

## ВЛИЯНИЕ КРУТКИ ЛОПАСТИ РОТОРА ВЕРТОЛЁТА НА ГЕНЕРАЦИЮ ВVI-ШУМА

*В работе решена задача генерации шума взаимодействия нестационарного завихренного течения с закрученной лопастью ротора вертолёта. Крутка лопасти изменялась равномерно от комля до внешнего от оси вращения конца. Результаты численного расчёта показали, что лопасть с круткой сильно возмущает течение: возникают дополнительные зоны неустойчивости течения, не наблюдавшиеся ранее для лопасти без крутки, которые являются источником шума. Вторая серия пиков пульсаций плотности в звуковой волне на поверхности лопасти превосходит по величине пики первой серии. Это говорит о захвате второй серией большей части звуковой энергии. Расчёт уровня шума в дальнем звуковом поле выявил целую гряду волновых гребней, а для лопасти без крутки их было всего два. В целом уровень VVI-шума лопасти с круткой выше на 20Дб, чем у лопасти без крутки. Это говорит о том, что крутка лопасти делает её более шумной, что с точки зрения борьбы с шумом аэродинамического происхождения нежелательно.*

**Ключевые слова:** Крутка лопасти, генерация VVI-шума.

### Введение

Из аэродинамики лопасти винта известно [1], что в области комлевой её части совокупная скорость обтекания ниже, чем скорость удалённого конца лопасти. Это делает неравномерной аэродинамическую нагрузку на лопасть, что крайне нежелательно. С целью равномерного распределения нагрузки на лопасть используется так называемая крутка лопасти. Суть её состоит в том, что угол постановки лопасти по отношению к плоскости вращения винта, а значит и угол атаки, варьируется от комля к внешнему концу лопасти. Форма сечения вдоль размаха лопасти при этом сохраняется. У комля лопасти угол атаки больше, а к внешнему от оси вращения концу лопасти он равномерно уменьшается. Таким образом, лопасть становится равномерней нагруженной. Однако, как при этом изменяется характер VVI –шума? Этому вопросу не было посвящено работ.

Закрученная лопасть, логично предположить, делает поток более завихренным, чем не закрученная. Но в этом лишь различие её в сравнении с незакрученной лопастью, если речь идет о генерируемом шуме взаимодействия её с потоком? Ниже приводится аналитическая постановка и численное решение данной задачи, приводится анализ характеристик ближнего и дальнего звуковых полей.

### Постановка задачи

Пусть есть лопасть прямоугольная вдоль размаха лопасть. В поперечном сечении лопасть имеет параболический профиль. Для постановки и решения задачи используем прямоугольную систему координат  $Oxyz$ . У комля лопасти  $z = 0, \gamma = 10^\circ$ , а к внешнему от оси вращения концу лопасть плавно закручена на величину  $\Delta = 2^\circ$  так, что на внешнем конце лопасти  $z = R, \gamma = 8^\circ$ . В плоскости вращения ротора лопасть повернута на угол  $\alpha$  по отношению к встречному потоку.

Передняя кромка лопасти взаимодействует с расположенными вдоль лопасти компактными вихрями Тейлора. На внешнем конце лопасти задаётся вихрь Скулли [2], завихренность которого плавно меняется вдоль всей лопасти вплоть до её комля [3].

