

*І.Л. Ущанівський<sup>1</sup>, Я.Б. Кирилів<sup>2</sup>, канд. техн. наук, ст. наук. співр.*

*О.О. Ларін<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доцент*

*(<sup>1</sup>Головне управління ДСНС України у Львівській області,*

*<sup>2</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,*

*<sup>3</sup>Національний технічний університет «ХПІ»)*

## **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЙ ВІДЦЕНТРОВОГО ПОЖЕЖНОГО НАСОСА**

Робота присвячена комп'ютерному моделюванню вимушених гармонічних коливань відцентрових пожежних насосів ПН-40УВ. В роботі розроблено тривимірну модель скінчених елементів (СЕ) насоса, проведено теоретичні дослідження визначення його вібраційних характеристик. Визначені власні частоти та форми коливань. Розраховані амплітудно-частотні характеристики (АЧХ), які показують резонансні зони вібрацій. Побудовано просторову форму вібрацій на номінальній частоті обертання ротора. Визначено, що найбільші амплітуди вібрацій спостерігаються на вхідному патрубку насоса.

**Ключові слова:** відцентрові пожежні насоси, комп'ютерне моделювання, метод скінчених елементів, вібраційні характеристики

**Вступ.** Ефективність роботи пожежних і рятувальних підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) в значній мірі залежить від стану готовності пожежно-технічного озброєння. Основним тактичним підрозділом в ДСНС є відділення на пожежному автомобілі. При ліквідації пожежі підрозділом, основною стратегічною дією є подача вогнегасної рідини до осередку загорання. При цьому, використовується насосна установка, що входить до технічного оснащення відповідно спеціалізованого автомобіля.

Сучасні пожежні установки являють собою відносно складний комплекс вузлів і агрегатів. Вони включають основний і декілька допоміжних насосів, системи приводу, управління і контролю, багаточисленне обладнання для транспортування та подачі вогнегасних рідин.

Більшість насосних установок створюються на основі відцентрових насосів. Його конструктивні та експлуатаційні показники багато в чому визначають надійність і ефективність засобів і обладнання, що використовуються при ліквідації пожежі.

Відцентрові насоси знайшли широке застосування у пожежно-рятувальній техніці завдяки наявності ряду переваг: рівномірність подачі вогнегасних засобів (без пульсацій); здатністю працювати «на себе», тобто при перекритті пожежного ствола, засміченні або заломі пожежного рукава в системі подачі води не відбувається надмірне підвищення тиску; простотою управління й обслуговування в експлуатації на пожежах. Для пожежних автомобілів важливо, що відцентрові насоси не вимагають складного приводу від двигуна, їх габарити і маси відносно невеликі.

Одним з найбільш важливих показників відцентрового пожежного насоса є його надійність. Порушення працездатності, тобто відмова, виражається у вигляді прямих і непрямих ознак, що супроводжують роботу відцентрових пожежних насосів. До прямих ознак можна віднести сильний знос поверхонь, що труться, механічні руйнування деталей, що труться, і тому подібне. Прикладами непрямих ознак можуть бути невластивий шум при роботі агрегату, його підвищена вібрація. Непрямі ознаки відмов найчастіше є наслідком різних несправностей.

Характерні несправності відцентрових пожежних насосів, які приводять до відмов, наведені в таблиці 1. Завдяки проведеному аналізу статистики відмов пожежних насосів у ДСНС з 2000 по 2011 роки видно, що в залежності від причини виникнення несправності можна виділити чотири основні види несправностей:

Таблиця 1

Характерні несправності відцентрових пожежних насосів, що приводять до відмов

№ з/п	Несправність	Причина виникнення несправності
1	Не забезпечується паспортна подача і напір	<ul style="list-style-type: none"> <li>– збільшення зазору в ущільненні проточної частини;</li> <li>– значний знос робочого колеса насоса;</li> <li>– забруднення робочого колеса насоса;</li> <li>– поява кавітаційного режиму.</li> </ul>
2	Вібрація насоса	<ul style="list-style-type: none"> <li>– розцентровка з'єднань приводу трансмісії і насоса;</li> <li>– поломка з'єднувальної муфти;</li> <li>– порушення балансування робочого колеса (забруднення робочого колеса);</li> <li>– послаблення затяжки болтів кріплень до рами автомобіля;</li> <li>– значний знос підшипників;</li> <li>– поява кавітаційного режиму;</li> <li>– зачіпання робочого колеса за корпус насоса.</li> </ul>
3	Підвищення температури елементів насоса	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сальникова набивка прийшла в непридатність;</li> <li>– механічні дефекти підшипників (поломка сепараторів, зношування кульок, забоїни);</li> <li>– неправильна установка підшипників в опорі (перекіс);</li> <li>– повертання підшипника на валу або в опорі;</li> <li>– порушення зазору в підшипниках;</li> <li>– нестача змазки чи вона прийшла в непридатність.</li> </ul>

