

*В.Г. МАРТИНЕНКО, М.І. ГРИЦЕНКО***РОЗРОБКА ЗДВОЄНОЇ ЛОПАТКИ ОСЬОВОГО ВЕНТИЛЯТОРА ІЗ ПІДВИЩЕНИМИ АЕРОДИНАМІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Представлений комплексний підхід до профілювання вінця лопаток робочого колеса, оцінки аеродинамічних характеристик повітряного потоку, а також статичних і динамічних міцнісних параметрів нової здвоєної лопатки робочого колеса вентилятора ВО-21Д на заміну тілесної лопатки, що не відповідає вимогам зміненого опору шахтної мережі. Аеродинамічний аналіз циклічно симетричної скінченно-об'ємної моделі проточної частини вентиляційної установки, що включає в себе робоче колесо, спрямляючий апарат і дифузор, дозволив підтвердити ефективність розроблених профілів здвоєних лопаток робочого колеса вентилятора, а також визначити аеродинамічні навантаження на лопатки. Ці навантаження разом з відцентровими силами від обертання ротора вентиляційної установки були використані для скінченно-елементного аналізу його статичної міцності і відстройки від резонансних режимів, що підтвердило працездатність розробленої конструкції і можливість її використання на практиці.

Ключові слова: профілювання, аеродинаміка, динамічна міцність, шахтна мережа, метод скінченних елементів.

*В.Г. МАРТЫНЕНКО, Н.И. ГРИЦЕНКО***РАЗРАБОТКА СДВОЕННОЙ ЛОПАТКИ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА С ПОВЫШЕННЫМИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Представлен комплексный подход к профилированию венца лопаток рабочего колеса, оценке аэродинамических характеристик воздушного потока, а также статических и динамических прочностных параметров новой сдвоенной лопатки рабочего колеса вентилятора ВО-21Д взамен телесной лопатки, не соответствующей требованиям изменившегося сопротивления шахтной сети. Аэродинамический анализ циклически симметричной конечно-объемной модели проточной части вентиляторной установки, включающей в себя рабочее колесо, спрямляющий аппарат и диффузор, позволил подтвердить эффективность разработанных профилей сдвоенных лопаток рабочего колеса вентилятора, а также определить аэродинамические нагрузки на лопатки. Данные нагрузки вместе с центробежными силами от вращения ротора вентиляторной установки были использованы для конечно-элементного анализа его статической прочности и отстройки от резонансных режимов, что подтвердило работоспособность разработанной конструкции и возможность ее использования на практике.

Ключевые слова: профилирование, аэродинамика, динамическая прочность, шахтная сеть, метод конечных элементов.

*V.G. MARTYNYENKO, M.I. HRYTSENKO***DEVELOPMENT OF A TWIN BLADE OF THE AXIAL FAN WITH EXTENDED AERODYNAMIC CHARACTERISTICS**

The paper presents a comprehensive approach to profiling the impeller blades, assessing aerodynamic characteristics of an air flow, as well as static and dynamic strength parameters of a new twin blade of the VO-21D fan impeller instead of a solid blade that does not meet the requirements of the changed mine network resistance. The approach uses the finite-volume method for performing the computational fluid dynamics analysis and the finite-element method for providing the results of the structural strength analysis. The profiling process allow to get a dense blading structure with a high pressure rise. The aerodynamic analysis of a cyclically symmetric finite-volume model of the flow passage of the main ventilation fan installation, including the impeller, the straightener and the diffuser, allowed to confirm an effectiveness of the developed profiles of the twin blades of the fan impeller, as well as to determine aerodynamic loads on the blades. These loads, in a combination with the centrifugal forces of rotation of the rotor of the fan installation, were used for the finite-element analysis of its static strength and detuning from resonance modes, which confirmed an operability of the developed design and a possibility of its use for the practical purposes. The proposed methodology illustrates the way for the least expensive adaptation of the fan installation to restricted requirements of the mine ore due to changed mine network conditions. This technique can be used by engineers and scientists who are handling the problem of an adaptation of the already produced fan structures to the updated working conditions as well as a creation of new units with some unique aerodynamic parameters. In addition to this, the paper is a good illustration of the possibilities of the profiling tool used for creating the twin blades profiles as well as method to determining their static and dynamic structural strength.