### Аэродинамическая задача

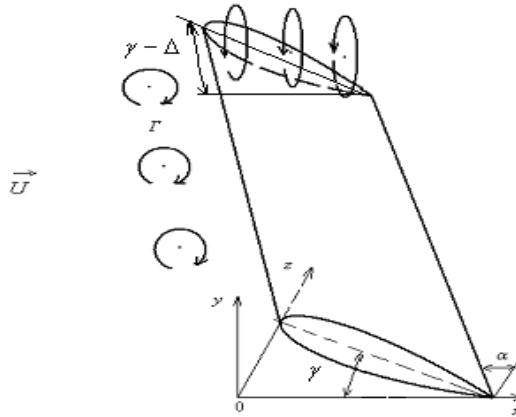


Рис.1 Взаимодействие вихрей с закрученной вдоль размаха лопастью

Система уравнений, описывающая взаимодействие идеального сжимаемого течения с вихрями, имеет вид [4]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u'}{\partial \tau} + u' \frac{\partial u'}{\partial \xi} + \lambda c v' \frac{\partial u'}{\partial \eta} + \frac{c}{AR} w' \frac{\partial u'}{\partial \zeta} &= -\frac{1}{M^2 \rho'} \frac{\partial \rho'}{\partial \xi}; \\
 \frac{\partial v'}{\partial \tau} + u' \frac{\partial v'}{\partial \xi} + \lambda c v' \frac{\partial v'}{\partial \eta} + \frac{1}{AR} w' \frac{\partial v'}{\partial \zeta} &= -\frac{\lambda c}{M^2 \rho'} \frac{\partial \rho'}{\partial \eta}; \\
 \frac{\partial w'}{\partial \tau} + u' \frac{\partial w'}{\partial \xi} + \lambda c v' \frac{\partial w'}{\partial \eta} + \frac{1}{AR} w' \frac{\partial w'}{\partial \zeta} &= -\frac{1}{M^2 AR \rho'} \frac{\partial \rho'}{\partial \zeta}; \\
 \frac{\partial \rho'}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho' u')}{\partial \xi} + \lambda c \frac{\partial(\rho' v')}{\partial \eta} + \frac{1}{AR} \frac{\partial(\rho' w')}{\partial \zeta} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь  $\xi = x/c, \eta = y/\lambda, \zeta = z/R, \tau = kt, u' = u/U_\infty, v' = v/U_\infty, w' = w/U_\infty$ ;  
 $\rho = \rho' \rho_\infty U_\infty^2, \rho = \rho_\infty \rho'$ , а  $c, \lambda, R$  - длина хорды лопасти, толщинный параметр, радиус лопасти соответственно,  $M$  - число Маха,  $AR = R/c$  ("aspect ratio").

Граничным условием, задаваемым на поверхности лопасти, есть условие непроницаемости жидкости через поверхность:

$$\bar{V}_n|_r = 0. \quad (2)$$

Поставленная задача (1)-(2) позволяет найти безразмерные компоненты скорости и плотности. Для решения задачи о генерации звука необходима ещё постановка акустической задачи.

### Акустическая задача

Система уравнений, описывающих генерацию и распространения звука, состоит из двух уравнений [4]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \tau^2} - \frac{1}{M_\infty^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \xi^2} - a^2 (\lambda^2 c^2 \cdot \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \eta^2} + \frac{1}{AR^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \zeta^2}) + \\ & R(\bar{\rho}', \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \xi}, \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \eta}, \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \zeta}, \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \xi^2}, \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \eta \partial \xi}, \dots, \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \zeta^2}) = \\ & = \gamma (\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \xi}, \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \eta}, \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \zeta}, \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \xi^2}, \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \eta \partial \xi}, \dots, \frac{\partial^3 \bar{\varphi}}{\partial \zeta^3}); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \bar{\rho} (\frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \xi^2} + c^2 \lambda^2 \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \eta^2} + \frac{1}{AR^2} \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \zeta^2}) + c \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \xi} \\ & + c^2 \lambda^2 \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \eta} + \frac{1}{AR^2} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \zeta} \cdot \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \zeta} = - \left[ c \frac{\partial \rho'}{\partial \tau} + \right. \\ & \left. \bar{\rho}' (c \frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} + \lambda c^2 \frac{\partial \bar{v}}{\partial \eta} + \frac{c^2}{R} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \zeta}) + c \bar{u} \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \xi} + \lambda c^2 \bar{v} \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \eta} + \frac{c^2}{R} \bar{w} \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \zeta} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнениях (3)-(4)  $\bar{\varphi}, \bar{\rho}'$  - безразмерный звуковой потенциал и плотность. Выражение  $R(\bar{\rho}', \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \xi}, \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \eta}, \frac{\partial \bar{\rho}'}{\partial \zeta}, \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \xi^2}, \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \eta \partial \xi}, \dots, \frac{\partial^2 \bar{\rho}'}{\partial \zeta^2})$  содержит слагаемые, зависящие от плотности  $\bar{\rho}'$  и её производных. Граничное условие для акустических компонент учтено в аэродинамической постановке [5].

### Метод решения задачи. Анализ результатов счёта

Обе поставленные выше задачи (1)-(2),(3)-(4) содержат в себе системы нелинейных дифференциальных уравнений, решение которых осуществлялось с помощью численно-аналитического метода [6]. Использовалась, как и ранее [3,6], 15-точечная схема. Счёт был устойчив на сетке порядка  $80 \times 40$ .

**Ближнее поле**

Численный расчёт характеристик ближнего поля выполнен для различных углов  $\alpha$  постановки лопасти к набегающему потоку в плоскости её вращения и чисел Маха  $M$ . Угол атаки лопасти изменялся от корня к внешнему концу лопасти вместе с её круткой:  $\gamma = 10^\circ - 8^\circ$ . Рассмотрены следующие расчётные ситуации:  $M = 0,2; \alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  (рис.2)