- 1) не забезпечується паспортна подача і напір (21%);
- 2) підвищена вібрація насоса (33%);
- 3) підвищення температури елементів насоса (39%);
- 4) інші -7%.

Переглянувши дані види несправностей і причин їх виникнення можна стверджувати, що в решті всі вони будуть призводити до збільшення вібрації або шуму насоса. Тобто більша кількість несправностей, що поступово приводить до відмов характеризується збільшенням амплітуди вібрації та шуму.

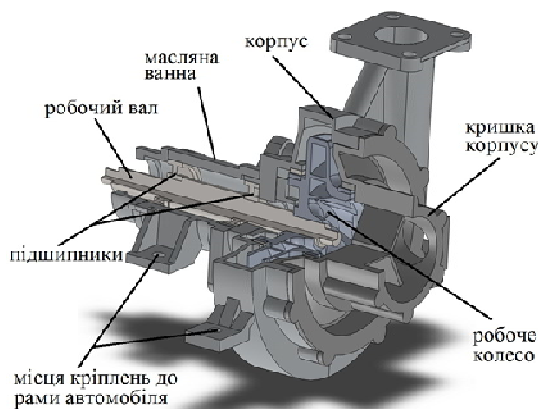
**Постанова задачі.** Метою даної роботи є розробка теоретичної комп'ютерної моделі відцентрового пожежного насоса ПН-40УВ та дослідження на її основі його вібраційних характеристик. Визначені залежності дозволять відтворити теоретичний опис вібраційних ознак що супроводжують роботу насоса та можуть бути використані при створенні системи діагностики технічного стану насосів в експлуатації.

**Основний матеріал.** В роботі досліджується відцентровий пожежний насос типу ПН-40УВ, який серійно випускається ТОВ «Прилуцький завод протипожежного і спеціального машинобудування «Пожспецмаш» (м. Прилуки, Україна).

Конструкція відцентрового пожежного насоса (рис. 1.) у вигляді його тривимірної геометричної моделі була створена програмним комплексом SolidWorks, зокрема завдяки тому, що він надає багаті можливості для тривимірного моделювання та дозволяє створювати моделі високої складності.

Насос складається з:

- 1) корпусу, який за рахунок чотирьох болтових з'єднань кріпиться до рами пожежного автомобіля, масляної ванни, кришки корпусу, робочого вала та робочого колеса;
- 2) масляної ванни, яка кріпиться до тильної сторони корпусу та служить для охолодження підшипників робочого вала;

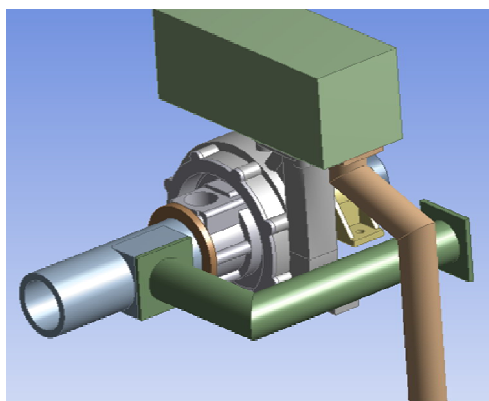


*Рис. 1. Просторова геометрія насоса в розрізі*

- 3) кришки корпусу, яка кріпиться з фронтальної частини корпусу та служить для з'єднання корпусу та всмоктувального патрубку насоса, а також для забезпечення герметичності;
- 4) робочого колеса, яке жорстко посаджено на вал;
- 5) робочий вал консольно встановлюється в корпус на двох підшипниках.

Основним кріпленням насоса ПН-40УВ є болтове з'єднання до рами автомобіля на чотирьох опорах. Окрім цього, з'єднання додатковими зв'язками є елементи трубопровідних систем. Так, кришка корпусу насосу з'єднується із всмоктувальним патрубком, який через сталеву трубу діаметром 100 мм жорстко з'єднаний із цистерною автомобіля.

