

«ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ: ОБРАЗОВАНИЕ И НАУКА»

*Редакционный совет:*

**Гончаров А. Н.** – Председатель Совета (МЧС Республики Беларусь),  
**Украинец А. А.** – заместитель Председателя Совета (ГИИ МЧС Республики Беларусь),  
**Марченко С. А.** – заместитель Председателя Совета (ГИИ МЧС Республики Беларусь),  
**Аверин В. С.**, д.б.н. (Институт радиологии, Беларусь), **Авитисов П. В.**, д.м.н., проф.  
(АГЗ МЧС России), **Акимов В. А.**, д.т.н., проф. (ВНИИ ГОЧС, Россия),  
**Бабосов Е. М.**, акад. (Институт социологии, Беларусь), **Габбасов С. Г.**, к.т.н.  
(МЧС Республики Казахстан), **Ильющенко А. Ф.**, чл.-кор., д.т.н., проф. (ГНПО ИПМ, Беларусь),  
**Новиков Г. Ф.** (НИИ ПБ и ЧС МЧС Республики Беларусь), **Мышкин Н. К.**, акад., д.т.н., проф.  
(ИММС им. В. А. Белого, Беларусь), **Овсяник А. И.**, д.т.н., проф. (начальник  
научно-технического управления МЧС России), **Пушкин И. А.**, д.т.н., проф. (АГЗ МЧС России),  
**Плескачевский Ю. М.**, чл.-кор., д.т.н., проф. (Гомельский филиал НАН Беларуси),  
**Харламов А. И.**, д.т.н., проф. (ИПМ им. И. Н. Францевича, Украина).

*Главный редактор:* **Плескачевский Ю. М.** чл.-кор.,  
д.т.н., проф. (Гомельский филиал НАН Беларуси).

*Заместители главного редактора:*

**Чеботарев С. С.**, д.э.н., проф. (Департамент государственной научно-технической  
и инновационной политики Министерства образования и науки Российской Федерации),

**Суторма И. И.**, к.т.н., доц. (ГИИ МЧС Республики Беларусь).

*Ответственный секретарь редакционной коллегии:*

**Вертячих И. М.**, к.т.н., доц. (ГИИ МЧС Республики Беларусь).

*Редакционная коллегия:*

**Астахов П. В.**, к.ф.-м.н., доц. (ГИИ МЧС, Гомель), **Аюбаев Т. М.** (МЧС Республики Казахстан,  
Астана), **Бобрышева С. Н.**, к.т.н., доц. (ГИИ МЧС, Гомель), **Богданова В. В.**, д.х.н., проф.  
(НИИ физико-химических проблем БГУ, Минск), **Богданович П. Н.**, д.т.н., проф. (БелГУТ,  
Гомель), **Буякевич Л. И.**, к.ф.-м.н., доц. (ГИИ МЧС, Гомель), **Верещагин М. Н.**, д.т.н., проф.  
(ГГТУ им. П. О. Сухого, Гомель), **Гольдаде В. А.**, д.т.н., проф. (ГГУ им Ф. Скорины, Гомель),  
**Горохов В. М.**, д.т.н. (ГНУ ИПМ, Минск), **Демиденко О. М.**, д.т.н., проф. (ГГУ им. Ф. Скорины,  
Гомель), **Довгяло В. А.**, д.т.н., проф. (БелГУТ, Гомель), **Калач А. В.**, д.х.н. доц. (ФГББОУ ВПО,  
Воронеж), **Кашарный В. В.**, к.т.н., доц. (АГЗ МЧС, Москва), **Кикинев В. В.**, к.т.н.  
(ГИИ МЧС, Гомель), **Княгина В. Н.**, к.ф.-м.н., доц. (ГИИ МЧС, Гомель), **Ковтун В. А.**, д.т.н., проф.  
(ГИИ МЧС, Гомель), **Коновалова Ю. А.**, к.ф.н. (ГИИ МЧС, Гомель), **Кравцов А. Г.**, д.т.н., доц.  
(Гомельский филиал НАН Беларуси), **Малкин В. А.**, д.т.н. (Военная академия, Минск),  
**Набатова А. Э.**, к.ю.н., доц. (ГИИ МЧС, Гомель), **Нарский Г. И.**, д.п.н., проф.  
(ГГУ им. Ф. Скорины, Гомель), **Неверов А. С.**, д.т.н., проф. (БелГУТ, Гомель),  
**Пасовец В. Н.**, к.т.н., доц. (ГИИ МЧС, Гомель), **Песецкий С. С.**, д.т.н., проф.  
(ИММС им. В. А. Белого, Гомель), **Сердюков А. Н.**, член-корр., д.т.н., проф.  
(ГГУ им. Ф. Скорины, Гомель), **Станкевич В. М.**, к.т.н., доц. (ГИИ МЧС, Гомель),  
**Титов О. В.**, к.ф.-м.н. (ГИИ МЧС, Гомель), **Толстопятов Е. М.**, д.т.н.,  
(ИММС им. В. А. Белого, Гомель), **Тростянский С. Н.**, д.т.н., доц. (ФГББОУ ВПО, Воронеж),  
**Халапсина Т. И.**, к.т.н., доц. (ГИИ МЧС, Гомель), **Холодилов О. В.**, д.т.н., проф.  
(БелГУТ, Гомель), **Шныпарков А. В.**, к.ф.-м.н., доц. (ГИИ МЧС, Гомель).