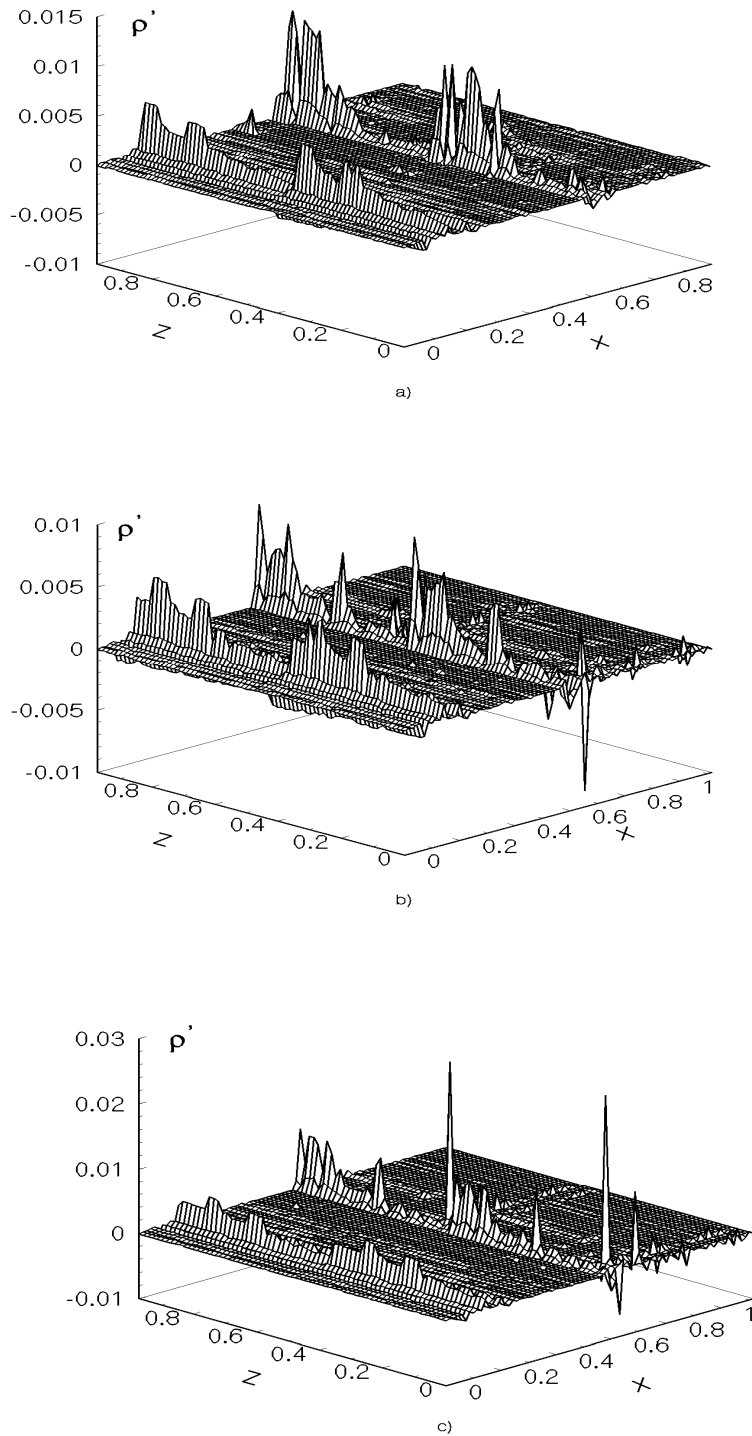


Рис.2  $M = 0,2; \alpha : a - 30^\circ, b - 45^\circ, c - 60^\circ$

и  $M = 0,4; \alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  (рис.3).