Key words: profiling, aerodynamics, dynamic strength, mine net, finite element method.

Вступ. Вентилятор головного провітрювання шахти розраховується на встановлені значення опору шахтного поля. У разі зміни опору провітрюваної мережі (наприклад, при завалі вироблення або включенні додаткової вентиляційної установки на іншому виході шахти) вентилятор припиняє свою роботу на оп-

тимальному режимі, що тягне за собою істотне зниження його коефіцієнта корисної дії і продуктивності [1].

Це призводить до необхідності зміни номінальної точки роботи вентиляторної установки (тобто, співвідношення перепаду тиску за нею до її продуктивно-

сті). При збереженні конструкції та параметрів установки й двигуна незмінними найбільш перспективним та оптимальним є шлях заміни лопаток робочого колеса на нові із вдосконаленим профілем пера. В той же час, процедура їхнього проектування є нетривіальною інженерною задачею, оскільки для підвищення перепаду тиску, який розвивається вентиляторною установкою, доводиться прибігати до кардинальних рішень.

Одне з таких рішень було застосоване до шахтного осевого вентилятора ВО-21Д, що призначений для провітрювання закритих та діючих шахт, рудників та тунелів. Це рішення з підвищення робочого тиску вентилятора полягало у тому, щоби замінити тілесні одинарні лопатки оригінальної конструкції, що пред-

ставлена на рис. 1, *а*, на здвоєні листові, таким чином звузивши проточні канали та подвоївши кількість аеродинамічних профілів. На цьому рисунку показана вентиляторна установка типу ВО-Д [2] на якій цифрою 1 позначена роторна група, що включає в себе вал на підшипникових опорах і робоче колесо зі знімними лопатками, розраховане на обертання зі швидкістю 750 об/хв; 2 – корпус; 3 – рама; 4 – кок; 5 – вхідна коробка; 6 – дифузор (не показаний і знаходиться праворуч від малюнка); 7 – електродвигун; 8 – сполучна муфта; 9 – гальмо.

На рис. 1, *б* представлена роторна група з новими здвоєними лопатками, розробленими фахівцями Інженерно-технічного центру «Донвентилятор».