**Адрес редакции:** Речицкий пр., 35-а, г. Гомель, 246023, Республика Беларусь,  
телефон: +(375 232) 46-09-95, факс: +(375 232) 46-00-13; E-mail: niogii@gmail.com

---

Учредитель – Государственное учреждение образования «Гомельский инженерный институт» Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь.

Решением коллегии Высшей аттестационной комиссии журнал включен в Перечень научных изданий Республики Бе-  
ларусь для опубликования результатов диссертационных исследований.

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь, свидетельство о регистрации № 839  
от 21 января 2011 г.

МИНИСТЕРСТВО ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГОМЕЛЬСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ  
МЧС РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

# ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ: ОБРАЗОВАНИЕ И НАУКА

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с сентября 2006 года

Выходит два раза в год, один том в год

---

ГОМЕЛЬ, ГИИ МЧС РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ · 2014, ТОМ 9, № 1

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУКА

<b>Мелешенко Р. Г., Мунтян В. К.</b> Исследование точности сброса воды с пожарного самолета Ан-32П .....	3
<b>Абрамов Ю. А., Тищенко Е. А., Борисова А. С.</b> Обобщенные математические модели терморезистивных чувствительных элементов пожарных извещателей при внутреннем тепловом воздействии .....	9
<b>Астахов П. В., Желонкина Т. П., Лукашевич С. А., Шершнев Е. Б.</b> Исследование термодинамики поверхностного натяжения.....	17
<b>Дубинин Д. П., Корытченко К. В.</b> Исследование ширины противопожарного барьера, создаваемого взрывом топливовоздушных зарядов .....	21
<b>Банний В. А.</b> Электромагнитные экраны как средство решения проблемы электромагнитной безопасности и предупреждения чрезвычайных ситуаций .....	26
<b>Суриков А. В.</b> Исследование процесса дымообразования с применением CFD-модели .....	34
<b>Тарадуда Д. В.</b> Развитие научно-технического потенциала национального университета гражданской защиты Украины в сфере пожарной безопасности.....	41
<b>Скорород А. З., Копытков В. В., Шершнев С. В.</b> Оценка воздействия солнечной радиации на температуру серы комовой при ее хранении открытым способом .....	46

**Ларин А. Н., Ущипивский И. Л., Кирилов Я. Б., Ларин А. А.** Компьютерное моделирование вибраций центробежных пожарных насосов с дисбалансом..... 55

## **ОБРАЗОВАНИЕ**

**Михалевич В. А.** Пожарно-спасательный спорт как основной профессионально значимый вид спорта для будущих офицеров-спасателей..... 62

**Алешкевич Н. А., Косенок Я. А., Федосенко Н. Н., Шолох В. Г.** Комплексные задания как средство развития исследовательских компетенций студентов ..... 65

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА. ТЕХНОЛОГИИ. ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

**Калач А. В., Чудаков А. А.** Прогнозирование затопления населенных пунктов ..... 71

**Пеньков А. И., Шарафиев Р. Р., Федонов М. С.** Защита атмосферы от вредных аэрозольных выбросов атомных энергоустановок ..... 78

**Басманов А. А., Говаленков С. С.** Определение необходимых средств индивидуальной защиты при ликвидации чрезвычайной ситуации, связанной с выбросом опасного химического вещества ..... 87

