колебания лопасти невращающегося несущего винта вертолета описываются дифференциальным уравнением в частных производных [1]:

$$(EI \cdot y''')'' = W . \quad (1)$$

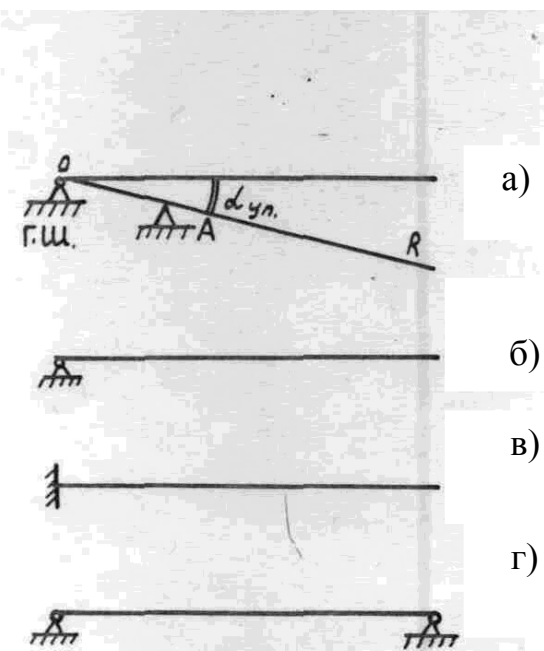


Рис. 1

В уравнении:  $Y$  - перемещение сечения лопасти в плоскости наименьшей жесткости;  $EI$  - изгибная жесткость сечения лопасти относительно главной оси, лежащей в плоскости хорд;  $W$  - внешняя распределенная нагрузка:

$$W = T - m\ddot{y} - mg , \quad (2)$$

где

$m$  - погонная масса лопасти;

$T$  - погонная аэродинамическая нагрузка;

$g$  - ускорение силы тяжести.

После подстановки (2) в (1) получим

$$(EI \cdot y''')'' + m\ddot{y} = T - mg . \quad (3)$$

Решение уравнения (3) представим в виде разложения в ряд по собственным формам колебаний [2]:

$$y = \sum_j \delta_j \cdot y_j, \quad (4)$$

где  $j = 1, 2, \dots$  - число собственных форм, принимаемых в расчете;

$y_j$  - форма  $j$ -ого тона собственных колебаний лопасти в пустоте, которая является функцией ее радиуса;

$\delta_j$  - некоторые функции времени (коэффициенты деформаций).

Собственные формы  $y$  определяются из дифференциального уравнения (3), когда его правая часть равна нулю:

$$(EI \cdot y'')'' + m\ddot{y} = 0. \quad (5)$$

После определения частот и форм собственных колебаний в решении (4), неизвестными останутся только коэффициенты деформаций  $\delta_j$ . Применяя метод Б.Г. Галеркина к системе дифференциальных уравнений изгибных колебаний лопасти, записанных в частных производных (3), после двукратного дифференцирования, получим:

$$\dot{y} = \sum_j \dot{\delta}_j \cdot y_j, \quad (6)$$

$$\ddot{y} = \sum_j \ddot{\delta}_j \cdot y_j. \quad (7)$$

Подставим (4), (6) и (7) в уравнение (3), а затем умножим его поочередно на  $y_j$  и проинтегрируем по радиусу лопасти. В силу ортогональности собственных форм получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, связанных между собой только через аэродинамическую нагрузку:

$$\ddot{\delta}_j + p_j^2 \cdot \delta_j = \frac{A_j}{m_j}, \quad (8)$$

где

$$m_j = \int_{r_{г.ш.}}^R m(y_j)^2 dr;$$

$p_j$  - частота собственных колебаний лопасти по  $j$ -ому тону,

$$A_j = \int_{r_{г.ш.}}^R (T - mg) \cdot y_j dr.$$

Расчет аэродинамических сил, входящих в правую часть уравнения (8), выполняется в зависимости от аэродинамических коэффициентов подъемной силы  $C_y$  и силы сопротивления  $C_x$  от угла атаки профиля лопасти и числа Маха, полученных по результатам продувок в аэродинамических трубах. Вычисление коэффициентов деформации лопастей  $\delta_j$  выполняется методом численного интегрирования уравнения (8).