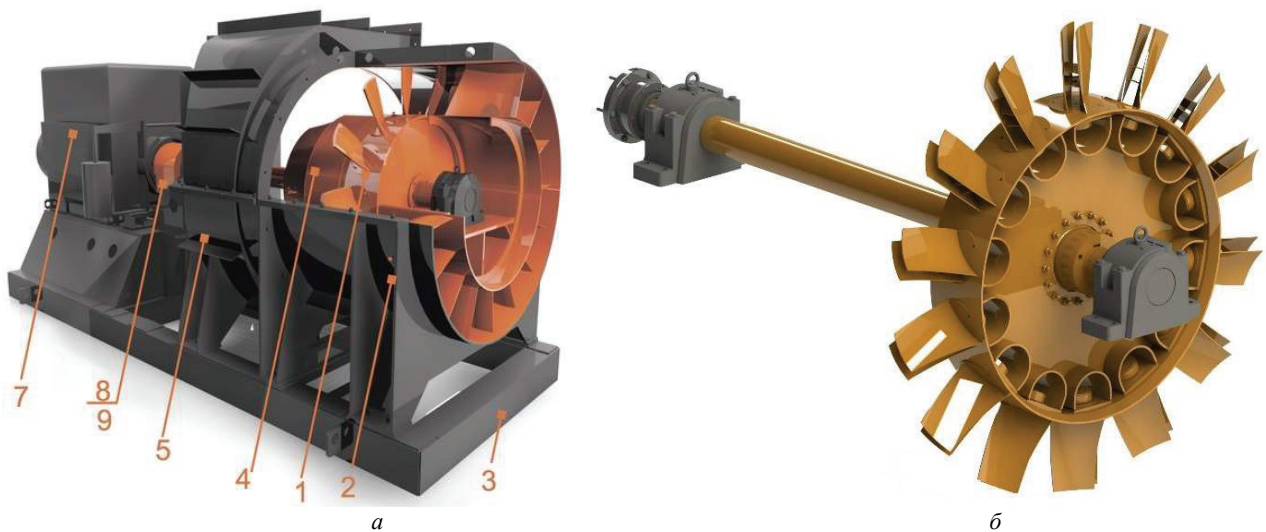


Рисунок 1 – Вентиляторна установка ВО-21Д: *а* – загальна конструкція вентиляторної установки з тілесними лопатками; *б* – ротор вентилятора з новими здвоєними лопатками

Задача проектування такого здвоєного аеродинамічного профілю ускладнюється ще й тим, що його використання тягне за собою підвищення загальної ваги лопатки і, як результат, відцентрових навантажень на її посадочний вузол. Окрім того, навантаженість проточної частини профілю за рахунок аеродинамічних сил може стати порівняною із відцентровими, що також потребує перевірки.

1. Методи розв'язання задачі та розрахункові моделі. Для оцінки параметрів продуктивності вентилятора використовувався метод скінченних об'ємів [3], а для визначення його міцності – метод скінченних елементів [4], застосування яких є найбільш оптимальним у випадку складних геометричних моделей і великого числа конструктивних елементів.

З метою оцінки аеродинамічних характеристик вентиляційної установки була побудована скінченно-об'ємна розрахункова модель (рис. 2), що складається з секторів циклічної симетрії проточної частини робочого колеса (РК), вінця спрямляючого апарату (ВСА) і дифузора (Д). На вході робочого колеса був заданий масовий розхід, а на виході з дифузора – повний тиск, що дорівнює одній атмосфері. При цьому об'єм повітря, що відповідає робочому колесу, вважався оберто-

вим, а інші об'єми – нерухожими.

На рис. 3, *а* показана повна розрахункова модель для проведення аналізу статичної та динамічної міцності ротора вентилятора ВО-21Д з урахуванням дії навантажень від відцентрових та аеродинамічних сил і власної ваги. Для отримання точної картини розподілу напружень в лопатці РК була побудована розрахункова модель, що складається з сектора циклічної симетрії РК з більш дрібною скінченно-елементною сіткою (рис. 3, *б*), до якої додаються навантаження від відцентрової сили і тиску потоку повітря.

Для передачі тиску на поверхні пера лопатки використовувалась технологія односпрямованої взаємодії рідини та твердих тіл (one-way fluid-structure interaction), застосована також в роботі [5], завдяки якій вузлові значення тиску, отримані з відповідних поверхонь скінченно-об'ємної моделі, інтерполюються на поверхневі вузли скінченно-елементної моделі.

2. Розрахунок аеродинамічної схеми вентилятора зі здвоєними лопатками. Для розрахунку аеродинамічних параметрів потоку повітря були використані його стандартні властивості при кімнатній температурі. З метою моделювання турбулентного руху в потоці була застосована двопараметрична модель тур-

булентності «k-epsilon», використання якої є найбільш обґрунтованим для розрахунків проточних частин осевих вентиляторних установок [1].

На рис. 4, а та 4, б представлені графіки розподі-

лу вектору швидкостей та скалярних значень повного тиску в проточній частині вентиляторної установки для середнього меридіонального перерізу.

