УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ЦАГИ

Том XX 1989 № 6

УДК 629.735.45.015.3.035.62

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МГНОВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СКОРОСТИ ПО ДИСКУ НЕСУЩЕГО ВИНТА ПРИ МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЯХ КОЭФФИЦИЕНТА РЕЖИМА ЕГО РАБОТЫ

В. Э. Баскин, В. П. Бутов, Л. С. Павлов

Опытами подтверждены результаты прошлых исследований о наличии существенно неравномерных скосов потока и получены ранее неизвестные резкие колебания модуля вектора скорости потока, набегающего на сечения лопасти.

Сопоставлением результатов измерений и визуальных исследований установлена причина этих колебаний, заключающаяся во взаимодействии вблизи азимутов 90° и 270° вихрей, сошедших с концов лопастей.

За время режимного полета вертолета от взлета и до посадки несущий винт проходит все скорости поступательного перемещения, начиная с нулевой. При этом на малых скоростях полета отмечается особое состояние вертолета: повышенные вибрации, чрезмерные напряжения в конструкции лопастей и др. Утвердилось мнение, что эти отрицательные явления обусловлены неравномерностью распределения индуктивных скосов потока по диску несущего винта [1]. О модуле вектора скорости обычно полагали, что он изменяется только в соответствии с кинематикой движения лопасти и вертикальной составляющей скорости.

Как показали проведенные опыты, это предположение не оправдывается, перепады модуля еще более значительны, чем перепады скосов.

Перед рассмотрением результатов опыта следует сделать краткое замечание об условиях проведения измерений. В опытах с несущим винтом в аэродинамических трубах поток в зоне винта формируется в результате сложного движения, состоящего из переносного, создаваемого потоком трубы, и относительного, создаваемого вращением лопастей. Поэтому результаты опытов по исследованию возмущенного потока зависят от способа измерения его параметров: скосов и скоростных напоров.

На практике используют как инерционные приборы в виде пневмотрубок и жидкостных манометров, так и малоинерционные в виде термоанемометров или тех же пневмотрубок, снабженных электрическими преобразователями давления (датчиками) и регистрирующей электронной аппаратурой. Первые, в основном, используются для измерения параметров переносного движения, вторые — относительного. Результаты опытов, обсуждаемые ниже, получены обоими видами приборов в разное время на модели несущего винта. Наряду с результатами измерений приведены фотографии с изображением формы вихрей, сошедших с концов лопастей. Они получены с помощью дыма, выпускаемого в полете из концов четырехлопастного несущего винта диаметром 21 м. Визуальные исследования позволяют наглядно представить характер возмущений.

Как показывают визуальные исследования, на висении возмущения потока в переносном и относительном движениях выглядят по-разному: в первом случае течение выглядит, как струйное (рис. 1, *а*), а во втором видны возмущения в виде вихрей (рис. 1, *б*), сошедших с концов лопастей [3, 4]. В первом случае скорость возмущенного течения вблизи диска винта измерялась инерционным прибором (пневмотрубка

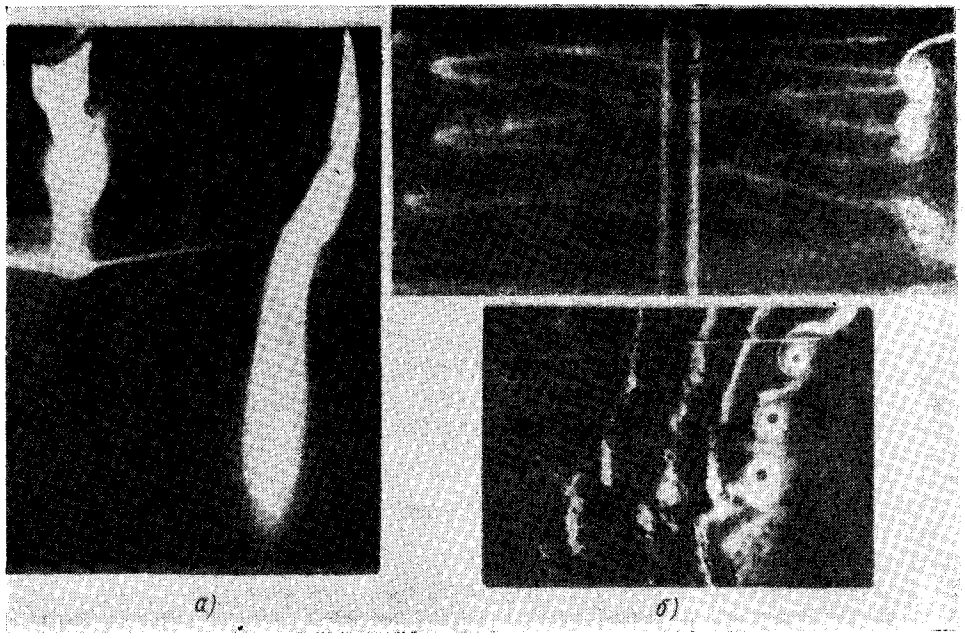

а)
б)