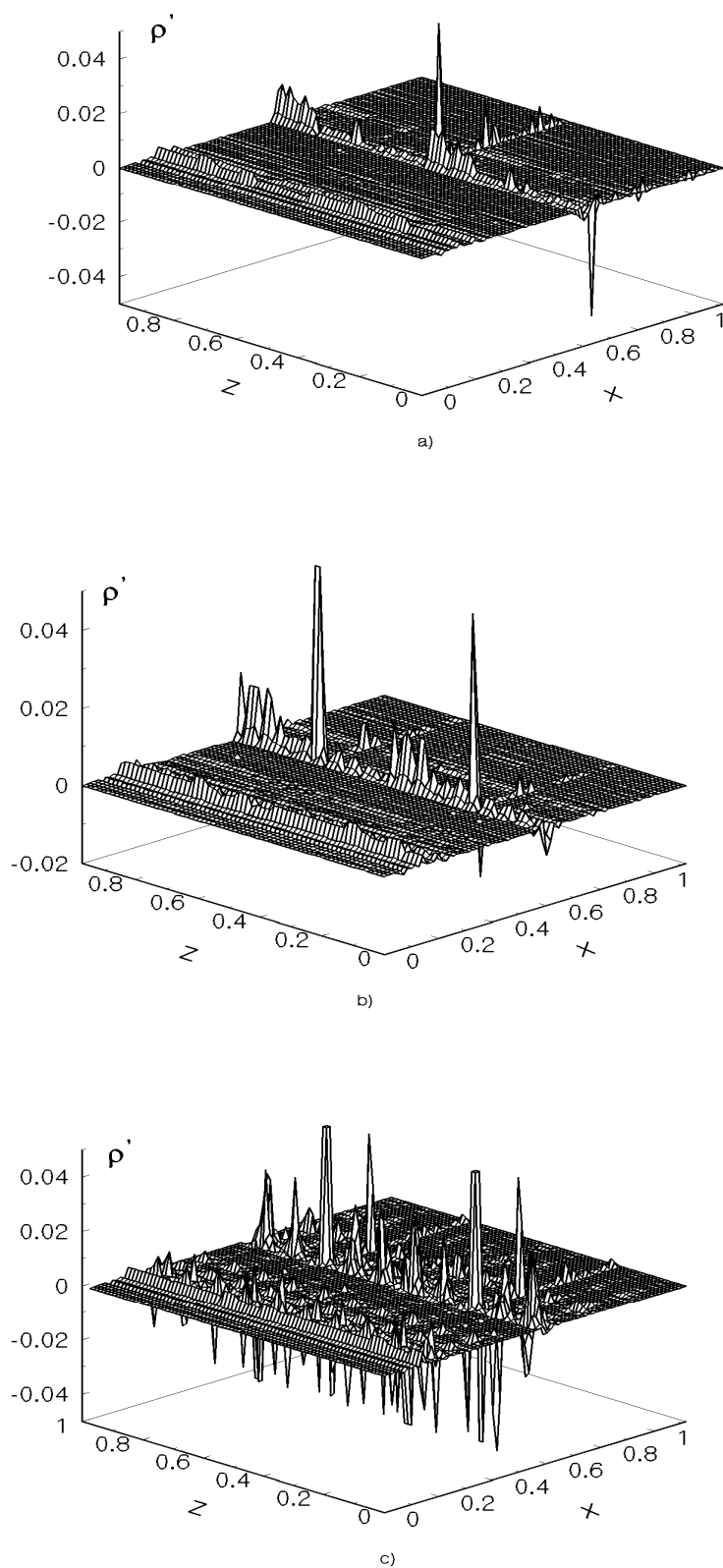
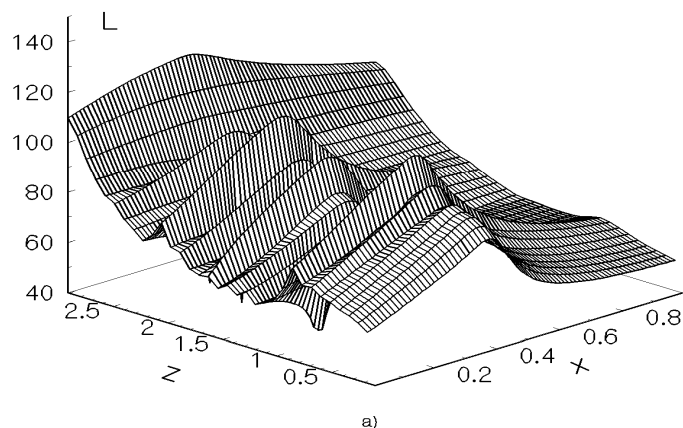


Рис.3  $M = 0,4; \alpha : a - 30^\circ, b - 45^\circ, c - 60^\circ$

При этом  $c = 0,3m$ ,  $AR = 10$ . Данная задача отличается от ранее решённой задачи [3] тем, что здесь лопасть имеет геометрическую кривую. Данные численного расчёта обнаружили следующее. Две серии возмущений плотности, которые наблюдались и ранее, здесь уже имеют преимущественно вихревую природу. Этот вывод сделан по причине резкого возрастания пиков второй серии, которые, как уже было установлено, связаны с вихревой частью взаимодействующего с лопастью потока. Если для числа Маха  $M = 0,2$  и меньших углов  $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$  это заметно в меньшей мере (рис.2), то для чисел  $M = 0,4$  и углов  $\alpha = 60^\circ$  присутствующие резкие пики говорят о том, что закрученная лопасть интенсивнее возмущает набегающий на неё поток, чем лопасть без кривки. На рис.3с этот аспект наиболее чётко выражен: вторая серия пиков имеет значительное количество резко выраженных максимумов, что говорит о существовании области неустойчивости течения вдоль всей второй зоны пиков.

### Дальнее поле

Особенности поведения ближнего поля сказались на распределении уровня звукового давления  $L$  по поверхности лопасти. Характер поведения  $L$  существенным образом отличается от распределения звукового давления в случае незакрученной лопасти. Здесь уже наблюдается не два локальных максимума (гребня волны), а их целая гряда – до десяти пиков. Этот факт говорит о том, что дальнее звуковое поле, генерируемое взаимодействием потока, вихрей с закрученной вдоль размаха лопастью, существенно отличается от дальнего звукового поля, генерируемого лопастью без кривки. Нелинейный характер волны выражен значительно. Максимальный уровень  $L$  находится в районе 120Дб (рис.4). Он наблюдается на конце лопасти. Уровень остальных пиков варьируется от 70-100Дб, что соответствует максимуму уровня звукового давления в задаче для лопасти без кривки [3]. Следовательно, кривка лопасти не снижает общий уровень звукового давления, как это наблюдалось в случае увеличения угла атаки лопасти [7], а наоборот существенно его увеличивает. Таким образом, с точки зрения снижения шума аэродинамического происхождения кривка лопасти, нежелательна, так как лопасть закрученная лопасть становится более шумной.