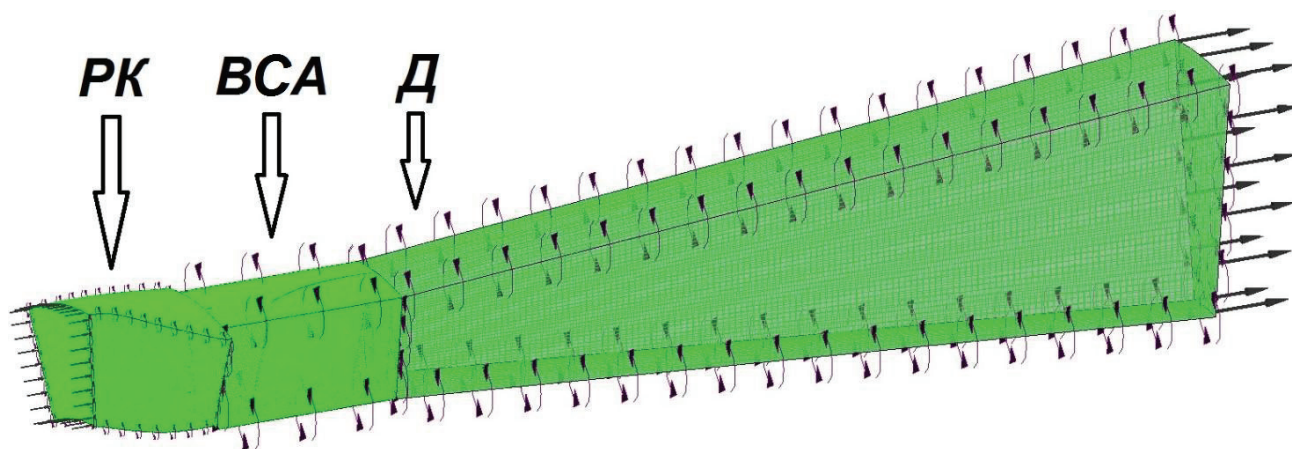


Рисунок 2 – Розрахункова модель потоку повітря у вентиляторній установці

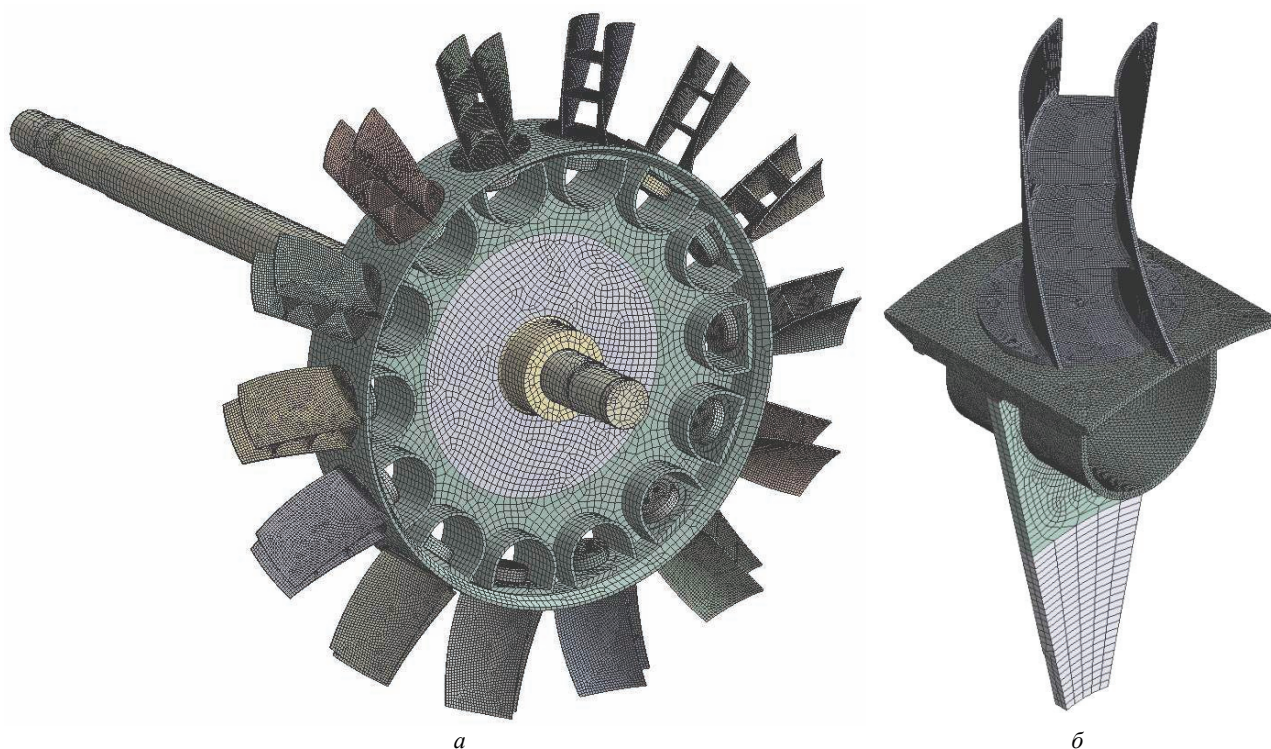


Рисунок 3 – Розрахункова модель ротора вентилятора: а – цілого ротору; б – сектору циклічної симетрії РК