Рис. 1

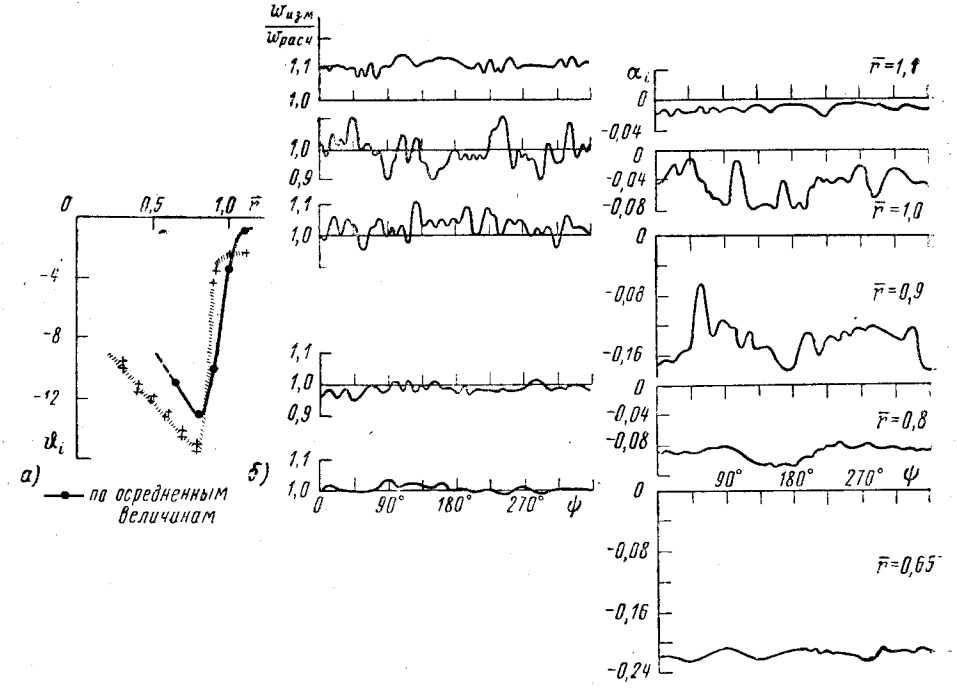

$\omega_{изм}/\omega_{расч}$
1,1
1,0
0,9
α_i
$\bar{r}=1,1$
$\bar{r}=1,0$
$\bar{r}=0,9$
$\bar{r}=0,8$
$\bar{r}=0,65$
0
-0,04
-0,08
-0,16
-0,24
0,5
1,0
$\bar{r}$
-4
-8
-12
ϑ_i
а)
по осредненным величинам
б)
90°
180°
270°
ψ

Рис. 2

с жидкостным манометром) в неподвижной, земной, системе осей координат. Результаты измерения приведены на рис. 2, *а* (штрихи) в виде экспериментальной зависимости $v_i(\bar{r})$, показывающей изменение осредненной индуктивной скорости v_i [м/с] в зависимости от изменения относительного радиуса $\bar{r}=r/R$. Видно, что по периферии диска ($0{,}8<\bar{r}<1{,}1$) величина осредненной индуктивной скорости резко возрастает от $v_{i\,\min}$ до $v_{i\,\max}$.