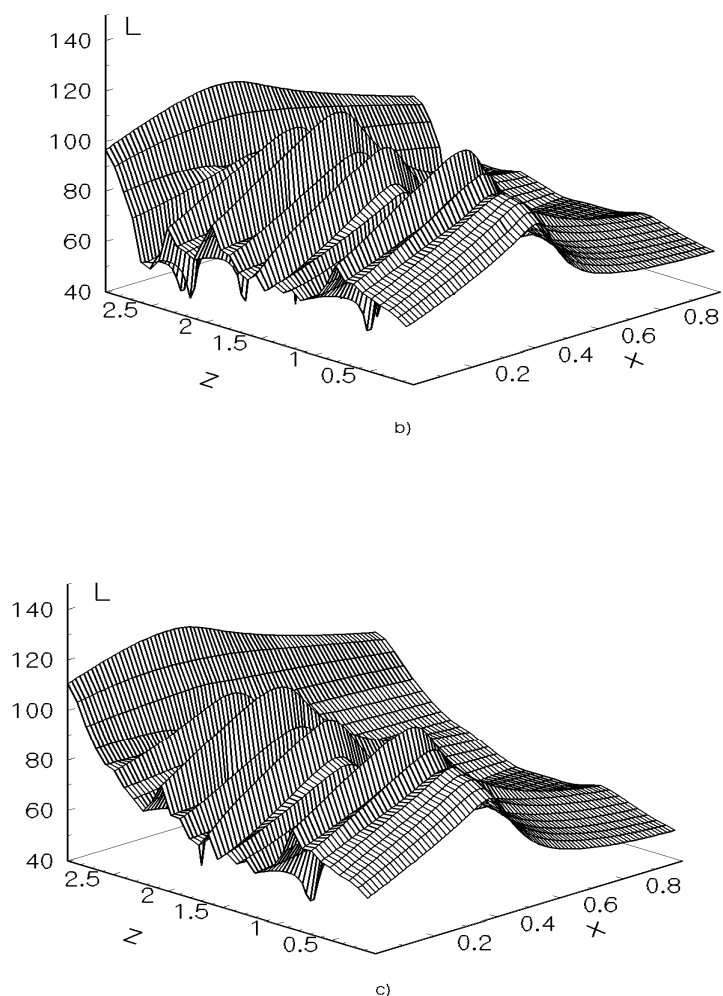


Рис.4  $M = 0,2; \alpha : a - 30^\circ, b - 45^\circ, c - 60^\circ$

В зависимости от числа Маха набегающего потока общий уровень шума может даже повысится, например, для числа Маха  $M = 0,4$  - на 7-10Дб (рис.5). При этом уровень вторичных пиков достигает уровня основного максимума (110 Дб, рис.5а), который при этом даже несколько снижается. Это ещё раз говорит нам о том, что одновременное изменение кинематики течения и геометрии лопасти может различным образом отразится на процессе формирования дальнего звукового поля.