Аналогічно вихідний патрубок насоса під'єднано до колектора, що має розгалужену трубопровідну систему, яка з'єднує насос із пожежним рукавом та цистерною. З'єднання колектора із цистерною є жорстким. Колектор представляє собою масивну складну структуру трубопроводів, кранів та інших додаткових систем контролю і управління. Докладне моделювання цієї частини насосної установки не має сенсу оскільки вібрації цієї деталі не представляють інтересу. Разом із тим наявність колектора суттєво впливає на вібрацію насосу, оскільки надає додаткову масу та жорсткість зв'язку із цистерною автомобіля. Тому в даній роботі було спрощено змодельований колектор, як просторове тіло простої форми, відповідних габаритів та маси і що має геометрично тотожні точки жорстких кріплень насоса до колектора та колектора до цистерни автомобіля.



*Рис. 2. Геометрична модель насоса ПН-40УВ із спрощеною моделлю колектора*

Для коректного відтворення інерційно-пружних параметрів системи від колектора промодельовано трубопровід, що з'єднує насос із гнучким пожежним рукавом. На рис. 2 представлено геометричну модель насоса із спрощеною моделлю колектора.

Аналіз вібраційного стану відцентрових пожежних насосів в роботі та дослідження впливу на нього різного роду експлуатаційних пошкоджень та дефектів є предметом дослідження в даній роботі. Проведення відповідних теоретичних аналізів потребує розробки адек-

ватних математичних моделей, що враховують основні конструктивні особливості та дозволяють змінювати її параметри так щоб проводити моделювання дефектів та пошкоджень. Відцентровий пожежний насос є тривимірним тілом, що має складну просторову систему зв'язків та розподіл жорсткості по елементах конструкції. Зазначені особливості потребують розробки математичних моделей відцентрового насоса, як тривимірного твердого деформованого тіла.

Задоволення вимогам та потребам, що сформульовані до теоретичних моделей може бути реалізовано за допомогою комп'ютерного моделювання, що ґрунтується на використанні методу скінчених елементів (МСЕ) [1, 2]. У відповідності до підходу зазначене моделювання проводиться за наступним алгоритмом:

- 1) розробка докладних геометричних моделей конструктивних елементів відцентрового насоса;
- 2) математичний опис динамічного аналізу, що потребується провести;
- 3) нанесення розрахункової (скінчено-елементної) сітки на побудовану геометрію;
- 4) завдання граничних умов, зв'язків, навантажень, тощо;
- 5) проведення розрахунків та аналіз результатів.

Запишемо розрахункові рівняння, розв'язок яких надає опис динамічних процесів, що відбуваються під час вібрацій насоса

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + \beta \cdot [K] \cdot \{\dot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = \{Q(t)\}. \quad (1)$$

- де  $[M]$  – глобальна матриця мас побудованої скінчено-елементної моделі, що формується з матриць мас окремих скінчених елементів;
- $\{q\}$  – вектор стовпець вузлових переміщень (переміщення кожного вузла скінчених елементів моделі у трьох напрямках);
- $\beta$  – коефіцієнт дисипації енергії, відповідно до моделі Релея-Фойгта;
- $[K]$  – глобальна матриця жорсткості побудованої скінчено-елементної моделі, що формується з матриць жорсткості окремих скінчених елементів;
- $\{Q\}$  – вектор вузлових сил;
- $t$  – час.

Математичне формулювання проблеми визначення власних частот та форм коливань задається рівнянням (2), яке може бути отримане з загального рівняння динаміки відцентрового насоса (1) якщо не враховувати дисипативні складові та зовнішній вплив

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = 0. \quad (2)$$

Розв'язок рівняння (2) відшукується у вигляді гармонічних рухів за яких усі точки системи відтворюють періодичність руху на одній і тій самій частоті, що називається власною:

$$\{q\} = \{\xi\} \cdot \sin(pt), \quad (3)$$

- де  $\xi$  – вектор амплітуд вузлових переміщень при власних коливаннях – вектор власної форми коливань;
- $p$  – власна частота системи.

