

6
А67 МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ТУЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

на правах рукописи

Н.И.ЗАГРЕБЕЛЬНЫЙ

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ
И ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
РАБОЧИХ ЛОПАСТЕЙ
ШАХТНЫХ ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ
ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

(05.172 – горные машины)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула, 1971

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
ТУЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

на правах рукописи

Н.И. ЗАГРЕБЕЛЬНЫЙ

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАСТЕЙ ШАХТНЫХ ОСЕВЫХ
ВЕНТИЛЯТОРОВ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

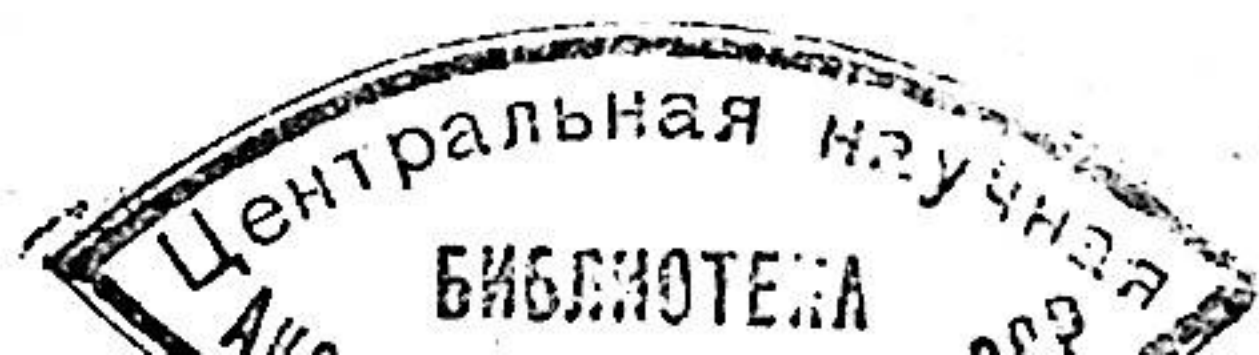
(05.172. Горные машины)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

г. Тула

1971 г.



Работа выполнена в Донецком научно-исследовательском
Институте горной механики и технической кибернетики
им. М.М.Федорова

Научный руководитель кандидат технических наук
В.ВАСИЛЬЕВ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, проф. С.Н.БОГОМОЛОВ

кандидат технических наук, доц. В.В.НИКУЛИН

Ведущее предприятие: Каменский машиностроительный завод.

Автореферат разослан 13. мая 1971 года

Защита диссертации
состоится 14. июня 1971 года

на заседании совета горного факультета Тульского
политехнического института (г. Тула, пр. Ленина, 92)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Ученый секретарь Совета
горного факультета,
кандидат технических
наук, доцент

Д.Г.СКАБИЧЕВСКИЙ

В В Е Д Е Н И Е

Директивы XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану
развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 гг. пре-
дусматривают ускоренное развитие угольной и горно-добы-
вающей промышленности, увеличение роста производи-
тельности труда и снижение себестоимости угля.

Задача повышения надежности и долговечности осе-
вых вентиляторов главного проветривания шахт отвечает
требованиям развития и перевооружения угольной промыш-
ленности. Надежная работа выпускаемых промышленностью осевых
вентиляторов обуславливается конструкцией рабочих лопа-
стей.

В настоящее время на осевых вентиляторах применя-
ется несколько типов лопастей, различающихся как конструк-
цией, так и аэродинамическими показателями. Большинство из
конструкций обладает недостатками, главными из которых сле-
дует считать низкую эксплуатационную стойкость, малую изно-
состойкость и коррозионную стойкость. Кроме того, некоторые ти-
пы вентиляторов, например, серии "В" обладают низкими аэро-
динамическими показателями. Ввиду этого возникла необходи-
мость замены клепаных лопастей вентиляторов серии "В" ли-
стовыми кручеными, имеющими более высокие к.п.д. и износо-
стойкость.

На основании изложенного следует, что задача экспериментального и теоретического исследования лопастей осевых вентиляторов на прочность и колебания имеет целью как повышение срока службы лопастей, так и улучшение их эксплуатационных качеств.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, общих выводов, приложений, содержащих акты внедрения результатов работы. Работа является частью большого комплекса исследований рабочих лопастей шахтных осевых вентиляторов, проведенных в ИГиМ и ТК им. М. М. Федорова.

В ГЛАВЕ I дается детальное обоснование актуальности темы на основании обзора существующих наиболее распространенных конструкций лопастей шахтных осевых вентиляторов как в СССР, так и за рубежом; опыта их работы на различных шахтах; известных в литературе исследований и методов расчета напряженного состояния и колебаний при действии на лопасти рабочих нагрузок.

Общими недостатками большинства лопастей являются многооперационная и трудоемкая технология их изготовления (например, сварно-клепаные лопасти), низкая износостойкость, а также невысокие аэродинамические качества (например, клепаемые лопасти серии "В").

Опыт эксплуатации осевых вентиляторов показал, что некоторые лопасти ненадежны в работе по причине низкой их прочности и вибростойкости. Так, литые лопасти из облегченного сплава вентилятора ВОКД-2,4, сварно-клепаные ВОКД-3 и листовые ВОКД-1,8 разрушаются в весьма короткий срок. Анализ свидетельствует о том, что разрушения происходят вследствие наличия концентраторов напряжений, а также из-за возможных

ошибок в технологии сварки, например, в листовых лопастях.

Лопасты сварно-клепаной конструкции обладают низкой износостойкостью, ввиду того, что профильная оболочка изготавливается из весьма тонкого металлического листа. Например, лопасти серии "В", имея толщину листа 3 мм, выходят из строя по причине износа и коррозии в среднем через 2-3 месяца.

В работе проведен анализ современных методов оценки напряженного состояния и колебаний лопастей осевых турбомашин. Важность вопроса обеспечения надежной работы лопастей осевых турбомашин привлекла внимание многих исследователей: С.А. Тумаркина, И.Т. Ильичева, И.И. Мееровича, А.В. Левина, А.Д. Коваленко, Б.Ф. Шорра, И.И. Малинина, И.М. Жумахова, С.М. Гринберга, П.И. Риза, А.И. Пожалостина, В.П. Югаева, Л.М. Качанова, А.П. Филиппова, Д.Д. Ульяницкого, В.Новацкого, Г.Блейха, М. Бартона, С.П. Тимошенко, И.А. Раскина и др.

Анализ работ по изучению колебаний и напряженного состояния лопастей турбомашин показывает, что расчетные схемы, применяемые для лопаток паровых турбин, вносят значительные погрешности при расчете лопастей вентиляторов, особенно сварно-клепаной конструкции, имеющей соизмеримые размеры по длине и ширине лопасти и весьма сложный закон изменения геометрических параметров по длине лопасти. Расчет компрессорных лопастей также является весьма приближенным ввиду различия в характере закрепления лопастей компрессора и вентилятора в рабочем колесе.