**Комнатный Д. В.** Модели техногенных опасностей электромагнитного происхождения в системах управления ответственными технологическими процессами ..... 95

**Семененя И. Н.** Проблема влияния космогеофизических факторов на нейропсихические процессы как аспект безопасности жизнедеятельности ..... 101

**Родионов П. В., Ворошева И. В., Чикарев Е. Ю.** Обеспечение питанием и водой спасательных формирований и пострадавшего населения при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций ..... 111

**Макаревич С. Д., Макаревич Д. М.** Анализ результатов стендовых ресурсных испытаний прецессионного редукторного механизма, используемого в качестве привода аварийно-спасательного устройства для эвакуации людей и грузов из глубины ..... 116

**Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Лебедев В. Я., Бабич В. Е.** Магнитно-абразивная обработка тел качения центробежного насоса ПН-40УВ ..... 122

**Набатова А. Э., Пасовец В. Н., Бородако А. В.** Технический комплекс для предотвращения террористических актов, совершаемых с использованием взрывных устройств ..... 128

**Шабловский Я. О., Киселевич В. В.** Предупреждение чрезвычайных ситуаций, обусловленных старением электрической изоляции кабелей и проводов ..... 133

**Лапицкая Н. П., Сахарова Д. Б., Давыденко-Кучинская С. С.** Политика государства в области экономии и бережливости сырьевых ресурсов – важный фактор экономической безопасности государства ..... 140

**Власов А. А.** Сравнительный анализ применения индексных методов анализа пожарного риска..... 147

**Докучаев А. Н.** Этапы становления международного сотрудничества Республики Беларусь в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций ..... 152

## **ГРАЖДАНСКАЯ ОБОРОНА**

**Короленок Т. С.** Восстановление электроснабжения мобильных и удаленных потребителей ..... 156

**Демидов П. Г.** Алгоритм выбора маршрута при совершении марша с учетом системы ограничений..... 162

УДК 614.846.35:534.1

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПОЖАРНЫХ НАСОСОВ С ДИСБАЛАНСОМ

А. Н. ЛАРИН, доктор технических наук, профессор<sup>1</sup>

И. Л. УЩАПИВСКИЙ<sup>2</sup>

Я. Б. КИРИЛОВ, старший научный сотрудник, кандидат технических наук<sup>3</sup>

А. А. ЛАРИН, кандидат технических наук, доцент<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков

<sup>2</sup>Главное управление ГС ЧС Украины во Львовской области, Украина

<sup>3</sup>Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности, Украина

<sup>4</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина

Работа посвящена компьютерному моделированию вынужденных гармонических колебаний центробежных пожарных насосов ПН-40УВ. Разработана трехмерная конечно-элементная (КЭ) модель насоса, проведены теоретические исследования по определению 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.

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

### Введение

Эффективность работы пожарных и спасательных подразделений в значительной степени зависит от состояния готовности пожарно-технического вооружения. При ликвидации пожара основным стратегическим действием является подача огнетушащей жидкости к очагу возгорания. При этом используется насосная установка, входящая в техническое оснащение специализированного автомобиля.

Современные пожарные установки представляют собой относительно сложный комплекс узлов и агрегатов. Они включают основной и несколько вспомогательных насосов, системы привода, управления и контроля, многочисленное оборудование для транспортировки и подачи огнетушащих жидкостей.

Большинство насосных установок создаются на основе центробежных насосов, конструктивные и эксплуатационные показатели которого во многом определяют надежность и эффективность средств и оборудования, используемого при ликвидации пожара.

Центробежные насосы нашли широкое применение в пожарно-спасательной технике благодаря наличию ряда преимуществ: равномерность подачи огнетушащих средств (без пульсаций), способностью работать «на себя», т. е. при перекрытии пожарного ствола или засорении пожарного рукава не происходит чрезмерное повышение давления; простота управления и обслуживания в эксплуатации. Для пожарных автомобилей важно, что центробежные насосы не требуют сложного привода от двигателя, их габариты и массы относительно невелики.

Одним из наиболее важных показателей центробежного пожарного насоса является его надежность. Нарушение его работоспособности выражается в виде прямых и косвенных признаков, сопровождающих работу. К прямым признакам можно отнести сильный износ, механические разрушения трущихся деталей и т. п. Примерами косвенных признаков могут быть несвойственный шум, сопровождающий работу агрегата, его повышенная вибрация и т. п. Косвенные признаки отказов чаще всего являются следствием различных неисправностей.