Оцінка напрямів руху повітря та локальних вихрових процесів дозволяє визначити найбільш навантажені та важливі зони проточної частини, а також встановити ефективність профілів лопаток робочого колеса та спрямляючого апарату, що особливо важливо після виконання процесу двовимірного моделювання при переході до тривимірної розрахункової моделі.

3. Оцінка міцності конструкції робочого колеса. Оцінка статичної міцності для сталевих та алюмінієвих елементів виконувалась за критерієм Мізеса [6]. У відповідності до нього еквівалентні напруження

розраховуються наступним чином:

$$\sigma_{\text{eqv}} = \{0,5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]\}^{0,5}, \quad (1)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження.

При цьому сам критерій міцності полягає у неперевищенні максимальними еквівалентними напруженнями визначеної границі міцності $[\sigma]$:

$$\sigma_{\text{eqv}}^{\text{max}} \leq [\sigma], \quad (2)$$

а запасом міцності вважається відношення цих двох величин: $\eta = [\sigma] / \sigma_{\text{eqv}}^{\text{max}} \geq 1$.

На рис. 5, а і рис. 5, б показані контурні графіки розподілу еквівалентних за Мізесом напружень в РК вентилятора. Як видно з графіків, максимальне значення напружень досягається в галтельному переході

від місця кріплення лопатки до циліндричної поверхні хвостовика і становить $(\sigma_{\text{eqv}})_{\text{max}} = 157$ МПа. З урахуванням границі текучості сталі 09Г2С, з якої виготовлена лопатка, що становить $\sigma_T = 325$ МПа, запас міцності ротора вентилятора ВО-21Д зі здвоєними лопатками становить значення $n \approx 2$.

Таким чином, ротор вентилятора ВО-21Д зі здвоєними лопатками має достатній запас міцності для

надійної роботи на номінальних режимах.

На рис. 5, в показана згинна форма власних коливань ротора вентилятора, яка відповідає власній частоті 37,74 Гц.

Перші шість частот власних коливань ротора складають наступні значення: 12,98 Гц; 37,74 Гц; 55,64 Гц; 87,61 Гц; 112,1 Гц; 169,08 Гц.