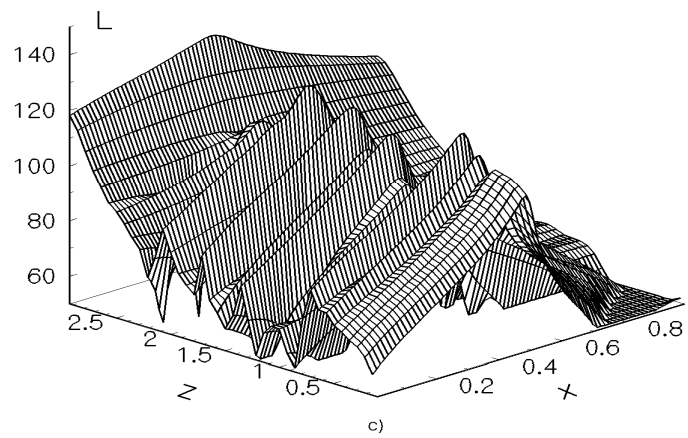
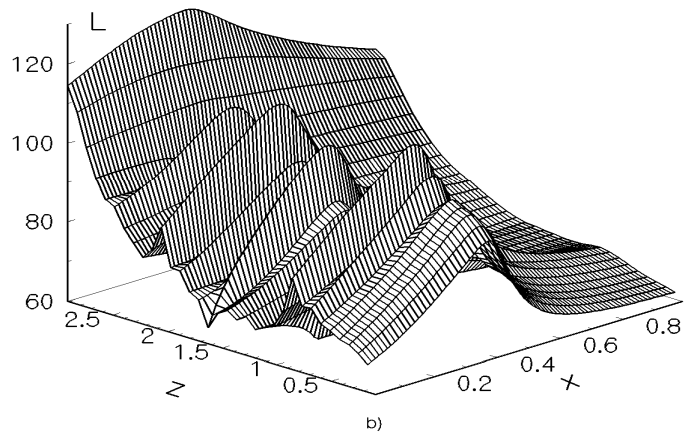
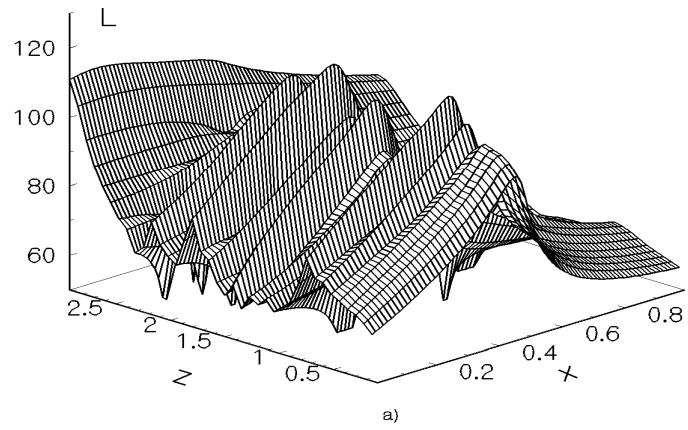
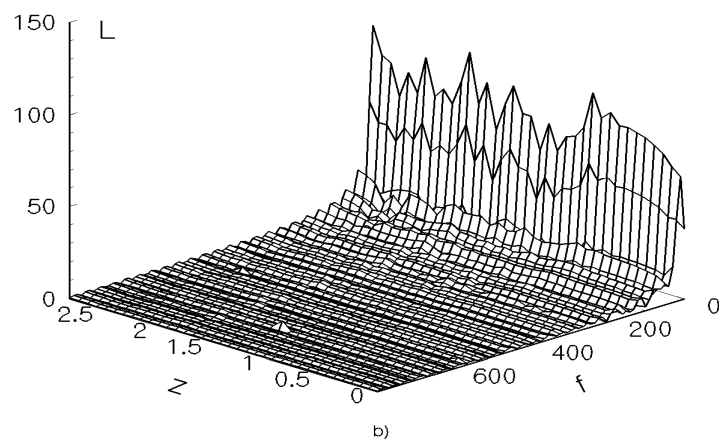
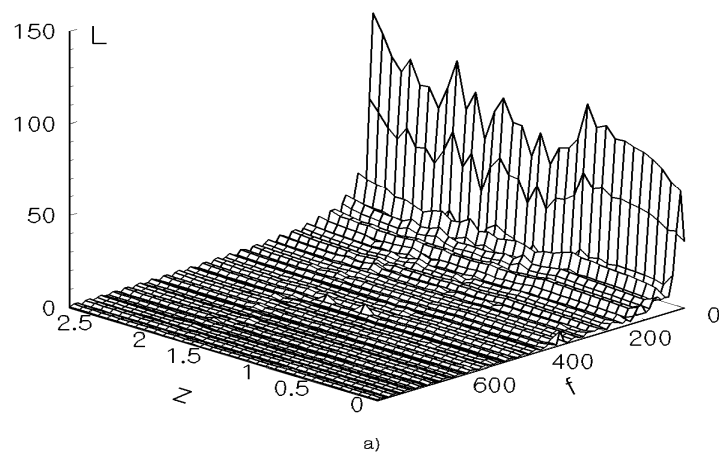
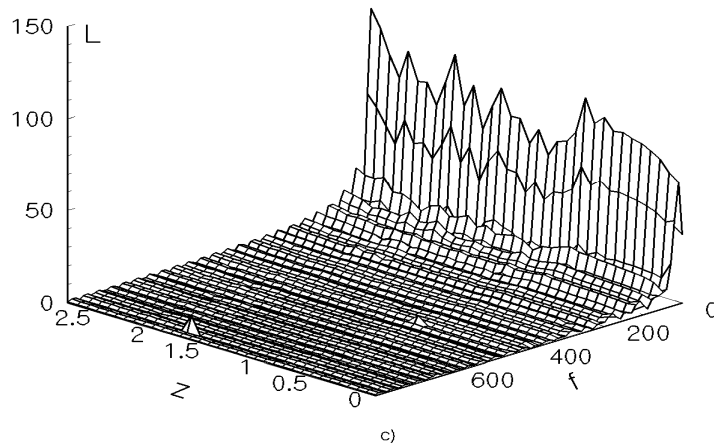