Под действием ветровой нагрузки лопасть вертолета, находящегося на стоянке, начинает движение в вертикальной плоскости. В зависимости от того, находится ли лопасть на ограничителе свеса или отошла от него, в решении (4) используются шарнирные или консольные формы колебаний. Коэффициенты деформации, определяемые из системы дифференциальных уравнений (8), также будут соответствовать шарнирным или консольным формам. При колебательном движении лопасти в момент изменения консольных форм  $y_j^K$  на шарнирные  $y_j^{III}$  и наоборот должно соблюдаться условие сопряжения решений. Это может быть получено путем обеспечения равенства перемещений и скоростей движения лопасти в момент смены форм. Обозначим перемещения и скорости для шарнирно опертой лопасти через

$$y^{III} = \sum_j \delta_j^{III} \cdot y_j^{III}, \quad (9)$$

$$\dot{y}^{III} = \sum_j \dot{\delta}_j^{III} \cdot y_j^{III}, \quad (10)$$

а для консольного закрепления

$$y^K = \sum_j \delta_j^K \cdot y_j^K, \quad (11)$$

$$\dot{y}^K = \sum_j \dot{\delta}_j^K \cdot y_j^K. \quad (12)$$

Приравнявая выражения (9), (11) для перемещений и (10), (12) для скоростей движения и учитывая угол  $\alpha_{yn}$ , получим после некоторых преобразований начальные условия для коэффициентов деформации и их производных в момент времени, когда лопасть поднимается с ограничителя свеса:

$$\delta_j^{III} = \frac{\int_{r_{г.ш.}}^R m \cdot y_j^{III} \cdot \sum_l \delta_l^K \cdot y_l^K dr + \int_{r_{г.ш.}}^R \alpha_{yn} \cdot r \cdot m \cdot y_j^{III} dr}{\int_{r_{г.ш.}}^R m \cdot (y_j^{III})^2 dr}, \quad (13)$$

$$\dot{\delta}_j^{III} = \frac{\int_{r_{г.ш.}}^R m \cdot \dot{y}_j^{III} \cdot \sum_l \dot{\delta}_l^K \cdot y_l^K dr}{\int_{r_{г.ш.}}^R m \cdot (y_j^{III})^2 dr}. \quad (14)$$

В момент касания ограничителя свеса, при опускании лопасти вниз, будем иметь

$$\delta_j^K = \frac{\int_{r_{г.ш.}}^R m \cdot y_j^K \cdot \sum_l \delta_l^{III} \cdot y_l^{III} dr - \int_{r_{г.ш.}}^R \alpha_{yn} \cdot r \cdot m \cdot y_j^K dr}{\int_{r_{г.ш.}}^R m \cdot (y_j^K)^2 dr}, \quad (15)$$

$$\dot{\delta}_j^K = \frac{\int_{r_{г.ш.}}^R m \cdot y_j^K \cdot \sum_l \dot{\delta}_l^{III} \cdot y_l^{III} dr}{\int_{r_{г.ш.}}^R m \cdot (y_j^K)^2 dr} \quad (16)$$

Таким образом, по формулам (13) и (14) вычисляются начальные условия при численном интегрировании уравнения (8) для момента времени, в который происходит изменение консольных собственных форм в решении (4) на шарнирные. Выражения (15) и (16) служат для вычисления начальных условий при обратной смене форм.