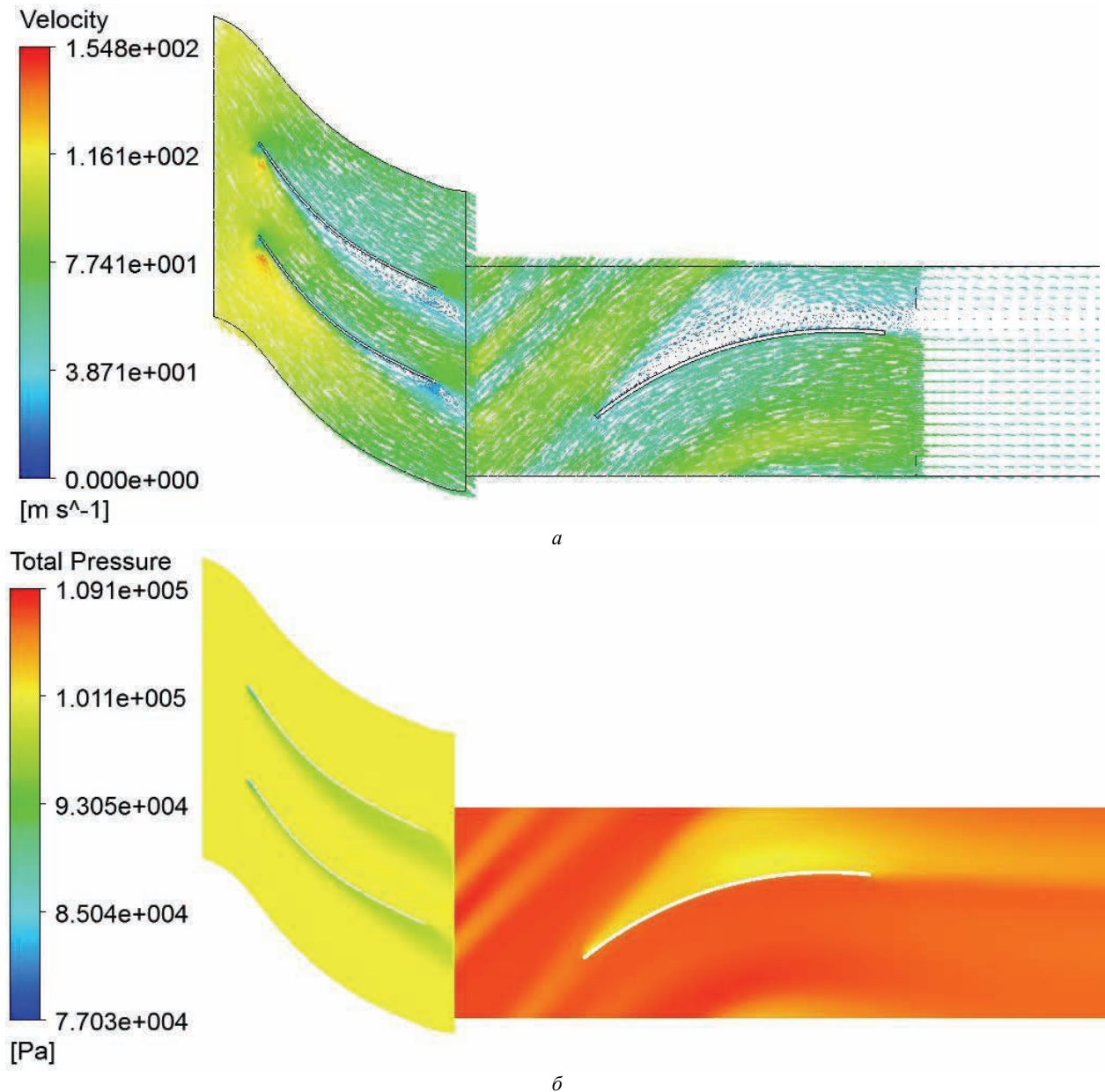


Рисунок 4 – Графіки розподілу параметрів потоку в проточній частині вентиляторної установки в меридіональному перерізі: а – векторний графік розподілу швидкостей потоку; б – контурний графік розподілу тиску в стаціонарній системі координат

Відстройка частот власних коливань ротора від кратностей частоти збуджуючого навантаження оцінювалась за формулою [7]:

$$\Delta f_{ij} = [(f_i - j \cdot v) / v] \cdot 100\%, \quad (3)$$

де i – номер власної частоти (ВЧ);

j – кратність частоти збуджуючого навантаження;

Δf_{ij} – запас відстройки;

f_i – власна частота коливань ротора;

$v = \omega / 2\pi$ – частота збудження.

Рівні такої відстройки представлені в табл. 1.

Як видно з таблиці, ротор вентилятора ВО-21Д з новими здвоєними лопатками має відстройку від резонансних режимів більше 20%, що свідчить про достатній рівень усунення динамічних явищ в вентиляторі [7].