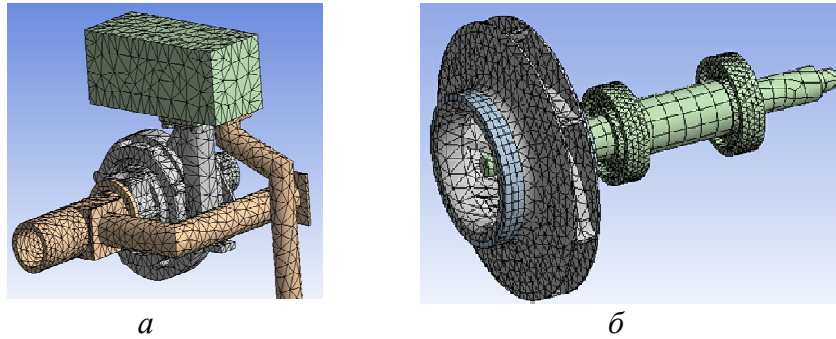
Тоді отримаємо рівняння (4) для визначення власних форм коливань, яке має розв'язки тільки за реалізації умови (5), що дозволяє визначити власні частоти відцентрового пожежного насоса:

$$([K] - p^2 \cdot [M]) \cdot \{\xi\} = 0. \quad (4)$$

$$\det([K] - p^2 \cdot [M]) = 0. \quad (5)$$

Отриману в такий спосіб розрахункову математичну модель можна використовувати з метою проведення варіативних досліджень в тому числі й моделювання впливу різного роду пошкоджень на динамічні характеристики пожежних насосів.

Під час комп'ютерного моделювання використовувався програмний комплекс ANSYS з використанням тривимірних геометричних моделей, що описані раніше.

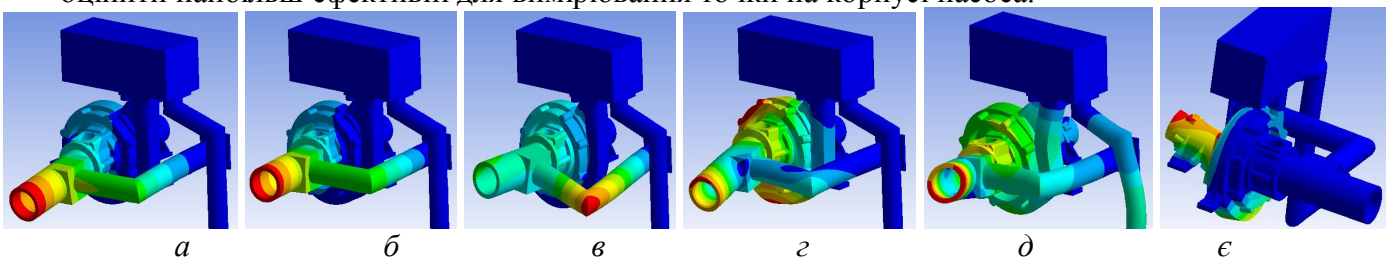


**Рис. 3.** Скінчено-елементні моделі: а – відцентрового пожежного насоса ПН-40УВ зібраного з трубопровідною системою; б – робочого колеса, що посаджено на вал у підшипниках

Отже, наступною частиною алгоритму теоретичного комп'ютерного моделювання є нанесенням розрахункової скінчено-елементної сітки. Її побудова є важливою частиною моделювання оскільки від якості сітки істотно залежить достовірність отриманих результатів. Впершу чергу слід уникати появи вироджених елементів тобто елементи повинні мати відносно невеликі відношення між своїми геометричними розмірами та не мати гострих кутів. Перевірка адекватності сітки проводиться шляхом проведення декількох однакових тестових розрахунків із різною густиною сітки скінчених елементів. При цьому близькість результатів свідчить про якість побудованої моделі.

Побудовані розрахункові сітки корпусу відцентрового насоса ПН-40УВ, що досліджується в роботі представлено на рис. 3.

**Визначення лінійних динамічних характеристик елементів конструкції.** Одними з найбільш важливих динамічних характеристик механічних об'єктів є показники власних коливань, тобто спектр власних частот та власні форми коливань. Дійсно власні частоти визначають наявність та положення резонансних зон на спектрі вібрацій, що супроводжує роботу відцентрового насоса, визначають критичні швидкості обертання валу. Крім того, реальна вібрація насоса супроводжується наявністю випадкового широкосмугового впливу поряд із звичайним полігармонічним впливом, а відгук системи на такий вплив завжди є найбільш потужним на власних частотах коливань. Власні форми коливань є головними формами можливих рухів об'єкта, що деформується під час вібрацій. Так, відповідно до положень лінійної теорії коливань [3] будь-яка форма вимушених коливань є суперпозицією власних форм. Тобто аналіз форм коливань дозволяє визначити місця з найбільшими рівнями вібрацій та оцінити найбільш ефективні для вимірювання точки на корпусі насоса.