Характерные неисправности центробежных пожарных насосов которые приводят к отказам можно разделить четыре основных вида:

- 1) не обеспечивается паспортная подача и напор (21 %);
- 2) повышенная вибрация насоса (33 %);
- 3) повышение температуры элементов насоса (39 %);
- 4) другие – 7 %.

Анализ причин возникновения неисправностей позволяет утверждать, что все они способны приводить к увеличению вибрации или шума насоса.

### Постановка задачи

Целью данной работы является разработка теоретической компьютерной модели центробежного пожарного насоса ПН-40УВ и исследование на ее основе его вибрационных характеристик. Определены зависимости, позволяющие теоретически описать вибрационные признаки, сопровождающие работу насоса, что может быть использовано при создании системы диагностики их технического состояния в эксплуатации.

### Основной материал

В работе исследуется центробежный пожарный насос типа ПН-40УВ, серийно выпускаемый ОАО «Прилукский завод противопожарного и специального машиностроения «Пожспецмаш» (г. Прилуки, Украина).

Конструкция центробежного пожарного насоса в виде его трехмерной геометрической модели представлена на рисунке 1.

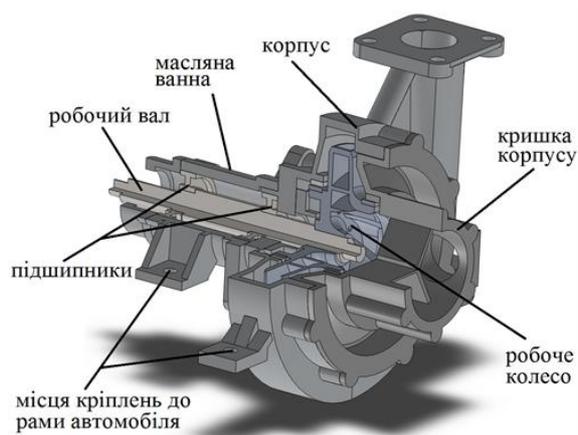


Рисунок 1 – Пространственная геометрия насоса в разрезе

Насос состоит из:

- 1) корпуса, который с помощью четырех болтовых соединений крепится к раме пожарного автомобиля;

2) масляной ванны, которая крепится к тыльной стороне корпуса и служит для охлаждения подшипников рабочего вала;

3) крышки корпуса, которая крепится с фронтальной части корпуса и служит для соединения корпуса и всасывающего патрубка насоса, а также для обеспечения герметичности;

4) рабочего колеса, которое жестко посажено на вал;

5) рабочего вала, консольно установленного в корпус на двух подшипниках.

Основным креплением насоса ПН-40УВ является болтовое соединение к раме автомобиля на четырех опорах. Кроме этого соединения, дополнительными связями являются элементы трубопроводных систем. Так, крышка корпуса насоса соединяется с всасывающим патрубком, который через стальную трубу диаметром 100 мм жестко соединен с цистерной автомобиля.

Аналогично выходной патрубок насоса подключен к коллектору, имеющему разветвленную трубопроводную систему, которая соединяет насос с пожарным рукавом и цистерной. Соединение коллектора с цистерной является жестким. Коллектор представляет собой массивную сложную структуру трубопроводов, кранов и других дополнительных систем контроля и управления. Подробное моделирование этой части насосной установки не имеет смысла, поскольку вибрации этой детали не представляют интереса. Вместе с тем наличие коллектора существенно влияет на вибрацию насоса, поскольку предоставляет дополнительную массу и жесткость связи с цистерной автомобиля. Поэтому в данной работе был упрощенно смоделирован коллектор, как пространственное тело простой формы соответствующих габаритов и массы и имеющих геометрически тождественные точки жестких креплений насоса к коллектору и коллектора к цистерне автомобиля.

Для корректного воспроизведения инерционно-упругих параметров системы от коллектора промоделирован трубопровод, соединяющий насос с гибким пожарным рукавом. На рисунке 2 представлена геометрическая модель насоса с упрощенной моделью коллектора.