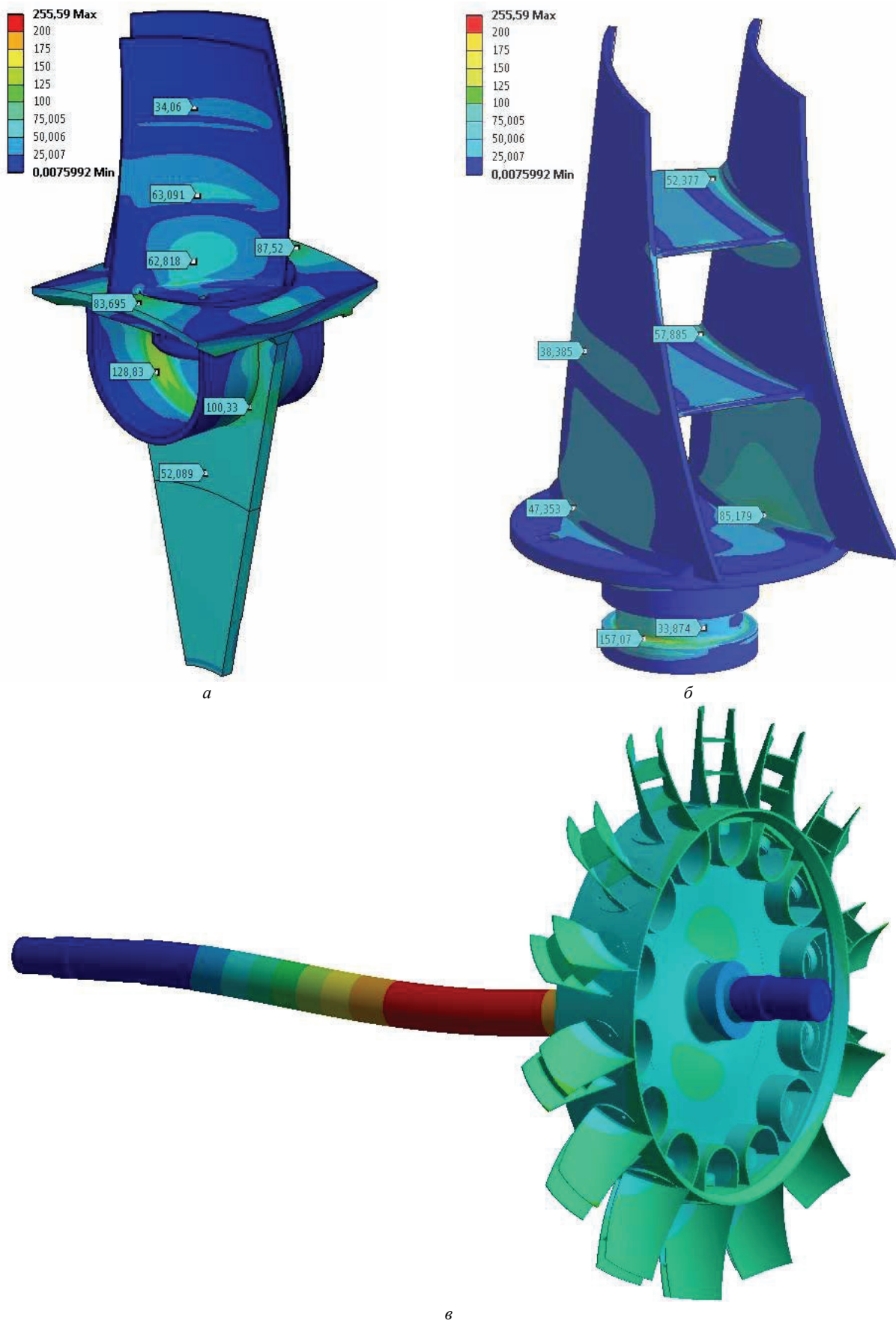


Рисунок 5 – Результати міцнісного аналізу: а – контурний графік еквівалентних напружень в РК; б – контурний графік еквівалентних напружень в лопатці; в – згинна форма власних коливань ротора

Таблиця 1 – Аналіз резонансів у алюмінієвій лопатці

№ ВЧ	Відносна відстройка ВЧ від кратностей частоти збуджуючого навантаження (КЗН), %					
	1 КЗН	2 КЗН	3 КЗН	4 КЗН	5 КЗН	6 КЗН
1	22,12	122,1	222,1	322,1	422,1	522,1
2	126,4	26,4	73,5	173,5	273,5	373,5
3	233,8	133,8	33,84	66,16	166,1	266,1
4	425,6	325,6	225,6	125,6	25,6	74,3
5	572,6	472,6	372,6	272,6	172,6	72,6
6	914,4	814,4	714,4	614,4	514,4	414,4

Висновки. Нові здвоєні лопатки робочого колеса вентилятора ВО-21Д задовольняють змінним вимогам до його продуктивності при збереженні високого коефіцієнта корисної дії.