Во втором случае измерялась скорость возмущенного течения по диску винта при помощи вращающихся вместе с лопастями пневмотрубок и датчиков с последующей записью электрических сигналов от датчиков на ленту осциллографа. Пневмотрубки следовали за лопастью на расстояниях, соответствующих углу смещения 90°. Результаты измерения приведены на рис. 2, *б*, в виде экспериментальных зависимостей $w_{изм}/w_{расч}=f_1(\psi)$ и $\alpha_i=f_2(\psi)$, показывающих изменение относительной величины измеренной скорости $w_{изм}$ в плоскости вращения к расчетной $w_{расч}=\omega r$ и скосов потока $\alpha_i \approx v_i/w_{изм}$ по азимуту на периферии диска ($0{,}65\leqslant\bar{r}\leqslant 1{,}1$). Видно, что осредненные за оборот v_i изменяются по радиусу по тому же **закону**, как и в первом случае (рис. 2, *а*, штрихи), а мгновенные $w_{изм}/w_{расч}$ и α_i испытывают несистематические высокочастотные колебания с амплитудой примерно до 0,2 по скорости и до 0,08 по скосу. Область пульсаций совпадает с вихревой дорожкой. Величина скорости $w_{изм}$ колеблется в зоне диска винта около расчетного $w_{расч}$, а вне диска существенно (~ на 10%) превосходит расчетную. Увеличение скорости за диском происходит из-за известного эффекта подсасывания.

От висения к полету с горизонтальной скоростью вертолет переходит от нулевой до режимной скорости.

При этом стационарное обтекание лопасти на висении преобразуется в обтекание с постепенно усиливающейся нестационарностью при горизонтальном полете. Соответственно претерпевает изменения состояние потока в зоне винта. Эти изменения можно условно разделить на три характерных разновидности.

В диапазоне относительных скоростей $\bar{v}=v/\omega R$ от 0 до ~0,03 из-за малой горизонтальной скорости происходит деформация вихревого цилиндра, образованного ранее на висении. Он, вероятно, скашивается по направлению вектора горизонтальной скорости. В результате в переносном движении течение, как и на висении, остается струйным, а осредненная индуктивная скорость уменьшается на передней ($90°<\psi<270°$) и возрастает на задней ($270°<\psi<90°$) половинах диска. В относительном движении на передней части диска сохраняются высокочастотные пульсации скоростного напора, как и на режиме висения, а на задней — пульсации отсутствуют (измерения не приводятся).

В диапазоне относительных скоростей от 0,03 до ~0,1 вихревой цилиндр оплющивается настолько, что в пределах диска в зонах азимутов 90° и 270°, вихревые жгуты, сошедшие с концов лопастей, из-за повышенной плотности расположения, взаимодействуя, дают начало иной, отличной от циклоидальной в плане, форме вихрей (рис. 3, 5). В результате на передней половине диска винта видны раздельные вихри, задняя половина, исключая азимуты 90° и 270°, освобождается от вихрей. а за диском по бокам тянутся сгустки, соединенные перемычками.

Измерения вращающимися насадками скосов потока и модуля вектора скорости по диску двухлопастного несущего винта диаметром 2,54 м показывают (рис. 4, 6), что в зонах деформации концевых вихрей наблюдается резкое изменение не только углов скоса потока, а и модуля вектора скорости, лежащего в плоскости диска. Если размах колебания угла скоса не превосходит 0,4, то размах колебания модулей скорости составляет 0,7. Следовательно, на некоторых режимах полета вклад изменения модуля в характер изменения аэродинамической нагрузки на лопасти более значителен, чем скоса, так как аэродинамическая нагрузка в сечении лопасти пропорциональна углу атаки и квадрату модуля вектора скорости.