По описанной методике был проведен расчет деформаций и изгибающих моментов, действующих в лопасти несущего винта вертолета Ми-8 при штормовом ветре. Вертолет с невращающимся несущим винтом (угловая скорость вращения винта  $\omega = 0$ ) находится на стоянке и обдувается ветром. Направление ветра определяется азимутальным положением лопасти  $\varphi$  и углом наклона вектора скорости ветра к горизонту  $\alpha$  (рис.2). Скорость ветра изменяется во времени по заданному на рис.3 закону, который соответствует штормовому порыву  $V_B = V_{II}$ . На графике (рис.4) в этом же масштабе времени показано изменение прогиба конца лопасти. Из графика видно, что реакция лопасти на порыв ветра представляет собой затухающий во времени колебательный процесс.

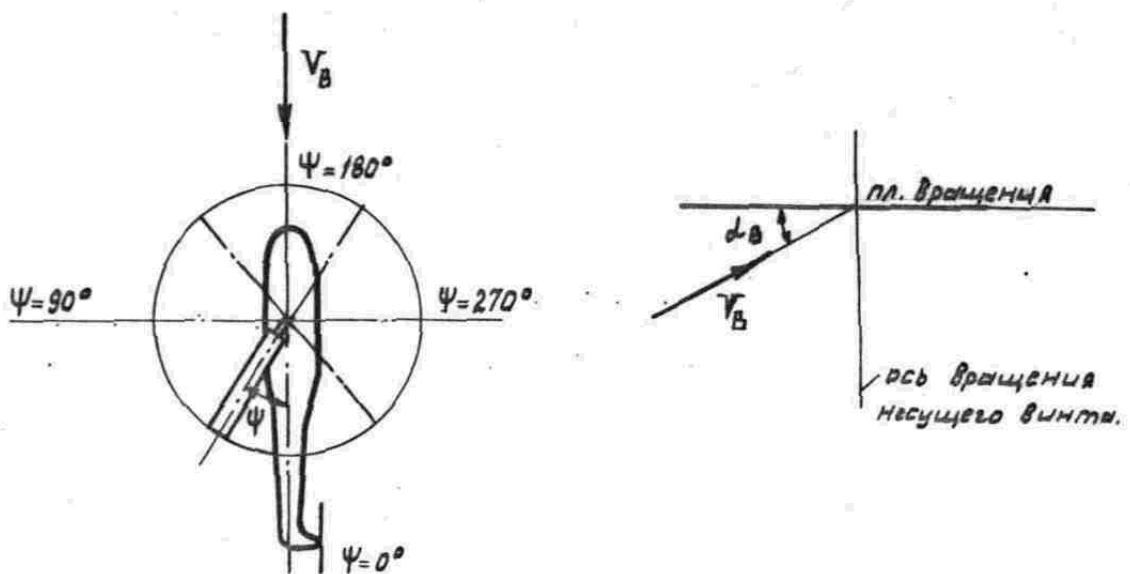


Рис. 2

Момент времени, соответствующий наибольшему отклонению конца лопасти, является расчетным. В это время имеют место максимальные деформации лопасти, а в лонжероне действуют наибольшие изгибающие моменты. Расчетным сечением для незашвартованной лопасти является сечение, находящееся на относительном радиусе  $\bar{r} = 0.308$ . В этом сечении при

изгибающем моменте равном  $M = 8000 \text{ Нм}$ , по результатам лабораторных испытаний, происходит потеря устойчивости нижней панели лонжерона.