Результати розрахунку аеродинаміки проточної частини вентилятора свідчать про низький рівень турбулентності і відсутність в ній вихрових потоків.

Оцінка напружено-деформованого стану колеса і лопатки встановила високий коефіцієнт запасу вентилятора, що дозволяє забезпечити для нього як статичну, так і динамічну міцність.

Модальний аналіз ротора і зіставлення його власних частот з кратностями частоти збуджуючого навантаження показують достатній рівень їх відстройки від резонансних режимів.

Таким чином ротор вентилятора ВО-21Д зі здвоєними лопатками забезпечує необхідні аеродинамічні параметри, а також є статично і динамічно міцним.

Список літератури

1. Брусиловский И.В. Аэродинамика осевых вентиляторов. Москва: Машиностроение, 1984. 240 с.
2. Донвентилятор. Вентиляторы главного проветривания серии ВО-Д. URL: <https://donvent.com/ru/node/34> (дата звернення: 05.09.2019).
3. Роч П. Вычислительная гидродинамика. Москва: Мир, 1980. 618 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Москва: Мир, 1975. 541 с.

5. Мартыненко В.Г., Гриценко Н.И. Анализ статической и динамической прочности осевого вентилятора с учетом аэродинамических свойств потока и неоднородности температурного поля. Проблемы машиностроения. 2015. Т. 18, № 4/1. С. 44-52. URL: <http://journals.uran.ua/jme/article/view/57509> (дата звернення: 05.09.2019).

6. Тимошенко С.П. Сопrotivление материалов. Том 1. Элементарная теория и задачи. Москва: Наука, 1965. 364 с.

7. Вибрации в технике. Справочник в 6-ти томах. Том 6. Защита от вибрации и ударов: Фролова К.В. (ред.). Москва: Машиностроение, 1981. 456 с.

References (transliterated)

1. Brusilovsky I.V. Aerodinamika osevykh ventilyatorov [Aerodynamics of axial fans]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 240 p.
2. Donvent. Main ventilation fans of the VO-D series. Available at <https://donvent.com/ru/node/34> (accessed 05.09.2019).
3. Rouch P. Vychislitel'naya gidrodinamika [Computational fluid dynamics]. Moscow, Mir Publ., 1980. 618 p.
4. Zienkiewicz O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [The finite element method in engineering science]. Moscow, Mir Publ., 1975. 541 p.
5. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I. Analiz staticheskoy i dinamicheskoy prochnosti oseвого ventilyatora s uchotom aerodinamicheskikh svoystv potoka i neodnorodnosti temperaturnogo polya [Analysis of the static and dynamic strength of an axial fan, taking into account the aerodynamic properties of the flow and the heterogeneity of the temperature field]. Problemy mashinostroyeniya [Problems of machine building]. 2015, vol. 18, no. 4/1, pp. 44-52. Available at <http://journals.uran.ua/jme/article/view/57509> (accessed 05.09.2019).
6. Tymoshenko S.P. Soprotivleniye materialov. Tom 1. Elementarnaya teoriya i zadachi. [Strength of materials. Volume 1. Elementary theory and problems]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 364 p.
7. Vibratsii v tekhnike. Spravochnik v 6-ti tomakh. Tom 6. Zashchita ot vibratsii i udarov [Vibrations in the technique. Handbook in 6 volumes. Vol. 6. Protection from vibration and shock]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 456 p.

Надійшла (received) 05.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мартыненко Володимир Геннадійович (Мартыненко Владимир Геннадьевич, Martynenko Volodymyr Gennadiyovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри Динаміки та міцності машин; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-0905>; e-mail: martynenko.volodymyr@gmail.com

Гриценко Микита Ігорович (Гриценко Никита Игоревич, Hrytsenko Mykyta Ihorovych) – ТОВ «ІТЦ «Донвентилятор», директор; Харків, Україна; e-mail: nikitahrytsenko@gmail.com