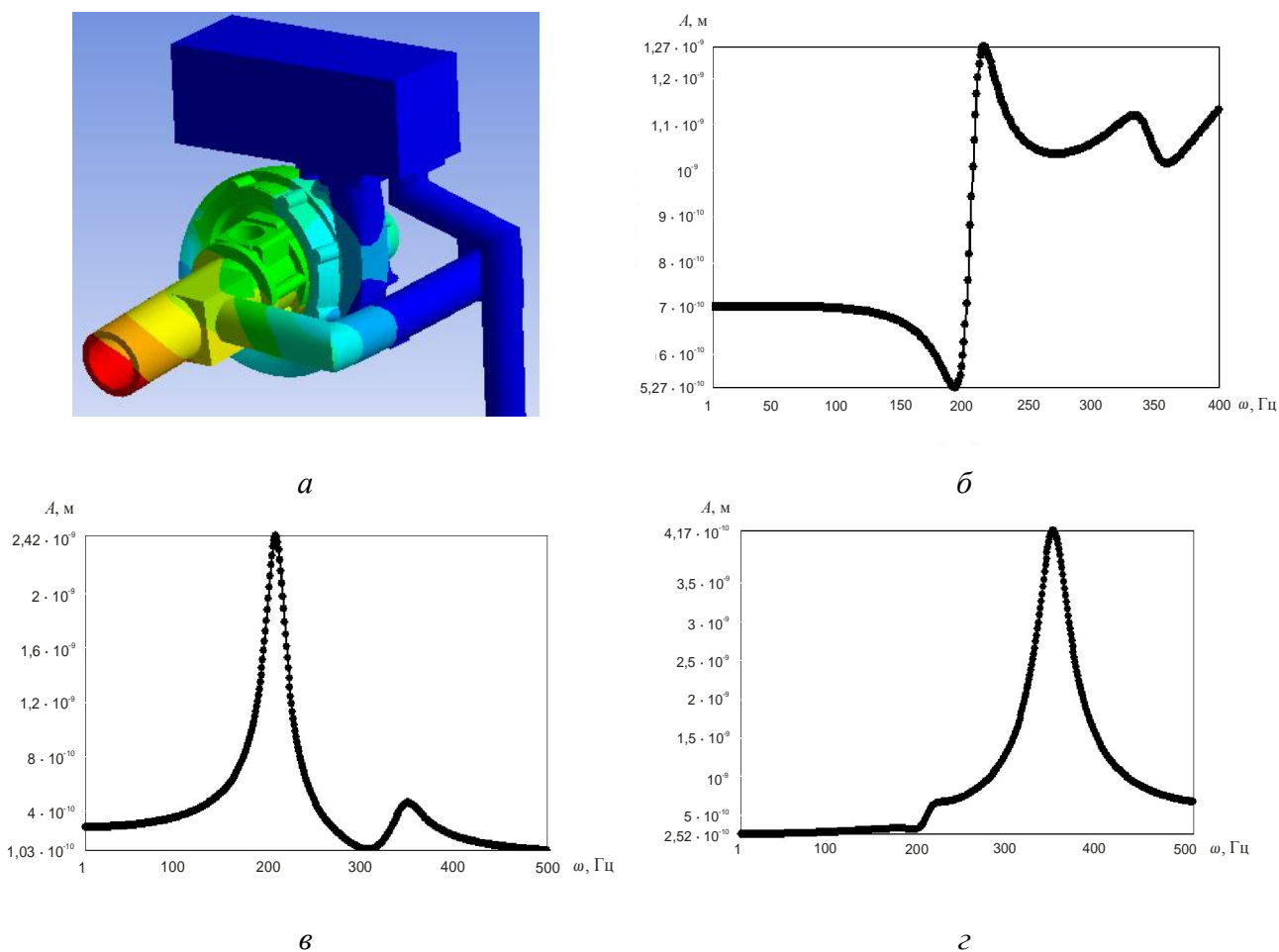


**Рис. 4.** Власні форми коливань корпусу насоса, що встановлений на опорній рамі та відповідні власні частоти:

а – 176,5 Гц; б – 299 Гц; в – 556 (568) Гц; г – 1160 Гц; д – 1229,3 Гц; е – 1461 Гц