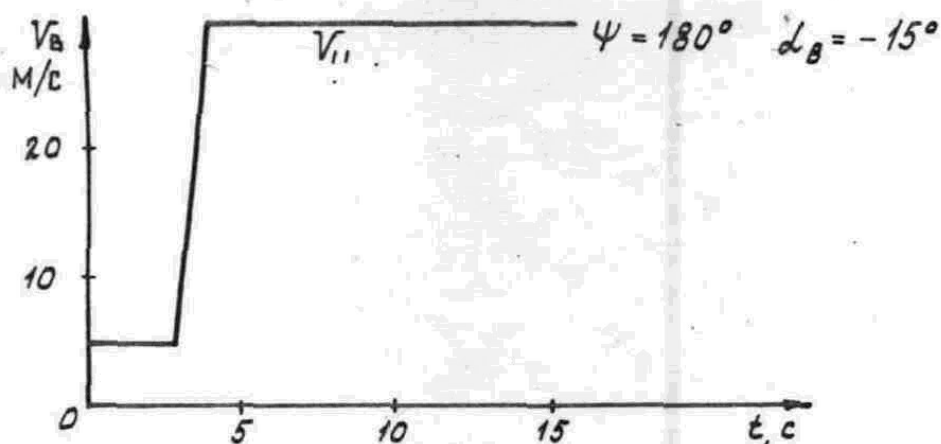


Рис. 3

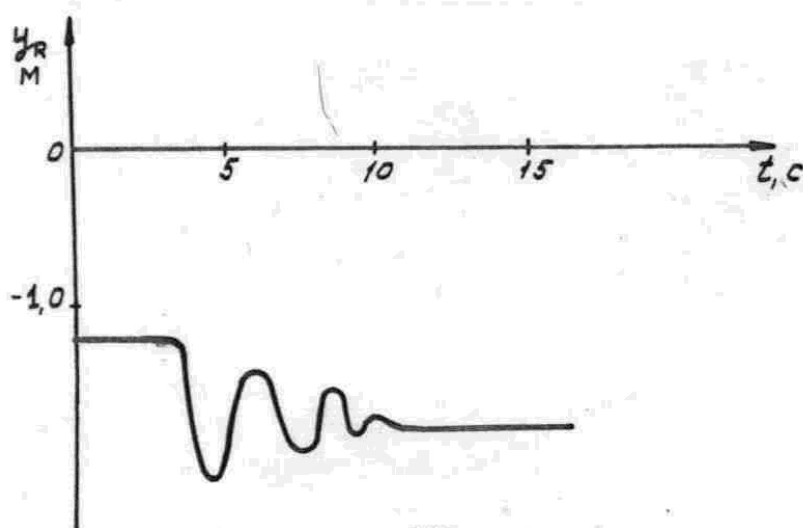


Рис. 4

Данную величину изгибающего момента будем считать расчетной. С целью определения азимута лопасти, на котором происходит наибольшая ее деформация, для заданного угла атаки винта ( $\alpha_B = -15^\circ$ ) проводился расчет для углов  $\psi = 0^\circ \dots 360^\circ$  (рис. 5). На рис. 6 представлен график максимальных изгибающих моментов в расчетный момент времени в функции азимута для того же значения угла атаки винта. Из этих двух графиков видно, что наибольший прогиб конца лопасти происходит тогда, когда лопасть находится на азимуте  $\psi = 90^\circ$ . На этом же азимуте действует и максимальный изгибающий момент. На рис. 7 показана форма упругой линии лопасти, полученная из этого расчета, которая соответствует моменту времени  $t = 7,55 \text{ c}$  (через  $3,5 \text{ c}$  после начала действия порыва). В это время лопасть находится на упоре ограничителя свеса,

и колебания происходят по консольным формам. На рис. 8 представлены графики прогиба конца лопасти, находящейся на азимуте  $\psi = 90^\circ$ , в функции угла атаки винта.