При расчете на колебания листовых лопастей, по-видимому, наиболее правильной является схема пологой открытой цилиндрической оболочки с частичным защемлением по части

одной из сторон о последующей экспериментальной оценкой влияния закрутки. Имеющиеся в литературе методы расчета касаются только консолидных полых цилиндрических оболочек.

Одним из самых существенных показателей машин является к.п.д. Созданы осевые вентиляторы, статический к.п.д. которых достигает 0,82-0,84. Однако, большое количество вентиляторных установок главного проветривания на шахтах СССР работает с низким статическим к.п.д. и неоправданно перерасходует значительное количество электроэнергии. Так, около 2400 осевых вентиляторов, работающих при среднеэксплуатационном к.п.д., равном 0,5, расходуют в год более 2,5 млрд. кВт-часов электроэнергии.

Повышение эксплуатационного статического к.п.д. этих вентиляторных установок может быть достигнуто несколькими способами, в частности, путем модернизации установки с применением новых рабочих лопастей. Последние должны обладать хорошими аэродинамическими показателями, иметь достаточную прочность и износостойкость, а также должны иметь простую технологию изготовления и малый вес. При этом следует иметь в виду, что количество вентиляторов, на которых возможна замена лопастей, весьма велико. Так, на шахтах Советского Союза используется около 500 вентиляторов серии "В", на которые ежегодно поставляется на запасные части около 20 тысяч лопастей.

Ввиду этого совместно ЛПИИТК им. М.М. Федорова, Тульским политехническим институтом и Каменским машиностроительным заводом были разработаны крученые листовые лопасти к вентиляторам серии "В".

Таким образом, основной задачей, поставленной в работе, является изучение профильных лопастей, обладающих низкой прочностью, и листовых лопастей вс тягаторов ВОКД-1,8 и серии "В" на прочность и колебания.

В ГЛАВЕ II приводятся результаты экспериментальных исследований динамической прочности следующих видов лопастей: сварно-клепанных ВОКД-3, ВОКД-1,8 и ВОД-30, а также литых лопастей ВОКД-2,4.

Исследования включают в себя: изучение вынужденных колебаний и напряженного состояния лопастей на действующем вентиляторе и определение динамических характеристик лопастей-собственных частот и форм колебаний.

Изучение вынужденных колебаний и напряженного состояния лопастей проводилось на аэродинамических стендах при различных режимах работы вентилятора. Испытания выполнены методом электро-тензометрии с использованием тензодатчиков, тензоусилителя ВАНЧ, токоусилителя и шлейфового осциллографа. Тензодатчики наклеивались прямоугольными розетками: главные деформации были получены путем пересчета.

Исследования собственных частот и форм колебаний лопастей проводилось на спроектированном в ИГиТК электромагнитном вибростенде резонансного типа, состоящем из U-образной станины, в которой укрепляется испытуемая лопасть, электромагнита, возбуждающего колебания лопасти, усилительной и регистрирующей аппаратуры.

Исследования лопастей ВОКД-3 проводилось на стенде Каменского машиностроительного завода. Установлено, что максимальные напряжения, возникающие у корня лопасти на ее рабочей поверхности, не превышают 500 кг/см^2 . На тыльной сто-

роне напряжения ниже вследствие изгиба лопасти. Величины напряжений при изменении режима работы вентилятора меняются в малых пределах. Возникающие в результате вибрации лопасти динамические напряжения составляют примерно 18% от величины максимальных статических напряжений. Установлено, что частота вынужденных колебаний лопасти находится в диапазоне 93 - 96 гц. (в зависимости от числа оборотов вентилятора). Низшая собственная частота колебаний лопасти равна 98 гц., отстройка от резонанса составляет около 3%. При изготовлении настройка лопастей на определенную частоту не производится, поэтому возможны отклонения в собственных частотах.

Таким образом, лопасти ВОКД-3, имея малую отстройку от резонанса, находятся в условиях, близких к резонансу.

Сварно-клепаные лопасти ВОКД - 1,8 испытывались для сопоставления с листовыми, о которых сказано ниже. Анализ напряжений, возникающих в лопасти, свидетельствует о том, что они не превышают по величине 620 кг/см^2 . Наибольшие напряжения получены у корня лопасти. Частоты вынужденных колебаний лопасти кратны 10-й и 11-й гармоникам по секундным оборотам ротора. Анализ свободных колебаний показал, что отстройка от резонанса составляет приблизительно 27%, лопасти работают в благоприятных условиях.

Испытания лопастей ВОД-30, проведенные для опытного вентилятора на отенде Каменского машиностроительного завода, показали, что напряжения в лопастях не превышают 475 кг/см^2 . Частота вынужденных колебаний равна 120 гц., а собственных - 135 гц. Таким образом, лопасти находятся в благоприятных условиях.

Литые лопасти ВОКД-2,4 изготавливаются из облегченного магниевых сплава ИЛ-5-Т4 (удельный вес $\gamma = 1,81$), который обладает следующими механическими свойствами:

$$\begin{aligned} \sigma_b &= 2200 \text{ кг/см}^2; & \sigma_T &= 850 \text{ кг/см}^2; & \sigma_{-1} &= 1000 \text{ кг/см}^2; \\ \sigma_{-1}' &= 800 \text{ кг/см}^2 & & & & \text{— для образцов с надрезом.} \end{aligned}$$

Сравнительная вибростойкость лопастей литой конструкции (из магниевых сплава) со сварно-клепаной определялась экспериментально следующим образом. На лопасти, укрепленной на массивном основании, установлен эксцентрик с грузом. При вращении эксцентрика на лопасть действует знакопеременная нагрузка. Испытания проводились в резонансном состоянии, когда скорость вращения эксцентрика и собственная частота колебаний лопасти равны.

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что литые лопасти, имея малую отстройку от резонанса, обладают низкой вибростойкостью по сравнению со сварно-клепаными. Для увеличения вибростойкости необходимо применять демпфирование лопастей в месте заделки, что приводит к увеличению долговечности на 65 - 70%, а также осуществить максимальную отстройку от резонанса.