Рис.5  $M = 0,4; \alpha: a - 30^\circ, b - 45^\circ, c - 60^\circ$

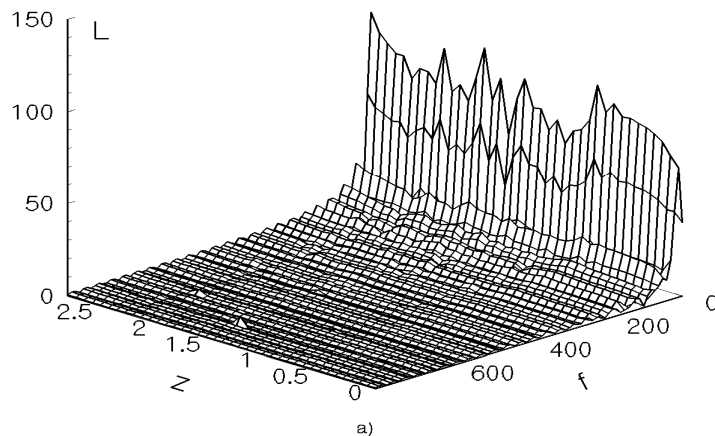


Особенность распределения давления сказалась в спектре генерируемого шума. Спектр шума (рис.6,7) имеет изрезанную огибающую, отражающую описанную выше серию максимумов уровня звукового давления  $L$ . Наиболее выраженная изрезанность в спектре наблюдается для нулевой и первой гармоник. Количество локальных максимумов (изломов) на огибающей нулевой и первой гармоник соответствует количеству максимумов в серии пиков уровня звукового давления  $L$ . Это значит, что основными энергетическими составляющими в спектре генерируемого шума является нулевая и первая гармоники. Гармоники, начиная со второй, имеют уже более сглаженную огибающую в спектре, по которой уже отчётливо нельзя сказать о количестве локальных максимумов уровня давления  $L$ .



Рис.6  $M = 0,4; \alpha : a - 30^\circ, b - 45^\circ, c - 60^\circ$ 

Тенденция распределения энергии в частотном спектре остаётся похожей, как и в случае ранее решённых задач для лопасти без крутки. Различие состоит лишь в том, как уже подчёркивалось выше, что закрученная лопасть захватывает больше кинетической энергии набегающего на неё потока для генерации звука взаимодействия лопасти и вихревого течения, чем незакрученная лопасть. При этом уровень шума естественно возрастает. А это не позволяет рассматривать геометрическую крутку лопасти как способ снижения шума. Следовательно, дальнейшие исследования в области снижения шума необходимо проводить в направлении вариации формы продольного сечения незакрученной лопасти.



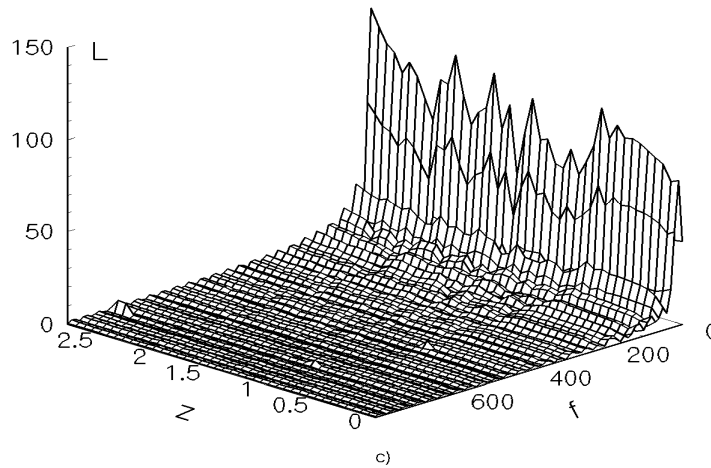
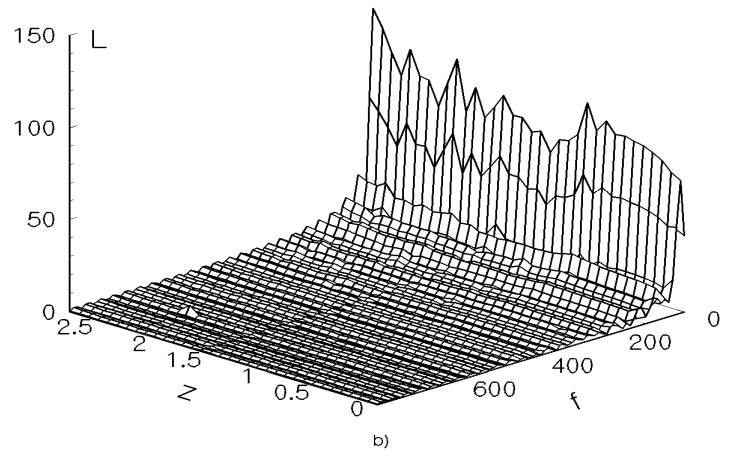


Рис.7  $M = 0,4; \alpha : a - 30^\circ, b - 45^\circ, c - 60^\circ$

## Выводы

1. Поставлена и численно решена задача о генерации шума взаимодействия закрученной лопасти с завихренным потоком.