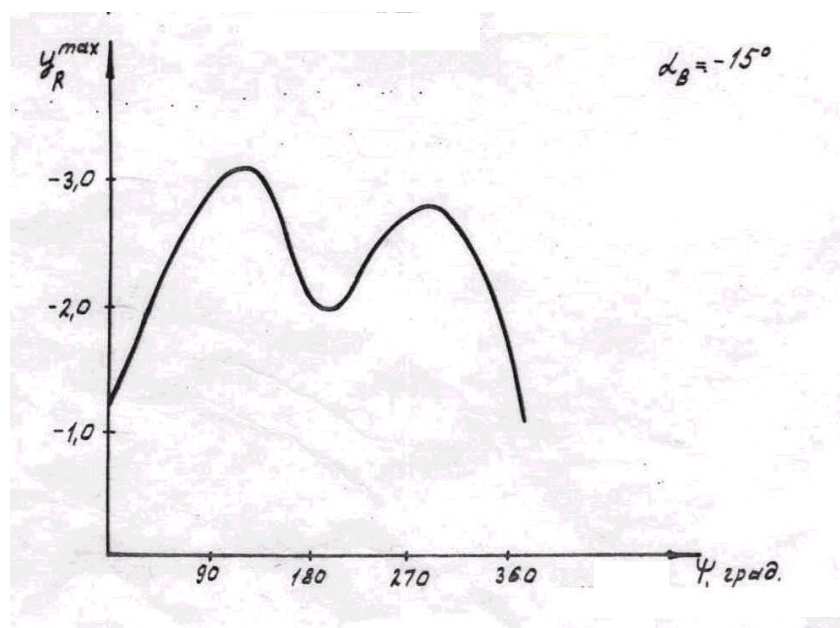


Рис.5

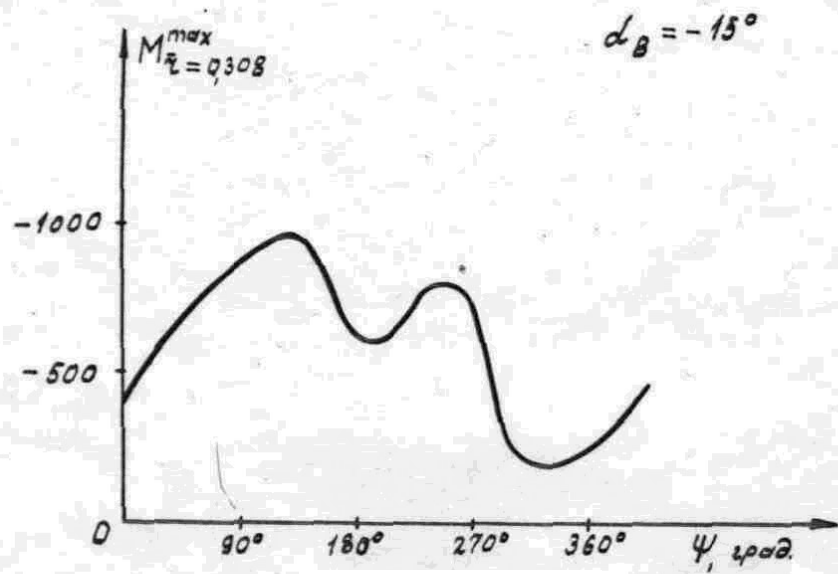


Рис. 6

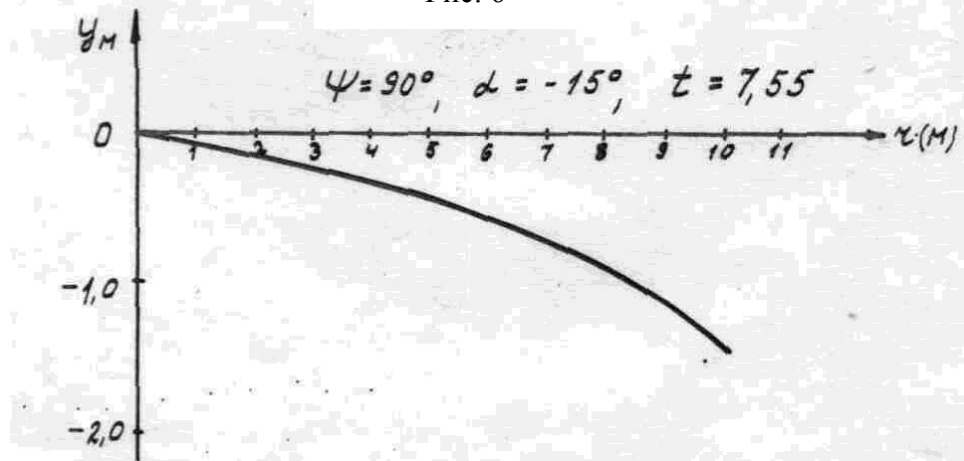


Рис. 7

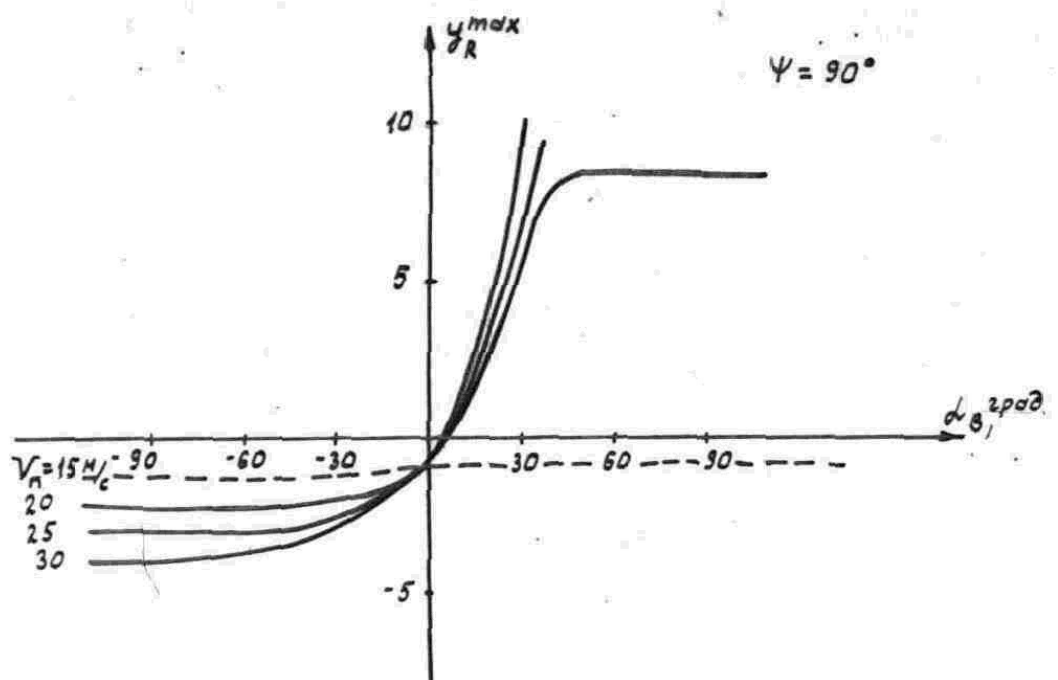


Рис. 8



Эти зависимости рассчитаны для порывов ветра разной интенсивности, когда скорость ветра нарастала по закону, представленному на графике рис. 3. Из графиков видно, что в зоне отрицательных углов атаки винта лопасть деформируется как консольно закрепленная в комле балка. Прогибы конца лопасти выходят на асимптоту, достигая максимальных величин при угле атаки винта, равном  $\alpha_B = -90^\circ$ . Для отрицательных углов атаки, превосходящих по модулю  $30^\circ$ , лопасть достигает уровня колес вертолета при скоростях порыва ветра  $V_{II} > 20 \text{ м/с}$ . При этой скорости ветра, но в области положительных углов атаки винта, лопасть будет заброшена вверх. Следует отметить, что в природе порывы ветра не постоянны по величине и направлению. К тому же втулка винта имеет ограничитель угла взмаха лопасти вверх, который не учтен в расчете. Поэтому представленные зависимости (особенно в области положительных углов атаки винта) и вытекающие из них ограничения следует рассматривать как взятые с запасом. На графиках рис. 9 представлены изгибающие моменты, действующие в расчетном сечении лопасти. Как видно из графиков, при скорости порывов ветра  $V_{II} > 20 \text{ м/с}$  и угле атаки  $\alpha_B = -90^\circ$ , изгибающий момент превышает величину, при которой нижняя панель лонжерона теряет устойчивость. В диапазоне положительных углов атаки винта изгибающий момент не велик, т.к. движение лопасти происходит по шарнирным формам. На рис. 10 показан график изменения напряжений в лонжероне лопасти в расчетном сечении для скорости порыва ветра  $V_{II} = 30 \text{ м/с}$ .