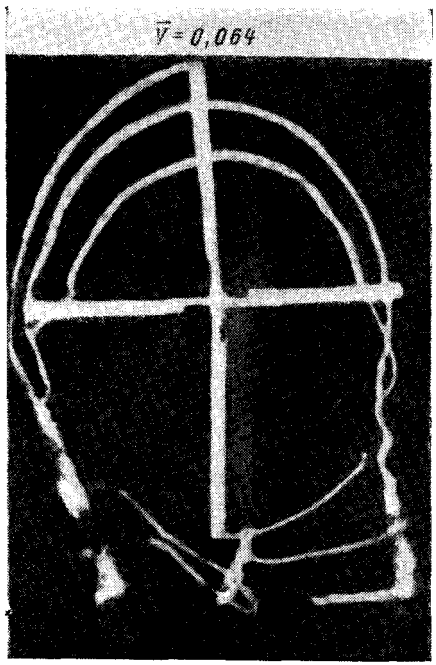


Рис. 3

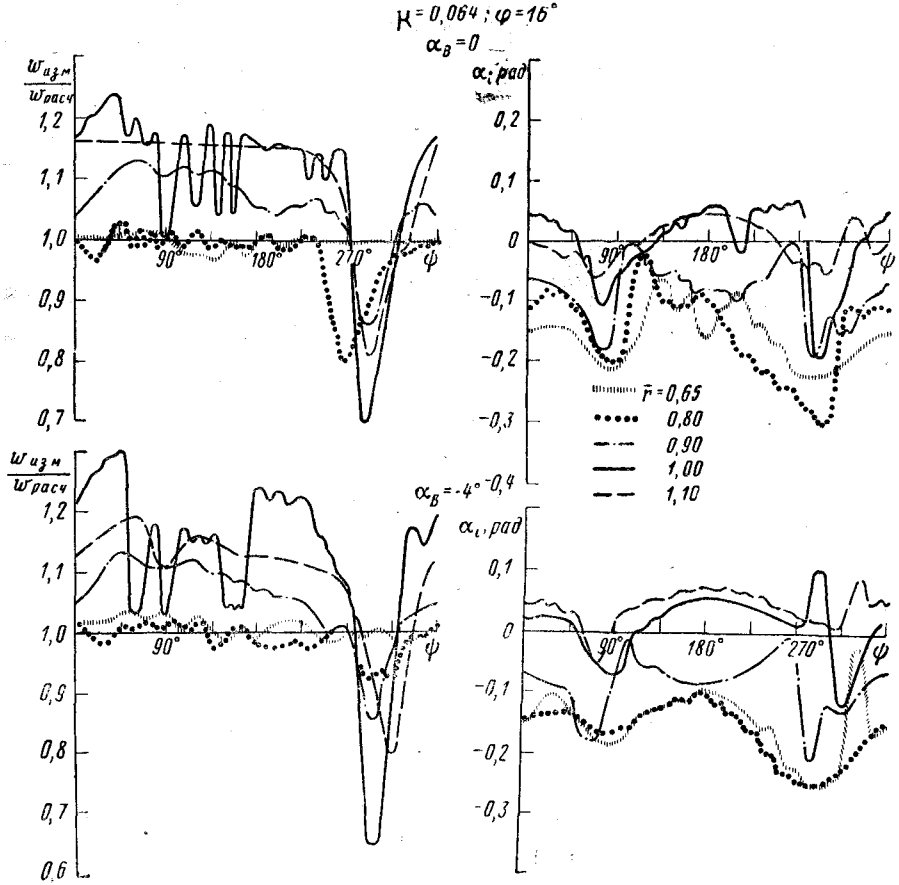

μ = 0,064 ; φ = 16°
α_B = 0
α_B = -4°
w_изм / w_расч
α_i, рад
ψ
90°
180°
270°
r̄ = 0,65
0,80
0,90
1,00
1,10