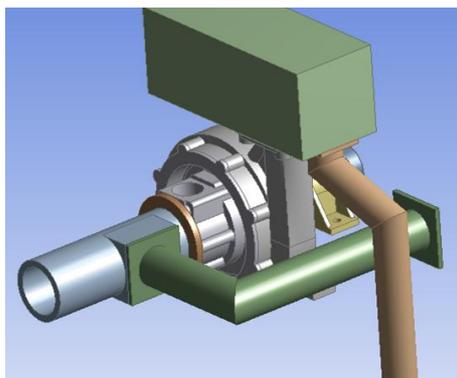


Рисунок 2 – Геометрическая модель насоса ПН-40УВ с упрощенной моделью коллектора

Анализ вибрационного состояния центробежных пожарных насосов и исследование влияния на него разного рода эксплуатационных повреждений и дефектов является предметом исследования в данной работе. Проведение соответствующих теоретических анализов требует разработки адекватных математических моделей, учитывающих основные конструктивные особенности и позволяющий изменять ее параметры так, чтобы проводить моделирование дефектов и повреждений. Центробежный пожарный насос принципи-

ально является трехмерным телом, имеет сложную пространственную систему связей и распределение жесткости по элементам конструкции. Указанные особенности требуют разработки математических моделей центробежного насоса как трехмерного твердого деформированного тела.

Удовлетворение требованиям и потребностям, которые сформулированы в теоретической модели, может быть реализовано с помощью компьютерного моделирования, основанного на использовании метода конечных элементов (МКЭ) [1], [2]. В соответствии с подходом указанное моделирование проводится по следующему алгоритму:

- 1) разработка подробных геометрических моделей конструктивных элементов центробежного насоса;
- 2) математическое описание динамического анализа;
- 3) нанесение расчетной (конечно-элементной) сетки на построенную геометрию;
- 4) задания граничных условий, связей, нагрузок и т. д.;
- 5) проведение расчетов и анализ результатов.

Полученную таким образом расчетную математическую модель можно использовать с целью проведения вариативных исследований, в том числе и для моделирования влияния различного рода повреждений.

При компьютерном моделировании использовались трехмерные геометрические модели, описанные ранее. Следующей частью алгоритма теоретического компьютерного моделирования является нанесение расчетной конечно-элементной сетки. Ее построение является важной частью моделирования, поскольку от качества сетки существенно зависит достоверность полученных результатов. В первую очередь следует избегать появления вырожденных элементов, т. е. все элементы должны иметь относительно небольшие отношения между своими геометрическими размерами и не иметь острых углов. Проверка адекватности сетки производится путем проведения нескольких одинаковых тестовых расчетов с различной плотностью сетки. При этом близость результатов свидетельствует о качестве построенной модели.

Построенные расчетные сетки корпуса центробежного насоса ПН-40УВ представлены на рисунке 3.

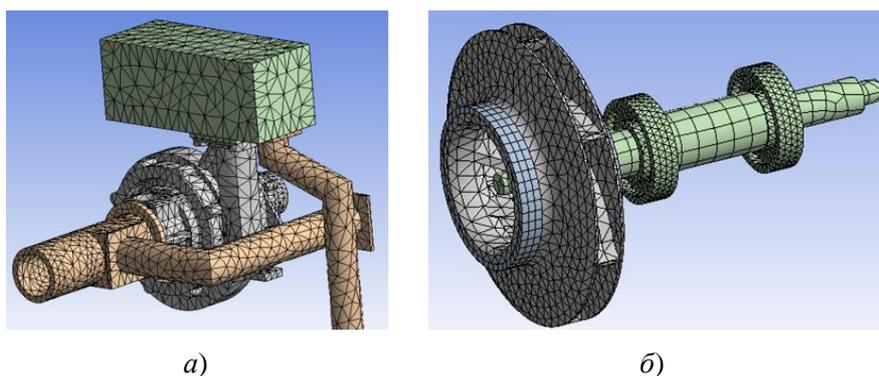


Рисунок 3 – КЭ модели: *а* – центробежного пожарного насоса ПН-40УВ с трубопроводной системой; *б* – рабочего колеса посаженного на вал в подшипниках

### **Исследование вынужденных гармонических колебаний пожарного насоса ПН-40УВ**

Во время работы насоса происходят вибрации, которые являются колебаниями, вызванными наличием вынужденных гармонических сил. Указанные силы являются результатом комплексного действия наличия дисбаланса, несоосности соединения валов и т. п. [4]. Соответствующие силы действуют на ротор рабочего колеса и передают-

ся через подшипники на корпус насоса. В данной работе были проведены соответствующие исследования на возбуждение колебаний двумя силами, приложенными к ротору насоса в вертикальной плоскости и имеющими между собой сдвиг по фазе на  $90^\circ$ . С целью анализа проявления вибраций насоса на разных частотах вращения ротора было построено АЧХ колебаний насоса. Решение получалось методом разложения в ряд по собственным формам колебаний. На рисунке 4 представлены распределение интенсивности амплитуды вибраций центробежного пожарного насоса и результаты расчетов его вынужденных гармонических колебаний.