Для оценки влияния швартовки был сделан расчет деформаций и изгибающих моментов зашвартованной лопасти. В расчетной схеме лопасть представлялась как двухопорная шарнирно-опертая балка (рис. 1г). По результатам расчетов можно сделать вывод, что во всем диапазоне углов атаки винта максимальный прогиб при  $V_{II} = 40 \text{ м/с}$  не превышает по абсолютной величине  $y_{\max} = 0,55 \text{ м}$ . При этом максимальный изгибающий момент в точке максимального прогиба равен  $M = 4880 \text{ Нм}$ , что соответствует напряжению в лонжероне лопасти  $\sigma = 0,106 \text{ ГПа}$ . Таким образом, для обеспечения прочности и сохранения перемещений незашвартованной лопасти в допустимых пределах во всем диапазоне углов атаки винта скорость ветра не должна превышать  $V_{II} = 20 \text{ м/с}$ . Наиболее опасным азимутом при действии ветровых нагрузок является  $\psi = 90^\circ$ .

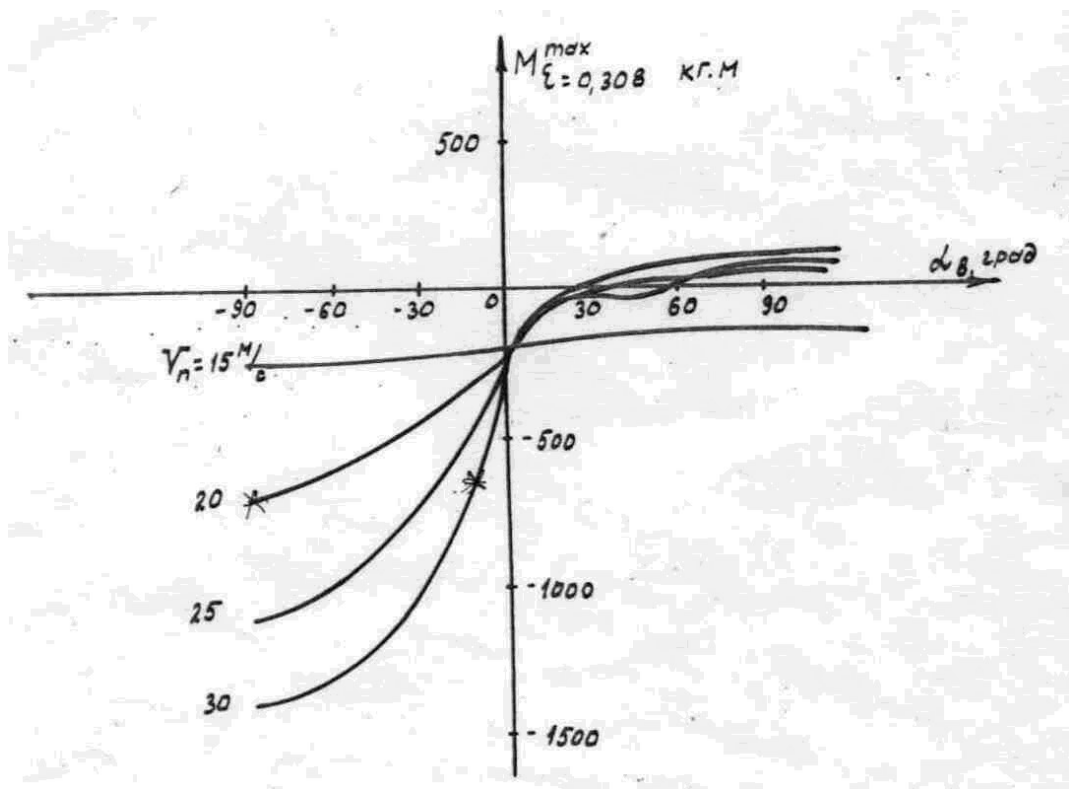


Рис. 9

Расчет зашвартованной лопасти проводился для швартовки, конструкция которой обеспечивает неподвижность ее конца. В этом случае упругие деформации лопасти и действующие в лонжероне изгибающие моменты находятся в допустимых пределах во всем диапазоне углов атаки винта до скорости ветра  $V_{II} = 40 \text{ м/с}$ .