В работе был проведен расчет собственных частот колебаний лопастей вентилятора ВОКД-3 с целью получения оптимальных конструктивных размеров при максимальной отстройке от резонанса. При расчете использован метод остаточного момента. Используя известные из сопротивления материалов зависимости между изгибающими моментами, кривизной изгиба, и поперечной распределенной (инерционной) нагрузкой, получены дифференциальные уравнения поперечных колебаний:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[E J_x(z) \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} + E J_{xy}(z) \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right] &= m(z) p^2 x \\ \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[E J_y(z) \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + E J_{xy}(z) \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} \right] &= m(z) p^2 y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Краевыми условиями для системы являются равенство нулю перемещений и углов поворота у корня лопасти и равенство нулю перерезывающих сил и изгибающих моментов на свободном конце. Вводя допущение, что лопасть — система с сосредоточенными массами, соединенными невесомыми упругими стержнями, и выполнив интегрирование дифференциальных уравнений (1) на участке $i-1$ -ой массы до i -ой массы, можно получить рекуррентные формулы:

$$\left. \begin{aligned} Q_{xi} &= Q_{xi-1} + m_{i-1} p^2 x_{i-1} \\ Q_{yi} &= Q_{yi-1} + m_{i-1} p^2 y_{i-1} \\ M_{xi} &= M_{xi-1} - Q_{yi} \Delta z \\ M_{yi} &= M_{yi-1} + Q_{xi} \Delta z \\ \theta_{xi} &= \beta_{xi} \left(\frac{M_{yi-1}}{2} + \frac{M_{yi}}{2} \right) + \beta_{xyi} \left(\frac{M_{xi-1}}{2} + \frac{M_{xi}}{2} \right) + \theta_{xi-1} \\ \theta_{yi} &= \beta_{yi} \left(\frac{M_{xi-1}}{2} + \frac{M_{xi}}{2} \right) + \beta_{xyi} \left(\frac{M_{yi-1}}{2} + \frac{M_{yi}}{2} \right) + \theta_{yi-1} \\ x_i &= \beta_{xi} \left(\frac{M_{yi-1}}{3} + \frac{M_{yi}}{6} \right) \Delta z + \beta_{xyi} \left(\frac{M_{xi-1}}{3} + \frac{M_{xi}}{6} \right) \Delta z + \\ &\quad + \theta_{xi-1} \Delta z + x_{i-1} \\ y_i &= \beta_{yi} \left(\frac{M_{xi-1}}{3} + \frac{M_{xi}}{6} \right) \Delta z + \beta_{xyi} \left(\frac{M_{yi-1}}{3} + \frac{M_{yi}}{6} \right) \Delta z + \\ &\quad + \theta_{yi-1} \Delta z + y_{i-1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $M_{xi}, M_{yi}, Q_{xi}, Q_{yi}$ — изгибающие моменты и перерезывающие силы соответственно в i -ом сечении;

$\theta_{xi}, \theta_{yi}, x_i, y_i$ — углы поворота и перемещения соответственно в i -ом сечении;

Δz — длина участка интегрирования;

$\beta_{xi}, \beta_{yi}, \beta_{xyi}$ — коэффициенты, выражающие зависимости между моментами инерции сечения, модулем упругости E и Δz .

Используются значения четырех переменных, получаемых из краевых условий на закрепленном конце, и четырех переменных — на свободном конце. Расчет проводится поэтапно:

- 1) Из каких-либо соображений задается значение круговой частоты p .
- 2) Используются рекуррентные формулы (2), начальные значения переменных и краевые условия, по которым вычисляются значения переменных на одном конце лопасти:

$$Q_{xn}, Q_{yn}, M_{xn}, M_{yn}$$

- 3) По полученным значениям переменных и краевым условиям на другом конце лопасти составляется система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Q_{xn}^I + Q_{xn}^{II} \bar{M}_{x0} + Q_{xn}^{III} \bar{Q}_{y0} + Q_{xn}^{IV} \bar{Q}_{x0} &= 0 \\ Q_{yn}^I + Q_{yn}^{II} \bar{M}_{x0} + Q_{yn}^{III} \bar{Q}_{y0} + Q_{yn}^{IV} \bar{Q}_{x0} &= 0 \\ M_{xn}^I + M_{xn}^{II} \bar{M}_{x0} + M_{xn}^{III} \bar{Q}_{y0} + M_{xn}^{IV} \bar{Q}_{x0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

которая решается относительно неизвестных: $\bar{M}_{x0}, \bar{Q}_{x0}, \bar{Q}_{y0}$.
Значение остаточного момента вычисляют по формуле:

$$M_{ост} = M_{уп}^I + M_{уп}^{II} \bar{M}_{хо} + M_{уп}^{III} \bar{Q}_{yo} + M_{уп}^{IV} \bar{Q}_{хо} = 0. \quad (4)$$

Значения круговых частот, для которых $M_{ост}$ обращается в нуль, являются собственными частотами системы.

Расчет проведен с использованием приводимой в работе АЛЮЛ - программы на ЭВМ "Урал-4". Сходимость результатов расчета с экспериментом удовлетворительна.

В ГЛАВЕ II приводятся результаты экспериментальных исследований листовых лопастей вентиляторов ВОКД-1,8 и ВУПД-1,8. Описываются конструктивные особенности трех вариантов лопастей ВУПД-1,8, которые рассмотрены с целью выбора оптимальной конструкции, обладающей необходимой прочностью. На рис. 1 представлен один из вариантов конструкции лопасти.

Исследования напряженного состояния и колебаний проведены по описанной выше методике на натурных вентиляторах. Получены эпюры главных напряжений σ_1 и σ_2 для обоих типов лопастей. Максимальные напряжения возникают у корня лопасти в месте приварки листа. По мере удаления к свободному концу напряжения резко падают по величине. У корня лопасти напряжения изгиба составляют примерно 75% от общей величины напряжений - в лопастях ВОКД-1,8 и 45% ВУПД - 1,8.

Установлено, что величина напряжений зависит от режима работы вентилятора: чем больше угол установки лопастей θ , тем выше уровень напряжений. При одном и том же угле θ напряжения растут по мере увеличения давления H и максимальны при помпаже. Аналогично изменяется величина динамических напряжений; причем в условиях помпажа последние возрастают примерно в 2,5 раза - в лопастях ВОКД-1,8, а в лопастях ВУПД-1,8 на 75%.