Рис. 4

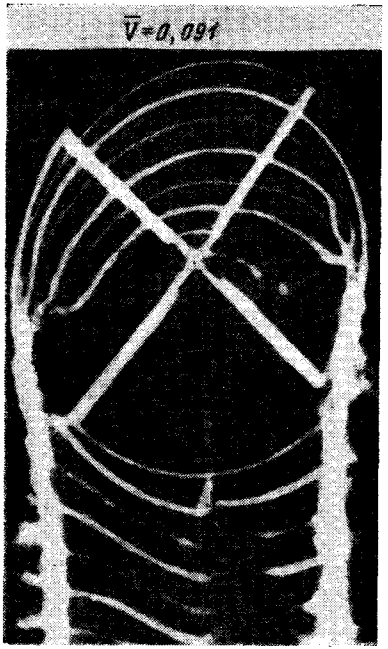

V̄ = 0,091

Рис. 5

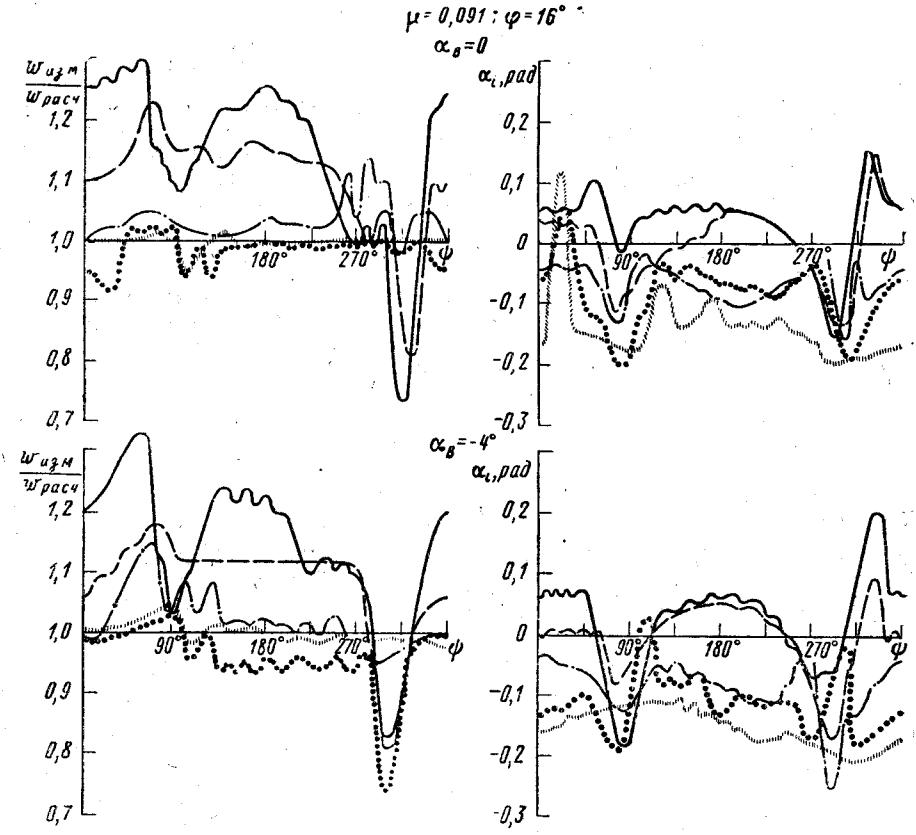


Рис. 6

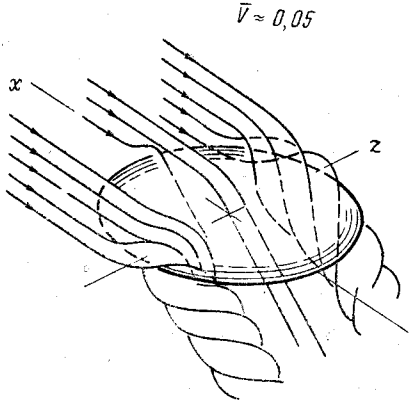


Рис. 7

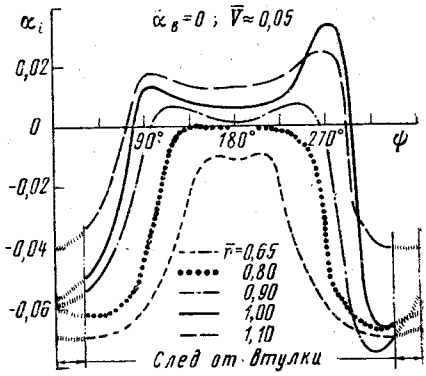


Рис. 8

Крайней неравномерностью возмущенного потока по диску винта объясняется особое состояние одновинтового вертолета при полете на малых скоростях. У вертолета соосной схемы возможно такое сочетание параметров возмущенного потока, которое может служить причиной схлестывания лопастей с катастрофическими последствиями.

Результаты визуальных исследований характера течения, осуществленных путем меченых дымом струй потока аэродинамической трубы, показаны на рис. 7, воспроизводящем серию фотографий. Они показывают, что сквозь среднюю часть диска — течение струйное, а в зоне сгустков от концевых вихрей по бокам вихревого следа — спиралеобразное. С ростом поступательной скорости шаг спирали увеличивается.

Скосы потока под диском четырехлопастной модели несущего винта на относительном расстоянии $y/R=0{,}1$ имеют большой размах колебания, но плавное изменение по азимуту (рис. 8). Существенных изменений модуля вектора скорости отмечено не было.

В диапазоне относительных скоростей $v>0{,}1$ роль поступательного перемещения столь велика, что в сплющенном вихревом следе существенно ослабевает взаимное влияние концевых вихрей по бокам. В результате форма вихрей в плане приближается к циклоидальной. Они становятся обособленными. Размах колебаний модуля вектора скорости уменьшается, хотя изменение по азимуту скосов потока остается существенно неравномерным. Результаты опытов здесь не приводятся — они достаточно известны [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальные исследования по аэродинамике вертолета./Под ред. А. К. Мартынова. — М.: Машиностроение, 1980.

2. Werle, Armand C. Mesures & visualisations instationnaires sur les rotors. — ONRA, AFITAE 6-e collogue d'aerodinamique, 1969.

3. Landarebe A. J., Cheney M. C. Rotor wakes-key to performance prediction. — AGARD Conf. Proceed. N 111, Aerodynamics of rotor wings, 1972.

Рукопись поступила 26/XII 1988 г.