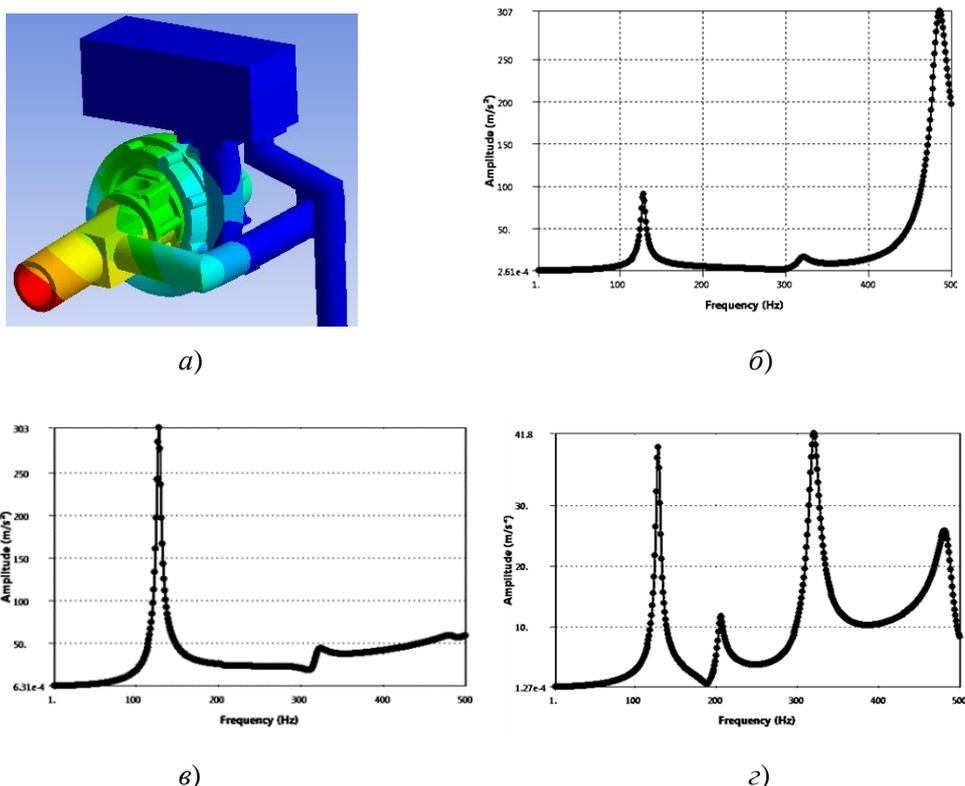


Рисунок 4 – Результаты расчетов вынужденных гармонических колебаний:  
 а – пространственная форма вынужденных колебаний на частоте 33 Гц (2000 об/мин);  
 б, в, з – АЧХ в осевом, вертикальном и горизонтальном направлениях

Из приведенных результатов видно, что на рабочей частоте вращения ротора наблюдаются вибрации, которые преимущественно приводят в движение крышку корпуса насоса и закрепленную на нем трубопроводную систему. При этом наибольшие амплитуды вибраций (цвет красный и коричневый) наблюдаются на входном патрубке насоса. Следует отметить, что данное место является легкодоступным для установки измерительной аппаратуры при экспериментальных исследованиях вибраций насоса, установленного на пожарном автомобиле. Соответствующие особенности позволяют сформировать рекомендации для установки измерительной аппаратуры при вибродиагностических испытаниях.

Предыдущие исследования были проведены для исправного насоса. Общая идея диагностики заключается в определении закономерностей изменения вибраций насоса, имеющего скрытые дефекты. Поэтому следующим шагом в исследовании является моделирование вибраций насоса с дефектом. В работе проведены исследования по моделированию засорения рабочего колеса. Результаты приведены на рисунке 5.