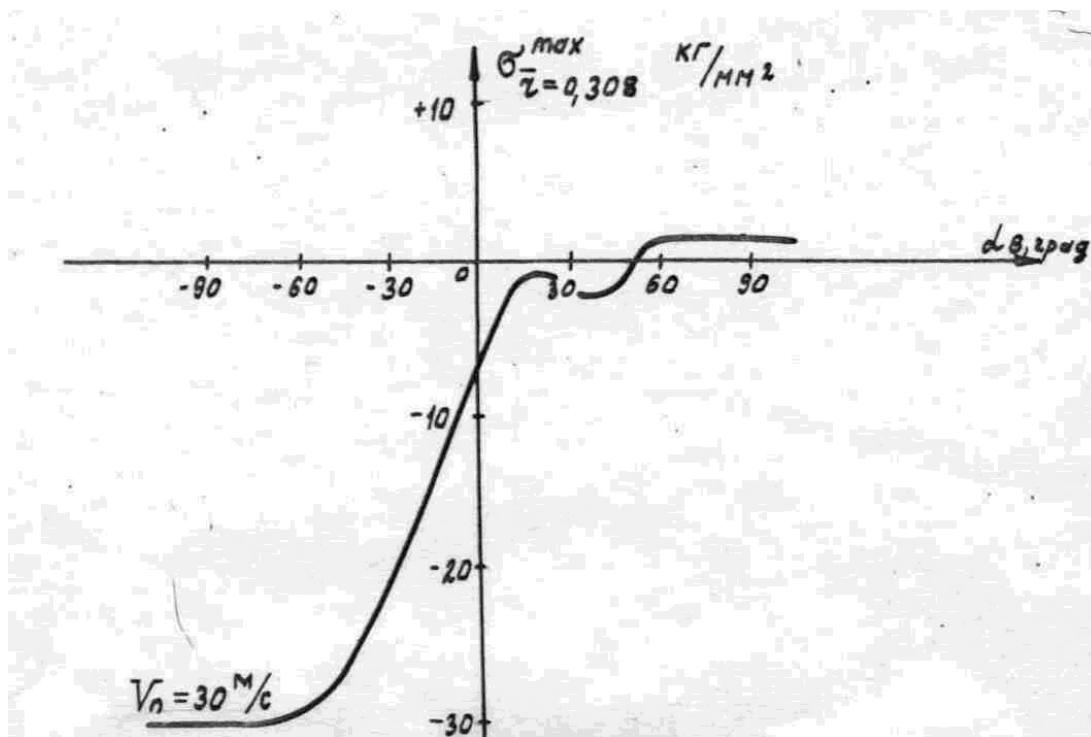


Рис. 10

#### Список литературы

1. Миль М.Л., Некрасов А.В., Браверман А.С., Гродно Л.Н., Лейканд М.А. Вертолеты. – М.: Машиностроение, 1967. - 424 с.

2. Михеев Р.А. Исследование динамической прочности лопастей несущего винта вертолета при горизонтальном полете и в неспокойном воздухе. / Р.А. Михеев, А.И Туркина [А.И. Братухина] // Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов. Всесоюзная конф., Москва. 1983: Тез. Докл. - МАИ, 1983. – с. 156.

---

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*Братухина Анна Ивановна, доцент кафедры строительной механики и прочности Московского государственного авиационного института (технического университета), к.т.н.*