Було проведено аналіз власних форм та частот коливань. У отриманому спектрі власних частот присутні локальні частоти вібрацій, що збуджують форми лише трубопроводу це частоти 63 Гц, 65 Гц, 261 Гц, 349 Гц, 413 Гц, 504 Гц, 1209 Гц, 1263 Гц. Решта спектру відповідає формам коливань за яких вібрація поширюється на корпус насоса, відповідні форми коливань та значення власних частот наведено на рис. 4.

**Дослідження вимушених гармонічних коливань пожежного насосу ПН-40УВ.** Під час роботи насоса відбуваються вібрації, які є коливаннями, що викликані наявністю вимушених гармонічних сил. Зазначені сили є результатом комплексної дії наявності дисбалансу, не співвісності з'єднання валів тощо [4]. Відповідні сили діють на ротор робочого колеса та передаються через підшипники на корпус насоса. В даній роботі було проведено відповідні дослідження на збудження коливань двома силами, що прикладені до ротора насоса у вертикальній площині та мають між собою зсув по фазі на  $90^\circ$ . З метою аналізу прояву вібрацій насосу на різних частотах обертання ротора було побудовано АЧХ коливань насосу. Розв'язок отримувався методом розкладання в ряд по власних формах коливань. На рис. 5 представлено АЧХ у різних напрямках та форма вимушених коливань насоса.



**Рис. 5.** Результати розрахунків вимушених гармонічних коливань:  
*а* – просторова форма вимушених коливань за навантаження 33 Гц (2000 об/хв);  
*б, в, г* – амплітудно-частотна характеристика у осьовому, вертикальному та горизонтальному напрямках

**Висновки.** В роботі наведені результати комп'ютерного скінчено-елементного моделювання вібраційних характеристик відцентрового пожежного насоса ПН-40УВ. Визначені власні частоти, форми коливань та розраховані амплітудно-частотні характеристики. Теоретично встановлено, що найбільші амплітуди вібрацій спостерігаються на входному патрубку насоса. Тому дане місце є оптимальним для встановлення датчиків заміру вібрацій вимірювального комплексу "Ультра-В-І".

### Список літератури:

1. Толлок В. А. Метод конечных элементов. Теория, алгоритмы, реализация / В. А. Толлок, В. В. Киричевский, С. И. Гоменюк и др. – К.: Наук. думка, 2003. – 256 с.
2. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах / К. А. Басов. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
3. Бабаков И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков. – М.: Наука, 2004. – 591 с.
4. Жовдак В. А. Колебания вращающихся роторов / В. А. Жовдак, Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – 80 с.

*И.Л. Ущачивский, Я.Б. Кырылив, А.А. Ларин*

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ПОЖАРНОГО НАСОСА

Работа посвящена компьютерному моделированию вынужденных гармонических колебаний центробежных пожарных насосов ПН- 40УВ. В работе разработана трехмерная модель конечных элементов (КЭ) насоса, проведены теоретические исследования определения его вибрационных характеристик. Определены собственные частоты и формы колебаний, рассчитаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), которые показывают резонансные зоны вибраций. Построена пространственная форма вибраций на номинальной частоте вращения ротора. Определено, что наибольшие амплитуды вибраций наблюдаются на входном патрубке насоса.

**Ключевые слова:** центробежные пожарные насосы, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, вибрационные характеристики.

*I.L. Ushchapivskyi, Ya.B. Kyryliv, O.O. Larin*

### COMPUTERIZED SIMULATION OF VIBRATION OF CENTRIFUGAL FIRE PUMP

The paper deals with computer FE modelling of forced harmonic vibrations of centrifugal fire pumps PN-40UV. A 3D FE model of the pump is developed and a theoretical study of its vibration characteristics determination is carried out. Natural frequencies and coupled models are identified. Frequency response functions (FRF) showing resonant vibration zones are calculated. A spatial mode of vibrations at the rated speed of the rotor is built. The biggest vibrations amplitude are observed at the upstream end.

**Key words:** centrifugal fire pumps, computer simulation, finite elements method, vibrations characteristics.