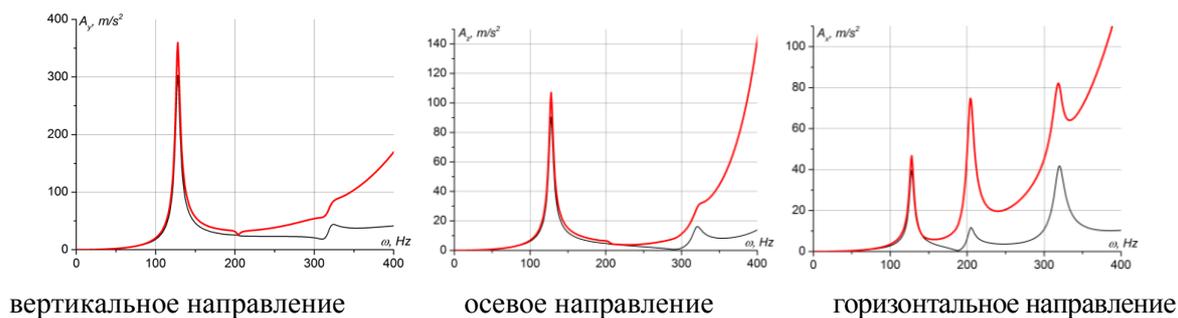


Рисунок 5 – АЧХ виброускорений насоса, имеющего дополнительный дисбаланс (засорение рабочего колеса): черная кривая – виброускорения насоса без дополнительного дисбаланса; красная кривая – с максимальным дисбалансом

Засорение рабочего колеса приводит к появлению дополнительного дисбаланса, что равномерно повышает старшие гармоники в пределах 25 %. И только 5-я гармоника вибраций в вертикальном направлении получила более значительное увеличение.

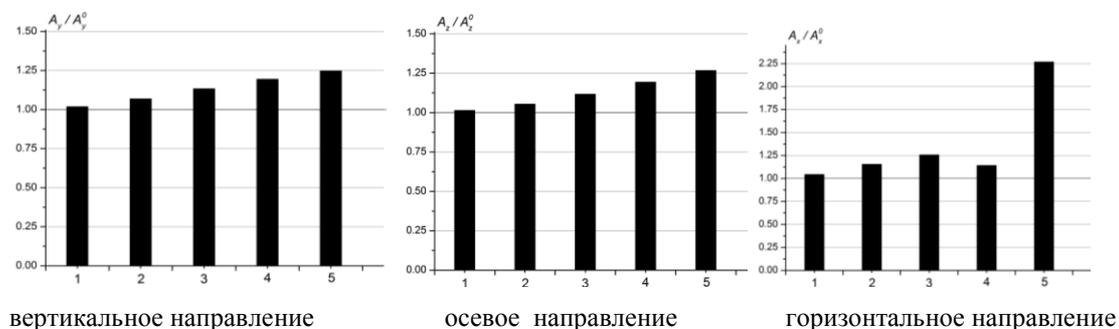


Рисунок 6 – Диаграммы относительных изменений гармоник вибраций, возникающих при наличии дополнительного дисбаланса (за единицу принято значение соответствующих гармоник вибраций насоса без дополнительного дисбаланса)

### Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты компьютерного КЭ моделирования вибрационных характеристик центробежного пожарного насоса ПН-40УВ. Определены собственные частоты и формы колебаний. Рассчитаны АЧХ, которые показывают резонансные зоны вибраций. Построена пространственная форма вибраций при вынужденных колебаниях на частоте вращения ротора 2000 об/мин. Определено, что наибольшие амплитуды вибраций наблюдаются на входном патрубке насоса. Поэтому указанное место является наиболее целесообразным для установления датчиков замера вибраций.

### Литература

- 1 Метод конечных элементов. Теория, алгоритмы, реализация / В. А. Толок [и др.]. – К. : Наук. думка, 2003. – 256 с.
- 2 Басов, К. А. ANSYS в примерах и задачах / К. А. Басов. – М. : Компьютер Пресс, 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.

Поступила в редакцию 27.03.2014

**O. M. Larin, I. L. Ushapivsky, Ya. B. Kirilov, O. O. Larin**  
**COMPUTER SIMULATION OF VIBRATION OF A CENTRIFUGAL FIRE  
PUMP WITH DISBALANCE**

The paper deals with computer FE modeling of force 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 has been carried out. A natural frequencies and normal modes have been identified. FRF of vibrations was calculated. A spatial mode of vibrations at the nominal frequency of the rotor rotation has been built.