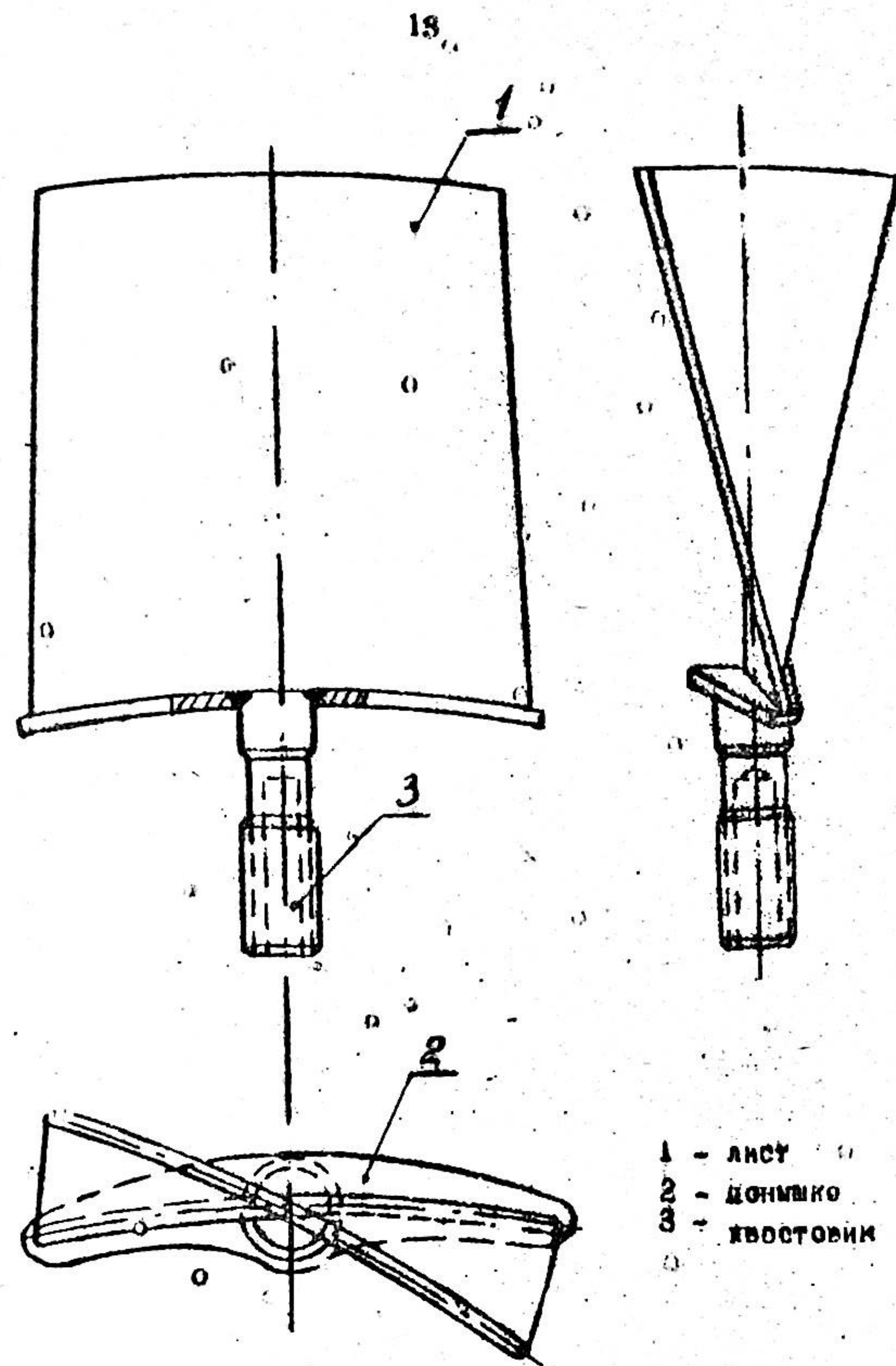


Рис.1. Конструкция листовой лопасти.

Таким образом, получено, что максимальные статические напряжения, возникающие при помпаже, равны 1185 кг/см² - в лопастях ВОУД-1,8 и 1120 кг/см² - в лопастях ВУПД-1,8, а полные суммарные напряжения - 1580 кг/см² и 1250 кг/см² соответственно.

Анализ осциллограмм вынужденных колебаний, одна из которых для примера представлена на рис.2, дал следующие результаты.

Вентилятор ВОУД-1,8. Спектр частот вынужденных колебаний лопастей обеих ступеней следующий:

$$\begin{aligned} \nu_1 &= 12 \\ \nu_2 &= 4n_1 \\ \nu_3 &= \frac{n_2}{2} \\ \nu_4 &= 13n_1 \end{aligned}$$

где 12 - число оборотов ротора в сек;

n - число лопаток направляющего аппарата.

В зависимости от режима работы вентилятора указанный спектр частот не изменяется. При увеличении давления H и переходе вентилятора в помпажный режим высокие частоты исчезают, а преобладающее значение имеет одна, близкая к собственной частоте лопасти. Была определена низшая собственная частота, которая равна 68,4 гц; логарифмический декремент колебаний при этом равен:

$$\delta = 0,0128$$

Таким образом, листовая лопасть при режимах работы вентилятора, когда $H = H_{max}$ и, особенно при помпаже, работает в условиях резонансного состояния. Отрицательным свойством листовых лопастей является малая величина декремента δ , что способствует развитию колебаний лопасти с большой амплитудой.

При испытаниях вентилятора ВОУД-1,8 производилось определение аэродинамических нагрузок, действующих на лопасть,