2. Обнаружено значительное влияние крутки лопасти на характер генерируемого шума. В частности, по всей поверхности лопасти наблюдается целая серия волновых фронтов, а

для лопасти без крутки их наблюдалось всего лишь два. При этом максимальный уровень шума для закрученной лопасти возрос более чем на 20Дб.

3. Лопасть с круткой захватывает больше энергии набегающего потока в процессе генерации звука, что делает её более шумной. Следовательно, крутка лопасти не желательна для снижения уровня шума аэродинамического происхождения.

## Литература

1. Джонсон У. Теория вертолѐта: В 2-х книгах./ Джонсон У. – М.:”Мир”,1983,т.1,2-1024с.
2. Scully M.P. Computation of Helicopter Rotor Wake Geometry and Its Influence on Rotor Harmonic Airloads. / Scully M.P.// Massachusetts Institute of Technology,ASPL TR 178-1, March 1975.
3. Пѐтр В. Лукьянов. Влияние присоединѐнного концевго вихря лопасти ротора вертолѐта на генерацию BVI-шума./Пѐтр В. Лукьянов./ Вісник Черкаського Університету. Серія Прикладна математика. Інформатика, №18(311),2014.С.:46-58.
4. Лук’янов Петро В. Генерація звуку взаємодії вихорів Тейлора і Скуллі з лопаттю змінної товщини./Лук’янов Петро В.// Наукові вісті НТУ „КПІ”.Сер.:фіз.-мат.науки,2014,№4.С.139-145.
5. Пѐтр В. Лукьянов. Шум близкого взаємодія вихря-лопасти вертолѐта. // Пѐтр В. Лукьянов /Збірн. Праць акустичного симпозиуму Консонанс-2013.-К.: ІГМ НАНУ.1-2 жовтня 2013,с.181-187.
6. Лукьянов П.В. Об одном численно-аналитическом подходе к решению задачи генерации звука тонким крылом. Часть II. Схема применения для нестационарных задач./Лукьянов Петро В./Акустичний вісник.-2012-№3(15).-С.45-52.
7. Лукьянов П.В. Влияние угла атаки лопасти на генерацию шума взаимодействия вихрей и ротора вертолѐта./Лукьянов П.В./ Экологический вестник научных центров черноморского экономического сотрудничества.№3, 2014.С.:45-58.

Стаття надійшла 04 . 11 . 2014  
 Прийнято до друку 25 . 11 . 2014

## Анотація

**Петро В. Лук’янов**

**Вплив закручення лопаті ротора гелікоптера на генерацію BVI- шуму**

*В статті розв’язано задачу генерації шуму взаємодії нестационарної завихреної течії та закрученої лопаті ротора гелікоптера. Закручення лопаті змінювалось рівномірно від комля до зовнішнього, від осі обертання, кінця лопаті. Результати чисельного розрахунку показали, що лопать з закрученням дуже збурює течію: виникають додаткові зони нестійкості течії, що не спостерігалися раніше для лопаті без закручення. Ці зони і є джерелом додаткового шуму. Друга серія піків пульсацій густини в звуковій хвилі на поверхні лопаті перевищує за величиною піки першої серії. Це свідчить про те, що друга серія містить у собі більшу частину звукової енергії. Розрахунок рівня шуму в дальньому звуковому полі виявив цілий ряд хвильових гребенів, а для лопаті без закручення їх було лише два. В цілому, рівень BVI-шуму лопаті з закрученням вище на 20Дб ніж у лопаті без закручення. Це вказує на те, що закручення лопаті робить її більш шумною, що з точки зору боротьби з шумом аеродинамічного походження, небажано.*

*Ключові слова: закручена лопать, генерація BVI-шуму.*

## Summary

**Petro V. Lukianov**

**Helicopter’s rotor blade warp influence on BVI-noise generation**

*In this paper a problem of sound generation by non-stationary vortex flow and helicopter’s rotor warped blade interaction been solved. Warp of the blade have been changed uniformly from the blade’s butt to the exterior, in respect to the axis of rotation, end of the blade. The results of numerical calculations have showed that the blade with the warp intensively disturbs flow around blade: additional regions of instability of the flow arise, which have not been observed earlier for the blade*

*without warp and these instabilities are the source of the noise. The second series of the peaks of density pulsations on blade surface overcomes by value peaks of the first series. This fact reveals the capture of the most part of the sound energy by the second series of peaks. The calculations of the noise level of the far sound field have showed ridge of wave crests, but previous study of the far sound field for the blade without warp reveled two crests only. In whole the level of the BVI-noise of the warped blade is more then the level blade without warp on 20dB. This distinction show that the warped blade is more noisy that is undesirable for the aerodynamically noise control.*

**Keywords:** *warped blade, BVI-noise generation.*