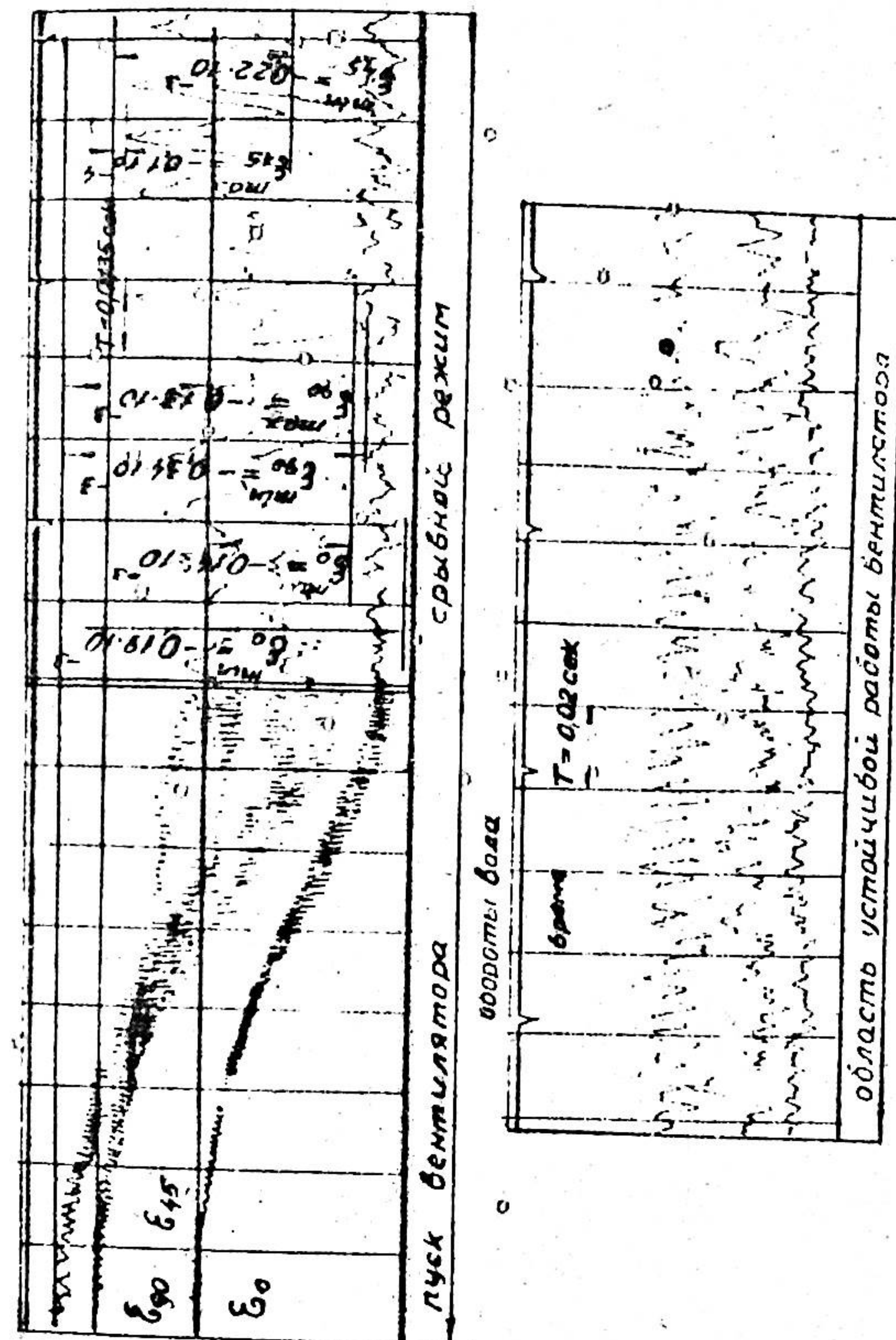


Рис.2 Осциллограмма деформации лопастей ВОУД-1,8

с использованием тензомембранных датчиков. В исследуемой точке в листовой лопасти просверлено отверстие, в котором устанавливалась мембрана с наклеенным на нее тензодатчиком. Таким образом, было измерено суммарное давление потока на лопасть. Была получена эпюра давления воздушного потока по поверхности лопасти. Величина максимального давления при

$$H = H_{max}:$$

$$P_{max} = 0,48 \text{ кг/см}^2$$

Установлено, что при изменении режима работы вентилятора величины давлений количественно изменяются, в то время как качественная картина остается неизменной.

Воздушный поток проходит через проточную часть вентилятора пульсируя. Анализ полученных осциллограмм позволил определить характер и величину пульсации. Установлено, что на лопасти первой ступени воздушный поток в условиях устойчивой работы вентилятора поступает плавно, без пульсации. При переходе вентилятора в помпаж имеет место пульсация с частотами, равными $13n$ и выше.

На лопасти второй ступени воздушный поток поступает пульсируя с частотами, равными $\frac{n^2}{2}$, $13n$, n^2 . Сопоставление осциллограмм показало, что наиболее низкая частота пульсации потока наблюдается при работе вентилятора в помпажном режиме и близка к собственной частоте колебаний лопасти. Это приводит к возбуждению значительных по величине динамических деформаций. В зоне устойчивой работы вентилятора отстройка от резонанса составляет приблизительно 18%.

Вентилятор ВУПД-1,8. Анализ осциллограмм вынужденных колебаний показал, что лопасти ступеней колеблются с одинаковыми частотами. В зоне устойчивой работы вентилятора и в пом-

паже основной является частота $\nu_f = 88$ гц. Собственная частота равна $\nu_{fc} = 70$ гц. Таким образом, отстройка от резонанса составляет приблизительно 19%.

В работе приводятся результаты лабораторных исследований по повышению несущей способности листовых лопастей с целью изучения влияния на несущую способность листовых лопастей некоторых технологических и конструктивных факторов.

Ввиду того, что в лопасти возникают значительные по величине напряжения, а отстройка от резонанса составляет 19%, повышение несущей способности лопасти осуществлялось следующими путями:

- уменьшение радиуса кривизны лопасти с целью увеличения изгибной жесткости;
- замена материала (стали 3) на низколегированную (09Г2С), имеющую лучшие механические характеристики, чем сталь 3, и обладающую хорошей свариваемостью;
- смещение центра инерции корневого сечения листа относительно оси хвостовика с целью уменьшения изгибающего момента, возникающего в результате действия центробежных сил;
- увеличение толщины листа лопасти с целью повышения собственной частоты лопасти и геометрических параметров сечения;
- проведение термической обработки лопасти для снятия остаточных напряжений, возникающих в результате сварки.

Исследования проводились посредством сравнительных установочных испытаний натуральных лопастей на усталостной машине ГИ-1. Каждая партия одинаковых лопастей из 4 - 6 штук подвергалась растягивающей переменной нагрузке P . Выбор такой схемы испытаний оправдан ввиду того, что на основании

тензометрических исследований напряжения в лопасти от центробежной (растягивающей) нагрузки составляют примерно 80% от величины суммарных напряжений, а испытания на усталость являются сравнительными. Полученные результаты позволили построить кривые ограниченной усталости в системе координат $P-\lg N$, где N - число циклов до разрушения лопасти; при этом коэффициент асимметрии цикла выбираю:

$$r = \frac{P_{min}}{P_{max}} = 0,33$$

На рис. 3 представлены усталостные характеристики лопастей, имеющих различные исследуемые факторы. Так, кривые 1 и 3 характеризуют различные материалы - сталь 3 и сталь 09Г2С соответственно. Из рисунка ясно, что применение низколегированной стали повышает усталостную прочность примерно на 60%. Увеличение толщины листа лопасти с 5 мм (кривая 1) до 6 мм (кривая 2) вызывает увеличение усталостной прочности на 18-20%. Две партии лопастей из стали 09Г2С были подвергнуты термической обработке: одна - высокому отпуску (до 670°C), вторая - нормализации (до 910°C). Как следует из рисунка, высокий отпуск увеличивает долговечность примерно на 45% (кривая 4), а нормализация - на 65-70% (кривая 5).

Проведенные мероприятия в совокупности позволили увеличить несущую способность лопастей в среднем в 1,8-2 раза.

Параллельно со всем комплексом исследований произведен анализ микроструктуры образцов, вырезанных из каждой партии лопастей. Как показали металлографические исследования, микроструктура сварного соединения без термической обработки весьма неоднородна: имеются зоны с мелкозернистым равномерным распределением по сечению феррита и перлита (основной металл) и зо-

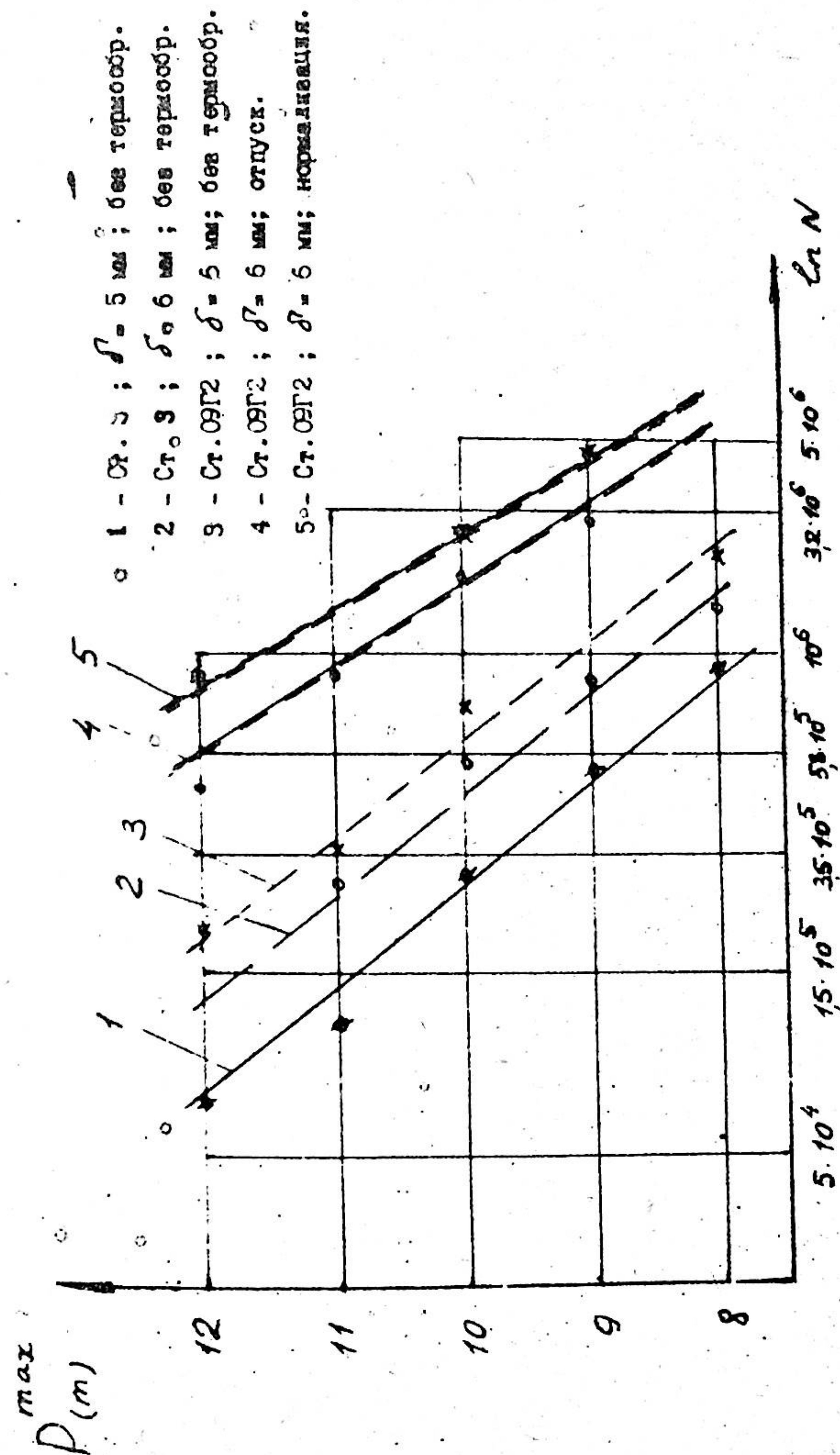


Рис. 3. Усталостные характеристики листовых лопастей.

ны с крупным зерном с игольчатым выделением избыточного феррита (зона сварки) что, как известно, обуславливается наличием значительных остаточных напряжений в кристаллической решетке стали. В образцах, прошедших термическую обработку, зерно измельчено и имеется более равномерное распределение феррита и перлита.

Глава IV. содержит расчет листовых лопастей на прочность и колебания. Листовые лопасти представляют собой консольные пологие оболочки, имеющие крутку профиля; причем заделка осуществляется по части одной из сторон. В настоящее время расчет такого типа оболочек отсутствует, а имеющиеся методы рассматривают колебания заделанной по одной из сторон цилиндрической открытой оболочки. Ввиду этого основной целью, поставленной в работе, является расчет прочности листовых лопастей, а также оценка консольной схемы расчета на колебания применительно к листовым лопастям.

Расчет на прочность включает в себя изучение распределения напряжений в зависимости от вида закрепления. Так, на примере прямоугольной пластинки постоянной толщины и растянутой равномерно распределенными нагрузками q_1 и q_2 , равными по величине центробежным, изучена концентрация напряжений в зависимости от участка защемления одной из сторон. Использовано основное дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = - q(y) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \quad (5)$$

Решение уравнения проводилось методом конечных разностей с использованием соответствующих граничных условий. Как известно, точность метода конечных разностей зависит от шага сетки. Поэтому подсчет напряжений производился с последовательным

уменьшением шага сетки до тех пор, пока дальнейшее уменьшение шага перестает значительно влиять на результаты.

В результате проведенного расчета получены эпюры главных напряжений, из которых следует, что у края пластинки, имеющего частичную заделку, наблюдается значительная концентрация напряжений. Так, при заделке, равной $1/5$ длины стороны коэффициент концентрации составляет примерно 4,65. Следует иметь в виду, что избранная схема расчета пластинки на растяжение вносит значительную погрешность, учитывая, что оболочка обладает примерно такой же жесткостью на растяжение, в то время как на изгиб жесткости оболочки и пластинки различны.

Расчет напряженного состояния лопасти на изгиб от действия аэродинамических нагрузок рассматривается для защемленной по части стороны пологой цилиндрической оболочки, прямоугольной в плане. На оболочку действует нормальная распределенная нагрузка, определенная экспериментально. Исходными являются урав-

нения пологой цилиндрической оболочки:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \beta^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \alpha \partial \beta} + \mu \frac{\partial w}{\partial \alpha} &= - \frac{1-\mu^2}{E\delta} R^2 X \\ \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha \partial \beta} + \frac{\partial^2 v}{\partial \beta^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial w}{\partial \beta} &= - \frac{1-\mu^2}{E\delta} R^2 Y \\ \mu \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{\partial v}{\partial \beta} + c^2 \nabla^2 w + w &= - \frac{1-\mu^2}{E\delta} R^2 Z \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $c^2 = \frac{\delta^2}{12R^2}$; X, Y, Z - компоненты вектора интенсивности поверхностной нагрузки.

Задача решается методом конечных разностей. Общий ход решения таков. Оставляются уравнения (6) в конечных разностях для каждого узла. При этом, если из граничных условий известны искомые величины на контуре, то уравнения для контурных точек не записываются. Во все или часть уравнений входят неизвестные во внеконтурных узлах сетки, которые необходимо выразить через внутриконтурные значения искомых функций. Для этого используются граничные условия:

жесткая заделка края:

$$u = v = w = \frac{\partial w}{\partial n} = 0 \quad (7')$$

свободный край:

$$\left. \begin{aligned} T_n &= B \left[\frac{\partial u}{\partial n} + \mu \frac{\partial v}{\partial \tau} - \mu \delta^2 w \right] = 0 \\ T_{nn} + \frac{\partial H}{\partial \tau} &= -D \left[\frac{\partial^3 w}{\partial n^3} + (2-\mu) \frac{\partial^3 w}{\partial n \partial \tau^2} \right] = 0 \\ S &= B \frac{1-\mu}{2} \left[\frac{\partial v}{\partial n} + \frac{\partial u}{\partial \tau} \right] = 0 \\ M_n &= -D \left[\frac{\partial^2 w}{\partial n^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} \right] = 0 \end{aligned} \right\} (7'')$$

Решение проводилось для единичной нагрузки. Для определения величины напряжений от аэродинамических сил следует напряжения от единичной нагрузки умножить на величину аэродинамической силы.

Проведенные расчеты напряженного состояния листовых лопастей позволили определить уровень напряжений, возникающих от действия центробежных и аэродинамических сил. Расчет даст заниженный на 25% результат в сравнении с экспериментом.

Расчет на колебания проводился с целью оценки влияния краевых условий на собственные частоты листовых лопастей. В качестве расчетной схемы использована консольная оболочка с варьируемой величиной заделки. Рассмотрены только изгибные колебания. Схема решения, проводившегося методом конечных разностей, аналогична описанной ранее. Получено вековое уравнение в виде:

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \alpha & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \alpha & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} - \alpha & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} - \alpha \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

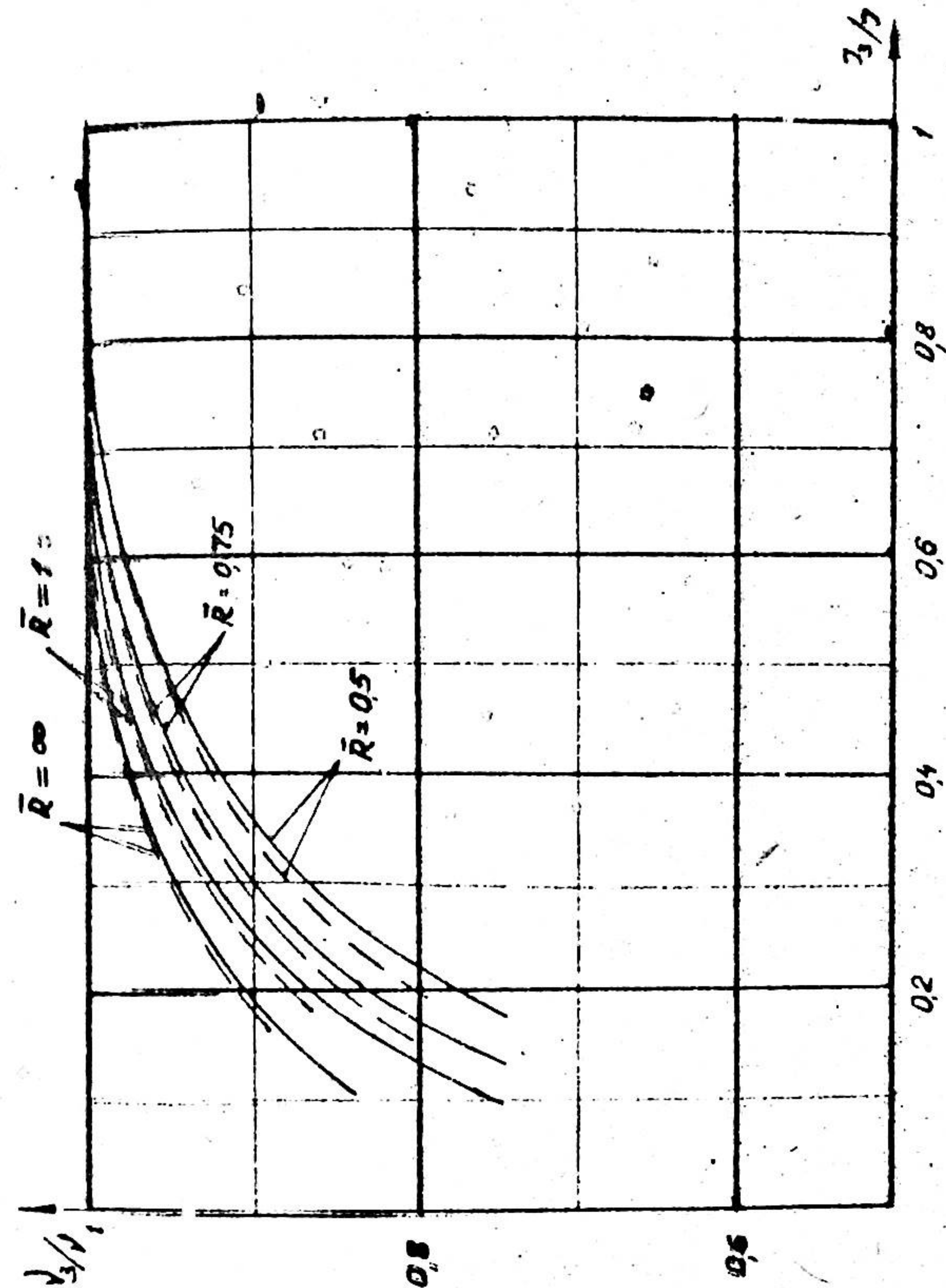


Рис. 4. Влияние краевых условий на собственные частоты.

где α — собственные значения.

При проведении всех вычислительных операций использовалась ЭВМ "Урал-4".

Полученные результаты приведены в графике зависимостей собственных частот изгибных колебаний от величины заделки (см. Рис. 4). По оси абсцисс откладывались отношения моментов инерции сечения заделки на участке к моменту инерции сечения оболочки относительно минимальной оси жесткости полного сечения листа; по оси ординат — отношения собственных частот оболочки заделанной по участку к собственным частотам оболочки заделанной по всему краю. Получены кривые для нескольких радиусов кривизны оболочки, а также для пластинки; причем на графике указаны отношения величин радиусов оболочек к радиусу лопасти в корневом сечении.

В работе приведены результаты внедрения. Так, Донским рудоремонтным заводом (Тульская область) изготавливаются листовые лопасти к вентиляторам ВОКЛ-1,8 и 1,5 с учетом результатов и рекомендаций данной работы.

На шахте № 1 /зубовская/ комбината "Новомосковскуголь" эксплуатируется с 1 декабря 1970г. вентиляторная установка серии "В" с листовыми лопастями, изготовленными с учетом результатов диссертационной работы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

1. Анализ современных методов расчета на прочность и колебания лопаток ротативных машин свидетельствует о том, что в настоящее время отсутствуют достаточно простые и надежные методы расчета поворотных лопастей, имеющих сложную форму поперечного сечения, например, сварно-клепаной конструкции.

Существующие методы неприемлемы также для расчета листовых лопастей ввиду особенности их закрепления в рабочем колесе.

2. Лопости некоторых типов осевых вентиляторов обладают недостаточной прочностью в условиях действия значительных статических и динамических нагрузок. Наличие различных концентраторов напряжений приводит к возникновению усталостных трещин.

Кроме того, осевые вентиляторы, оснащенные профилированными лопастями, в настоящее время не соответствуют современным требованиям по статическому эксплуатационному к.п.д., например, вентиляторы серии "В".

3. Создание листовых закрученных лопастей, имеющих значительно больший к.п.д., упрощенную конструкцию и технологию изготовления, а также меньший вес, устраняет недостатки, присущие сварно-клепаным лопастям. Основным недостатком листовых лопастей, препятствующим их широкому применению в промышленности, является их ограниченная несущая способность.

4. Расчет лопастей сварно-клепаной конструкции на колебания показал, что при вычислении первых двух собственных частот поперечных колебаний наибольшую точность дает метод остаточного момента. Решение указанной задачи выполнено на ЭВМ "Урал-4".

В теоретической части работы выполнен анализ напряженного состояния и колебаний листовых лопастей. Расчет на прочность, выполненный методом конечных разностей показал, что наибольшие напряжения ($\sigma_{max} = 1350 \text{ кг/см}^2$) возникают вблизи корневого сечения лопасти.

Расчет свободных колебаний лопастей позволил установить зависимости между собственными частотами и величиной участка заделки лопасти. Одновременно в работе выполнен расчет нижней собственной частоты консольной оболочки вариационным методом.

5. В работе приведены сравнительные результаты экспериментальных исследований динамической прочности лопастей некоторых типов вентиляторов: ВОКЛ-3; 2,4; 1,8; ВОД-30. Экспериментальные

исследования выполнены на действующих вентиляторах при их испытании на стендах Каменского машиностроительного завода и института Донгипроуглемаш. Исследования показали, что по напряженному состоянию лопасти указанных типов имеют достаточно высокий запас прочности ($\sigma_{max} = 500 - 700 \text{ кг/см}^2$); однако лопасти, например, вентиляторов ВОКД-3 и 2,4 имеют сравнительно низкую вибростойкость по причине весьма малой отстройки от резонанса, что достаточно близко соответствует теоретическим выводам.

6. Теоретические исследования динамической прочности листовых лопастей вентилятора ВОКД-1,8, выполненные тензометрированием натурального образца машины на аэродинамическом стенде, показали, что у корневого сечения возникает весьма высокие напряжения ($\sigma_{max} = 1200 \text{ кг/см}^2$). Коэффициент динамичности в зоне устойчивой работы вентилятора составляет $K_d = 1,1$; а при работе в срывном режиме $K_d = 1,9$; при этом лопасти работают в резонансных условиях.

Металлографические исследования темплетов, вырезанных вблизи сварных швов, показали непровары и переход металла. Таким образом, недостаточно отработанная технология сварки в значительной степени снижает прочность конструкции.

Повышение несущей способности лопастей ВОКД-1,8 возможно при конструктивном изменении, позволяющем увеличить отстройку от резонанса (например, изменением толщины листа и его кривизны), а также путем улучшения технологии сварки.

7. Экспериментальные исследования прочности первой партии листовых лопастей вентиляторов серии "В", выполненные на стенде Каменского машиностроительного завода, показали, что наибольшие напряжения возникают у заделки лопасти.

($\sigma_{max} = 1180 \text{ кг/см}^2$). Отстройка от резонанса составляет 19%, а наибольший коэффициент динамичности в зоне устойчивой работы вентилятора составляет $K_d = 1,5$; в срывной зоне - $K_d = 1,4$.

Усталостные испытания позволили найти пути повышения несущей способности лопастей в 1,5 - 2 раза:

- изменение толщины листа ($\delta = 6 \text{ мм}$ вместо $\delta = 5 \text{ мм}$);
- применение хорошо свариваемой стали (09Г2 вместо ст.3) имеющей механические характеристики выше примерно вдвое;
- термическая обработка с целью снятия остаточных напряжений от сварки;
- уменьшение радиуса кривизны корневого сечения с целью увеличения изгибной жесткости и частоты собственных колебаний;
- применение накладки в зоне соединения листа с хвостовиком с целью увеличения площади поперечного сечения.

8. Опытная партия листовых лопастей, изготовленная Каменским машиностроительным заводом с учетом рекомендаций данной работы, с первого декабря 1970г. установлена на действующем вентиляторе ВУП-1,8 комбината "Новомосковскуголь" (шахта № 1 "Зубовская").

Донским рудоремонтным заводом (Тульская область) изготавливаются листовые лопасти к вентиляторам ВОКД-1,8 и 1,5 с учетом результатов работы.

По диссертационной работе опубликованы следующие материалы:

1. Конструкция и прочность лопастей осевых вентиляторов главного проветривания. Сб. "Угольное и горнорудное машиностроение", НИИИНФОРТЕХМАШ, 2-68-3, М., 1968

2. Экспериментальные исследования прочности листовых и стеклопластиковых лопастей шахтных осевых вентиляторов главного проветривания. Инф. ЦНПИУГОЛЬ, № 132, 1966.

3. Вибростенд для определения собственных частот и форм колебаний лопаток шахтных осевых вентиляторов. "Вопросы горной механики", изд-во "Недра", М., № 23, 1971.

4. Повышение несущей способности листовых лопаток шахтных осевых вентиляторов. Сб. "Угольное и горнорудное машиностроение", НИИИНФОРМТЕХНАШ, 2-71-17, М., 1971.

5. О характере аэродинамических нагрузок, действующих на рабочие лопатки шахтного осевого вентилятора. Сб. "Горные машины и автоматика", № 3, М., 1971.

6. Анализ причин разрушения листовых лопаток вентилятора ВОВД-1,8, "Вопросы горной механики", № 26, (в печати).

7. Влияние краевых условий на собственные частоты изгибных колебаний листовых лопаток шахтных осевых вентиляторов. "Вопросы горной механики", № 27, (в печати).

8. Экспериментальные исследования динамической прочности листовых лопаток вентилятора ВОВД-1,8. Сб. "Горные машины и автоматика", (в печати).

О результатах диссертационной работы доложено:

1. На Всесоюзной научно-технической конференции по вентиляции и вентиляторостроению. г. Днепропетровск, 1968

2. На техническом совещании при начальнике СКУ Каменского машиностроительного завода, 1969.

3. На техническом совещании отдела шахтных вентиляторов ИГМТК им. М. М. Федорова с участием Тульского политехнического института, ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского, Каменского машиностроительного завода, 1969.

БП 05631. Подписано к печати 12.У.1971г.

Формат 60x90 1/16. Объем 1,25 печ.л.

Тираж 120 экз.

Заказ 161.

Институт ДОНУГИ. Донецк, Артема, 114